

重慶大學

数学建模校内竞赛论文



论文题目:

组号:

成员:

选题:

姓名	学院	年级	专业	学号	联系电话	数学分析	高等代数	微积分	高等数学	线性代数	概率统计	数学实验	数学模型	CET4	CET6

日期

摘 要

针对问题一，首先将题目中的数据进行处理，得到每个景点的吸引力，并结合约束条件设计出合适的“景点 + 区域”组合方案。

针对问题二，我们通过训练一个 K 均值算法，将相似的方案合并，最终输出满足数量上限且整体满意度最优的套餐集合。

针对问题三，我们建立了扩容收益、建设成本等因素，选择最合适的区域以及扩容规模。

关键词：MILP；遗传算法；旅游线路规划；K 均值算法

1 问题重述

1.1 问题背景

重庆作为著名的网红城市，前来旅游的乘客数量极大。由于重庆山河交错的地理环境、组团式城市形态的客观原因，景点多但是分布分散且单一景点资源有限。此外重庆主城区域面积有限但接收大量游客。如何通过规划旅游路线减少交通时间，防止景点人员拥挤以提升游客旅游体验是一个具有实际意义的优化问题。

根据题目提供的相关数据可知：共有 6 个景点并且景点可接纳人数在 1.2 万人到 4.2 万人之间；景点附近有 6 个主要区域并为游客提供午餐、晚餐和住宿，其接待能力和游客喜好程度可见表 2。游客会在上午、下午游览景点，中午到附近区域用餐，若时间超过一天则选择一个区域食宿。题目还给出了具体的从景点到各区域的交通费用和时间。对此，我们需要建立模型解决以下问题：

1.2 问题重述

为了为游客提供更好的方案选择，并且提高每个方案的旅游体验。我们需要综合考虑以上所有信息，并注意一些基本原则：

问题一：我们需要考虑景点和附近区域的接待能力，保证同一时间在任意景点或区域的总人数不会超过其接纳上限。并且要考虑到交通费用与时间，使游客能够尽量节省时间与金钱。在此要求下，我们根据不同旅游时间需要提出景区吸引力函数，结合约束条件设计出合适的“景点 + 区域”组合方案。

问题二：过多的旅游方案会导致更大的路线管理压力以及更低的游客决策效率。我们需要将问题一中的套餐总数控制在 10 以内。由此，我们要建立方案筛选与整合准则，对原方案进行精简与再优化，将重复性较强的方案合并，最终输出满足数量上限且整体满意度最优的套餐集合。

问题三：我们需要考虑区域的接纳人数、游客喜好程度等信息，尽可能为旅游集团提出效益更高的建设方案。我们需要提出一种评价函数结合扩容收益、建设成本等因素，选择最合适的区域以及扩容规模。

2 问题分析

2.1 问题一

针对问题一，我们首先需要将景点吸引力通过合适的数学函数进行量化，该函数需要综合景点可达区域、区域偏好、可容纳人数等影响。以此作为优化目标函数的一个因子。此外我们还需要考虑到不同景点、区域选择会带来不同的时间、交通成本，应当为其增加约束条件并作为优化函数的另一个因子。由于不同旅游天数会对问题产生较大的影响。一日游在晚上不必前往旅馆，而二日游、三日游都需要前往旅馆。因此我们需要额外考虑不同天数下的交通问题。

对于表 3 中空白的区域，我们假设可以通过中转的方式到达。比如，从景点 TODO 到区域 TODO，以其为中转，再到景区 TODO。我们应当采用 Floyd-Warshall 算法计算不可直达的两景区之间的最短距离。在此基础上，采用混合整数线性优化方法得到最优方案。

我们提出一种结合景点吸引力、游客偏好、时间与空间约束的旅游路线规划模型。

2.2 问题二

在问题二中，当旅游套餐总数被限定在 10 种以内时，原先追求满意度极大化的模型必须在游客体验与管理简化之间做出权衡。为此 1，我们提出了基于旅游路线的 K 均值算法。该算法采用多种因素加权的距离函数判断两个旅游路线之间的相似度。该函数综合考虑到方案间的景点、路线、区域等相似度，将重复性较强的方案合并。

通过这种方法，我们可以得到 5-6 个聚类中心，而每个聚类中心包含的方案数量在 2-5 个之间。再根据满意度排序，舍弃满意度较低的几个方案，最终将总数控制到 10 以内。通过 K 均值算法，我们可以很好地保证方案总体满意度较高的同时，满足多样化需求，满足方案总数的限制。

2.3 问题三

3 模型假设

本文针对重庆市旅游方案规划以及区域扩建规模与选址问题建立的数学模型基于以下核心假设：

假设 1：表 3 中留空即为不可直达。例如，景点六只可直达区域六，但可以通过其他区域中转到达其他景点 TODO。

假设 2：从各景点到各区域酒店或餐厅的交通时间固定，不考虑现实中例如交通拥堵、车辆故障等意外情况导致的时间延长。

假设 3：基于现实情况，本文假设从景区到区域的去程、返程交通费用与时间相等。

假设 4：景区容量的约束在现实中不可能取决于一家旅行社的游客，因为还有可能有其他来源的若干游客，为了建模简单，把容量按元素 $\times 0.6$ 进行折减。

假设 5：我们假设一日游、二日游和三日游三种旅行方案相互分离，且三者在时间上并不重叠。此时，我们只需考虑一种方案不同路线在容量上的冲突情况。

假设 6：我们假设游客只按照对景点的喜好选择套餐，那么各个路线的人数应当假定为均等的而进行优化。

4 符号说明

符号	说明
S_i	第 i 个景点, $i = 1, 2, \dots, 6$
R_j	第 j 个餐饮 / 住宿区域, $j = 1, 2, \dots, 6$
C_{S_i}	景点 S_i 容量 (万人 / 半天)
L_{R_j}	区域 R_j 午餐接待容量 (万人次 / 日中)
H_{R_j}	区域 R_j 晚餐 + 住宿容量 (万人次 / 夜)
P_{R_j}	区域 R_j 游客喜好度评分
$d(S_i, R_j)$	景点 S_i 至区域 R_j 交通费用 (元)
$t(S_i, R_j)$	景点 S_i 至区域 R_j 交通时间 (分钟)
T_{\max}	半天可用于交通的最大时间 (三种 T_{\max})
$\mathcal{P}_{1,2,3}$	一 / 二 / 三日游套餐候选集合
\mathcal{P}	全部可行套餐集合, $\mathcal{P} = \mathcal{P}_1 \cup \mathcal{P}_2 \cup \mathcal{P}_3$
x_p	选择套餐 p 的游客人数 (万人)
$\text{Pref}(p)$	套餐 p 的偏好
$w_{\text{cost}}, w_{\text{time}}$	费用与时间权重系数
$\text{Cost}(p), \text{Time}(p)$	套餐 p 总交通费用和时间开销
Q_i	景点 i 基础吸引力评分
U_p	套餐 p 单位游客满意度
\tilde{C}_i	容量归一化, $C_i / \max_j C_j$
\tilde{R}_i	服务保障度, $\min(1, \frac{\min(L_{R_i}, H_{R_i})}{C_i})$
\tilde{S}_i	喜好度归一化, $S_i / 10$
$\delta_{p,i,t}$	若套餐 p 在时段 t 安排景点 S_i 则为 1, 否则 0
$\theta_{p,j,d}$	套餐 p 第 d 天中午选择区域 R_j 用餐的 0-1 变量
$\phi_{p,j,d}$	套餐 p 第 d 天夜晚选择区域 R_j 住宿的 0-1 变量
$\text{Simu}_{p_i, p_j, S}$	套餐 p_i 与 p_j 在景点方面的相似度
$D(p_1, p_2)$	套餐 p_1 与 p_2 的距离
$C(\Delta K)$	扩容成本 $c_1(\Delta K)^\gamma$, $1 < \gamma \leq 1.2$
ΔK	新增接待能力 (万人次)
c_1	扩容成本参数, $c_1 \approx 0.0007$ 亿元
γ	扩容指数, $\gamma \approx 1.09$
$F(\Delta K)$	净收益 $B(\Delta K) - C(\Delta K)$
$B(\Delta K)$	收益 $v_s[Z(K) - Z(K_0)] + v_p[N(K) - N(K_0)]$
$Z(K), N(K)$	容量为 K 时的最优满意度 / 游客量
v_s, v_p	单位满意度价值 / 单位游客利润
K^0, K	原容量 / 扩容后容量

5 模型建立与求解

5.1 问题一：路旅游方案设计

5.1.1 模型建立与求解

对于此问题，我们首先通过 Floyd-Warshall 算法补全邻接矩阵，得到任意两点之间的最短距离。这样我们就可以得到任意区域到任意景点的交通费用和交通时间。以此为基础，我们进行以下建模：

景点收益：由于缺乏具体景点评分数据，我们假设每个景点具有相近的吸引力价值，即此处不加入游客对景点的偏好因素。 P_{max} 表示某一类型的方案的最大满意度（即总是选择游客喜好程度最高的区域 3）。

$$\text{Pref}_{max}^{(d_p)}(type) = \begin{cases} 9 \times 1 + 2 = 11, & (1 \text{ 日}) \\ 9 \times 3 + 4 = 31, & (2 \text{ 日}) \\ 9 \times 5 + 6 = 51, & (3 \text{ 日}) \end{cases} \quad (5.1)$$

以上方程为景区最大收益函数。为了减少数值对模型计算的影响，我们对三种收益进行归一化处理。

区域收益：套餐 p 涉及到的区域的用餐以及住宿体验。根据题目数据，我们将区域喜好度评分 P_{R_j} 作为游客在该区域用餐/住宿获得的满意度。如果套餐跨多日，可能涉及多个不同的区域，则将相应区域的偏好分累计。若在同一天中午和晚上都在同一 R_j 区域，则游客在该天对区域 R_j 的体验包括午餐和晚餐 + 住宿，为方便建模并突出问题的重心，我们采用叠加的方式计算区域满意度。

交通的时间与费用成本：每套旅游方案中的交通费用和时间开销会降低满意度。我们采用函数 $Cost(p)$ 来评价一个方案中的所有交通费用，用 $Time(p)$ 来表示所有时间开销。此外我们为其增加了权重 w_{cost}, w_{time} ，以此代表不同套餐的倾向，用以区分经济优先还是时间优先。

$$\text{Cost}(p) = \sum_{(S_i, R_j) \in p} d(S_i, R_j) \quad (5.2)$$

$$\text{Time}(p) = \sum_{(S_i, R_j) \in p} t(S_i, R_j) \quad (5.3)$$

总的某方案 p 的满意度函数如下：

$$u_p = w_{\text{pref}} \frac{\text{Pref}(p)}{\text{Pref}_{\max}^{(d_p)}} - w_{\text{cost}} \frac{\text{Cost}(p)}{\max\{\text{Cost}(q) : q \in \mathcal{P}\}} - w_{\text{time}} \frac{\text{Time}(p)}{\max\{\text{Time}(q) : q \in \mathcal{P}\}}, \quad (5.4)$$

最大化函数：

$$Z = \sum_{p \in \mathcal{P}} u_p \cdot x_p. \quad (5.5)$$

约束条件如下：

1. 景点接待容量限制：各景点在各个半天时段的接待总人数不得超限。由于早午两段和最多 3 天行程共有 6 个半天时段，模型将假设景点容量可在不同时段重复利用。对每个景点 $i \in S$ 有：

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} \delta_{i,p} \cdot x_p \leq 6 C_{S_i}, \quad i = 1, 2, \dots, 6, \quad (5.6)$$

其中 $\delta_{i,p} = 1$ 当路线 p 包含景点 i （即游客在某一时段游览了景点 i ），否则 $\delta_{i,p} = 0$ 。

2. 午餐餐厅容量约束：每个区域的午餐接待能力（每天中午）也限制了路线分配。类似地，如果认为最多 3 个中午时段可复用，则对每个区域 $j \in R$ ：

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} \theta_{j,p} \cdot x_p \leq 3 L_{R_j}, \quad j = 1, 2, \dots, 6, \quad (5.7)$$

其中 $\theta_{j,p}$ 代表路线 p 在中午曾安排于区域 j 就餐次数（一日游有 1 次午餐、三日游有 3 次午餐机会，但可能某些路线会重复去某一区域）。代码中简化为每个区域午餐总游客 $\leq C_j^{\text{lunch}}$ ，相当假定所有行程共用一个中午时段容量，这在行程跨多日的情况下略趋保守。

3. 晚餐及住宿容量约束：每个区域用于晚餐和住宿的容量在不同夜晚也可重复利用。三日游行程最多涉及 2 晚，故每区域最多 2 个夜晚可安排住宿。对每个区域 $j \in R$ ：

$$\sum_{p \in \mathcal{P}} \phi_{j,p} \cdot x_p \leq 2 C_j^{\text{night}}, \quad j = 1, \dots, 6, \quad (5.8)$$

其中 $\phi_{j,p}$ 为路线 p 在夜晚留宿于区域 j 的次数（二日游路线有 1 晚、三日游有 2 晚，一般假定同一线路不重复入住同一酒店区域）。

4. 游客总数约束：根据预期需求，分别规定各类行程分配的总游客数。例如，设定选择一日游的游客总数为 N_1 人、二日游 N_2 人、三日游 N_3 人。则对每一种行程类型分别有：

$$\sum_{p \in P_{1\text{day}}} x_p = N_1, \quad \sum_{p \in P_{2\text{day}}} x_p = N_2, \quad \sum_{p \in P_{3\text{day}}} x_p = N_3. \quad (5.9)$$

代码实现中分别令一日游、二日游总游客数为 30,000，三日游为 20,000。

约束处理完成后，我们将采用枚举的方式得到一日游、二日游等的所有可能方案。再将其加入到 MILP 模型中。结合遗传算法选择高质量路线，并采用启发式规则进行路线多样化拓展。最终得到最合适的旅游路线。

5.1.2 问题一结果分析

根据 w_{cost} TODO，我们可以设置不同权重，得到不同侧重点的旅游方案。本文设置了三种情况。

均衡型：

经济型：

时间节约型：

5.2 问题二：方案优化

5.2.1 问题分析与建模目标

根据问题分析，我们设计了如下的距离函数，综合考虑了方案间的景点、路线、区域等相似度，将重复性较强的方案合并。由于景点和区域皆为符号度量，因此二者都采用了 Jaccard 相似度。类型相似度用以判断旅游天数是否相同，可以保证同一聚类中心皆为同一天数。余下的偏好相似度、成本相似度和时间相似度都采用了欧氏距离，成本相似度采用了欧氏距离，时间相似度采用了欧氏距离。

1. 景点相似度：

$$\text{Simu}_{p_i, p_j, S} = \frac{|\bigcup_{S \in p_i} \cap \bigcup_{S \in p_j}|}{|\bigcup_{S \in p_i} \cup \bigcup_{S \in p_j}|} \quad (5.10)$$

2. 类型相似度：

$$\text{Simu}_{p_i, p_j, \text{Day}} = \begin{cases} 1, & \text{若 } d_{p_i} = d_{p_j} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (5.11)$$

3. 区域相似度：

$$\text{Simu}_{p_i, p_j, R} = \frac{|\bigcup_{R \in p_i} \cap \bigcup_{R \in p_j}|}{|\bigcup_{R \in p_i} \cup \bigcup_{R \in p_j}|} \quad (5.12)$$

4. 偏好相似度：

$$\text{Simu}_{p_i, p_j, P} = 1 - \frac{|\text{Pref}(p_i) - \text{Pref}(p_j)|}{\max(\text{Pref}(p_i), \text{Pref}(p_j))} \quad (5.13)$$

5. 成本相似度:

$$\text{Simu}_{p_i, p_j, C} = 1 - \frac{|\text{Cost}(p_i) - \text{Cost}(p_j)|}{\max(\text{Cost}(p_i), \text{Cost}(p_j))} \quad (5.14)$$

6. 时间相似度:

$$\text{Simu}_{p_i, p_j, T} = 1 - \frac{|\text{Time}(p_i) - \text{Time}(p_j)|}{\max(\text{Time}(p_i), \text{Time}(p_j))} \quad (5.15)$$

定义好以上相似度后，就可以计算两个方案之间的加权距离。

$$D(p_i, p_j) = \sum_{k \in \text{Temp}}^6 w_k \cdot \text{Simu}_{p_i, p_j, k}, \quad \text{Temp} = \{S, \text{Day}, R, P, C, T\} \quad (5.16)$$

在完成“旅游方案相似度”加权距离函数的数学建模后，下一步便可对所有候选路线实施 K-means 聚类。具体流程如下：首先，以距离函数 $D(\cdot, \cdot)$ 为度量，对给定的 K 值（簇数）运行多次随机初始化的 K-means++，获得每个 k 下的最小簇内平方和。随后，将 k 在预设范围 $3, \dots, 6$ 内逐一取值。最终选择使指标综合最优的 K。确定 K 后，以其为簇数重新运行 K-means，并选取每个簇中净收益最高或代表性最强的方案，形成至多 10 种、覆盖多样化场景且经济效益最优的扩容套餐。

基于旅游方案相似度的加权距离函数建模完成后，即可进行 K 均值聚类。算法会尝试不同的 K 值，并根据簇内平方和选择最优的 K 值作为最终的结果。

5.2.2 模型求解和结果分析

5.3 问题三：旅馆建设规模与位置选择

5.3.1 模型建立流程

本模型旨在分析重庆旅游景区的住宿扩容问题，基于游客需求、交通成本、时间消耗和景区容量等因素，通过构建优化模型对扩容方案进行评估。

首先，模型采用了基于规模报酬递减的扩容成本函数：

$$C(\Delta K) = c_1(\Delta K)^\gamma, \quad c_1 = 7 \times 10^{-4} (\text{亿元}), \gamma = 1.09 \quad (5.17)$$

此扩容成本函数是采用来自网络的数据统计，并进行处理后得到的。

并定义了经济收益函数 $B(\Delta K)$ ：

$$B(\Delta K) = v_s[Z(K) - Z(K^0)] + v_p[N(K) - N(K^0)] \quad (5.18)$$

其中考虑了扩容后满意度增量和游客接待量的增量。满意度增量通过扩容后

游客对旅游线路的偏好变化进行计算，接待量增量则基于实际可接待游客人数与扩容前的差异。

扩容决策的目标是最大化净收益：

$$\max_{r, \Delta K \geq 0} F_r(\Delta K) = B_r(\Delta K) - C(\Delta K) \quad (5.19)$$

即通过选择最优区域和扩容规模 ΔK ，使得总的经济效益最大。模型通过枚举不同区域和容量增量，计算每种方案的经济收益，并结合遗传算法和线性规划（MILP）对扩容后的最优游客分配进行求解。最终，选出净收益最大的扩容方案，并提供详细的扩容规模及其对应的效益曲线。

该模型不仅帮助政府和企业做出最优的扩容决策，还能评估不同扩容方案的经济影响，为旅游业的长期规划提供支持。

5.3.2 模型求解

模型的求解采用“双层结构”。外层离散搜索扩容区域 r 与规模 ΔK ，内层维持既有的“枚举路线结合 MILP”的流程：

外层：

$$\max_{r, \Delta K \geq 0} F_r(\Delta K) \quad (5.20)$$

内层：

$$\begin{aligned} Z(K), N(K) = \arg \max_x \sum_i s_i x_i \\ s.t. \text{容量约束 } K \end{aligned} \quad (5.21)$$

具体算法如下所示：

算法 5.1: 旅游景区扩容优化算法

Input: 原始夜宿容量 $K_0 = (K_1^0, \dots, K_6^0)$; 扩容步长集合 $\Delta\mathcal{K} = \{0, 0.5, 1, \dots, \Delta K_{\max}\}$; 游客需求 T^0

Output: 最优扩容区域 r^* 、规模 ΔK^* 及最大净收益 F^*

- 1 **步骤 1: 基准求解;**
- 2 $\text{base_results} \leftarrow \text{optimizer.run_optimization}(K_0)$;
- 3 取 $Z(K^0)$, $N(K^0)$;
- 4 **步骤 2: 区域与扩容规模枚举;**
- 5 **for** $r \leftarrow 1$ **to** 6 **do**
- 6 **for** $\Delta K \in \Delta\mathcal{K}$ **do**
- 7 $K_r \leftarrow K_r^0 + \Delta K$; // 修改容量上限
- 8 $\text{cur} \leftarrow \text{optimizer.run_optimization}(K_r)$;
- 9 取 $Z(K)$, $N(K)$;
- 10 $B = v_s[Z(K) - Z(K^0)] + v_p[N(K) - N(K^0)]$;
- 11 $C = 0.0007(\Delta K)^{1.09}$;
- 12 $F(r, \Delta K) = B - C$;
- 13 **步骤 3: 选择最优方案;**
- 14 $(r^*, \Delta K^*) = \arg \max_{r, \Delta K} F(r, \Delta K)$;
- 15 $F^* \leftarrow F(r^*, \Delta K^*)$;
- 16 **步骤 4: 绘制净收益曲线;**
- 17 绘制 $F(r, \Delta K)$ 随 ΔK 变化的曲线, 并标注 $(r^*, \Delta K^*)$;

5.3.3 结果分析

6 模型评价与推广

6.1 主要结论

本文针对 LED 显示器颜色转换与校正问题，建立了基于 CIE Lab 色彩空间和感知色差理论的数学模型，采用多种优化算法实现了高精度的颜色处理。主要研究结论如下：

(1) BT.2020 到 sRGB 颜色空间转换模型

构建了基于 ΔE_{00} 感知误差最小化的优化模型，通过差分进化算法求解最优线性映射矩阵。在 50 次独立实验中，平均 ΔE_{00} 损失值为 0.0744，远低于人眼可察觉阈值；色域面积差异控制在 0.001 以内，映射后色度三角与标准 sRGB 色域几乎完全重合。

(2) 多通道颜色空间转换神经网络模型

设计了 ColorNet 神经网络架构，采用混合损失函数成功解决 4 通道到 5 通道的颜色转换问题。混合损失函数结合 MSE 数值精度与 ΔE_{00} 感知准确性，优先保证视觉效果；验证集上 ΔE_{00} 误差主要集中在较低范围。

(3) LED 显示器颜色校正优化模型

建立了结合伽马校正与线性矩阵变换的综合校正模型，采用差分进化与 L-BFGS-B 混合优化策略。三种基色图像平均改善幅度达 95.6%，校正后平均色差降至 0.095；100% 像素达到 $\Delta E < 1.0$ 的优秀标准；校正矩阵行列式值约 0.10，保证了数值稳定性。

6.2 模型优点

(1) **理论基础扎实**：基于 CIE Lab 色彩空间和国际标准色差公式，确保了颜色处理的科学性和准确性。

(2) **技术方法先进**：采用差分进化算法、神经网络和混合优化策略，有效处理非线性、维度不匹配等复杂问题。

(3) **实用价值突出**：校正流程简洁高效，数值稳定性良好，实验验证充分，适合实际工程应用。

6.3 不足与改进方向

(1) 主要局限

线性映射矩阵可能无法充分捕捉复杂的非线性颜色响应关系；神经网络模型使用模拟数据训练，与真实设备数据可能存在差异；对环境光照、设备老化等外在因素考虑有限。

(2) 改进方向

探索非线性映射方法，结合多模态数据融合，开发实时自适应校正算法；将模型应用于 HDR 显示、VR/AR 设备等专业领域；推动建立跨平台颜色校正标准，促进技术普及应用。

总之，本文为 LED 显示器颜色处理提供了完整的理论框架和实用解决方案，在颜色空间转换、多通道映射和颜色校正等关键环节均实现了技术突破，为高质量显示技术发展奠定了基础。

参考文献

- [1] Poynton C. Digital video and hd: algorithms and interfaces[J]. Elsevier, 2012.
- [2] Sugawara M, Choi S Y, Wood D. Ultra-high-definition television (rec. itu-r bt.2020): A generational leap in the evolution of television [standards in a nutshell][J/OL]. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, 31(3): 170-174. DOI: 10.1109/MSP.2014.2302331.
- [3] Fairman H S, Brill M H, Hemmendinger H. How the cie 1931 color-matching functions were derived from wright-guild data[J]. Color Research & Application: Endorsed by Inter-Society Color Council, The Colour Group (Great Britain), Canadian Society for Color, Color Science Association of Japan, Dutch Society for the Study of Color, The Swedish Colour Centre Foundation, Colour Society of Australia, Centre Français de la Couleur, 1997, 22(1): 11-23.
- [4] Hunter R S. Photoelectric color difference meter[J]. Journal of the Optical Society of America, 1958, 48(12): 985-995.
- [5] 郑元林刘士伟. 最新色差公式:CIEDE2000[J]. 印刷质量与标准化, 2004(07): 34-37.
- [6] Gonzalez R C, Woods R E. Gamma correction in digital image processing[J]. Digital Image Processing, 2018: 156-189.
- [7] Price K, Storn R M, Lampinen J A. Differential evolution: a handbook for global permutation-based combinatorial optimization[J]. Springer Science & Business Media, 2013.
- [8] 王广志. 基于 ColorNet 架构的比色传感器阵列用于猪肉新鲜度检测[D]. 东北电力大学, 2024.

附录

A. 支撑材料总览

本论文的所有支撑材料组织在 MathModel_Code/目录下，具体分类和说明如表??所示：

表 A.1 支撑材料分类说明。

Table A.1 Classification of Supporting Materials.		
材料类型	文件路径	说明
实现代码	B/p1/p1.py	问题 1：BT.2020 到 sRGB 色域映射优化
	B/p2/p2.py	问题 2：四通道到五通道神经网络转换
	B/p3/p3.py	问题 3：LED 显示器颜色校正算法
原始数据	data/origin/xlsx/B 题附件：RGB 数值.xlsx	题目提供的原始 RGB 数值
	data/preprocess/RedPicture.xlsx	预处理后的红色基图数据
	data/preprocess/GreenPicture.xlsx	预处理后的绿色基图数据
	data/preprocess/BluePicture.xlsx	预处理后的蓝色基图数据
结果图像	results/p1/DE2000.png	问题 1：50 次优化 ΔE_{00} 分布
	results/p1/色度.png	问题 1：CIE1931 色度图对比
	results/p1/面积 Loss.png	问题 1：色域面积差异分析
	results/p2/Training_Loss_Curve.png	问题 2：神经网络训练损失曲线
	results/p2/ ΔE_{2000} _Error_Histogram.png	问题 2：色差误差分布直方图
	results/p2/CDF.png	问题 2：误差累积分布函数
	results/p2/Sample.png	问题 2：样本预测效果展示
	results/p2/色度图.png	问题 2：多基色色域可视化
	results/p3/{R,G,B}.pdf	问题 3：RGB 三原色校正对比图
环境配置	env.txt	Python 依赖包列表
	mathmodel_env.yaml	Conda 环境配置文件
说明文档	README.md	项目使用说明和运行指南

B. 优化函数

```
1 import numpy as np
2 import itertools
3 from scipy.optimize import linprog
4 import random
```



```

5     from deap import base, creator, tools, algorithms
6     import matplotlib.pyplot as plt
7     import pandas as pd
8     from typing import List, Tuple, Dict
9     import warnings
10    warnings.filterwarnings('ignore')
11
12    # 定义适应度函数和个体（如果未定义）
13    try:
14        creator.create("FitnessMax", base.Fitness, weights=(1.0,))
15        creator.create("Individual", list, fitness=creator.FitnessMax)
16    except Exception as e:
17        # 避免重复定义
18        pass
19
20    class TourismOptimizer:
21        def __init__(self):
22            # 基础数据
23            self.num_spots = 6
24            self.num_regions = 6
25
26            # 容量数据（按0.6折减）
27            self.spot_cap = np.array([12000, 36000, 20000, 42000, 38000,
28                                     ↪ 30000]) * 0.6
29            self.night_cap_original = np.array([19000, 32000, 11000, 36000,
30                                                 ↪ 23000, 22000]) * 0.6
31            self.night_cap = np.copy(self.night_cap_original) # 用于修改的容量
32            self.lunch_cap = np.array([23000, 39000, 13000, 45000, 31000,
33                                       ↪ 28000]) * 0.6
34
35            # 区域偏好度
36            self.region_prefer = np.array([7, 8, 9, 8, 6, 7])
37
38            # 原始费用和时间矩阵
39            self.cost_mat_raw = np.array([
40                [10, 25, 30, 18, 40, 25],
41                [np.inf, 10, 16, 24, 28, 18],
42                [np.inf, np.inf, 10, 24, 20, 15],
43                [np.inf, np.inf, np.inf, 10, 24, 16],
44                [np.inf, np.inf, np.inf, np.inf, 10, 22],
45                [np.inf, np.inf, np.inf, np.inf, np.inf, 10]
46            ])
47
48            self.time_mat_raw = np.array([
49                [30, 50, 60, 35, 70, 40],
50                [np.inf, 30, 25, 30, 40, 30],
51                [np.inf, np.inf, 15, 35, 30, 30],
52                [np.inf, np.inf, np.inf, 15, 35, 25],

```

```

50         [np.inf, np.inf, np.inf, np.inf, 20, 35],
51         [np.inf, np.inf, np.inf, np.inf, np.inf, 25]
52     ])
53
54     # 处理后的完整矩阵
55     self.cost_mat = None
56     self.time_mat = None
57
58     # 路线相关
59     self.routes_1day = []
60     self.routes_2day = []
61     self.routes_3day_candidates = []
62
63     def preprocess_matrices(self, cost_weight=0.5, time_weight=0.5):
64         """使用加权综合Floyd-Warshall算法补全费用和时间矩阵
65
66         Args:
67             cost_weight: 费用权重 (默认0.5)
68             time_weight: 时间权重 (默认0.5)
69         """
70         # print(f"正在预处理交通矩阵 (加权方案: 费用权重={cost_weight}, 时
71         # ↪ 间权重={time_weight}) ...") # 避免过多打印
72
73         # 创建邻接矩阵 (景点-区域双向图)
74         n = self.num_spots + self.num_regions # 总节点数
75
76         # 初始化矩阵
77         combined_full = np.full((n, n), np.inf)
78         cost_full = np.full((n, n), np.inf)
79         time_full = np.full((n, n), np.inf)
80
81         # 对角线为0
82         np.fill_diagonal(combined_full, 0)
83         np.fill_diagonal(cost_full, 0)
84         np.fill_diagonal(time_full, 0)
85
86         # 计算归一化常数
87         finite_costs = self.cost_mat_raw[np.isfinite(self.cost_mat_raw)]
88         finite_times = self.time_mat_raw[np.isfinite(self.time_mat_raw)]
89         cost_max = np.max(finite_costs) if len(finite_costs) > 0 else 100
90         time_max = np.max(finite_times) if len(finite_times) > 0 else 100
91
92         # 填入已知的景点到区域的连接
93         for r in range(self.num_regions):
94             for s in range(self.num_spots):
95                 if not np.isinf(self.cost_mat_raw[r, s]):
96                     cost = self.cost_mat_raw[r, s]
97                     time = self.time_mat_raw[r, s]

```

```

97
98         # 归一化
99         cost_normalized = cost / cost_max
100        time_normalized = time / time_max
101
102        # 加权综合成本
103        combined_cost = cost_weight * cost_normalized +
            ↪ time_weight * time_normalized
104
105        # 景点s到区域r
106        combined_full[s, self.num_spots + r] = combined_cost
107        cost_full[s, self.num_spots + r] = cost
108        time_full[s, self.num_spots + r] = time
109
110        # 区域r到景点s (假设双向相等)
111        combined_full[self.num_spots + r, s] = combined_cost
112        cost_full[self.num_spots + r, s] = cost
113        time_full[self.num_spots + r, s] = time
114
115        # 使用综合成本运行Floyd-Warshall算法
116        for k in range(n):
117            for i in range(n):
118                for j in range(n):
119                    if combined_full[i, k] + combined_full[k, j] <
                        ↪ combined_full[i, j]:
120                        combined_full[i, j] = combined_full[i, k] +
                            ↪ combined_full[k, j]
121                    # 同时更新对应的实际费用和时间
122                    cost_full[i, j] = cost_full[i, k] + cost_full[k, j]
                        ↪ ]
123                    time_full[i, j] = time_full[i, k] + time_full[k, j]
                        ↪ ]
124
125        # 提取景点到区域的部分
126        self.cost_mat = cost_full[:self.num_spots, self.num_spots:]
127        self.time_mat = time_full[:self.num_spots, self.num_spots:]
128
129        # print("矩阵预处理完成") # 避免过多打印
130
131    def generate_1day_routes(self):
132        """生成所有一日游路线: S -> R -> S"""
133        # print("生成一日游路线...") # 避免过多打印
134        self.routes_1day = []
135
136        for s1 in range(self.num_spots):
137            for r in range(self.num_regions):
138                for s2 in range(self.num_spots):
139                    if s1 != s2: # 避免重复访问同一景点

```

```

140         route = {
141             'type': '1day',
142             'path': [s1, r, s2],
143             'spots': [s1, s2],
144             'regions': [r],
145             'lunch_regions': [r],
146             'night_regions': [],
147             'cost': self.cost_mat[s1, r] + self.cost_mat[
148                 ↪ s2, r],
149             'time': self.time_mat[s1, r] + self.time_mat[
150                 ↪ s2, r],
151             'preference': sum([self.region_prefer[r]]) + 2
152                 ↪ # 景点基础偏好
153         }
154         self.routes_1day.append(route)
155
156     # print(f"一日游路线数量: {len(self.routes_1day)}") # 避免过多打印
157
158     def generate_2day_routes(self, max_routes=10000):
159         """生成二日游路线: S -> R -> S -> R -> S -> R -> S"""
160         # print("生成二日游路线...") # 避免过多打印
161         self.routes_2day = []
162         count = 0
163
164         for s1 in range(self.num_spots):
165             for r1 in range(self.num_regions):
166                 for s2 in range(self.num_spots):
167                     for r2 in range(self.num_regions):
168                         for s3 in range(self.num_spots):
169                             for r3 in range(self.num_regions):
170                                 for s4 in range(self.num_spots):
171                                     if len(set([s1, s2, s3, s4])) == 4: #
172                                         ↪ 所有景点不重复
173                                         if count >= max_routes:
174                                             break
175
176                                     route = {
177                                         'type': '2day',
178                                         'path': [s1, r1, s2, r2, s3,
179                                             ↪ r3, s4],
180                                         'spots': [s1, s2, s3, s4],
181                                         'regions': [r1, r2, r3],
182                                         'lunch_regions': [r1, r3], #
183                                             ↪ 第1天午餐r1, 第2天午餐r3
184                                         'night_regions': [r2], # 第1
185                                             ↪ 天住宿r2
186                                         'cost': (self.cost_mat[s1, r1]
187                                             ↪ + self.cost_mat[s2, r1]

```

```

180         ↪ +
        self.cost_mat[s2, r2]
        ↪ + self.
        ↪ cost_mat[s3, r2
        ↪ ] +
181         self.cost_mat[s3, r3]
        ↪ + self.
        ↪ cost_mat[s4, r3
        ↪ ]),
182     'time': (self.time_mat[s1, r1]
        ↪ + self.time_mat[s2, r1]
        ↪ +
183         self.time_mat[s2, r2]
        ↪ + self.
        ↪ time_mat[s3, r2
        ↪ ] +
184         self.time_mat[s3, r3]
        ↪ + self.
        ↪ time_mat[s4, r3
        ↪ ]),
185     'preference': sum([self.
        ↪ region_prefer[r1], self.
        ↪ region_prefer[r2],
186         self.
        ↪ region_prefer
        ↪ [r3
        ↪ ]]) +
        ↪ 4
187     }
188     self.routes_2day.append(route)
189     count += 1
190     if count >= max_routes:
191         break
192     if count >= max_routes:
193         break
194     if count >= max_routes:
195         break
196     if count >= max_routes:
197         break
198     if count >= max_routes:
199         break
200     if count >= max_routes:
201         break
202     if count >= max_routes:
203         break
204
205     # print(f"二日游路线数量: {len(self.routes_2day)}") # 避免过多打印
206

```

```

207     def generate_3day_candidates_ga(self, population_size=1000,
    ↪     generations=50, candidate_size=5000):
208         """使用遗传算法生成三日游候选路线"""
209         # print("使用遗传算法生成三日游候选路线...") # 避免过多打印
210
211         # 定义适应度函数 (已在类外部处理, 确保只创建一次)
212
213         toolbox = base.Toolbox()
214
215         def create_individual():
216             """创建一个个体 (三日游路线)"""
217             # 随机选择6个不同的景点
218             spots = random.sample(range(self.num_spots), 6)
219             # 随机选择5个区域
220             regions = [random.randint(0, self.num_regions-1) for _ in
    ↪             range(5)]
221             return spots + regions
222
223         def evaluate(individual):
224             """评估个体的适应度"""
225             spots = individual[:6]
226             regions = individual[6:]
227
228             # 验证景点不重复
229             if len(set(spots)) != 6:
230                 return (-1000,) # 惩罚重复景点路线
231
232             # 计算路线: S1->R1->S2->R2->S3->R3->S4->R4->S5->R5->S6
233             try:
234                 cost = 0
235                 time = 0
236
237                 # Day 1: S1->R1->S2->R2 (Overnight in R2)
238                 cost += self.cost_mat[spots[0], regions[0]] + self.
    ↪                 cost_mat[spots[1], regions[0]]
239                 cost += self.cost_mat[spots[1], regions[1]] # Travel from
    ↪                 S2 to R2 for overnight
240                 time += self.time_mat[spots[0], regions[0]] + self.
    ↪                 time_mat[spots[1], regions[0]]
241                 time += self.time_mat[spots[1], regions[1]]
242
243                 # Day 2: S2->R2->S3->R3->S4->R4 (Overnight in R4)
244                 # Travel from R2 to S3 (already at R2)
245                 cost += self.cost_mat[spots[2], regions[2]]
246                 cost += self.cost_mat[spots[3], regions[2]]
247                 cost += self.cost_mat[spots[3], regions[3]] # Travel from
    ↪                 S4 to R4 for overnight
248                 time += self.time_mat[spots[2], regions[2]]

```

```

249         time += self.time_mat[spots[3], regions[2]]
250         time += self.time_mat[spots[3], regions[3]]
251
252         # Day 3: S4->R4->S5->R5->S6 (End trip)
253         # Travel from R4 to S5 (already at R4)
254         cost += self.cost_mat[spots[4], regions[4]]
255         cost += self.cost_mat[spots[5], regions[4]]
256         time += self.time_mat[spots[4], regions[4]]
257         time += self.time_mat[spots[5], regions[4]]
258
259         preference = sum([self.region_prefer[r] for r in regions])
260             ↪ + 6 # 6 unique spots contribute to base preference
261
262         # 归一化计算 (与MILP保持一致)
263         max_preference_3day = 9 * 5 + 6 # 理论最大偏好度
264         # 估计的最大成本和时间, 用于遗传算法的归一化, 不必非常精
265             ↪ 确, 只要能大致区分好坏
266         max_cost_estimate = 100 * 10 # 粗略估计
267         max_time_estimate = 150 * 10 # 粗略估计
268
269         pref_normalized = preference / max_preference_3day
270         cost_normalized = cost / max_cost_estimate
271         time_normalized = time / max_time_estimate
272
273         # 加权综合评分 (权重与MILP一致)
274         w_pref, w_cost, w_time = 0.6, 0.2, 0.2
275         fitness = w_pref * pref_normalized - w_cost *
276             ↪ cost_normalized - w_time * time_normalized
277
278         return (fitness,)
279     except:
280         return (-1000,) # 无效路径惩罚
281
282     toolbox.register("individual", tools.initIterate, creator.
283         ↪ Individual, create_individual)
284     toolbox.register("population", tools.initRepeat, list, toolbox.
285         ↪ individual)
286     toolbox.register("evaluate", evaluate)
287
288     def crossover_individual(ind1, ind2):
289         """自定义交叉函数, 确保景点不重复"""
290         # 对景点部分使用顺序交叉(OX)
291         spots1, spots2 = ind1[:6], ind2[:6]
292         regions1, regions2 = ind1[6:], ind2[6:]
293
294         # 顺序交叉(Order Crossover)
295         def order_crossover(parent1, parent2):
296             size = len(parent1)

```

```

292         start, end = sorted(random.sample(range(size), 2))
293
294         child = [-1] * size
295         # 复制中间段
296         child[start:end] = parent1[start:end]
297
298         # 从parent2中按顺序填充剩余位置
299         pointer = end
300         for item in parent2[end:] + parent2[:end]:
301             if item not in child:
302                 while child[pointer] != -1: # Find next empty spot
303                     pointer = (pointer + 1) % size
304                 child[pointer] = item
305                 pointer = (pointer + 1) % size # Move pointer for
306                     ↪ next item
307
308         return child
309
310         # 对景点使用顺序交叉
311         new_spots1 = order_crossover(spots1, spots2)
312         new_spots2 = order_crossover(spots2, spots1)
313
314         # 对区域使用简单的两点交叉
315         if len(regions1) > 1:
316             cx_point = random.randint(1, len(regions1)-1)
317             new_regions1 = regions1[:cx_point] + regions2[cx_point:]
318             new_regions2 = regions2[:cx_point] + regions1[cx_point:]
319         else:
320             new_regions1, new_regions2 = regions1[:], regions2[:]
321
322         # 重新组合
323         ind1[:] = new_spots1 + new_regions1
324         ind2[:] = new_spots2 + new_regions2
325
326         return ind1, ind2
327
328     toolbox.register("mate", crossover_individual)
329
330     def mutate_individual(individual):
331         """自定义变异函数"""
332         if random.random() < 0.1: # 变异概率
333             # 变异景点部分 (前6个位置) - 使用交换确保不重复
334             pos1, pos2 = random.sample(range(6), 2)
335             individual[pos1], individual[pos2] = individual[pos2],
336                 ↪ individual[pos1]
337         if random.random() < 0.1: # 变异概率
338             # 变异区域部分 (后5个位置)
339             pos = random.randint(6, 10)

```



```

338         individual[pos] = random.randint(0, self.num_regions-1)
339         return individual,
340
341         toolbox.register("mutate", mutate_individual)
342         toolbox.register("select", tools.selTournament, tournsize=3)
343
344         # 运行遗传算法
345         population = toolbox.population(n=population_size)
346
347         # 初始评估
348         fitnesses = list(map(toolbox.evaluate, population))
349         for ind, fit in zip(population, fitnesses):
350             ind.fitness.values = fit
351
352         for gen in range(generations):
353             # 选择
354             offspring = toolbox.select(population, len(population))
355             offspring = list(map(toolbox.clone, offspring))
356
357             # 交叉和变异
358             for child1, child2 in zip(offspring[::2], offspring[1::2]):
359                 if random.random() < 0.5:
360                     toolbox.mate(child1, child2)
361                     del child1.fitness.values
362                     del child2.fitness.values
363
364             for mutant in offspring:
365                 if random.random() < 0.2:
366                     toolbox.mutate(mutant)
367                     del mutant.fitness.values
368
369             # 评估无效个体
370             invalid_ind = [ind for ind in offspring if not ind.fitness.
371                             ↪ valid]
372             fitnesses = map(toolbox.evaluate, invalid_ind)
373             for ind, fit in zip(invalid_ind, fitnesses):
374                 ind.fitness.values = fit
375
376             population[:] = offspring # Update population with new
377                                     ↪ generation
378
379             # if gen % 10 == 0: # 避免过多打印
380             #     fits = [ind.fitness.values[0] for ind in population if
381                             ↪ ind.fitness.valid]
382             #     if fits:
383             #         print(f"Generation {gen}: Max={max(fits):.2f}, Avg={
384                             ↪ np.mean(fits):.2f}")

```

```

382         # 提取最优个体作为候选路线, 保证多样性
383         population.sort(key=lambda x: x.fitness.values[0], reverse=True)
384
385         self.routes_3day_candidates = []
386         used_route_keys = set()
387
388         for ind in population:
389             spots = ind[:6]
390             regions = ind[6:]
391
392             # 验证景点不重复
393             if len(set(spots)) != 6:
394                 continue # 跳过有重复景点的个体
395
396             # 创建路线唯一标识
397             route_key = tuple(spots + regions)
398
399             # 只选择独特的路线
400             if route_key not in used_route_keys and len(self.
401                 ↪ routes_3day_candidates) < candidate_size:
402                 used_route_keys.add(route_key)
403
404                 route = {
405                     'type': '3day',
406                     'path': [spots[0], regions[0], spots[1], regions[1],
407                         ↪ spots[2], regions[2],
408                         spots[3], regions[3], spots[4], regions[4],
409                         ↪ spots[5]],
410                     'spots': spots,
411                     'regions': regions,
412                     'lunch_regions': [regions[0], regions[2], regions[4]],
413                         ↪ # 3天的午餐
414                     'night_regions': [regions[1], regions[3]], # 前2天的
415                         ↪ 住宿
416                     'cost': 0, # 需要重新计算
417                     'time': 0, # 需要重新计算
418                     'preference': 0, # 需要重新计算
419                     'fitness': ind.fitness.values[0]
420                 }
421
422             # 重新精确计算成本、时间、偏好
423             try:
424                 cost = (self.cost_mat[spots[0], regions[0]] + self.
425                     ↪ cost_mat[spots[1], regions[0]] +
426                     self.cost_mat[spots[1], regions[1]] + self.
427                         ↪ cost_mat[spots[2], regions[1]] +
428                     self.cost_mat[spots[2], regions[2]] + self.
429                         ↪ cost_mat[spots[3], regions[2]] +

```

```

422         self.cost_mat[spots[3], regions[3]] + self.
            ↪ cost_mat[spots[4], regions[3]] +
423         self.cost_mat[spots[4], regions[4]] + self.
            ↪ cost_mat[spots[5], regions[4]])
424
425         time = (self.time_mat[spots[0], regions[0]] + self.
            ↪ time_mat[spots[1], regions[0]] +
426         self.time_mat[spots[1], regions[1]] + self.
            ↪ time_mat[spots[2], regions[1]] +
427         self.time_mat[spots[2], regions[2]] + self.
            ↪ time_mat[spots[3], regions[2]] +
428         self.time_mat[spots[3], regions[3]] + self.
            ↪ time_mat[spots[4], regions[3]] +
429         self.time_mat[spots[4], regions[4]] + self.
            ↪ time_mat[spots[5], regions[4]])
430
431         preference = sum([self.region_prefer[r] for r in
            ↪ regions]) + 6
432
433         route['cost'] = cost
434         route['time'] = time
435         route['preference'] = preference
436
437         self.routes_3day_candidates.append(route)
438     except:
439         continue
440
441     # print(f"三日游候选路线数量: {len(self.routes_3day_candidates)}")
        ↪ # 避免过多打印
442
443     def generate_3day_routes_hybrid(self, target_routes=5000):
444         """混合方法生成三日游路线: 遗传算法 + 启发式规则"""
445         print("使用混合方法生成三日游路线...")
446
447         self.routes_3day_candidates = []
448
449         # 1. 先用遗传算法生成高质量路线
450         print("步骤1: 遗传算法生成高质量路线...")
451         self.generate_3day_candidates_ga(candidate_size=int(target_routes
            ↪ * 0.1), population_size=1000, generations=50) # 减少GA生成的
            ↪ 比例
452         ga_routes_count = len(self.routes_3day_candidates)
453         print(f"遗传算法生成: {ga_routes_count}条路线")
454
455         # 2. 启发式生成多样化路线
456         print("步骤2: 启发式生成多样化路线...")
457         used_route_keys = set()
458         for route in self.routes_3day_candidates:

```

```

459         route_key = tuple(route['spots'] + route['regions'])
460         used_route_keys.add(route_key)
461
462         # 为每个区域组合生成路线
463         # 考虑更系统地生成, 而不是固定组合
464         # 随机生成区域组合, 增加多样性
465
466         num_heuristic_routes = target_routes - ga_routes_count
467
468         # 尝试生成更多样化的区域组合
469         for _ in range(num_heuristic_routes * 2): # 尝试生成更多, 因为会有
            ↪ 重复或无效
470             if len(self.routes_3day_candidates) >= target_routes:
471                 break
472
473             # 随机选择5个区域, 可以重复
474             region_combo = [random.randint(0, self.num_regions - 1) for _
                ↪ in range(5)]
475
476             # 为该区域组合生成多种景点排列 (随机选择部分)
477             spot_permutations = list(itertools.permutations(range(self.
                ↪ num_spots)))
478             selected_perms = random.sample(spot_permutations, min(2, len(
                ↪ spot_permutations))) # 减少每个区域组合的景点排列数
479
480             for spots in selected_perms:
481                 if len(self.routes_3day_candidates) >= target_routes:
482                     break
483
484                 route_key = tuple(list(spots) + region_combo)
485                 if route_key not in used_route_keys:
486                     used_route_keys.add(route_key)
487
488                 route = {
489                     'type': '3day',
490                     'path': [spots[0], region_combo[0], spots[1],
                        ↪ region_combo[1], spots[2], region_combo[2],
491                         spots[3], region_combo[3], spots[4],
                        ↪ region_combo[4], spots[5]],
492                     'spots': list(spots),
493                     'regions': region_combo,
494                     'lunch_regions': [region_combo[0], region_combo
                        ↪ [2], region_combo[4]],
495                     'night_regions': [region_combo[1], region_combo
                        ↪ [3]],
496                 }
497
498             # 计算成本、时间、偏好

```

```

499         try:
500             cost = (self.cost_mat[spots[0], region_combo[0]] +
501                     ↪ self.cost_mat[spots[1], region_combo[0]] +
502                     self.cost_mat[spots[1], region_combo[1]] +
503                     ↪ self.cost_mat[spots[2], region_combo
504                     ↪ [1]] +
505                     self.cost_mat[spots[2], region_combo[2]] +
506                     ↪ self.cost_mat[spots[3], region_combo
507                     ↪ [2]] +
508                     self.cost_mat[spots[3], region_combo[3]] +
509                     ↪ self.cost_mat[spots[4], region_combo
510                     ↪ [3]] +
511                     self.cost_mat[spots[4], region_combo[4]] +
512                     ↪ self.cost_mat[spots[5], region_combo
513                     ↪ [4]])
514
515             time = (self.time_mat[spots[0], region_combo[0]] +
516                     ↪ self.time_mat[spots[1], region_combo[0]] +
517                     self.time_mat[spots[1], region_combo[1]] +
518                     ↪ self.time_mat[spots[2], region_combo
519                     ↪ [1]] +
520                     self.time_mat[spots[2], region_combo[2]] +
521                     ↪ self.time_mat[spots[3], region_combo
522                     ↪ [2]] +
523                     self.time_mat[spots[3], region_combo[3]] +
524                     ↪ self.time_mat[spots[4], region_combo
525                     ↪ [3]] +
526                     self.time_mat[spots[4], region_combo[4]] +
527                     ↪ self.time_mat[spots[5], region_combo
528                     ↪ [4]])
529
530             preference = sum([self.region_prefer[r] for r in
531                               ↪ region_combo]) + 6
532
533             route['cost'] = cost
534             route['time'] = time
535             route['preference'] = preference
536
537             self.routes_3day_candidates.append(route)
538         except:
539             continue
540
541     print(f"混合方法总共生成: {len(self.routes_3day_candidates)}条路线
542           ↪ ")
543     print(f"其中遗传算法: {ga_routes_count}条, 启发式: {len(self.
544           ↪ routes_3day_candidates) - ga_routes_count}条")
545
546     def solve_milp(self, routes, total_tourists=10000, weights=(0.6, 0.2,

```

```

526         ↪ 0.2)):
527         """使用混合整数线性规划求解路线分配"""
528         # print(f"求解MILP, 路线数量: {len(routes)}") # 避免过多打印
529
530         if not routes:
531             return {'solution': [], 'total_satisfaction': 0, '
532                     ↪ total_tourists': 0} # 返回包含总满意度和总游客数的字典
533
534         n_routes = len(routes)
535         w_pref, w_cost, w_time = weights
536
537         # 计算归一化的理论最大值
538         max_preference_1day = 9 * 1 + 2 # 1个区域 + 2个景点
539         max_preference_2day = 9 * 3 + 4 # 3个区域 + 4个景点
540         max_preference_3day = 9 * 5 + 6 # 5个区域 + 6个景点
541
542         # 成本和时间: 从所有路线中找最大值作为归一化基准
543         max_cost = max([route['cost'] for route in routes]) if routes else
544             ↪ 1
545         max_time = max([route['time'] for route in routes]) if routes else
546             ↪ 1
547
548         # 根据路线类型确定偏好度最大值
549         def get_max_preference(route_type):
550             if route_type == '1day':
551                 return max_preference_1day
552             elif route_type == '2day':
553                 return max_preference_2day
554             else: # 3day
555                 return max_preference_3day
556
557         # 构建目标函数系数 (最大化满意度 = 最大化偏好 - 最小化成本和时间)
558         c = []
559         for route in routes:
560             # 归一化各项指标到[0,1]范围
561             pref_normalized = route['preference'] / get_max_preference(
562                 ↪ route['type'])
563             cost_normalized = route['cost'] / max_cost
564             time_normalized = route['time'] / max_time
565
566             # 加权计算满意度
567             satisfaction = w_pref * pref_normalized - w_cost *
568                 ↪ cost_normalized - w_time * time_normalized
569             c.append(-satisfaction) # linprog求最小值, 所以取负
570
571         # 约束矩阵
572         A_ub = []
573         b_ub = []

```

```

568
569     # 景点容量约束 - 按时段分别约束
570     max_days = 3 # 最多3日游
571     max_time_slots = max_days * 2 # 每天上午+下午 (粗略估计, 实际应更
        ↪ 精细, 但为了简化模型, 保持原逻辑)
572
573     for s in range(self.num_spots):
574         constraint = []
575         for route in routes:
576             # 计算该路线中景点s被访问的次数
577             visit_count = route['spots'].count(s)
578             constraint.append(visit_count)
579         A_ub.append(constraint)
580         # 景点在多个时段可复用, 总容量 = 单时段容量 × 时段数
581         total_capacity = self.spot_cap[s] * max_time_slots
582         b_ub.append(total_capacity)
583
584     # 午餐容量约束
585     for r in range(self.num_regions):
586         constraint = []
587         for route in routes:
588             count = route['lunch_regions'].count(r)
589             constraint.append(count)
590         A_ub.append(constraint)
591         b_ub.append(self.lunch_cap[r])
592
593     # 住宿容量约束 - 按夜晚时段复用
594     max_nights = max_days - 1 # 最大夜晚数 (3日游需要2晚)
595
596     for r in range(self.num_regions):
597         constraint = []
598         for route in routes:
599             count = route['night_regions'].count(r)
600             constraint.append(count)
601         A_ub.append(constraint)
602         # 住宿容量可以在不同夜晚复用
603         total_night_capacity = self.night_cap[r] * max_nights # 使用
        ↪ self.night_cap
604         b_ub.append(total_night_capacity)
605
606     # 等式约束: 总游客数
607     A_eq = [[1] * n_routes]
608     b_eq = [total_tourists]
609
610     # 变量边界
611     bounds = [(0, total_tourists) for _ in range(n_routes)]
612
613     try:

```

```

614         # 求解
615         result = linprog(c, A_ub=A_ub, b_ub=b_ub, A_eq=A_eq, b_eq=b_eq
        ↪ ,
616                             bounds=bounds, method='highs')
617
618         if result.success:
619             solution = []
620             total_s = 0
621             total_t = 0
622             for i, x in enumerate(result.x):
623                 if x > 0.1: # 过滤掉很小的值
624                     num_tourists = int(round(x))
625                     route_info = routes[i].copy()
626                     route_info['tourists'] = num_tourists
627                     # 重新计算归一化满意度用于显示
628                     pref_normalized = route_info['preference'] /
629                                     ↪ get_max_preference(route_info['type'])
630                     cost_normalized = route_info['cost'] / max_cost
631                     time_normalized = route_info['time'] / max_time
632                     route_info['satisfaction'] = w_pref *
633                                     ↪ pref_normalized - w_cost * cost_normalized -
634                                     ↪ w_time * time_normalized
635                     solution.append(route_info)
636                     total_s += num_tourists * route_info['satisfaction
637                                     ↪ '']
638                     total_t += num_tourists
639
640             return {'solution': solution, 'total_satisfaction':
641                     ↪ total_s, 'total_tourists': total_t}
642         else:
643             # print("MILP求解失败") # 避免过多打印
644             return {'solution': [], 'total_satisfaction': 0, '
645                     ↪ total_tourists': 0}
646     except Exception as e:
647         # print(f"MILP求解出错: {e}") # 避免过多打印
648         return {'solution': [], 'total_satisfaction': 0, '
649                 ↪ total_tourists': 0}
650
651     def run_optimization(self, cost_weight=0.5, time_weight=0.5,
652         ↪ tourists_1day=30000, tourists_2day=30000, tourists_3day=20000):
653         """运行完整的优化流程
654
655         Args:
656             cost_weight: 费用权重, 用于路径预处理 (默认0.5)
657             time_weight: 时间权重, 用于路径预处理 (默认0.5)
658             tourists_1day: 一日游总游客数
659             tourists_2day: 二日游总游客数
660             tourists_3day: 三日游总游客数

```



```

653         """
654         # print("开始旅游路线优化...") # 避免过多打印
655         # print(f"使用权重配置: 费用权重={cost_weight}, 时间权重={
        ↪ time_weight}")
656
657         # 1. 数据预处理
658         self.preprocess_matrices(cost_weight, time_weight)
659
660         # 2. 生成路线
661         self.generate_1day_routes()
662         self.generate_2day_routes(max_routes=5000) # 限制二日游路线数量
663         self.generate_3day_routes_hybrid(target_routes=5000) # 使用混合方
        ↪ 法生成三日游路线
664
665         # 3. 分别求解三种旅游方案
666         results = {}
667
668         # 一日游
669         # print("\n=== 求解一日游方案 ===")
670         solution_1day_res = self.solve_milp(self.routes_1day,
        ↪ total_tourists=tourists_1day)
671         results['1day'] = solution_1day_res['solution']
672         results['1day_metrics'] = {'total_satisfaction': solution_1day_res
        ↪ ['total_satisfaction'], 'total_tourists': solution_1day_res[
        ↪ 'total_tourists']}
673
674         # 二日游
675         # print("\n=== 求解二日游方案 ===")
676         solution_2day_res = self.solve_milp(self.routes_2day,
        ↪ total_tourists=tourists_2day)
677         results['2day'] = solution_2day_res['solution']
678         results['2day_metrics'] = {'total_satisfaction': solution_2day_res
        ↪ ['total_satisfaction'], 'total_tourists': solution_2day_res[
        ↪ 'total_tourists']}
679
680         # 三日游
681         # print("\n=== 求解三日游方案 ===")
682         solution_3day_res = self.solve_milp(self.routes_3day_candidates,
        ↪ total_tourists=tourists_3day)
683         results['3day'] = solution_3day_res['solution']
684         results['3day_metrics'] = {'total_satisfaction': solution_3day_res
        ↪ ['total_satisfaction'], 'total_tourists': solution_3day_res[
        ↪ 'total_tourists']}
685
686         return results
687
688     def get_aggregated_metrics(self, results):
689         """从优化结果中聚合总满意度和总游客数"""

```

```

690         total_satisfaction_all_types = 0
691         total_tourists_all_types = 0
692
693         for day_type in ['1day', '2day', '3day']:
694             if f'{day_type}_metrics' in results:
695                 total_satisfaction_all_types += results[f'{day_type}
↳ _metrics']['total_satisfaction']
696                 total_tourists_all_types += results[f'{day_type}_metrics'
↳ ]['total_tourists']
697
698         return total_satisfaction_all_types, total_tourists_all_types
699
700     def print_results(self, results):
701         """打印优化结果"""
702         for day_type, solution in results.items():
703             if not isinstance(solution, list): # 过滤掉 metrics 字典
704                 continue
705
706             print(f"\n{'='*50}")
707             print(f"{day_type.upper()} 旅游方案结果")
708             print(f"{'='*50}")
709
710             if not solution:
711                 print("无可行解")
712                 continue
713
714             total_tourists = sum([route['tourists'] for route in solution
↳ ])
715             total_cost = sum([route['tourists'] * route['cost'] for route
↳ in solution])
716             total_time = sum([route['tourists'] * route['time'] for route
↳ in solution])
717             total_satisfaction = sum([route['tourists'] * route['
↳ satisfaction'] for route in solution])
718
719             print(f"路线类型数量: {len(solution)}")
720             print(f"总游客数: {total_tourists}")
721             print(f"总交通成本: {total_cost:.0f} 元")
722             print(f"总交通时间: {total_time:.0f} 分钟")
723             print(f"总满意度: {total_satisfaction:.2f}")
724             print(f"平均满意度: {total_satisfaction/total_tourists:.2f}")
725
726             print("\n具体路线分配:")
727             for i, route in enumerate(solution[:10]): # 只显示前10个
728                 spots_str = "->".join([f"S{s+1}" for s in route['spots']])
729                 regions_str = "->".join([f"R{r+1}" for r in route['regions
↳ ']])
730                 print(f"路线{i+1}: {route['tourists']}人")

```

```

731         print(f"    景点路径: {spots_str}")
732         print(f"    区域路径: {regions_str}")
733         print(f"    成本: {route['cost']:.1f}元, 时间: {route['time']:.1f}分钟, 偏好: {route['preference']}")
734         print()
735
736     # 扩容成本函数
737     def expansion_cost(delta_K: float) -> float:
738         """
739         扩容成本函数
740         Args:
741             delta_K: 新增接待能力 (万人次)
742         Returns:
743             扩容成本 (亿元)
744         """
745         c1 = 0.0007 # 亿元
746         gamma = 1.09
747         return c1 * (delta_K ** gamma)
748
749     # 净收益评价函数 (在主脚本中调用)
750     #  $B(\delta_K) = v_s * [Z(K) - Z(K_0)] + v_p * [N(K) - N(K_0)]$ 
751     #  $F(\delta_K) = B(\delta_K) - C(\delta_K)$ 

```

C. 聚类函数

```

1     #!/usr/bin/env python3
2     # -*- coding: utf-8 -*-
3     """
4     旅游方案K均值聚类算法
5     使用自定义距离函数来衡量旅游方案之间的相似度
6     """
7
8     import numpy as np
9     import matplotlib.pyplot as plt
10    import random
11    from typing import List, Dict, Tuple, Any
12    from collections import defaultdict
13    import warnings
14    warnings.filterwarnings('ignore')
15
16    class TourismKMeans:
17        def __init__(self, k: int = 3, max_iterations: int = 100, tolerance:
18            float = 1e-4):
19            """
20            初始化K均值聚类器
21
22            Args:
23                k: 聚类数量

```

```

23         max_iterations: 最大迭代次数
24         tolerance: 收敛阈值
25     """
26     self.k = k
27     self.max_iterations = max_iterations
28     self.tolerance = tolerance
29     self.centroids = None
30     self.labels = None
31     self.inertia_ = None
32
33 def custom_distance(self, route1: Dict, route2: Dict) -> float:
34     """
35     自定义距离函数：计算两个旅游方案之间的相似度距离
36
37     Args:
38         route1: 第一个旅游方案
39         route2: 第二个旅游方案
40
41     Returns:
42         float: 距离值（越小表示越相似）
43     """
44     # 1. 景点相似度（Jaccard相似度）
45     spots1 = set(route1.get('spots', []))
46     spots2 = set(route2.get('spots', []))
47     if len(spots1.union(spots2)) == 0:
48         spots_similarity = 0
49     else:
50         spots_similarity = len(spots1.intersection(spots2)) / len(
51             spots1.union(spots2))
52
53     # 2. 区域相似度（Jaccard相似度）
54     regions1 = set(route1.get('regions', []))
55     regions2 = set(route2.get('regions', []))
56     if len(regions1.union(regions2)) == 0:
57         regions_similarity = 0
58     else:
59         regions_similarity = len(regions1.intersection(regions2)) /
60             len(regions1.union(regions2))
61
62     # 3. 路线类型相似度
63     type1 = route1.get('type', '')
64     type2 = route2.get('type', '')
65     type_similarity = 1.0 if type1 == type2 else 0.0
66
67     # 4. 成本相似度（归一化欧几里得距离）
68     cost1 = route1.get('cost', 0)
69     cost2 = route2.get('cost', 0)
70     max_cost = max(cost1, cost2) if max(cost1, cost2) > 0 else 1

```

```

69         cost_similarity = 1 - abs(cost1 - cost2) / max_cost
70
71     # 5. 时间相似度（归一化欧几里得距离）
72     time1 = route1.get('time', 0)
73     time2 = route2.get('time', 0)
74     max_time = max(time1, time2) if max(time1, time2) > 0 else 1
75     time_similarity = 1 - abs(time1 - time2) / max_time
76
77     # 6. 偏好相似度（归一化欧几里得距离）
78     pref1 = route1.get('preference', 0)
79     pref2 = route2.get('preference', 0)
80     max_pref = max(pref1, pref2) if max(pref1, pref2) > 0 else 1
81     pref_similarity = 1 - abs(pref1 - pref2) / max_pref
82
83     # 加权综合距离（转换为距离，越小越相似）
84     weights = {
85         'spots': 0.25,      # 景点权重
86         'regions': 0.25,   # 区域权重
87         'type': 0.15,      # 类型权重
88         'cost': 0.15,      # 成本权重
89         'time': 0.10,      # 时间权重
90         'preference': 0.10 # 偏好权重
91     }
92
93     total_distance = (
94         weights['spots'] * (1 - spots_similarity) +
95         weights['regions'] * (1 - regions_similarity) +
96         weights['type'] * (1 - type_similarity) +
97         weights['cost'] * (1 - cost_similarity) +
98         weights['time'] * (1 - time_similarity) +
99         weights['preference'] * (1 - pref_similarity)
100     )
101
102     return total_distance
103
104     def find_centroid(self, cluster_routes: List[Dict]) -> Dict:
105         """
106         计算聚类中心（找到与所有路线平均距离最小的路线作为中心）
107
108         Args:
109             cluster_routes: 聚类中的路线列表
110
111         Returns:
112             Dict: 聚类中心路线
113         """
114         if not cluster_routes:
115             return {}
116

```

```

117         if len(cluster_routes) == 1:
118             return cluster_routes[0]
119
120         # 计算每条路线到其他所有路线的平均距离
121         avg_distances = []
122         for i, route in enumerate(cluster_routes):
123             total_distance = 0
124             for j, other_route in enumerate(cluster_routes):
125                 if i != j:
126                     total_distance += self.custom_distance(route,
127                                                                ↪ other_route)
128             avg_distance = total_distance / (len(cluster_routes) - 1)
129             avg_distances.append((avg_distance, route))
130
131         # 返回平均距离最小的路线作为中心
132         return min(avg_distances, key=lambda x: x[0])[1]
133
134     def fit(self, routes: List[Dict]) -> 'TourismKMeans':
135         """
136         训练K均值聚类模型
137
138         Args:
139             routes: 旅游方案列表
140
141         Returns:
142             self: 训练好的模型
143         """
144         if len(routes) < self.k:
145             raise ValueError(f"路线数量({len(routes)})必须大于聚类数({self
146                               ↪ .k})")
147
148         # 随机初始化聚类中心
149         self.centroids = random.sample(routes, self.k)
150
151         for iteration in range(self.max_iterations):
152             # 分配阶段: 将每个路线分配到最近的聚类中心
153             labels = []
154             total_distance = 0
155
156             for route in routes:
157                 min_distance = float('inf')
158                 best_cluster = 0
159
160                 for i, centroid in enumerate(self.centroids):
161                     distance = self.custom_distance(route, centroid)
162                     if distance < min_distance:
163                         min_distance = distance
164                         best_cluster = i

```

```

163
164         labels.append(best_cluster)
165         total_distance += min_distance
166
167     # 更新阶段：重新计算聚类中心
168     new_centroids = []
169     for i in range(self.k):
170         cluster_routes = [routes[j] for j in range(len(routes)) if
171                             ↪ labels[j] == i]
172         if cluster_routes:
173             new_centroid = self.find_centroid(cluster_routes)
174             new_centroids.append(new_centroid)
175         else:
176             # 如果某个聚类为空，随机选择一个新中心
177             new_centroids.append(random.choice(routes))
178
179     # 检查收敛
180     centroid_changed = False
181     for i in range(self.k):
182         if self.custom_distance(self.centroids[i], new_centroids[i]
183                                 ↪ ) > self.tolerance:
184             centroid_changed = True
185             break
186
187     self.centroids = new_centroids
188
189     if not centroid_changed:
190         print(f"算法在第{iteration + 1}次迭代后收敛")
191         break
192
193     self.labels = labels
194     self.inertia_ = total_distance
195
196     return self
197
198 def predict(self, routes: List[Dict]) -> List[int]:
199     """
200     预测新路线的聚类标签
201
202     Args:
203         routes: 待预测的路线列表
204
205     Returns:
206         List[int]: 聚类标签
207     """
208     if self.centroids is None:
209         raise ValueError("模型尚未训练，请先调用fit方法")

```

```

209         labels = []
210         for route in routes:
211             min_distance = float('inf')
212             best_cluster = 0
213
214             for i, centroid in enumerate(self.centroids):
215                 distance = self.custom_distance(route, centroid)
216                 if distance < min_distance:
217                     min_distance = distance
218                     best_cluster = i
219
220             labels.append(best_cluster)
221
222         return labels
223
224     def get_cluster_info(self, routes: List[Dict]) -> Dict:
225         """
226         获取聚类信息
227
228         Args:
229             routes: 原始路线列表
230
231         Returns:
232             Dict: 聚类信息
233         """
234         if self.labels is None:
235             raise ValueError("模型尚未训练, 请先调用fit方法")
236
237         cluster_info = {}
238
239         for i in range(self.k):
240             cluster_routes = [routes[j] for j in range(len(routes)) if
241                               ⇨ self.labels[j] == i]
242
243             if cluster_routes:
244                 # 计算聚类统计信息
245                 costs = [route.get('cost', 0) for route in cluster_routes]
246                 times = [route.get('time', 0) for route in cluster_routes]
247                 preferences = [route.get('preference', 0) for route in
248                                ⇨ cluster_routes]
249                 types = [route.get('type', '') for route in cluster_routes
250                           ⇨ ]
251
252                 cluster_info[i] = {
253                     'size': len(cluster_routes),
254                     'centroid': self.centroids[i],
255                     'avg_cost': np.mean(costs),
256                     'avg_time': np.mean(times),

```



```

254         'avg_preference': np.mean(preferences),
255         'type_distribution': dict(zip(*np.unique(types,
256             ↪ return_counts=True))),
257         'routes': cluster_routes
258     }
259
260     return cluster_info
261
262 def visualize_clusters(self, routes: List[Dict], save_path: str = None
263     ↪ ):
264     """
265     可视化聚类结果
266
267     Args:
268         routes: 原始路线列表
269         save_path: 保存图片的路径
270     """
271     if self.labels is None:
272         raise ValueError("模型尚未训练，请先调用fit方法")
273
274     # 提取特征用于可视化
275     costs = [route.get('cost', 0) for route in routes]
276     times = [route.get('time', 0) for route in routes]
277     preferences = [route.get('preference', 0) for route in routes]
278
279     # 创建子图
280     fig, axes = plt.subplots(2, 2, figsize=(15, 12))
281
282     # 1. 成本-时间散点图
283     scatter = axes[0, 0].scatter(costs, times, c=self.labels, cmap='
284     ↪ viridis', alpha=0.7)
285     axes[0, 0].set_xlabel('成本 (元)')
286     axes[0, 0].set_ylabel('时间 (分钟)')
287     axes[0, 0].set_title('聚类结果: 成本 vs 时间')
288     plt.colorbar(scatter, ax=axes[0, 0])
289
290     # 2. 成本-偏好散点图
291     scatter = axes[0, 1].scatter(costs, preferences, c=self.labels,
292     ↪ cmap='viridis', alpha=0.7)
293     axes[0, 1].set_xlabel('成本 (元)')
294     axes[0, 1].set_ylabel('偏好度')
295     axes[0, 1].set_title('聚类结果: 成本 vs 偏好度')
296     plt.colorbar(scatter, ax=axes[0, 1])
297
298     # 3. 时间-偏好散点图
299     scatter = axes[1, 0].scatter(times, preferences, c=self.labels,
300     ↪ cmap='viridis', alpha=0.7)
301     axes[1, 0].set_xlabel('时间 (分钟)')

```

```

297         axes[1, 0].set_ylabel('偏好度')
298         axes[1, 0].set_title('聚类结果: 时间 vs 偏好度')
299         plt.colorbar(scatter, ax=axes[1, 0])
300
301     # 4. 聚类大小柱状图
302     cluster_sizes = [sum(1 for label in self.labels if label == i) for
303                       ⇨ i in range(self.k)]
304     axes[1, 1].bar(range(self.k), cluster_sizes, color='skyblue',
305                   ⇨ alpha=0.7)
306     axes[1, 1].set_xlabel('聚类编号')
307     axes[1, 1].set_ylabel('路线数量')
308     axes[1, 1].set_title('各聚类大小分布')
309     axes[1, 1].set_xticks(range(self.k))
310
311     plt.tight_layout()
312
313     if save_path:
314         plt.savefig(save_path, dpi=300, bbox_inches='tight')
315
316     plt.show()
317
318 def generate_sample_routes(num_routes: int = 100) -> List[Dict]:
319     """
320     生成示例旅游路线数据
321
322     Args:
323         num_routes: 路线数量
324
325     Returns:
326         List[Dict]: 示例路线列表
327     """
328     routes = []
329
330     # 景点和区域信息
331     spots = list(range(6)) # S1-S6
332     regions = list(range(6)) # R1-R6
333     route_types = ['1day', '2day', '3day']
334
335     for i in range(num_routes):
336         route_type = random.choice(route_types)
337
338         if route_type == '1day':
339             # 一日游: 2个景点, 1个区域
340             route_spots = random.sample(spots, 2)
341             route_regions = random.sample(regions, 1)
342             cost = random.randint(20, 80)
343             time = random.randint(60, 180)

```

```
343         preference = random.randint(5, 15)
344
345     elif route_type == '2day':
346         # 二日游: 4个景点, 3个区域
347         route_spots = random.sample(spots, 4)
348         route_regions = random.sample(regions, 3)
349         cost = random.randint(80, 200)
350         time = random.randint(180, 360)
351         preference = random.randint(15, 25)
352
353     else: # 3day
354         # 三日游: 6个景点, 5个区域
355         route_spots = random.sample(spots, 6)
356         route_regions = random.sample(regions, 5)
357         cost = random.randint(200, 400)
358         time = random.randint(360, 600)
359         preference = random.randint(25, 35)
360
361     route = {
362         'id': i,
363         'type': route_type,
364         'spots': route_spots,
365         'regions': route_regions,
366         'cost': cost,
367         'time': time,
368         'preference': preference
369     }
370
371     routes.append(route)
372
373     return routes
374
375
376 def main():
377     """主函数: 演示K均值聚类算法"""
378     print("=" * 60)
379     print("旅游方案K均值聚类算法演示")
380     print("=" * 60)
381
382     # 生成示例数据
383     print("生成示例旅游路线数据...")
384     routes = generate_sample_routes(200)
385     print(f"生成了 {len(routes)} 条旅游路线")
386
387     # 创建并训练K均值模型
388     print("\n训练K均值聚类模型...")
389     kmeans = TourismKMeans(k=4, max_iterations=50)
390     kmeans.fit(routes)
```

```

391
392     # 获取聚类信息
393     print("\n聚类结果分析:")
394     cluster_info = kmeans.get_cluster_info(routes)
395
396     for cluster_id, info in cluster_info.items():
397         print(f"\n聚类 {cluster_id}:")
398         print(f"    路线数量: {info['size']}")
399         print(f"    平均成本: {info['avg_cost']:.2f} 元")
400         print(f"    平均时间: {info['avg_time']:.2f} 分钟")
401         print(f"    平均偏好度: {info['avg_preference']:.2f}")
402         print(f"    路线类型分布: {info['type_distribution']}")
403
404     # 可视化聚类结果
405     print("\n生成聚类可视化图表...")
406     kmeans.visualize_clusters(routes, save_path='tourism_clusters.png')
407
408     print(f"\n聚类完成! 模型惯性 (总距离): {kmeans.inertia_:.4f}")
409
410
411 if __name__ == "__main__":
412     main()

```

D. 运行函数

```

1  #!/usr/bin/env python3
2  # -*- coding: utf-8 -*-
3  """
4  旅游路线优化运行脚本
5  """
6  import deap
7  from tourism_optimization import TourismOptimizer, expansion_cost # Import
    ↳ expansion cost function
8  import numpy as np # Import numpy
9  import matplotlib.pyplot as plt
10 import matplotlib # Import matplotlib to configure fonts
11
12 # Import K-means clustering algorithm
13 from Q2_k_means import TourismKMeans
14
15 # --- Start: Matplotlib Chinese Font Configuration ---
16 # Configure font to support Chinese characters
17 # Try 'SimHei' first, if not available, try 'Microsoft YaHei' or '
    ↳ WenQuanYi Micro Hei'
18 matplotlib.rcParams['font.sans-serif'] = ['SimHei', 'Microsoft YaHei', '
    ↳ Arial Unicode MS']
19 matplotlib.rcParams['axes.unicode_minus'] = False # Solve the problem of
    ↳ '-' displaying as a square

```

```

20 # --- End: Matplotlib Chinese Font Configuration ---
21
22 def main():
23     print("=" * 60)
24     print("重庆旅游路线优化系统")
25     print("=" * 60)
26
27     # Create optimizer instance
28     optimizer = TourismOptimizer()
29
30     # Run optimization
31     try:
32         # Test different weight configurations
33         weight_configs = [
34             (0.5, 0.5, "均衡型"),
35             # (0.7, 0.3, "费用优先型"), # Can comment out other
36             #   configurations for faster expansion analysis
37             # (0.3, 0.7, "时间优先型")
38         ]
39
40         all_results = {}
41
42         for cost_w, time_w, config_name in weight_configs:
43             print(f"\n{'='*80}")
44             print(f"运行{config_name}配置 (费用权重={cost_w}, 时间权重={
45                 time_w})")
46             print(f"{'='*80}")
47
48             # Run optimization and get results
49             results = optimizer.run_optimization(cost_weight=cost_w,
50                 time_weight=time_w)
51             all_results[config_name] = results
52
53             # Print results
54             optimizer.print_results(results)
55
56             # Save results to file
57             save_results_to_file(results, suffix=f"_{config_name}")
58
59         # Compare results of different configurations
60         compare_configurations(all_results)
61
62         # ===== Problem 3: New Hotel Expansion Analysis =====
63         print(f"\n{'='*80}")
64         print("问题3: 新建旅馆扩容分析")
65         print(f"{'='*80}")
66         analyze_hotel_expansion(optimizer)

```

```

65         # ===== New: K-means Clustering Analysis =====
66         print(f"\n{' '*80}")
67         print("K均值聚类分析：旅游路线相似度分析")
68         print(f"{' '*80}")
69         perform_kmeans_analysis(all_results)
70
71     except Exception as e:
72         print(f"优化过程中出现错误：{e}")
73         import traceback
74         traceback.print_exc()
75
76     def compare_configurations(all_results):
77         """比较不同权重配置的结果"""
78         print(f"\n{' '*80}")
79         print("不同权重配置结果比较")
80         print(f"{' '*80}")
81
82         for day_type in ['1day', '2day', '3day']:
83             print(f"\n{day_type.upper()} 方案比较:")
84             print("-" * 60)
85             print(f"{'配置':<12} {'路线数':<8} {'总游客':<8} {'总费用':<12} {'总时间':<12} {'平均满意度':<12}")
86             print("-" * 60)
87
88             for config_name, results in all_results.items():
89                 solution = results.get(day_type, [])
90                 if solution:
91                     total_tourists = sum([route['tourists'] for route in
92                                             ↪ solution])
93                     total_cost = sum([route['tourists'] * route['cost'] for
94                                       ↪ route in solution])
95                     total_time = sum([route['tourists'] * route['time'] for
96                                       ↪ route in solution])
97                     total_satisfaction = sum([route['tourists'] * route['
98                                               ↪ satisfaction'] for route in solution])
99                     avg_satisfaction = total_satisfaction / total_tourists if
100                        ↪ total_tourists > 0 else 0
101
102                     print(f"{config_name:<12} {len(solution):<8} {
103                           ↪ total_tourists:<8} {total_cost:<12.0f} "
104                           f"{total_time:<12.0f} {avg_satisfaction:<12.2f}")
105                 else:
106                     print(f"{config_name:<12} {'无解':<8} {'-':<8} {'-':<12}
107                           ↪ {'-':<12} {'-':<12}")
108
109     def save_results_to_file(results, suffix=""):
110         """将结果保存到文件"""

```

```

105     filename = f'optimization_results{suffix}.txt'
106     with open(filename, 'w', encoding='utf-8') as f:
107         f.write("重庆旅游路线优化结果\n")
108         f.write("=" * 50 + "\n\n")
109
110         for day_type_key, solution_or_metrics in results.items():
111             if not isinstance(solution_or_metrics, list): # Filter out
112                 ↪ metrics dictionary
113                 continue
114             solution = solution_or_metrics
115
116             day_type = day_type_key.replace('_metrics', '') # Get actual
117                 ↪ day_type
118
119             f.write(f"{day_type.upper()} 旅游方案结果\n")
120             f.write("=" * 30 + "\n")
121
122             if not solution:
123                 f.write("无可行解\n\n")
124                 continue
125
126             total_tourists = sum([route['tourists'] for route in solution
127                 ↪ ])
128             total_cost = sum([route['tourists'] * route['cost'] for route
129                 ↪ in solution])
130             total_time = sum([route['tourists'] * route['time'] for route
131                 ↪ in solution])
132             total_satisfaction = sum([route['tourists'] * route['
133                 ↪ satisfaction'] for route in solution])
134
135             f.write(f"路线类型数量: {len(solution)}\n")
136             f.write(f"总游客数: {total_tourists}\n")
137             f.write(f"总交通成本: {total_cost:.0f} 元\n")
138             f.write(f"总交通时间: {total_time:.0f} 分钟\n")
139             f.write(f"总满意度: {total_satisfaction:.2f}\n")
140             f.write(f"平均满意度: {total_satisfaction/total_tourists:.2f}\
141                 ↪ n\n")
142
143             f.write("具体路线分配:\n")
144             for i, route in enumerate(solution[:10]):
145                 spots_str = "->".join([f"S{s+1}" for s in route['spots']])
146                 regions_str = "->".join([f"R{r+1}" for r in route['regions
147                     ↪ ']])
148                 f.write(f"路线{i+1}: {route['tourists']} 人\n")
149                 f.write(f"  景点路径: {spots_str}\n")
150                 f.write(f"  区域路径: {regions_str}\n")
151                 f.write(f"  成本: {route['cost']:.1f}元, 时间: {route['
152                     ↪ time']:.1f}分钟, 偏好: {route['preference']}\n\n")

```

```

144         f.write("\n")
145
146     print(f"\n结果已保存到 {filename} 文件")
147
148
149 def analyze_hotel_expansion(optimizer: TourismOptimizer):
150     """
151     Analyzes the hotel expansion problem to find the optimal expansion
152     ↳ area and scale.
153     """
154     print("\n开始分析旅馆扩容方案...")
155
156     # Define economic value parameters
157     # vs: Economic value per unit satisfaction (billion CNY/satisfaction)
158     # vp: Average profit per tourist (billion CNY/person)
159     v_s_per_million_satisfaction = 0.1 # Assume 1 million satisfaction
160     ↳ brings 0.1 billion CNY
161     v_p_per_million_tourists = 0.01 # Assume 1 million tourists brings
162     ↳ 0.01 billion CNY (10 CNY/person, 1 million * 10 = 10 million CNY
163     ↳ = 0.01 billion CNY)
164
165     # Run baseline optimization to get metrics at K0
166     print("获取基准指标 (扩容前)...")
167     base_results = optimizer.run_optimization(cost_weight=0.5, time_weight
168     ↳ =0.5, tourists_1day=30000, tourists_2day=30000, tourists_3day
169     ↳ =20000)
170     Z_K0_total, N_K0_total = optimizer.get_aggregated_metrics(base_results
171     ↳ )
172
173     # Convert number of tourists to millions to match delta_K unit
174     N_K0_total_wan = N_K0_total / 10000.0
175
176     print(f"基准总满意度 Z(K0): {Z_K0_total:.2f}")
177     print(f"基准总游客数 N(K0): {N_K0_total_wan:.2f} 万人次")
178
179     best_net_benefit = -np.inf
180     best_region_idx = -1
181     best_delta_K_wan = 0
182
183     # Define expansion capacity range (in millions of persons)
184     # Consider from 0 to a reasonable maximum value, e.g., twice the
185     ↳ original maximum capacity
186     max_delta_K_wan = max(optimizer.night_cap_original) / 10000.0 * 2 #
187     ↳ Twice the original max capacity, in millions of persons
188     delta_K_wan_range = np.arange(0, max_delta_K_wan + 1, 0.5) # From 0 to
189     ↳ max_delta_K_wan, step 0.5 million persons
190
191     # Store all test results

```



```

182     expansion_results = []
183
184     print("\n迭代各区域及扩容规模进行模拟...")
185     for r_idx in range(optimizer.num_regions):
186         original_night_cap_r = optimizer.night_cap_original[r_idx] # Get
187         ↪ the original capacity of this region
188
189         for delta_K_wan in delta_K_wan_range:
190             current_night_cap_r = original_night_cap_r + (delta_K_wan *
191                 ↪ 10000) # Convert millions of persons back to persons
192
193             # Temporarily modify the accommodation capacity of this region
194             optimizer.night_cap[r_idx] = current_night_cap_r
195
196             # Rerun optimization
197             # Note: run_optimization will regenerate routes, ensuring each
198             ↪ run is based on the modified capacity
199             current_results = optimizer.run_optimization(
200                 cost_weight=0.5, time_weight=0.5, # Use balanced weights
201                 ↪ for expansion analysis
202                 tourists_1day=30000, tourists_2day=30000, tourists_3day
203                 ↪ =20000
204             )
205             Z_K_total, N_K_total = optimizer.get_aggregated_metrics(
206                 ↪ current_results)
207             N_K_total_wan = N_K_total / 10000.0
208
209             # Calculate benefit B(delta_K)
210             B_delta_K = (v_s_per_million_satisfaction * (Z_K_total -
211                 ↪ Z_K0_total) +
212                 v_p_per_million_tourists * (N_K_total_wan -
213                 ↪ N_K0_total_wan))
214
215             # Calculate cost C(delta_K)
216             C_delta_K = expansion_cost(delta_K_wan)
217
218             # Calculate net benefit F(delta_K)
219             F_delta_K = B_delta_K - C_delta_K
220
221             expansion_results.append({
222                 'region_idx': r_idx,
223                 'region_name': f'区域{r_idx + 1}',
224                 'delta_K_wan': delta_K_wan,
225                 'original_night_cap_wan': original_night_cap_r / 10000.0,
226                 'new_night_cap_wan': current_night_cap_r / 10000.0,
227                 'Z_K_total': Z_K_total,
228                 'N_K_total_wan': N_K_total_wan,
229                 'Benefit_B': B_delta_K,

```

```

222         'Cost_C': C_delta_K,
223         'Net_Benefit_F': F_delta_K
224     })
225
226     # Update optimal solution
227     if F_delta_K > best_net_benefit:
228         best_net_benefit = F_delta_K
229         best_region_idx = r_idx
230         best_delta_K_wan = delta_K_wan
231
232     # Restore the original capacity of this region for the next region
233     ⇨ 's test
234     optimizer.night_cap[r_idx] = optimizer.night_cap_original[r_idx]
235
236     print("\n扩容分析结果:")
237     print("-" * 60)
238     print(f"{'区域':<8} {'扩容规模(万人次)':<18} {'原容量(万人次)':<16} {''
239           ⇨ '新容量(万人次)':<16} {'净收益(亿元)':<12}")
240     print("-" * 60)
241
242     # Print the top 20 net benefit solutions
243     sorted_expansion_results = sorted(expansion_results, key=lambda x: x[
244           ⇨ 'Net_Benefit_F'], reverse=True)
245     for i, res in enumerate(sorted_expansion_results[:20]):
246         print(f"{'region_name':<8} {'delta_K_wan':<18.2f} {'res['
247               ⇨ 'original_night_cap_wan':<16.2f} {'res['new_night_cap_wan
248               ⇨ ']:<16.2f} {'res['Net_Benefit_F']:<12.4f}")
249
250     print(f"\n最终建议:")
251     if best_region_idx != -1:
252         print(f"建议扩容区域: 区域{best_region_idx + 1}")
253         print(f"建议扩容规模: {best_delta_K_wan:.2f} 万人次")
254         print(f"最大净收益: {best_net_benefit:.4f} 亿元")
255         print(f"该区域原有住宿接待能力: {optimizer.night_cap_original[
256               ⇨ best_region_idx]/10000:.2f} 万人次")
257         print(f"该区域扩容后住宿接待能力: {(optimizer.night_cap_original[
258               ⇨ best_region_idx] + best_delta_K_wan * 10000)/10000:.2f} 万人
259               ⇨ 次")
260
261     # Plot net benefit
262     plt.figure(figsize=(12, 6))
263
264     region_colors = plt.cm.tab10 # Use matplotlib's color map
265
266     # Filter data for each region
267     regions_data = {r_idx: [] for r_idx in range(optimizer.num_regions
268           ⇨ )}
269     for res in expansion_results:

```

```

261         regions_data[res['region_idx']].append(res)
262
263     for r_idx, data in regions_data.items():
264         data.sort(key=lambda x: x['delta_K_wan'])
265         delta_K_wan_values = [d['delta_K_wan'] for d in data]
266         net_benefit_values = [d['Net_Benefit_F'] for d in data]
267
268         plt.plot(delta_K_wan_values, net_benefit_values, marker='o',
269                 ↪ linestyle='-',
270                 label=f'区域 {r_idx + 1}', color=region_colors(r_idx)
271                 ↪ )
272
273     plt.title('不同区域及扩容规模下的净收益')
274     plt.xlabel('新增接待能力 (万人次)')
275     plt.ylabel('净收益 (亿元)')
276     plt.grid(True)
277     plt.legend(title='区域')
278     plt.axhline(0, color='grey', linestyle='--', linewidth=0.8) # Zero
279     ↪ benefit line
280     plt.scatter(best_delta_K_wan, best_net_benefit, color='red',
281                ↪ marker='X', s=200,
282                label=f'最优解: 区域{best_region_idx+1}, {
283                    ↪ best_delta_K_wan:.2f}万人次, {best_net_benefit
284                    ↪ :.4f}亿元')
285
286     plt.legend()
287     plt.tight_layout()
288     plt.savefig('net_benefit_vs_expansion.png')
289     plt.show()
290
291 else:
292     print("未找到可行的扩容方案, 或者所有扩容方案都导致负净收益。")
293
294 def perform_kmeans_analysis(all_results):
295     """
296     对优化结果进行K均值聚类分析
297
298     Args:
299         all_results: 优化结果字典, 包含不同权重配置的结果
300     """
301     print("\n开始K均值聚类分析...")
302
303     # 1. 收集所有路线数据
304     all_routes = []
305     route_id = 0
306
307     for config_name, results in all_results.items():
308         for day_type in ['1day', '2day', '3day']:

```

```

303         solution = results.get(day_type, [])
304
305         for route in solution:
306             # 为K均值算法准备路线数据
307             route_data = {
308                 'id': route_id,
309                 'config': config_name,
310                 'type': day_type,
311                 'spots': route.get('spots', []),
312                 'regions': route.get('regions', []),
313                 'cost': route.get('cost', 0),
314                 'time': route.get('time', 0),
315                 'preference': route.get('preference', 0),
316                 'tourists': route.get('tourists', 0),
317                 'satisfaction': route.get('satisfaction', 0)
318             }
319             all_routes.append(route_data)
320             route_id += 1
321
322     if not all_routes:
323         print("没有找到可用的路线数据进行聚类分析")
324         return
325
326     print(f"收集到 {len(all_routes)} 条路线用于聚类分析")
327
328     # 2. 进行K均值聚类
329     # 尝试不同的k值
330     k_values = [3, 4, 5, 6]
331     best_k = 3
332     best_inertia = float('inf')
333
334     print("\n选择最优聚类数量...")
335     for k in k_values:
336         if k <= len(all_routes):
337             kmeans = TourismKMeans(k=k, max_iterations=50)
338             kmeans.fit(all_routes)
339             print(f"k={k}: 惯性值={kmeans.inertia_:.4f}")
340
341             if kmeans.inertia_ < best_inertia:
342                 best_inertia = kmeans.inertia_
343                 best_k = k
344
345     print(f"\n选择最优k值: {best_k}")
346
347     # 3. 使用最优k值进行最终聚类
348     print(f"\n使用k={best_k}进行最终聚类...")
349     final_kmeans = TourismKMeans(k=best_k, max_iterations=100)
350     final_kmeans.fit(all_routes)

```

```

351
352     # 4. 分析聚类结果
353     print(f"\n聚类结果分析:")
354     cluster_info = final_kmeans.get_cluster_info(all_routes)
355
356     print("-" * 100)
357     print(f"'聚类':<6} {'大小':<6} {'平均成本':<10} {'平均时间':<10} {'平
        ↪ 均偏好':<10} {'平均游客':<10} {'主要类型':<15}")
358     print("-" * 100)
359
360     for cluster_id, info in cluster_info.items():
361         main_type = max(info['type_distribution'].items(), key=lambda x: x
        ↪ [1])[0] if info['type_distribution'] else "未知"
362         avg_tourists = np.mean([route.get('tourists', 0) for route in info
        ↪ ['routes']])
363
364         print(f"{cluster_id:<6} {info['size']:<6} {info['avg_cost']:<10.1f
        ↪ } {info['avg_time']:<10.1f} "
365               f"{info['avg_preference']:<10.1f} {avg_tourists:<10.1f} {
        ↪ main_type:<15}")
366
367     # 5. 详细分析每个聚类
368     print(f"\n{'='*80}")
369     print("详细聚类分析:")
370     print(f"{'='*80}")
371
372     for cluster_id, info in cluster_info.items():
373         print(f"\n聚类 {cluster_id} 详细信息:")
374         print(f" - 路线数量: {info['size']}")
375         print(f" - 平均成本: {info['avg_cost']:.2f} 元")
376         print(f" - 平均时间: {info['avg_time']:.2f} 分钟")
377         print(f" - 平均偏好度: {info['avg_preference']:.2f}")
378         print(f" - 路线类型分布: {info['type_distribution']}")
379
380     # 分析配置分布
381     configs = [route.get('config', '未知') for route in info['routes']
        ↪ ]
382     config_dist = {}
383     for config in configs:
384         config_dist[config] = config_dist.get(config, 0) + 1
385     print(f" - 权重配置分布: {config_dist}")
386
387     # 分析景点和区域偏好
388     all_spots = []
389     all_regions = []
390     for route in info['routes']:
391         all_spots.extend(route.get('spots', []))
392         all_regions.extend(route.get('regions', []))

```

```

393
394         if all_spots:
395             popular_spots = {}
396             for spot in all_spots:
397                 popular_spots[f'S{spot+1}'] = popular_spots.get(f'S{spot
398                     ↪ +1}', 0) + 1
399             popular_spots = sorted(popular_spots.items(), key=lambda x: x
400                 ↪ [1], reverse=True)[:3]
401             print(f"    - 热门景点: {[f'{s}({c}次)' for s, c in
402                 ↪ popular_spots]}")
403
404         if all_regions:
405             popular_regions = {}
406             for region in all_regions:
407                 popular_regions[f'R{region+1}'] = popular_regions.get(f'R{
408                     ↪ region+1}', 0) + 1
409             popular_regions = sorted(popular_regions.items(), key=lambda x
410                 ↪ : x[1], reverse=True)[:3]
411             print(f"    - 热门区域: {[f'{r}({c}次)' for r, c in
412                 ↪ popular_regions]}")
413
414     # 6. 可视化聚类结果
415     print(f"\n生成聚类可视化图表...")
416     final_kmeans.visualize_clusters(all_routes, save_path='
417         ↪ tourism_optimization_clusters.png')
418
419     # 7. 保存聚类结果到文件
420     save_clustering_results(final_kmeans, all_routes, cluster_info)
421
422     print(f"\nK均值聚类分析完成!")
423     print(f"最终聚类数: {best_k}")
424     print(f"模型惯性值: {final_kmeans.inertia_:.4f}")
425     print(f"结果已保存到 clustering_results.txt 和
426         ↪ tourism_optimization_clusters.png")
427
428 def save_clustering_results(kmeans_model, routes, cluster_info):
429     """
430     保存聚类结果到文件
431
432     Args:
433         kmeans_model: 训练好的K均值模型
434         routes: 路线数据
435         cluster_info: 聚类信息
436     """
437     filename = 'clustering_results.txt'
438     with open(filename, 'w', encoding='utf-8') as f:
439         f.write("旅游路线K均值聚类分析结果\n")

```

```

433         f.write("=" * 50 + "\n\n")
434
435         f.write(f"聚类数量: {kmeans_model.k}\n")
436         f.write(f"路线总数: {len(routes)}\n")
437         f.write(f"模型惯性值: {kmeans_model.inertia_:.4f}\n\n")
438
439         for cluster_id, info in cluster_info.items():
440             f.write(f"聚类 {cluster_id}:\n")
441             f.write("-" * 30 + "\n")
442             f.write(f"路线数量: {info['size']}\n")
443             f.write(f"平均成本: {info['avg_cost']:.2f} 元\n")
444             f.write(f"平均时间: {info['avg_time']:.2f} 分钟\n")
445             f.write(f"平均偏好度: {info['avg_preference']:.2f}\n")
446             f.write(f"路线类型分布: {info['type_distribution']}\n")
447
448         # 配置分布
449         configs = [route.get('config', '未知') for route in info['
            ↪ routes']]
450         config_dist = {}
451         for config in configs:
452             config_dist[config] = config_dist.get(config, 0) + 1
453         f.write(f"权重配置分布: {config_dist}\n")
454
455         # 热门景点和区域
456         all_spots = []
457         all_regions = []
458         for route in info['routes']:
459             all_spots.extend(route.get('spots', []))
460             all_regions.extend(route.get('regions', []))
461
462         if all_spots:
463             popular_spots = {}
464             for spot in all_spots:
465                 popular_spots[f'S{spot+1}'] = popular_spots.get(f'S{
                    ↪ spot+1}', 0) + 1
466             popular_spots = sorted(popular_spots.items(), key=lambda x
                    ↪ : x[1], reverse=True)[:5]
467             f.write(f"热门景点: {popular_spots}\n")
468
469         if all_regions:
470             popular_regions = {}
471             for region in all_regions:
472                 popular_regions[f'R{region+1}'] = popular_regions.get(
                    ↪ f'R{region+1}', 0) + 1
473             popular_regions = sorted(popular_regions.items(), key=
                    ↪ lambda x: x[1], reverse=True)[:5]
474             f.write(f"热门区域: {popular_regions}\n")
475

```

```
476         f.write("\n代表性路线 (前5条):\n")
477         for i, route in enumerate(info['routes'][:5]):
478             spots_str = "->".join([f"S{s+1}" for s in route.get('spots'
479                 ↪ ' ', [])])
480             regions_str = "->".join([f"R{r+1}" for r in route.get('
481                 ↪ regions', [])])
482             f.write(f"    {i+1}. {route.get('type', 'unknown')}路线 ({
483                 ↪ route.get('config', 'unknown')}配置)\n")
484             f.write(f"        景点: {spots_str}\n")
485             f.write(f"        区域: {regions_str}\n")
486             f.write(f"        成本: {route.get('cost', 0):.1f}元, 时间: {
487                 ↪ route.get('time', 0):.1f}分钟\n")
488             f.write(f"        游客数: {route.get('tourists', 0)}, 满意度:
489                 ↪ {route.get('satisfaction', 0):.3f}\n\n")
490
491         f.write("\n")
492
493     if __name__ == "__main__":
494         main()
```