

环境类模型

The Interdisciplinary Contest in Modeling (ICM)
Problem E (Sustainability)

龙明策 研究员

上海交通大学 环境科学与工程学院

2025年12月19日

主要内容

1. 环境类模型概述
2. 环境类模型建模方法
3. 环境类模型赛题分析

1. 环境类模型概述

ICM-E题

- 1999年：开始设立交叉学科建模竞赛（ICM），环境类赛题
- 2016年：ICM开始设置E题（Sustainability，可持续性）
- 冠名奖（Rachel Carson奖）：Rachel Carson是美国海洋生物学家、作家，著作《寂静的春天》（1962年）引发公众对环保议题的关注



Rachel Louise Carson
1907.5.27—1964.4.14



讲述以DDT为代表的杀虫剂广泛使用，
给人们生存环境所造成不可逆转的危害

Sustainability

口联合国发布的17项全球可持续发展目标



全球环境治理
解决可持续性
发展的问题

所有赛题均与可持续发展目标相关联!

<https://dashboards.sdgindex.org/>

2016	2017	2018	2019	2020
Are we heading towards a thirsty planet?	Sustainable Cities Needed!	How does climate change influence regional instability?	What is the Cost of Environmental Degradation?	Drowning in Plastic
我们正在走向一个干渴的星球吗？	需要可持续发展的城市！	气候变化如何影响地区不稳定性？	环境退化的代价是什么？	淹没在塑料之中
2021	2022	2023	2024	2025
Re-Optimizing Food Systems	Forestry for Carbon sequestration	Light Pollution	Sustainability of Property Insurance	Making Room for Agriculture
食物系统再优化	用于碳封存的林业	光污染	财产险的可持续性	为农业让路

年份	题目	任务要求	解题思路
2016	Are we heading towards a thirsty planet? 我们正在走向一个干渴的星球吗?	建模衡量 区域水资源和供水能力 , 选择缺水国家进行分析预测, 并给出干预方案	<ul style="list-style-type: none"> □ 综合分析人口增长、经济发展、气候变化、地理环境等因素对供水的影响, 建立水资源短缺的评估模型、水流量系统模型等, 选择案例分析区域供水能力并给出方案建议。 □ 多元线性回归、系统动力学、灰色关联分析、粒子群优化算法等建模方法。
2017	Sustainable Cities Needed! 需要可持续发展的城市!	选两个中型城市, 定义 智能增长指标 , 分析城市现状, 依原则制定并评估未来可持续发展计划、排序各种促进增长的措施	<ul style="list-style-type: none"> □ 通过对城市经济、社会、环境等数据的分析, 建立如三维基线立方体模型、SSG 度量体系等综合评价模型, 以衡量城市智能增长程度。 □ 主成分分析、熵权法、灰色关联分析、支持向量机等建模方法。
2018	How does climate change influence regional instability? 气候变化如何影响地区不稳定性?	构建模型评估 国家脆弱性和气候变化影响 , 对脆弱指数排名前10的某国家, 分析气候变化如何加剧脆弱性、干预措施及成本、模型适用尺度的评估	<ul style="list-style-type: none"> □ 通过分析经济、社会、政治、环境等多种指标与气候变化影响因素, 建立了如 SPEC、PSA、FCI - CCIC 等模型, 确定国家脆弱性及气候影响, 找出关键指标并给出方案建议。 □ 层次分析法、熵权法、模糊聚类分析、灰色关联分析、概率模型等建模方法。

年份	题目	任务要求	解题思路
2019	What is the Cost of Environmental Degradation? 环境退化的代价是什么？	构建 生态服务价值评估模型 ，对不同规模的土地利用项目进行成本效益分析、评估模型有效性、模型对土地利用项目规划与管理的指导意义	<ul style="list-style-type: none"> □ 通过分析土地利用方式变化对生态系统服务的影响，构建生态服务价值评估模型，综合计算生态服务价值及项目成本效益，对不同规模项目进行成本效益分析，验证模型稳定性并提供决策建议。 □ 层次分析法、熵权法、支持向量机、BP 神经网络、成本效益分析法、模糊主成分分析法等建模方法。
2020	Drowning in Plastic 淹没在塑料之中	建模估算 一次性塑料废弃物 安全处理量、探讨减至安全水平的程度、设定全球最低可实现的目标、分析策略的影响与公平问题	<ul style="list-style-type: none"> □ 通过分析塑料废弃物的来源、处理方式、影响因素等，构建塑料生产 - 废物 - 危害模型、一次性塑料废弃物预测模型等，探讨塑料废弃物减少程度、设定最低可实现塑料废弃物水平的目标、并针对公平性问题提出解决方案。 □ 多元时间序列分析、灰色 - 费尔哈斯模型、层次分析法、熵权法等建模方法。
2021	Re-Optimizing Food Systems 食物系统再优化	开发 按需调整优化的食品系统模型 ，新系统的有效时间、效益、成本，分析问题、并应用于一个发达国家和一个发展中国家，讨论其扩展性与适应性	<ul style="list-style-type: none"> □ 通过分析食品生产、运输、分配等环节及相关环境、社会、经济指标，建立了生产模型、公平分配模型、环境 - 公平 - 经济模型等，利用模型分析并预测不同国家的食品系统优化方向及成效。 □ BP神经网络、Logistic模型、熵权法、成本效益分析等建模方法。

年份	题目	任务要求	解题思路
2022	Forestry for Carbon sequestration 用于碳封存的林业	开发用于森林管理的 碳封存与决策模型 ，应用模型确定砍伐森林的适宜量、说明适量砍伐的必要性	<ul style="list-style-type: none"> □ 通过分析森林及林产品碳储量、森林生态功能价值，建立森林碳储量模型、森林 - 林产品碳封存模型、碳封存 - 经济价值 - 生态保护模型等，分析预测森林碳储量、并制定管理计划与过渡策略。 □ BP 神经网络、Logistic 模型、多目标规划、层次分析法、熵权法等建模方法。
2023	Light Pollution 光污染	开发 光污染风险指标 ，应用于保护区、乡村社区、郊区社区、城市社区四种地点，描述三种干预策略、并选其中的两个地点确定最有效策略及影响	<ul style="list-style-type: none"> □ 通过分析光污染对人类、生态、社会、能源等方面的影响，建立了光污染风险评估模型、光污染系统模型、ESE 模型等，应用于不同区域的风险评估、并确定不同区域的最优干预策略。 □ 熵权法、层次分析法、K - means 聚类算法、Logistic 模型、ARIMA 模型等建模方法。
2024	Sustainability of Property Insurance 财产险的可持续性	开发 保险承保模型 并选择两个不同地区进行展示分析，调整该模型用于评估某地区扩大建设的可行性，建立 建筑保护模型 ，选择历史地标评估其价值并给出投保建议	<ul style="list-style-type: none"> □ 通过分析极端天气对保险赔付的影响、建筑的价值与风险等，建立了保险定价与决策模型、建筑保护模型等，通过模型优化求解，为保险企业、开发商及社区提供应对极端天气风险的策略。 □ 风险评估模型、多目标优化模型、MGWR模型、EWM – TOPSIS、层次分析法等建模方法。

年份	题目	任务要求	解题思路
2025	Making Room for Agriculture 为农业让路	针对森林生态到农业生态系统的食物网重构，开发 生态系统模型 ，应用模型量化农业周期与化学品（如杀虫剂、除草剂）影响、考虑物种回归和交互作用、评估有机农业干预方案的效果，为生态转型决策提供依据。	<ul style="list-style-type: none"> □ 通过分析森林转农田后的物种、化学物质及能量流动的动态变化，建立食物网扩展、稳定性评估和多准则效益分析的系列模型，用于模拟生态系统演变、评估物种回归与化学物质移除的效果，为有机农业转型提供量化决策依据。 □ Lotka-Volterra模型、Logistic增长模型、微分方程数值求解、层次分析法、熵权法、多目标规划、模糊综合评价等建模方法。

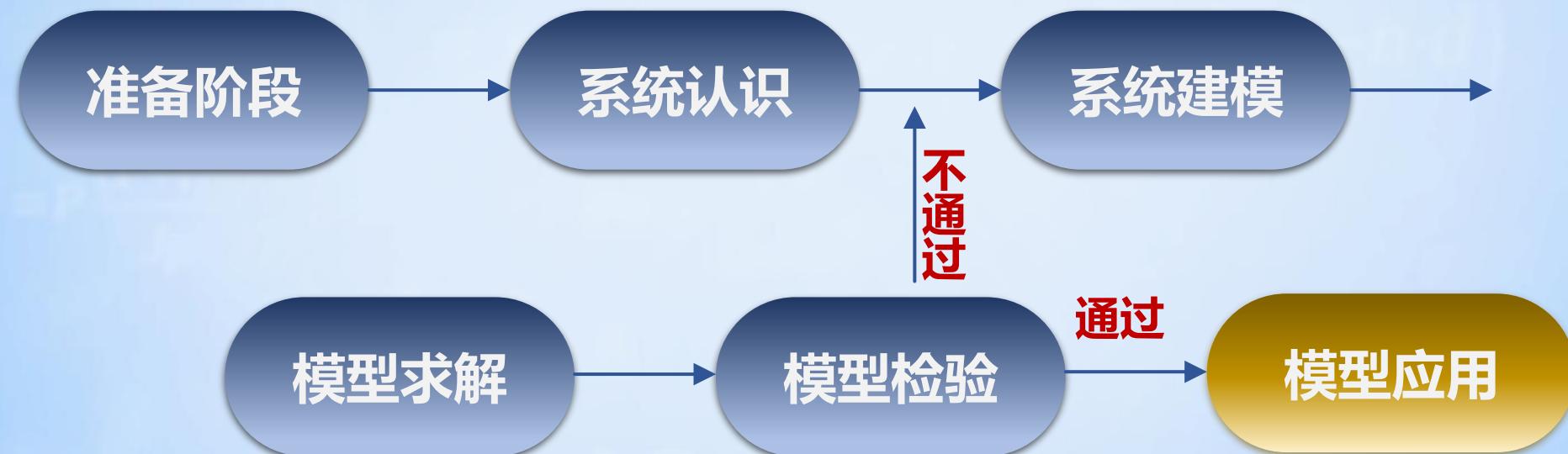
环境类模型问题

口 环境类数学建模问题特点

- 问题复杂全面：环境系统数据的统计分析、趋势预测、评价与选优（建立指标体系）、管理决策、系统优化规划等
- 交叉特色鲜明：管理科学、社会科学、经济学、生态学、农业、林业.....
- 领域广泛、大尺度（城市、国家、区域）
- 多因素、多变量、非线性、随机性（不确定性）
- 多目标：成本、效益、质量等同时寻优
- 动态的：随时间变化、长周期、开放（与系统外部环境的关系）

解题的总体思路

建模过程：五个步骤



解题的总体思路

1. 问题分析与拆解

从“复杂抽象问题”到“可量化的子问题”

核心逻辑：将宏观抽象问题拆解的四个步骤

“现状评估→因素分析→方案设计→效果预测”

案例示例：

- 2016 ICM：将水稀缺问题拆解为“物理稀缺（资源总量）+ 经济稀缺（获取能力）”
- 2019 ICM：将土地利用拆解为“短期经济收益 + 长期生态成本 + 代际发展价值”
- 2022 ICM：将投资组合拆解为“收益预测→风险量化→资产配置→动态调整机制”

2. 指标体系

构建“全维度+可计算”的评估框架

核心逻辑：指标应覆盖核心维度（经济维度、社会维度、环境维度、文化维度等），考虑客观性与数据可获得性

案例示例：

- 2017 ICM：引入城市智能增长指数，包含5个一级指标和可量化的10个二级指标
- 2019 ICM：引入土地生态价值指数，包含土地产出经济收益、生物多样性维持价值等8个二级指标
- 2022 ICM：引入投资绩效指数，包括年化收益率、盈亏率、风险系数等10个二级指标

解题的总体思路

3. 模型建立与验证

“基础模型 + 融合优化”，避免过度复杂

核心逻辑：优先选择经典模型（评价类、预测类、规划类），根据问题特征进行组合优化

敏感性分析 + 误差检验，强化模型实用性

案例示例：

- 2016 ICM：系统动力学模型+ 粒子群优化
- 2019 ICM：替代成本法 + 层次分析法 (AHP) + 成本效益矩阵
- 2022 ICM：时间序列预测 + 多目标线性规划
- 2023 ICM：熵权法+层次分析法+微分方程

4. 模型应用与案例分析

“模型适配 + 假设校准修正”

核心逻辑：根据模型假设、主要参数和案例特征，提出干预措施，或调整优化模型

案例示例：

- 2016 ICM：印度案例，考虑农业占用水 92% 的现状，重点优化种植作物类型
- 2023 ICM：深圳湾案例，结合滨海湿地特性，设计 “社会化参与”的保护机制
- 2024 ICM：发展中国家案例，结合财政有限的现状，优先选择低成本可再生能源技术

解题的总体思路

1 Introduction	1.1 Background.....	1.1 Problem Background	1.1 Background.....	1.1 Problem Background	1.1 Problem Background
1.2 Problem Statement and Analysis	1.2 Our Work.....	1.2 Our work.....	1.2 Our Work.....	1.2 Restatement of the Problem	1.2 Restatement of the Problem
2 Assumption and Symbol Explanation	2.1 Assumption.....	2. Assumptions and Justifications.....	2. Assumptions and Justification.....	2 Assumptions and Explanations	2 Assumptions and Explanations
2.2 Symbol Explanation.....					
3.Task 1	3.1 Data Pre-processing.....	3. Food System Model.....	4 Forest System Carbon Sequestration Prediction Mod	3 Notations	3 Notations
3.2 Primary Indicator System.....	3.2 Primary Indicator System.....	4.1 Food System Activities	4.1 Carbon stock changes in forest systems.....		
3.3 Weighting Models of Evaluation Indicators	3.3 Weighting Models of Evaluation Indicators	4.2 Food System Outcomes Index	4.1.1 Characteristics of temporal changes in forest		
3.4 Comprehensive Evaluation Index		4.3 Weights of indicators.....	4.1.2 Forecast of carbon stock in forest system.....		
3.5 Metric of Smart Growth.....		4.4 Model verification.....	4.2 Forest management plan selection.....		
4 Task 2	4.1 Growth Plan of Selected Cities	4.5 Food system goals index	5 Management Plans Balancing The Values of The For	4 Task 1: Regional Light Pollution Risk Level Metric	4 Task 1: Regional Light Pollution Risk Level Metric
4.2 City Index Evaluation			5.1 Forest value balance decision model.....	4.1 Problem Description and Analysis	4.1 Problem Description and Analysis
4.3 Analysis of Current Growth Plan.....			5.1.1 Objectives.....	4.2 Indicator selection	4.2 Indicator selection
5 Task 3	5.1 Our Smart Growth Plan(SGP)	5 Answers to Questions	5.1.2 Constraints.....	4.3 Light Pollution Risk Evaluation Model based on EWM-TOPSIS	4.3 Light Pollution Risk Evaluation Model based on EWM-TOPSIS
5.2 The Prediction Models for Evaluation		5.2 Benefits and costs Analysis.....	5.2 Scope of application of the plan and the premise of	4.3.1 EWM-TOPSIS	4.3.1 EWM-TOPSIS
5.3 The Evaluation of Our Smart Growth Plan.....		5.3 Applied to Japan and India.....	5.3 Transition point analysis.....	4.3.2 Model establishment	4.3.2 Model establishment
6 Task 4	6.1 Ranking the Individual Initiatives.....	6 Intervention plans	5.3.1 Genetic algorithm for solving the optimal sol	5 Task 2: Metric Application and Result Interpretation	5 Task 2: Metric Application and Result Interpretation
6.2 Comparing the Initiatives of Two Cities.....		6.1 Resilience.....	5.3.2 Transition point analysis of different tempera	5.1 Data Preparation	5.1 Data Preparation
7 Task 5	7.1 The Adaptable Plan For Pittsburgh.....	6.2 Equity	5.3.3 Transition point analysis of timber forests an	5.2 Metric Application and Result Interpretation	5.2 Metric Application and Result Interpretation
7.2 The Adaptable Plan For Ningguo		6.3 Sustainability.....	6. Forest Management Plan for Tien Shan.....	6 Task 3: Intervention Strategies and Specific Actions	6 Task 3: Intervention Strategies and Specific Actions
8. Sensitivity Analysis	8.1 Strengths	7 Sensitivity Analysis.....	6.1 Carbon stock and management plan of Tien Shan...	6.1 Strategy 1: Improve the light source	6.1 Strategy 1: Improve the light source
9. Strengths and Weaknesses	8.2 Weaknesses	8. Strengths and Weaknesses.....	6.2 Transition strategy to extend the 10-year cutting int	6.2 Strategy 2: Lower the lighting intensity	6.2 Strategy 2: Lower the lighting intensity
9.1 Strengths		8.1 Strengths.....	7. Sensitivity Analysis.....	6.3 Strategy 3: Optimize regional lighting layouts	6.3 Strategy 3: Optimize regional lighting layouts
9.2 Weaknesses		8.2 Weaknesses.....		7 Task 4: Strategy Determination and Impacts Evaluation	7 Task 4: Strategy Determination and Impacts Evaluation
References	References	9 Non-technical Newspaper Article.....	6. Forest Management Plan for Tien Shan.....	7.1 Strategy Implementation and Impacts Evaluation	7.1 Strategy Implementation and Impacts Evaluation
		References.....	6.1 Carbon stock and management plan of Tien Shan...	7.2 Strategy Determination	7.2 Strategy Determination
			6.2 Transition strategy to extend the 10-year cutting int	8 Sensitivity Analysis	8 Sensitivity Analysis
			7. Sensitivity Analysis.....	8.1 Evaluation model sensitivity	8.1 Evaluation model sensitivity
				8.2 Strategy model sensitivity	8.2 Strategy model sensitivity
			8. Strengths and Weaknesses.....	9 Strength and Weakness	9 Strength and Weakness
			8.1 Strengths.....	9.1 Strength	9.1 Strength
			8.2 Weaknesses.....	9.2 Weakness	9.2 Weakness
			9 Non-technical Newspaper Article.....	10 Conclusion	10 Conclusion
				11 Flier	11 Flier
				References	References
					24

- 问题分析与假设定义
- 模型构建与参数估计
- 方案设计与效果预测
- 结论与展望
- 指标体系与权重确定
- 模型验证与案例分析
- 灵敏度分析与模型优缺点

2. 环境类模型建模方法

2.1 预测类方法-线性回归

案例：2016 ICM E题O奖论文52831

利用线性回归构建数学模型，用于预测未来15年（至2031年）水资源安全状况

筛选8个关键预测变量：人口增长率P、人均GDP G、人均水资源供给S、大陆区域C_i (五大洲)、电力接入率E、空气污染 (PM2.5) A、卫生设施覆盖率San、纬度L。

$$W = \beta_0 + \beta_1 P + \beta_2 G + \beta_3 S + \beta_4 C + \beta_5 E + \beta_6 A + \beta_7 San + \beta_8 L$$

其中 W 为可获得改善水源的人口比例。

变量、 β 值和p值 (变量在 p<0.05 水平上显著)

Variable	Coefficient	p-value
Population Growth	-1.723	0.01980
GDP Per Capita	9.826x10 ⁻⁵	0.03320
Water Supply Per Capita	1.741x10 ⁻⁵	0.20258
Continent: AS	-2.838	0.31205
Continent: EU	2.537	0.55940
Continent: NA	-0.4585	0.88885
Continent: OC	-17.11	0.00808
Continent: SA	-6.712	0.07994
Access to Electricity	0.2698	1.59x10 ⁻⁶
Air Pollution	0.1713	0.03735
Sanitation	0.1615	0.00509
Latitude	-0.1608	0.00701

印度案例：采用亚洲(AS)对应参数进行线性回归预测

- β 值：采用2016年前的数据进行参数估计；
- 变量值：2016年后数据采用自回归方法预测
- 由方程计算2012-2031年印度水资源安全状况 (W值)

Table 4. Access to water (% of population) in India from 2012 to 2031

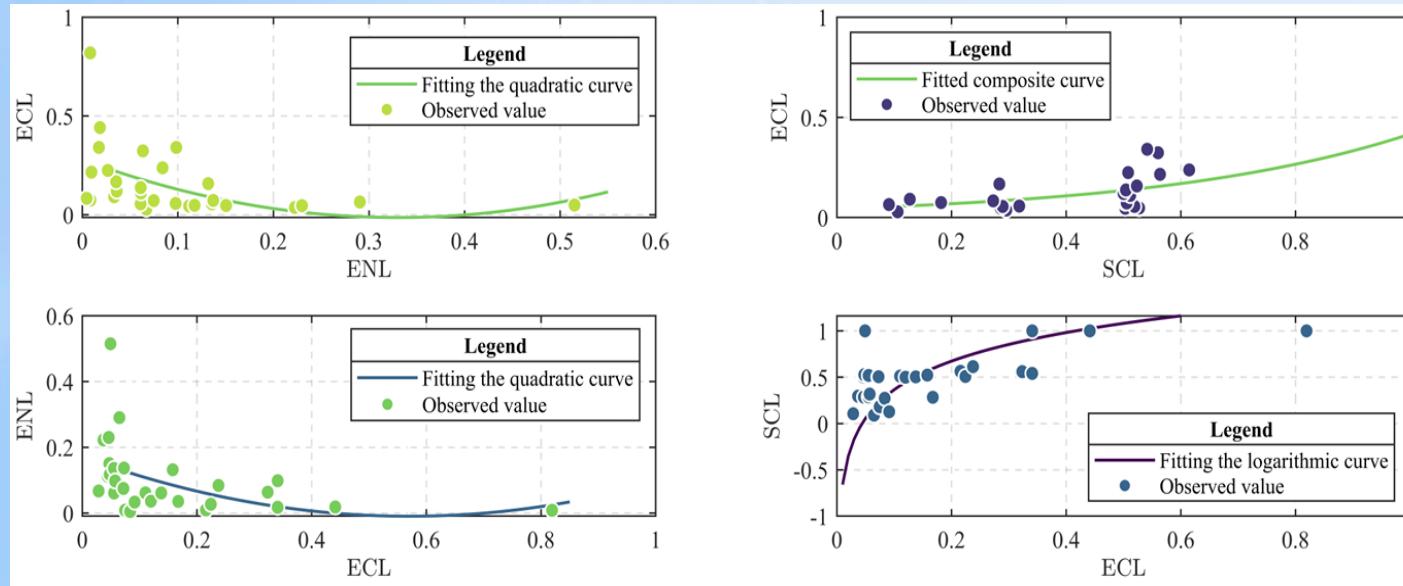
Year	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Access to Water	84.2	84.8	85.5	85.9	86.5	87.2	87.5	88.2	88.6	89.0
Year	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Access to Water	89.7	90.1	90.5	91.2	91.6	91.9	92.8	92.9	93.3	94.4

2.2 预测类方法-非线性回归

案例：2023 ICM E题O奖论文2314817

在光污染评估中，经济(ECL)、社会(SCL)、生态(ENL)三个子系统相互影响、相互制约

通过非线性回归分析，得到两两子系统光污染风险水平之间的定量关系



标号	曲线类型	方程式
A	二次函数曲线	$ECL = 0.279 - 1.774 \times ENL + 2.686 \times ENL^2$
B	指数曲线	$ECL = 0.044 \times 9.472^{SCL}$
C	二次函数曲线	$ENL = 0.171 - 0.634 \times ECL + 0.556 \times ECL^2$
D	对数曲线	$SCL = \log_{9.472}(ECL)$

- ECL (Economic Risk Level) :** 经济系统光污染风险水平。计算经济系统总光污染量 EC (基于人口、产业结构、人均光污染排放)；对 EC 值标准化处理，得到 ECL。
- SCL (Social Risk Level) :** 社会系统光污染风险水平。计算受光污染影响的地区比例 SC (基于不同土地类型的光强度阈值)；对 SC 标准化处理，得到 SCL。
- ENL (Ecological Risk Level) :** 生态系统光污染风险水平。计算受光污染影响的生物总数 EN (基于不同生物的光敏感阈值)；对 EN 标准化处理，得到 ENL。

2.3 预测类方法——微分方程

案例：2020 ICM E题O奖论文2021103

构建海鸟种群的动态微分方程模型，量化塑料污染对海洋生态系统的长期影响

海鸟是海洋生态系统的重要组成部分，并对塑料污染高度敏感，将海鸟总数量 $S(t)$ 作为评估海洋环境健康状况的**生物指标**

构建微分方程模型描述海鸟种群 S 变化规律：

假设全球塑料生产遵循当前趋势，预测的海鸟种群数量

$$\frac{dS}{dt} = (b - d_n)S - d_p S P_{trend}(t)$$

$S(t)$ ：海鸟的总数量； b ：海鸟出生率；

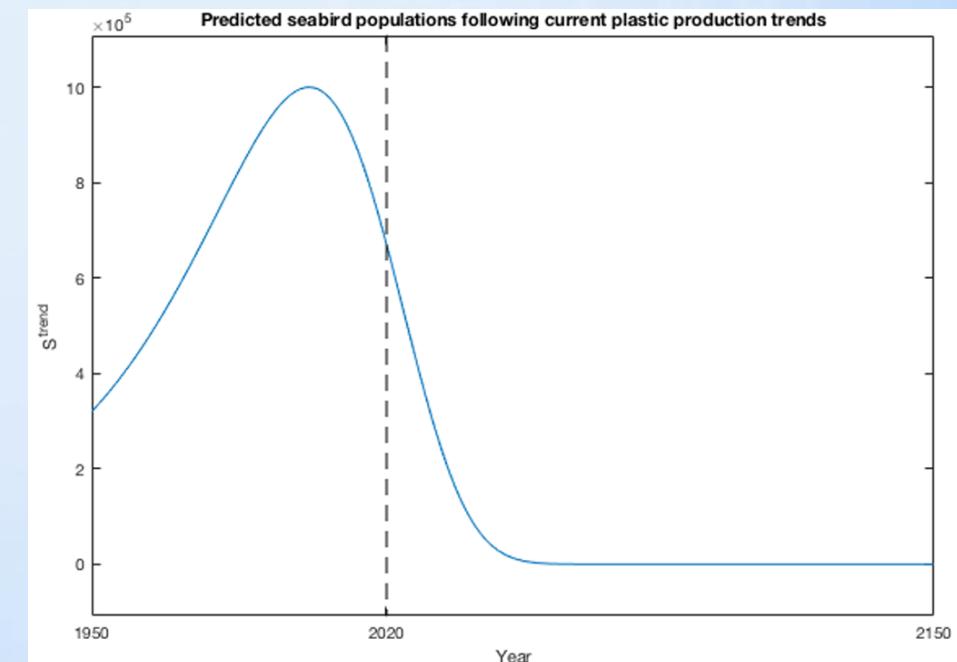
d_n ：自然海鸟死亡率；

d_p ：每兆吨塑料导致死亡的海鸟数量；

$P_{trend}(t)$ 是全球累计产生的塑料总量

求解微分方程：

$$S(t) = S(0)\exp((b - d_n)t - d_p \int_0^t P(t') dt')$$



若维持当前塑料生产：2056年海鸟将濒危 (<2500只)，2062年则极危

2.4 预测类方法——时间序列分析

(2005高教社杯全国大学生数学建模竞赛题目)

例1：水是人类赖以生存的资源，保护水资源就是保护人类自己，对我国大江大河水资源的保护和治理是重中之重。专家们呼吁：“以人为本，建设文明和谐社会，改善人与自然的环境，减少污染。”长江是我国第一、世界第三大河流，长江的污染程度日趋严重，已引起了相关政府部门和专家们的高度重视。2004年10月，由全国政协与中国发展研究院联合组成“保护长江万里行”考察团，从长江上游宜宾到下游上海，对沿线21个重点城市做了实地考察，揭示了一幅长江污染的真实画面，其污染程度让人触目惊心。

下表是1995~2004年长江流域水质报告，给出了长江干流各种水质类型的占比。假如不采取更有效的治理措施，依照过去10年的统计数据，对长江未来水质污染发展趋势做出预测分析。

年份	I类	II类	III类	IV类	V类	劣VI类
1995	24.7	35.7	30.0	2.9	6.7	0.0
1996	25.6	29.5	44.1	0.0	0.8	0.0
1997	14.6	27.6	44.5	13.3	0.0	0.0
1998	10.3	20.1	69.6	0.0	0.0	0.0
1999	0.0	56.4	30.8	5.5	7.3	0.0
2000	9.5	35.9	29.1	25.4	0.0	0.0
2001	2.3	30.1	35.3	18.7	7.8	5.8
2002	3.1	35.4	30.3	17.4	5.1	8.7
2003	8.0	17.8	68.0	1.5	4.6	0.0
2004	1.1	25.8	40.6	15.7	7.8	9.0

2.4 预测类方法——时间序列分析

□ 移动平均法是一种简单平滑数据处理技术，可以消除影响，显示出事件的发展方向与趋势，然后依趋势线分析预测序列的长期趋势。

移动平均法：根据时间序列资料、逐项推移，依次计算包含一定项数的时序平均值，以反映长期趋势。

三项移动平均：

$$y_i = \frac{y_{i-1} + y_i + y_{i+1}}{3} \quad (i = 1, 2, \dots, n - 1)$$

经过多次循环后，得到 $j = 1, 2, 3, 5, 6$ 时的线性回归方程为：

$$y_1 = -1.5824t + 18.4900$$

$$n = 10$$

取余法求 y_4

$$y_2 = -0.2119t + 32.6350$$

$$n = 25$$

$$y_4 = 100 - y_1 - y_2 - y_3 - y_5 - y_6$$

$$y_3 = 0.0229t + 42.5999$$

$$n = 36$$

$$y_5 = 0.4330t + 1.4117$$

$$n = 7$$

$$y_6 = 0.6492t - 1.3539$$

$$n = 6$$

预测中出现了较多0值，结果舍弃。

2.4 预测类方法——时间序列分析

将可饮用水，即 I、II、III类水综合考虑；
由于IV类水没有符合要求的线性回归方程，
采用取余法计算。

$$z_1 = -2.0208t + 95.0882$$

$$n = 8$$

$$z_5 = 0.4330t + 1.4117$$

$$n = 7$$

$$z_6 = 0.6492t - 1.3539$$

$$n = 6$$

$$z_4 = 100 - z_1 - z_5 - z_6$$

令 $t=11, 12, \dots, 20$ ，根据上述 z_j 的表达式，计算预测未来10年水质情况：

年份	z_1	z_4	z_5	z_6
2005	72.86	15.18	6.17	5.79
2006	70.84	16.12	6.61	6.44
2007	68.82	17.06	7.04	7.09
2008	66.80	17.80	7.47	7.73
2009	64.78	18.93	7.91	8.38
2010	62.76	19.87	8.34	9.03
2011	60.73	20.81	8.77	9.68
2012	58.71	21.75	9.20	10.33
2013	56.69	22.69	9.64	10.98
2014	54.67	23.63	10.07	11.63

- 口 可饮用水呈逐年递减的趋势，劣类水比例快速增长
- 口 长江流域水质呈整体下降的趋势，需要及时治理

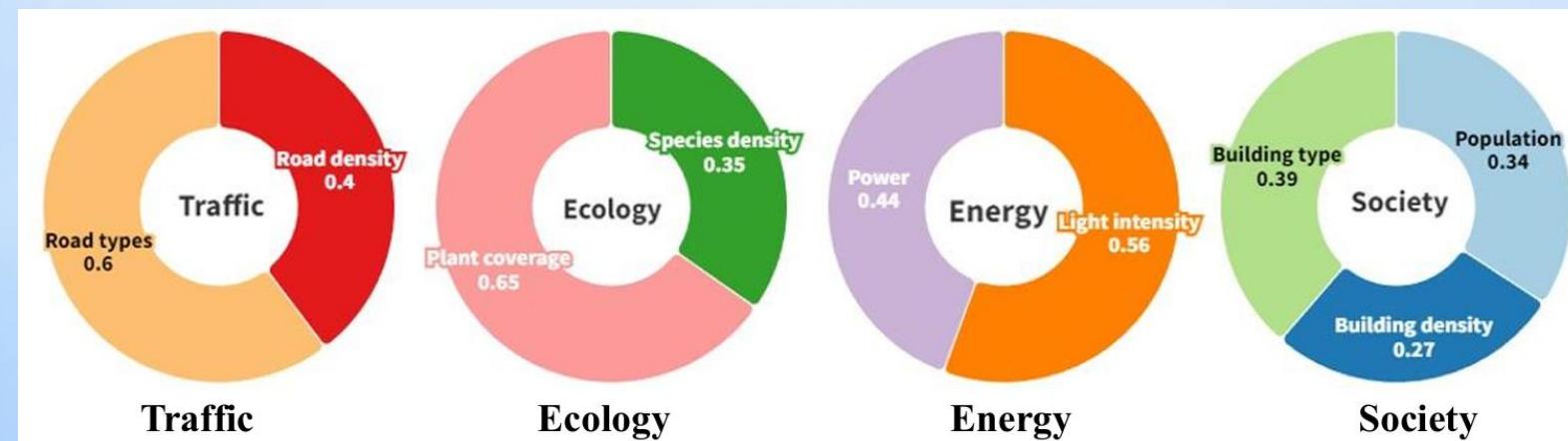
2.5 评价类方法-熵权法 (EWM)

案例：2023 ICM E题O奖论文2314354

利用熵权法确定光污染系统模型中各指标权重，构建多指标综合评价模型。

筛选了 4 个一级指标：交通、生态、能源、社会，下有9个二级指标。

Traffic	Ecology	Energy	Society
Road density: 12.93% Road types: 8.50%	Species density: 5.52% Plant coverage: 10.38%	Light intensity: 18.99% Power: 15.15%	Population density: 9.81% Building density: 7.73% Building type: 10.96%



各子指标权重占比分布图

2.6 评价类方法-层次分析法 (AHP)

案例: 2019 ICM E题O奖论文1902917

通过AHP方法, 将多维度、难量化的长期环境成本纳入土地利用项目的成本效益分析中。

① 建立层次模型

目标层: 总成本 C (长期)

准则层: 经济成本 C_1 和环境成本 C_2

方案层: 资本投入 C_{12} ; 生物多样性锐减 C_{21} 、

空气质量恶化 C_{22} 、土壤质量恶化 C_{23} 、

水质恶化 C_{24} 、人类健康影响 C_{25}

② 比较5个环境指标的相对重要性, 建立判断矩阵

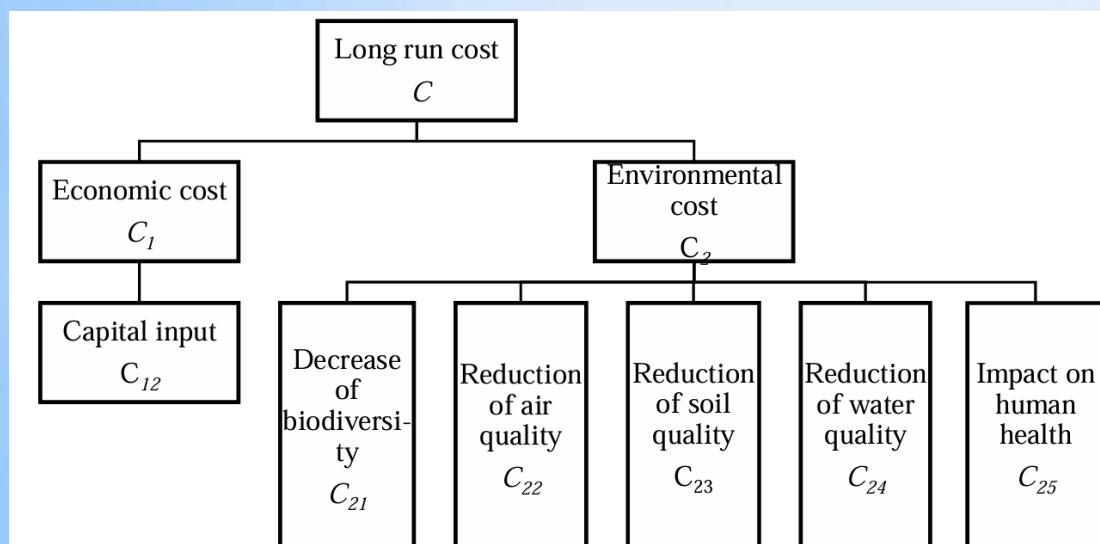
$$J_0 = \begin{bmatrix} 1 & 5/3 & 1 & 5/2 & 5/6 \\ 3/5 & 1 & 3/5 & 3/2 & 1/2 \\ 1 & 5/3 & 1 & 5/2 & 5/6 \\ 2/5 & 2/3 & 2/5 & 1 & 1/3 \\ 6/5 & 2 & 6/5 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

③ 权重计算

- 矩阵特征向量并归一化, 得到权重 $W_1 = \left[\frac{5}{21}, \frac{1}{7}, \frac{5}{21}, \frac{2}{21}, \frac{2}{7} \right]$
- 经济成本与环境成本同等重要, 即 C_1 、 C_2 权重各占0.5;
则组合权重向量 $W = \left[\frac{1}{2}, \frac{5}{42}, \frac{1}{14}, \frac{5}{42}, \frac{1}{21}, \frac{1}{7} \right]$

各指标权重:

资本投入 C_{12} : 0.5; 生物多样性锐减 C_{21} : 0.119;
空气质量恶化 C_{22} : 0.071; 土壤质量恶化 C_{23} : 0.119;
水质恶化 C_{24} : 0.048 ; 人类健康影响 C_{25} : 0.143



2.7 规划类方法-线性规划

案例：2022 ICM E题O奖论文2203489

建立线性规划模型：在满足资源约束的前提下，使得所有森林产品在其生命周期内的总碳封存量最高。

目标函数： $\max C_{sum} = \sum_t C_{hwp-t}$

C_{sum} ：森林产品在**全部统计时间内的总碳封存量**；

C_{hwp-t} ：第 t 年森林产品的碳储存量

约束条件：

所有类型产品的木材使用总量不超过可用总量：

$$\sum_{ty=1}^3 \sum_j V_{ty,j} \leq V_{products}$$

各类产品的木材使用量非负： $V_{ty,j} \geq 0$

$V_{ty,j}$ ：用于第 ty 类产品的树种 j 木材体积，

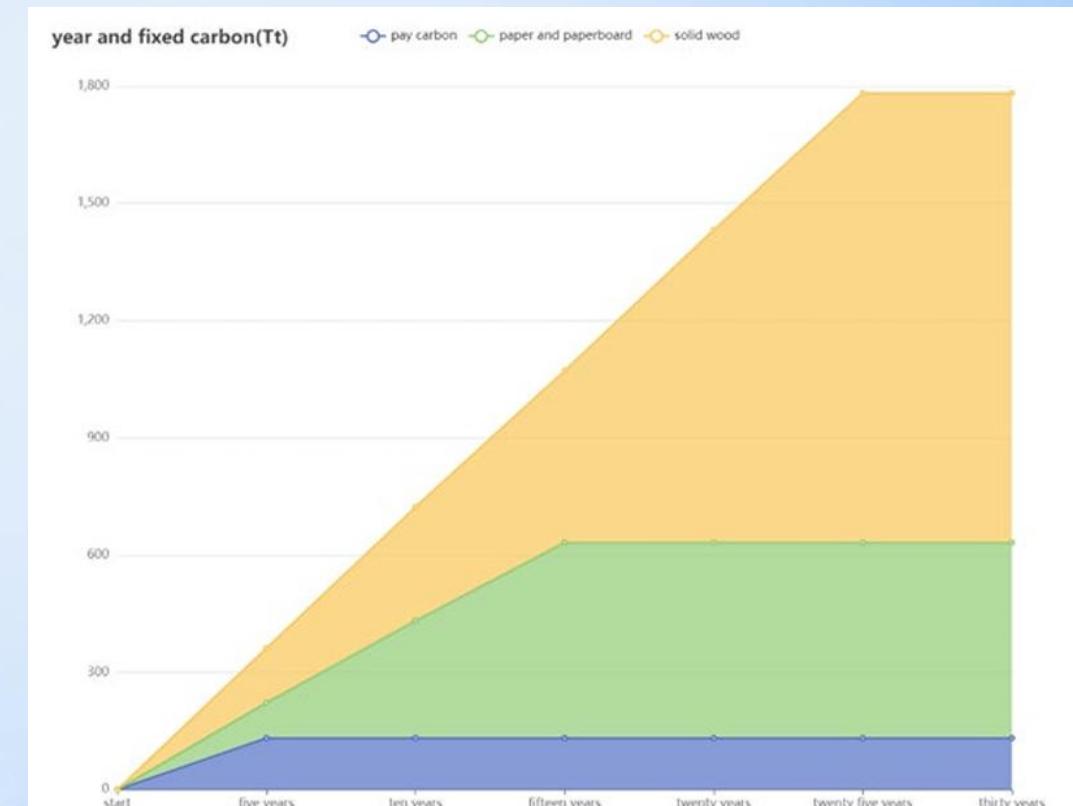
$ty = 1$, 燃料木材; $ty = 2$, 纸和纸制品; $ty = 3$, 固体木材产品

$V_{products}$ ：可用木材产品的总体积上限。

通过模型求解与数据分析得出结论：

1. 固体木材产品的碳储存贡献最大

2. 提高木材产品的使用寿命能显著增强碳汇效果



2.8 规划类方法-非线性规划

案例：2017 ICM E题O奖论文67671

通过建立**非线性规划模型**, 优化七类公共服务预算的分配, 使得城市的**智能增长指数最高**

目标函数: $\max SGI(B) = \frac{\cos(\theta(B)) + \mu|\Delta S(B)|}{(1+\sqrt{3}\mu)}$

- $\cos(\theta)$: 城市发展向量和理想向量 $(1,1,1)$ 夹角的余弦值, 衡量发展方向的正确性;
- $|\Delta S|$: 发展变化向量的模长, 衡量发展速度;
- μ : 权衡参数($\mu > 1/\sqrt{3}$ 重速度, $\mu < 1/\sqrt{3}$ 重方向)

约束条件:

- 预算总额约束: $\sum B_i = 100\%$ (总预算全部分配)
- 非负约束: $B_i \geq 0$ (各项预算非负)
- 正向发展约束: $\Delta S \geq 0$ (各项指标不倒退)

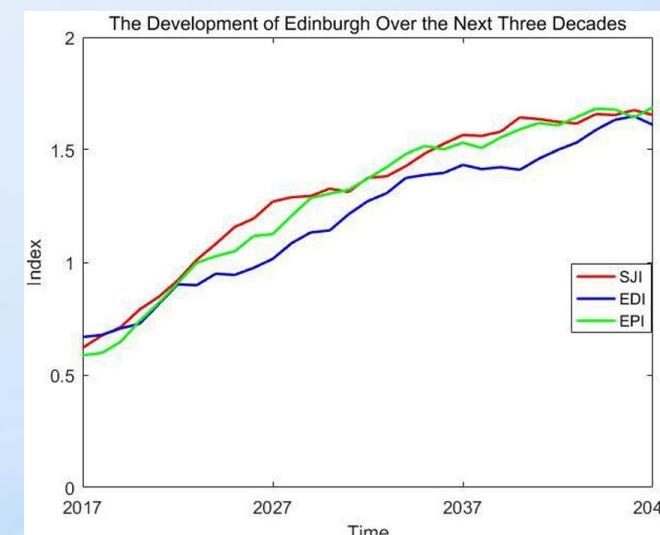
通过模型求解与数据分析得出以下结论:

1. 智能增长中, **环境服务预算调整潜力最大**
2. 预算分配的**长期持续性**对智能增长效果有累积增强作用

分析结果

Table 7. the current budget plan and optimal budget plan(% of total budget) of Edinburgh

Term	Factor	Current plan(%)	Optimal plan(%)	Change Δ (%)
B1	transport service	0.9887	8.0097	7.0210
B2	social service	36.6694	30.0526	-6.618
B3	environmental service	7.8152	14.7184	6.9032
B4	education service	41.1969	31.1592	-10.0377
B5	health service	3.8814	7.6051	3.7237
B6	development service	1.8227	7.9766	6.1539
B7	other	7.6256	0.4785	-7.1471
Total	All	100	100	0



衡量城市智能增长的指标

- 社会正义指数(SJI)
- 经济发展指数(EDI)
- 环境绩效指数(EPI)

3. 环境类模型赛题分析

2016 ICM Problem E

Are we heading towards a thirsty planet?

我们正在走向一个干渴的星球吗？

1

真题分析

2

文章解析

3

方法总结

真题分析

Will the world run out of clean water? According to the United Nations, 1.6 billion people (one quarter of the world's population) experience water scarcity. Water use has been growing at twice the rate of population over the last century. Humans require water resources for industrial, agricultural, and residential purposes. There are two primary causes for **water scarcity**: **physical scarcity and economic scarcity**. Physical scarcity is where there is inadequate water in a region to meet demand. Economic scarcity is where water exists but poor management and lack of infrastructure limits the availability of clean water.

Many scientists see this **water scarcity problem** becoming exacerbated with **climate change and population increase**. The fact that water use is increasing at twice the rate of population suggests that there is another cause of scarcity – is it **increasing rates of personal consumption**, or **increasing rates of industrial consumption**, or **increasing pollution which depletes the supply of fresh water**, or what?

□ 背景：水资源短缺

1/4人口缺水，用水增长速率是人口增长速率的两倍

□ 两个基本原因

- 物理性缺水
- 经济性缺水

□ 气候变化、人口增长

□ 其他原因

- 个人消费率的增加
- 工业消费率的增加
- 污染的增加
-

Is it possible to provide clean fresh water to all? **The supply of water** must take into account **the physical availability of water**

(e.g., natural water source, technological advances such as desalination plants or rainwater harvesting techniques).

Understanding water availability is an inherently interdisciplinary problem. One must not only understand the **environmental constraints** on water supply, but also how **social factors** influence availability and distribution of clean water. For example, lack of adequate sanitation can cause a decrease in water quality. Human population increase also places increased burden on the water supply within a region.

When analyzing **issues of water scarcity**, the following types of questions must be considered. How have humans **historically exacerbated or alleviated water scarcity**? What are the **geological, topographical, and ecological reasons** for water scarcity, and how can we accurately predict future water availability? What is the potential for new or **alternate sources of water** (for example, desalination plants, water harvesting techniques or undiscovered aquifers)? What are the demographic and **health** related problems tied to water scarcity?

□ 水资源供应

- 水的可利用性是多学科交叉问题

□ 可用水资源

- 环境限制
- 社会因素
-

□ 水资源短缺问题

- 历史规律
- 地理原因
- 替代水源
- 人口与健康
-

任务要求

1. Develop a model that provides a measure of the ability of a region to provide clean water to meet the needs of its population. You may need to consider the dynamic nature of the factors that affect both supply and demand in your modeling process.

□ 建立一个水资源指标模型

- 供需因素的动态性质
-

衡量一个地区提供清洁水以满足其人口需求的能力

2. Using the UN water scarcity map pick one country or region where water is either heavily or moderately overloaded. Explain why and how water is scarce in that region. Make sure to explain both the social and environmental drivers by addressing physical and/or economic scarcity.

□ 选择一个水资源严重或中度短缺的国家

- 解释该地区水资源稀缺的原因和方式
- 考虑物理性/经济性缺水
- 解释社会和环境驱动因素

3. In your chosen region from Task 2, use your model from Task 1 to show **what the water situation will be in 15 years**. How does this situation impact the lives of citizens of this region? Be sure to incorporate the environmental drivers' effects on the model components.

4. For your chosen region, **design an intervention plan** taking all the drivers of water scarcity into account. Any intervention plan will inevitably impact the surrounding areas, as well as the entire water ecosystem. Discuss this impact and the overall strengths and weaknesses of the plan in this larger context. How does your plan mitigate water scarcity?

5. Use the intervention you designed in Task 4 and your model to **project water availability into the future**. Can your chosen region become less susceptible to water scarcity? Will water become a critical issue in the future? If so, when will this scarcity occur?

□ 预测所选地区15年后的水资源情况

- 如何影响居民生活
- 包含环境驱动因素及其对模型的影响

□ 为所选地区设计干预计划

- 考虑驱动因素
- 计划的影响分析
- 计划的优势与劣势
- 计划如何减缓缺水问题

□ 预测未来水资源可用性

- 对水资源的敏感度低
- 水资源未来是否会、以及何时会成为关键问题

问题小结

- 建立一个**水资源指标模型**衡量一个地区提供清洁水以满足其人口需求的能力
- 在没有干预的情况下某地区**水资源短缺情况分析**
- 干预措施、以及该措施对所在区域水资源可用性的影响



1

真题分析

2

文章解析

3

方法总结

O奖文章解析

建模假设

- 在线数据库的数据是**准确、可靠且相互一致的**：由于数据源是国际组织网站，因此可以合理地假设数据是高质量的。
- 在模型验证中，**所忽略的国家指标数据**对权重计算和结果影响不大。
- 所选地区（巴基斯坦）的发展**遵循全球各国的发展规律**：采用全球数据建模所确定的结果，能够用于预测所选地区的发展。
- 未来 15 年所选地区（巴基斯坦）**将拥有稳定的政治环境**：政治局势、恐怖主义活动和外交争端的影响可以忽略，因此可以预测水资源短缺的趋势。
- 总取水量包括**农业、工业和市政用水**：其他部门的取水量微不足道、且缺乏相应数据。

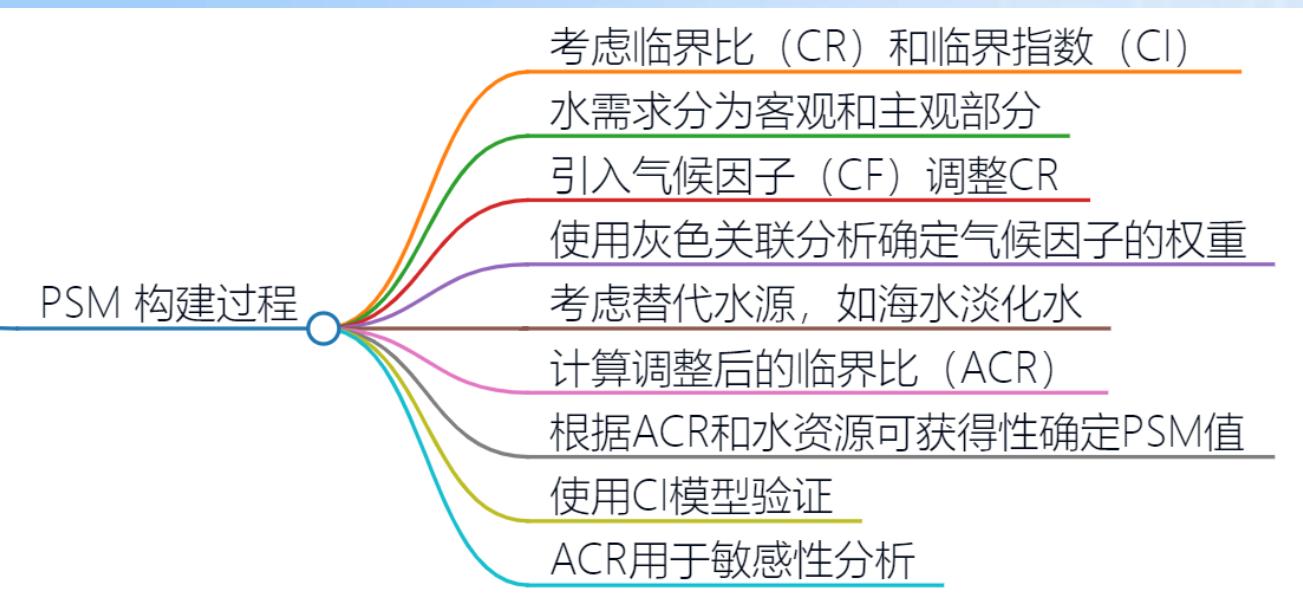
缩略语介绍

Abbreviation	Full Name
TSM	Total Scarcity Metric
PWS	Physical Water Scarcity
EWS	Economic Water Scarcity
PSM	Physical Scarcity Metric
ESM	Economic Scarcity Metric
HDI	Human Development Index
CR	Criticality Ratio
CI	Criticality Index
TRWR	Total Renewable Water Resources
IRWR	Internal Renewable Water Resources
CF	Climate Factor
WRI	World Resources Institute
IV	Interannual Variability
SV	Seasonal Variability
FO	Flood Occurrence
GRA	Grey Relational Analysis
ACR	Adjusted CR
WAPC	Water Availability per Capita
GRA	Grey Relational Analysis
GFM	Grey Forecasting Model

- **总缺水指标: Total Scarcity Metric (TSM)**, 衡量一个国家管理水资源短缺的能力。A larger TSM implies a weaker ability for a country to handle the balance between improved water supply and demand, and a harder work for it to solve its water problem.
- **物理性缺水指标: Physical water scarcity (PWS)**。It is the result of inadequate water resources to satisfy the demand or use of a country or a region conditioned on the full use efficiency of these resources.
- **经济性缺水指标: Economic water scarcity (EWS)**。It is the scarcity rising from the incomplete use of water in a country or a region.

TSM = PSM & ESM

物理性缺水指标(PSM)的构建



Per Capita Water Availability [m^3]	ACR Value			
	<0.8	0.8-1.2	1.2-1.6	>1.6
<2000	2	3	4	4
2000-10000	1	2	3	4
>10000	1	1	2	4

1-water surplus; 2-marginally vulnerable;

3-water stress;4-water scarcity.

Table 4: CI Value.

临界比 (CR)

CR

$$= \frac{\text{Total Water Withdrawal}}{\text{Total Renewable Water Resources(TRWR)}}$$

□ CR 越大，缺水问题越严重

□ CR指标的局限性：

- 使用更客观的参数取水量，而不是主观参数需水量，因此会失去用于衡量用水需求的信息
- 根据“用水”的定义，忽略了回流，而回流是“实际”用水的重要来源
- 其他因素，例如人口等没有被直接纳入其中。

物理性缺水指标(PSM)的构建



Per Capita Water Availability [m^3]	ACR Value			
	<0.8	0.8-1.2	1.2-1.6	>1.6
<2000	2	3	4	4
2000-10000	1	2	3	4
>10000	1	1	2	4

1-water surplus; 2-marginally vulnerable;
3-water stress;4-water scarcity.

Table 4: CI Value.

修正临界比 (ACR)

ACR

$$= \frac{\text{Total Water Withdrawal}}{\text{TRWR} + \text{Desalination Water Produced}} \times CF$$

$$CF = \omega_1 FO + \omega_2 IV + \omega_3 SV$$

CF: climate factor (气候因子, 0~5之间)

IV: Interannual Variability (年际变率)

SV: Seasonal Variability (季节性变率)

FO: Flood Occurrence (洪水发生率)

ω_i : 权重, 灰色关联度分析法

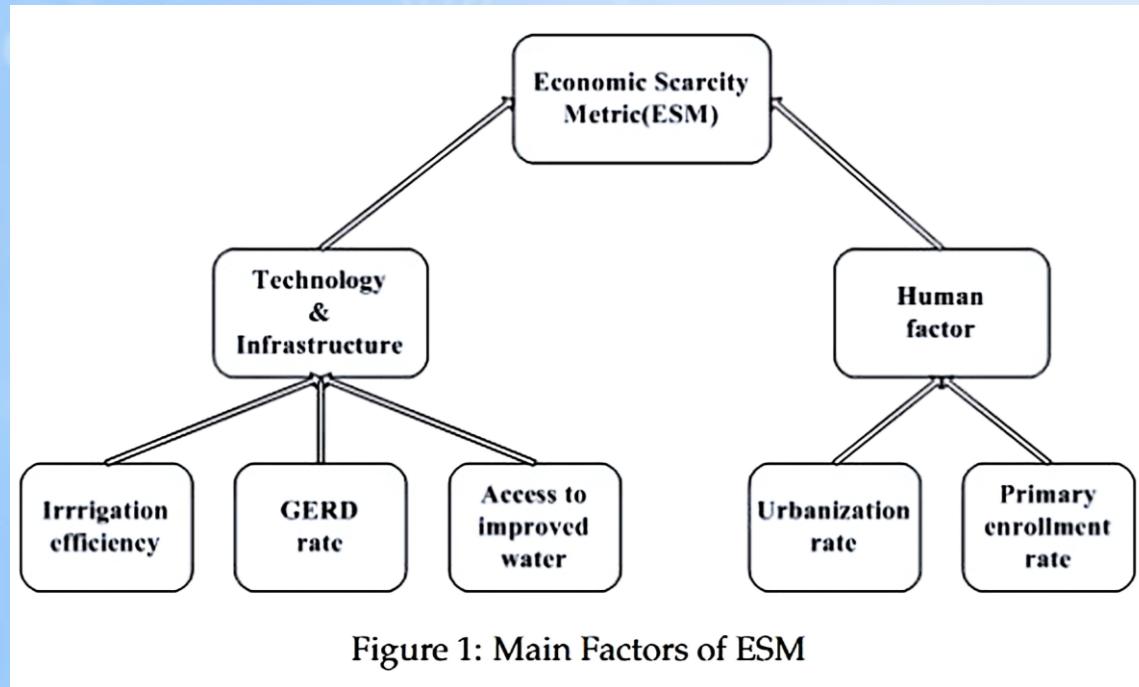
□ CI: ACR和人均可用水量的度量,

□ 依据CI值确定4种层次

1-水富余; 2-略不足; 3-水资源紧张; 4-水资源缺乏

综合利用ACR和CI值来表征物理性缺水

经济性缺水 (ESM) 的构建



技术与设施：灌溉效率、研发支出率、改善水源率
 社会人文：城镇化率、小学入学率

灰色关联度分析
(GRA)



$$x_{pj} = \frac{x_{ij} - m_j}{M_j - m_j}$$

$$ESM_p = 1 - \sum_{j=1}^k w_j x_{pj}$$

$i, p - country$

$M_j = \max_i x_{ij}$ (某 i 国家的 j 因子最大值 x_{ij})

$m_j = \min_i x_{ij}$ (某 i 国家的 j 因子最小值 x_{ij})

x_{ij} – the p th country observation on the j th factor
 (第 p 个国家的 j 因子观测值)

w_j – the weight of each factor j
 (因子 j 的权重)

x_{pj} – the p th country standard value on the j th factor
 (第 p 个国家的 j 因子标准值)

TSM的构建

Parameter α : incorporate the relative importance of physical water scarcity (PWS) on total scarcity compared to economic water scarcity (EWS).

$\alpha > 1$ implies PWS is considered more crucial

$\alpha < 1$ means EWS may be more important

$\alpha = 1$ gives PWS and EWS the same weight



➤ PSM用ACR值计算:

$$TSM_p = \frac{ESM_p + \alpha PSM_p / 5}{1 + \alpha}$$

➤ PSM用CI值计算:

$$TSM_p = \frac{ESM_p + \alpha PSM_p / 4}{1 + \alpha}$$

预测巴基斯坦未来的水资源状况

灰色预测模型（Grey Forecasting Model）+ logistics回归

Factors	2030	Now
Total Renewable Water Resources[km^3]	246.8	246.8
Agricultural water withdrawal[km^3]	202.3	172.4
Industrial water withdrawal[km^3]	2.25	1.4
Municipal water withdrawal[km^3]	6.43	9.65
Desalinated water produced[km^3]	0	0
Climate Factor	2.953	2.95
Water Availability Per Capita [m^3]	212	297.1

Table 7: Factor Prediction Results in PSM Model

Factors	2030	Now	Error[%]
Access to improved water[m^3]	94.48277003	90.9	0.018912
Urbanization rate[%]	45	37.428	0.058607
Primary enrollment rate[%]	97.20673933	72.46411	1.85
GERD rate[%]	0.020755812	0.29	4.09
Irrigation Efficiency	0.74	0.74	/

Table 6: Factor Prediction Results in ESM Model

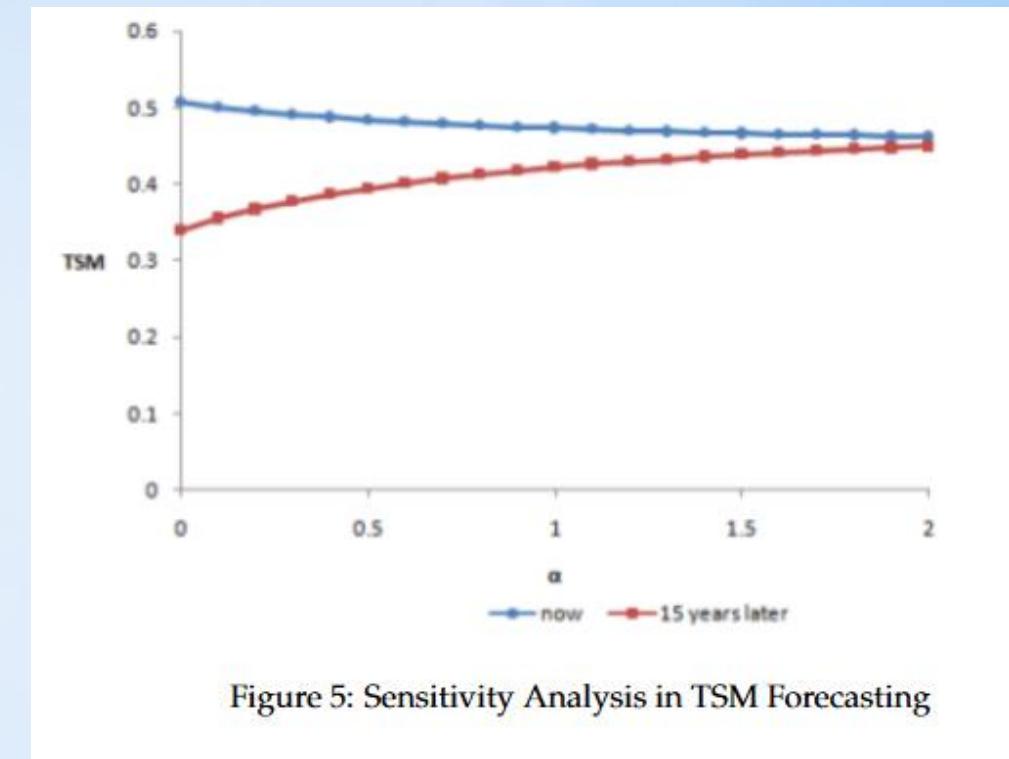


Figure 5: Sensitivity Analysis in TSM Forecasting

- 15年后，相较于2015年巴基斯坦的水资源状况变好；
- α增加：2030年情况更严重，说明未来缺水从物理性缺水为主转向经济性缺水为主的趋势。

1

真题分析

2

文章解析

3

方法总结

方法总结

O奖队伍编号	43443	49630	52831	52849	53494
建模方法	Polyfit拟合	GFM Logistic回归	多元Logistic回 归	Systems- Network Model Agent - Based Networks Approach Algorithmic Approach	对数模型 Logistic回归

2023 ICM Problem E

Light Pollution

光污染

1

真题分析

2

文章解析

3

方法总结

真题分析

Light pollution is used to describe any excessive or poor use of **artificial light**. Some of the phenomena that we refer to as light pollution include **light trespass**, **over-illumination**, and **light clutter**. These phenomena are most easily observed as a glow in the sky after the sun has set in large cities; however, they may also occur in more remote regions. Light pollution alters our view of the night sky, has environmental impacts and affects our health and safety. For example, plant maturation may be delayed or accelerated, and migration patterns of wildlife affected. Excessive artificial light may confuse our **circadian rhythms**, leading to poor sleep quality and perhaps physical and mental health issues. **Glare** caused by artificial lights may contribute to some motor vehicle accidents.

问题背景

- **光污染：指过量或不当使用人工光源，包括光侵扰、过度照明、光杂乱等现象**
- **光污染影响夜间天空观测、生态环境、人类健康与安全，如干扰动植物节律、扰乱人类昼夜节律、引发交通事故等**

真题分析

Community officials or local groups may implement **intervention strategies** to mitigate the negative effects of light pollution. Artificial light, however, has both **positive and negative effects** that impact different locations in different ways. For example, to avoid the negative impacts of light pollution listed above, some communities opt for low-light neighborhoods which in turn might lead to increased crime. **The impacts of light pollution** may depend on factors such as the location's level of development, population, biodiversity, geography, and climate. Therefore, assessing the extent of the effects and the potential impacts of any intervention strategies must be tailored to a specific location.

问题背景

不同地区（如城市、乡村、保护区）受光污染的影响程度不同，需因地制宜制定干预策略

任务要求

1. Develop a **broadly applicable metric** to identify **the light pollution risk level** of a location.

2. Apply your metric and interpret its results on the following four diverse types of locations: a **protected land** location, a **rural community**, a **suburban community**, and an **urban community**.

3. Describe **three possible intervention strategies** to address light pollution. Discuss **specific actions** to implement each strategy and the **potential impacts** of these actions on the effects of light pollution in general.

4. Choose **two of your locations** and use your metric to determine which of your intervention strategies is most effective for each of them. Discuss how the chosen intervention strategy impacts the risk level for the location.

□ 开发一个**广泛适用的评价指标**, 用于**量化**任意地点的光污染风险水平

□ 将该指标应用于以下四类典型地区, 并解释评估结果: **保护区, 农村社区, 郊区社区, 城市社区**

□ 描述**三种缓解光污染的可能干预策略**。针对每种策略, 说明具体实施措施及其对光污染影响的潜在效果

□ 选择两个地点, **使用所建立的评价指标评估**哪种干预策略最有效; 讨论所选策略如何改变相应光污染风险水平

任务总结

- **构建风险指标：**建立一套能综合评价光污染水平及影响的通用指标
- **评估四类地区：**使用该指标分别评估保护区、农村社区、郊区社区、城市社区，并分析其风险特征
- **提出干预策略：**设计三种可行的干预策略，明确具体措施、并分析其对光污染的影响
- **比较策略效果：**选择两个地区，利用指标评估各策略的效果，确定最优策略并分析其如何降低风险



1

真题分析

2

文章解析

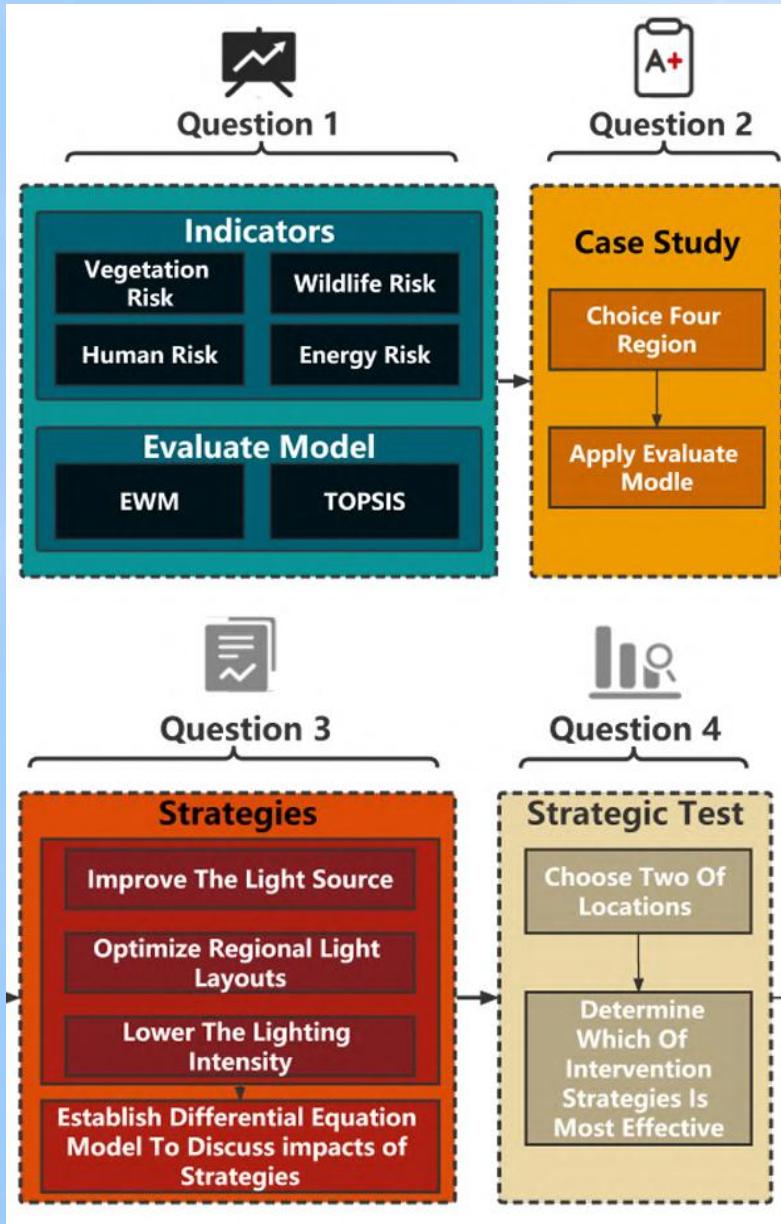
3

方法总结

O奖文章解析

假设及其依据

- 假设：将市场上使用的灯具类型分为 LED、荧光灯和其他灯具
 - 解释：LED 灯和荧光灯的光谱和能效与市场上其他灯具有显著差异。为了简化模型，将主要灯具类型分为 **LED、荧光灯和其他灯具**
- 假设：假设在评估模型中**未考虑的因素**对系统影响很小
 - 解释：影响光污染的因素太多，难以一一考虑
- 假设：假设所选的**四个区域具有足够的代表性**。因此，研究中建立的评估模型及其权重参数，可以应用于世界任何地方的风险评估
 - 解释：所选择的四个区域具有典型特征，从这四个区域获得的模型指标权重系数可视为常数

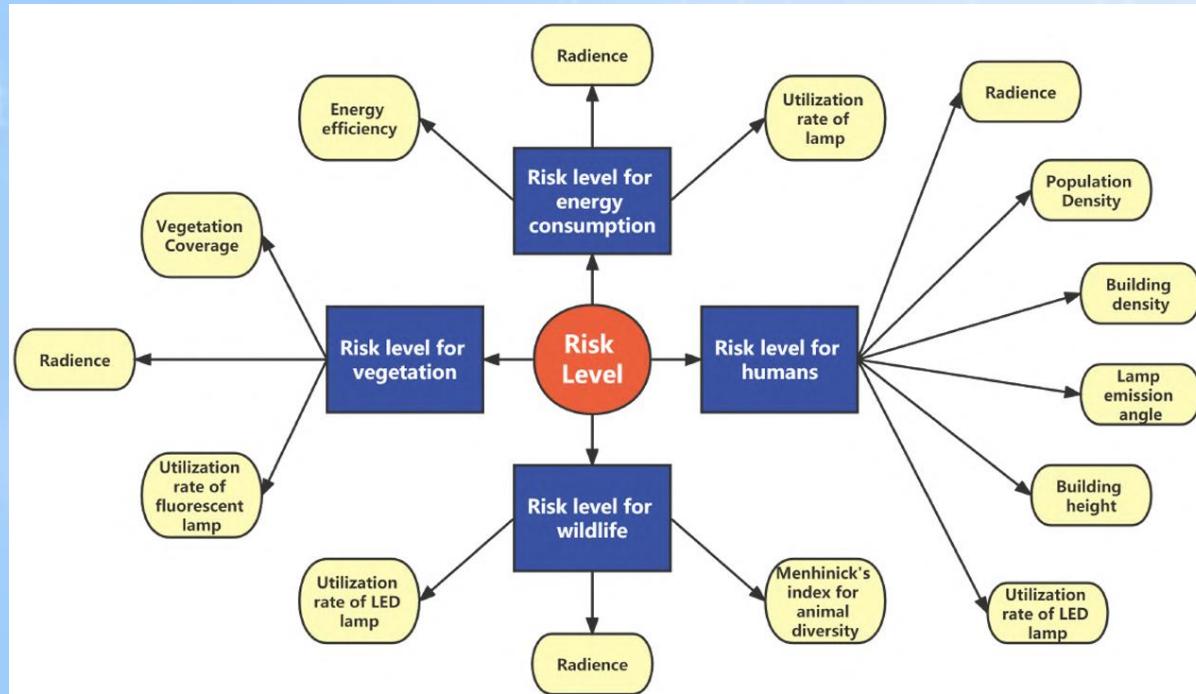


答题的构思框架

- 问题一：构建光污染风险评价模型。从植被风险、人类风险、野生动物风险以及能源风险四个维度选取评价指标，使用熵权法（EWM）和TOPSIS两种方法，建立评估模型
- 问题二：选择四个典型区域（城市、郊区、农村、保护区），应用评估模型
- 问题三：设计三种干预策略，即改进光源、优化区域照明布局、降低照明强度；建立微分方程模型量化干预策略的效果
- 问题四：从四个案例区域中选择了两个地点，应用上述干预策略进行模拟，确定哪一种干预策略最为有效

问题一：基于EWM-TOPSIS的光污染风险评价模型

利用EWM-TOPSIS评估不同方案、构建光污染风险评价模型



L ：光辐射量； Dmn ：多样性指数； PD ：人口密度； VC ：植被覆盖率；

P_F ：荧光灯使用比率； P_L ：LED灯使用比率； P_O ：其他类型灯使用比率；

d_i^+ ：人类受光污染影响的综合评分； η ：能源效率； H ：建筑高度；

BD ：建筑密度； $norm$ ：标准化处理后的数据；

- 从人类、植被、野生动物、能源四个维度选取15项指标（如光辐射、建筑高度、灯具类型比例等）
- 采用**极差标准化**（Min-Max）处理各指标数据

$$x_{norm} = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$$

- 采用**熵权法（EWM）确定各指标权重**
 - 采用TOPSIS计算各类风险值和总风险 R
- 人类风险： $R_h = (PD \cdot d_i^+)_norm$
- 植物风险： $R_p = (\frac{VC \times P_F}{\ln L})_{norm}$
- 野生动物风险： $R_w = (Dmn \times P_L \cdot \ln L)_{norm}$
- 能源消耗风险： $R_e = (\sum P_i \cdot (1 - \eta_i))_{norm}$

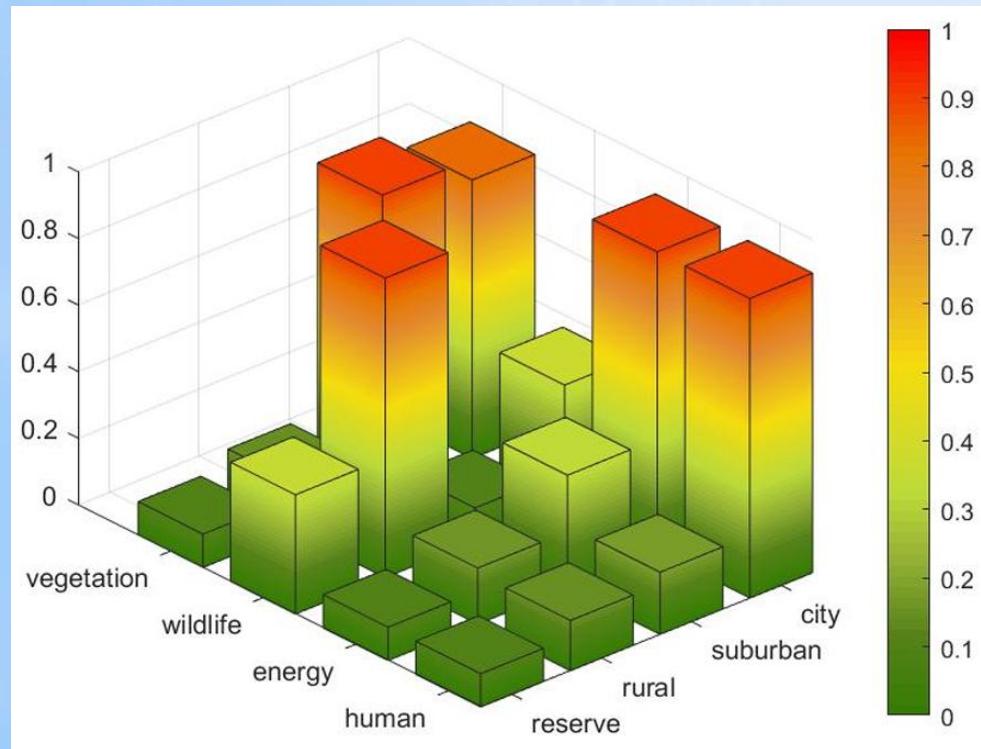
总风险： $R = R_h + R_p + R_w + R_e$

依据总风险数值划分四个等级：good(0-1)、ordinary (1-2)、poor(2-3)、fragile (3-4)

问题二：将光污染风险评价模型运用到四个典型区域

选择深圳的城区、郊区、农村和保护区，评估其光污染风险水平

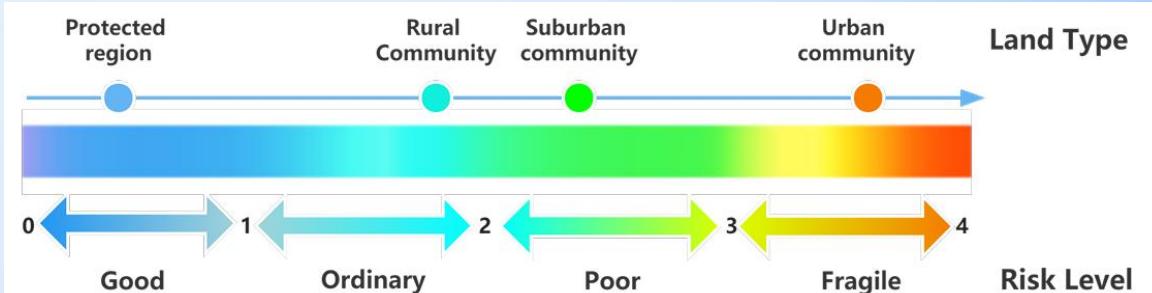
将四个区域的指标数据输入模型，计算各维度风险值



四个地区的风险总值R

Protected land	Rural community	Suburban community	Urban community
0.357992	1.859474	2.114942	3.19662

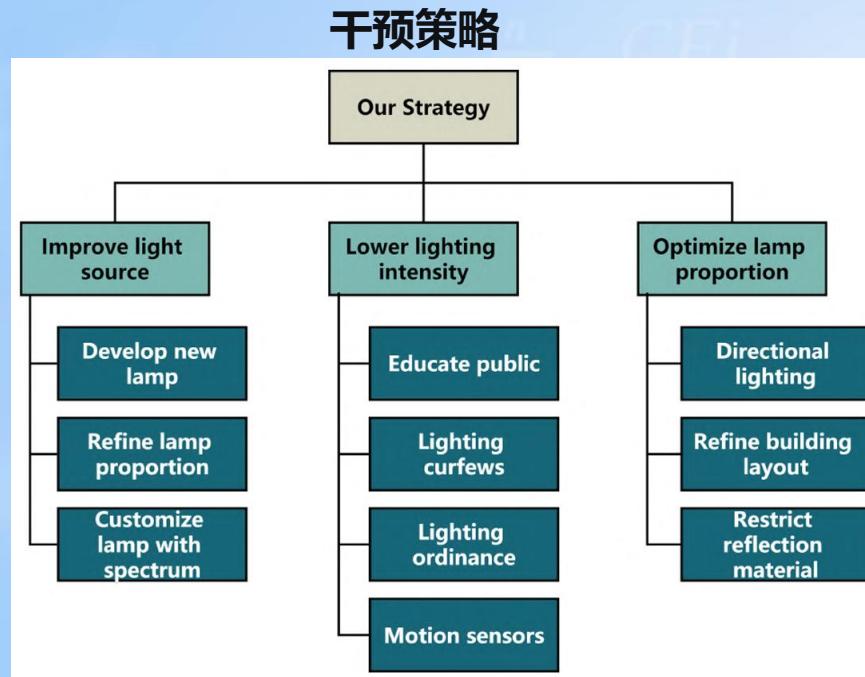
可视化结果



研究结果：城市除野生动物风险外其余均高；郊区植被风险最高；农村与保护区野生动物风险较高

问题三：设计三种干预策略并量化策略的效果

从光源、照明强度与区域照明布局三个层面制定干预策略



优化新灯具组成：
$$\begin{cases} \frac{dP_L}{dt} = r_1 \cdot P_L \left(1 - \frac{P_L}{P_{Lmin}} - \sigma_1 \cdot \frac{P_N}{P_{Nmax}}\right) \\ \frac{dP_N}{dt} = r_2 \cdot P_N \left(1 - \frac{P_N}{P_{Nmax}} - \sigma_2 \cdot \frac{P_L}{P_{Lmin}}\right) \end{cases}$$

P_L ：LED灯使用比率； r_1 ：LED灯使用比率的下降速率；

P_N ：新灯具使用比率； r_2 ：新灯具使用比率的增长速率；

σ_1 ：新灯具对LED灯的替代强度；

σ_2 ：LED灯对新灯具的抵抗强度

□ 策略一：改进光源

- ① 定制具有特定光谱的灯，减少有害波段输出
- ② **优化新灯具组成**
- ③ 开发光谱更好的新灯具

影响体现：改善灯具的光谱分布、调整使用比例，在风险评估模型中改变 P_F 、 P_L 和 P_O

□ 策略二：降低照明强度

- ① 教育公众
- ② 实施照明宵禁
- ③ 颁布照明法规，限制过亮照明
- ④ 使用运动传感器、调光器与定时器

影响体现：减少总光辐射量L

□ 策略三：优化区域照明布局

- ① 配备屏蔽和定向照明，控制光溢出
- ② 限制建筑高度H和密度BD
- ③ 限制反射材料

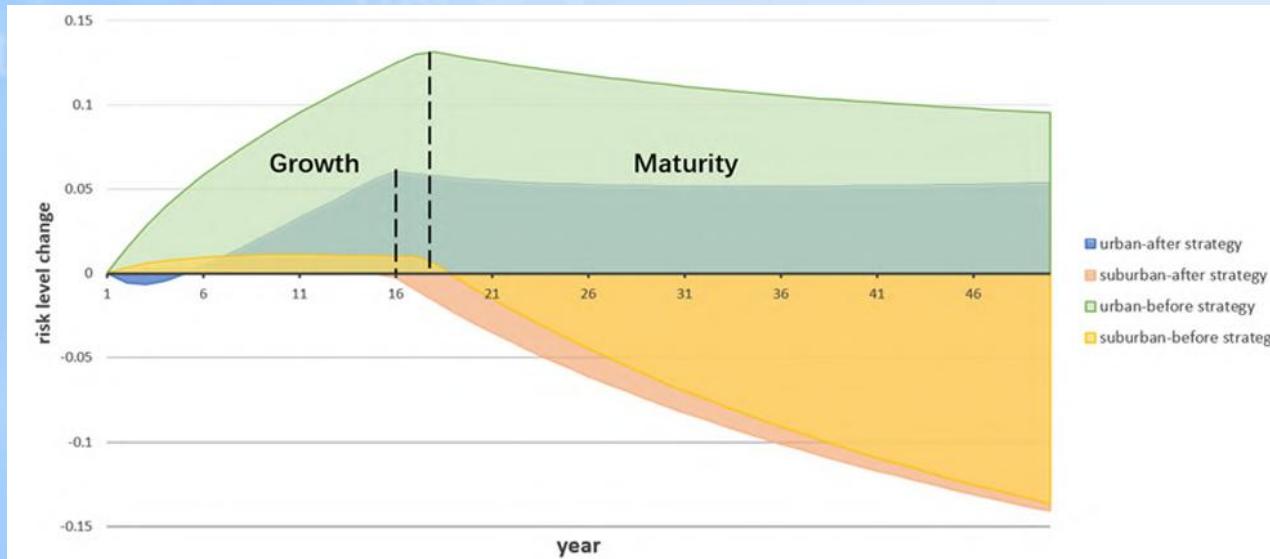
影响体现：降低风险评估模型中的H和BD

策略实施效果在问题四解答体现，对重要参数进行灵敏度分析

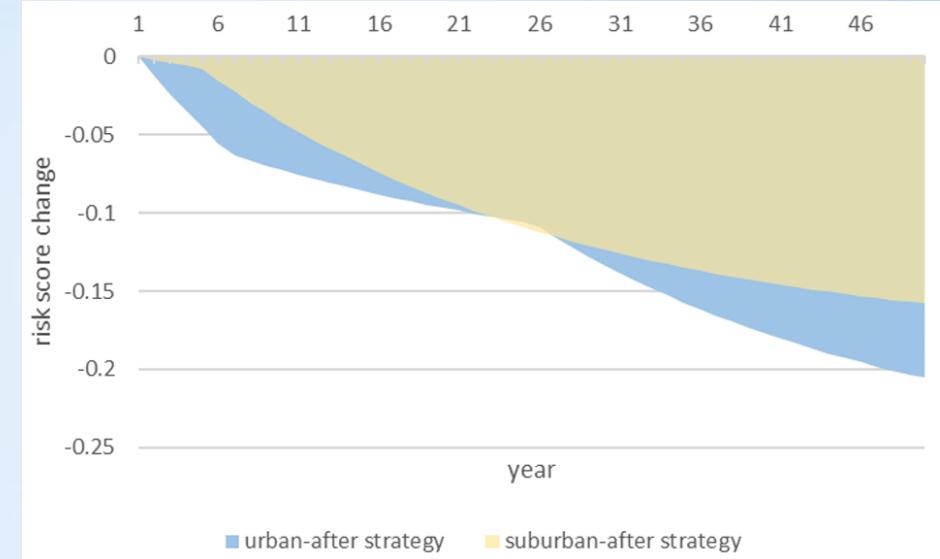
问题四：模拟策略的实施效果并确定最优策略

运用风险模型，在城市与郊区模拟未来50年三种策略的实施效果

策略一实施前后的风险



策略二实施前后的风险



策略三实施前后的风险

Region	Urban	Suburban
before strategy	3.19662	1.414942
after strategy	3.183761	1.374156
change	0.012859	0.040786

- 策略一可使风险增长放缓；策略二效果最显著，城市与郊区风险分别下降约0.25和0.15；策略三影响较小，风险变化0.01–0.05
- 策略二对区域光污染风险评估具有最明显和稳定的影响

1

真题分析

2

文章解析

3

方法总结

方法总结

O奖队员 伍编号	2301428	2305598	2307336	2308000	2312411	2314354	2314817	2320131
建模方 法	EWM; AHP	AHP; EWM; 变异系数法; 模糊聚类分析; 神经网络	EWM; TOPSIS; 微分方程	投影寻踪法; 遗传算法;	EWM; TOPSIS; Logistic模型; 时间序列模型	EWM; K-means;	Logistic模型; AHP; 非线性拟合;	EWM; AHP; K-mean

2024 ICM Problem E

Sustainability of Property Insurance

财产险的可持续性

1

真题分析

2

文章解析

3

方法总结

真题分析

Extreme-weather events are becoming a crisis for property owners and insurers. The world has endured “more than \$1 trillion in damages from more than 1,000 extreme-weather events in recent years.” The insurance industry saw claims for natural disasters in 2022 increase by “115% compared to the 30-year average.” Conditions are expected to get worse as losses from severe weather-related events are likely to increase due to floods, hurricanes, cyclones, droughts, and wildfires. Premiums for insurance coverage are rising quickly, with climate change fueling projected increases of 30-60% by 2040.

- 背景：极端天气事件给业主和保险公司带来危机
- 近年来1000次极端天气事件带来1万亿损失，情况甚至在进一步恶化

As climate change increases the likelihood of more severe weather and natural disasters, ICM wants to determine **how best to posture property insurance** now such that there is resilience in the system to cover the cost of future claims while also ensuring long-term health of insurance companies. Under what conditions should insurance companies underwrite policies? When should they choose to take the risk? Is there anything a property owner could do to influence this decision? Develop a model for insurance companies to determine **if they should underwrite policies in an area that has a rising number of extreme weather events.** Demonstrate your model using two areas on different continents that experience extreme weather events.

□ 财产保险的更好配置策略

- 在什么条件下保险公司承接保单？什么时候承担风险？
业主行为是否会影响决策？
- 开发模型：确定是否继续在极端天气事件数量不断增加的地区承接保单
- 两个不同大陆区域进行验证

As we look to the future, communities and property developers need to be asking themselves **how and where to build and grow**. As the insurance landscape changes, future real-estate decisions must be made to ensure properties are more resilient and built deliberately, including the viability to offer appropriate services to growing communities and populations. How can your **insurance model** be adapted to assess where, how, and whether to build on certain sites?

□ 如何调整保险模型，使其适用于评估在某特定区域是否建设、如何建设以及在何处建设社区？

There may be communities where your insurance model recommends against underwriting current or future property insurance policies. This may result in community leaders facing tough decisions about properties with cultural or community significance. As a community leader, how could you identify buildings in a community that should be preserved and protected due to their cultural, historical, economic, or community significance? **Develop a preservation model** for community leaders to use to **determine the extent of measures** they should take to preserve buildings in their community.

□ 开发一个保护模型，用于确定应该采取何种措施来保护社区建筑。

Select a historic landmark – not Cape Hatteras Lighthouse – that is in a location that **experiences extreme weather events**. Apply your insurance and your preservation models to assess the value of this landmark. Compose a one-page letter to the community recommending a plan, timeline, and cost proposal for the future of their treasured landmark considering the insight you have gained from the results of your insurance and preservation models.

- 选择一个位于极端天气事件区域的地标，应用所建模型来评估地标价值
- 基于保险和建筑保护模型，为社区推荐未来计划、时间表和成本建议

任务总结

- **开发保险决策模型：**帮助保险公司判断是否在极端天气增多的地区承保，在两个不同大陆的此类地区应用演示
- **拓展模型至房产：**调整保险模型，使其能评估特定地点建设的可行性、方式与适宜性
- **构建建筑保护模型：**针对保险模型不承保社区，为社区领导开发模型
- **案例分析与建议：**选极端天气频发地区的历史性地标，用保险和保护模型评估价值，并提供建议



1

真题分析

2

文章解析

3

方法总结

O奖文章解析

假设及其依据

- 假设：使用的数据是准确和有效的。

依据：数据来自于世界银行和其他官方网站和研究论文。

- 假设：所研究地区保持和平稳定，在可预见的未来，除了自然灾害外，不会发生任何重大事件。

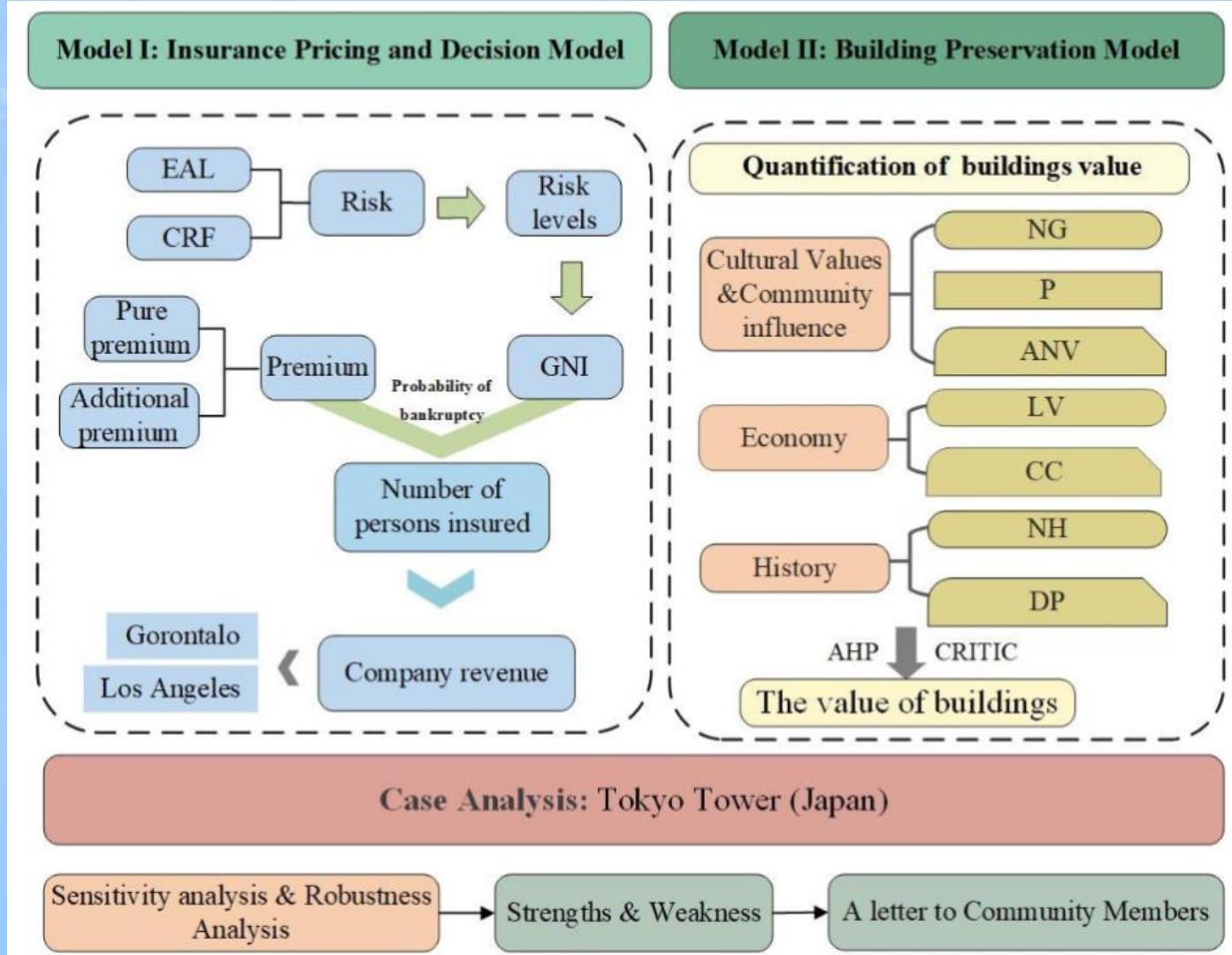
依据：稳定的资本市场环境提供了一个可预测的框架，可以在其中预测预期的回报。

需要注意的是，这一假设并不能否定自然灾害的潜在影响。

- 假设：每个地区的估计数字代表该地区的平均水平。

依据：出于本研究目的，将每个地区视为一个有凝聚力的实体，可进行简化分析。该方法通过关注汇总数据来简化区域研究中内在复杂性。

EAL: 年亏损期望值; CRF: 社区风险值; SV: 社会脆弱性;
 CR: 社区韧性; HLR: 历史损失率; GNI: 人均年度可支配收入



□ 模型一 “保险定价与决策模型”：通过计算年亏损期望值EAL和社区风险值CRF 来确定风险，进而划分风险等级。纯保费与附加保费共同构成保费，保费结合人均年度可支配收入GNI以及破产概率确定投保人数。GNI 和被保险人数相互作用，最终影响公司收入。

□ 模型二 “建筑保护模型”：从文化价值与社区影响、经济、历史三个维度对建筑价值进行量化，下设二级指标若干。运用层次分析法（AHP）和客观权值赋权法（CRITIC）确定建筑的最终价值。

Expected Annual Loss (EAL)

- 年亏损期望值 **EAL**: 衡量社区每年因自然灾害的平均经济损失。

$$EAL = Exposure \times Annualized Frequency \times HLR$$

考虑了灾害暴露、灾害年化频率和历史损失率 (HLR)。

- 每种灾害类型的**EAL**: 分别计算人口 (P)、建筑 (B) 和农业 (A) 三种后果类型的**EAL**值并求和

$$EAL_{HazardType} = EAL_{HazardType(P)} + EAL_{HazardType(B)} + EAL_{HazardType(A)}$$

- 综合**EAL**值: 18 种灾害类型对应**EAL**值的加和

$$EAL_{Composite} = \sum_{i=1}^{18} EAL_{Hazard Type}$$

- 对综合**EAL**值进行排名并转换为百分位数得到**EAL**分值 (归一化)，用于后续风险计算

$$EAL_{score} = \frac{EAL Score - Min(EAL Score)}{Max(EAL Score) - Min(EAL Score)} \times 100$$

Community Risk Factor (CRF)

- 社区风险因子CRF**: 将社区的社会脆弱性 (SV) 值除以社区韧性 (CR) 值的三角分布函数。

$$CRF = f\left(\frac{SV}{CR}\right)$$

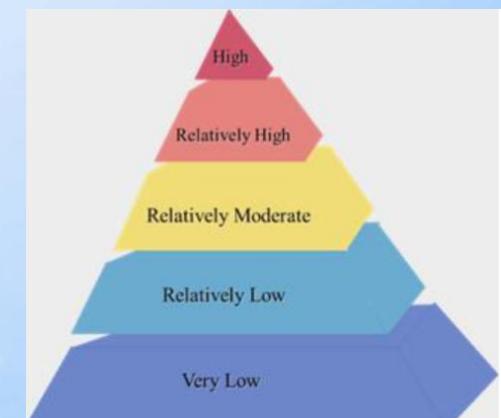
Risk Calculation

- 从风险值和风险分数两方面估算

$$R_{value} = EAL_{value} \times CRF$$

$$R_{score} = EAL_{score} \times CRF$$

- 风险方程包含自然灾害风险、后果增强和后果减少三个部分
- EAL** 为自然灾害风险部分，**CRF** 包含了后果增强 (SV) 和后果减少 (CR) 部分
- 利用**K算法**将灾害级别分为五类，直观呈现不同地区风险等级



保险费用计算

鉴于自然灾害发生时可能致使保险公司面临破产风险，引入**资本资产定价模型（CAPM）**。

预期投资回报率(ROI)的计算：

$$ROI = \int \frac{-A \times l(p) + (1+x)A \times R_{value} - I}{I} f(p) dp$$

A – 保险金额； I – 投资资本

$l(p)$ – 损失函数； x – 附加费率

每\$10000 的纯保费 y ：

$$y = 10000(1+x) \times p$$

y – 纯保费

p – 灾难造成损害的概率

- 假设居民愿意每年花费 5% 的年收入用于购买一年期的巨大灾害保险。保险公司基于上述公式从两个角度进行决策：
- 引入破产理论，在计算出公司未来破产概率小于 10% 的最低保费后，将其与当地人均年可支配收入（GNI）进行对比，如果每10000保额的保费与 GNI 的比值大于 5%，则预计当地居民无力承担巨灾保险费用，公司不应在该地进行投资；
- 若以当地人均 GNI 的 5% 作为每 10000 保额的保费，若此价格导致公司未来破产概率高于 10%，同样不在该地投资。

$$N = (1 - \omega y)N_A$$

$$\max \text{ Total Revenue } \quad \text{Total Revenue} = y \times N$$

$$s.t. \begin{cases} 0 < \omega y < 1 \\ y \geq y_{10} \\ y \leq 0.05 \times GNI \end{cases}$$

N_A – 当地总人数； N – 具有强烈购买欲望的人数； ω – 因子，与当地居民可支配收入以及贫富差距有关

建筑保护模型

指标描述

Table 3: Indicators

Object	Indicators	Description
Cultural Values and Community influence	NG	Number of Google search terms
	P	Participation in events held around the building
	ANV	Annual number of visitors
Economy	LV	Land value
	CC	Construction cost
History	NH	Number of historical research documents
	DP	Degree of preservation

灰色关联度分析(GRA)



建筑价值分数 V_{score} 计算

AHP → 二级指标权重
CRITIC → 一级指标权重

计算 V_{score} 值

$$V_{score} = \sum_{i=1}^3 \theta_i Score_{object}$$

θ_i — 一级指标权重
 $Score_{object}$ — 每个指标分数

各指标权值

$$\theta_i = (0.4432, 0.3873, 0.1694)$$

$$NG = 0.1698; P = 0.4429; ANV = 0.3873; LV = 0.4272; CC = 0.5728; NH = 0.6286; DP = 0.3714$$

建筑保护模型

$$M_{score} = V_{score} \times R_{score} \longrightarrow \text{划分保护等级并确定相应保护措施}$$

建筑物的 M_{score} 值越高，说明暴露于自然灾害的风险越高，需要采用更紧急、更全面的保护措施。

根据 M_{score} 的值分为三种情况：

- 低：采取基本保护措施，如日常维护和检查，必要时进行小修。风险值和这些建筑的价值低，因此采取的措施主要是预防性的，成本较低；
- 中：采用适度保护措施，包括加强结构检查、改进安全设施和备灾计划。这些措施旨在提高建筑物的抵抗力和韧性，需要适度投资；
- 高：实施全面、高强度保护措施，包括全面的结构加固、安装先进的安全系统，以及与外部专家合作制定风险管理计划。鉴于建筑的高风险和高价值，采取措施的目标是尽量减少损失，因此需要投入更高成本。

日本东京塔案例分析

保险定价



东京塔位置

- 东京塔由日本建筑师内藤多仲设计，建造花费 840 万美元。
- 当前东京人均年可支配收入（GNI）为 36964.96 美元，资本市场运行良好。
- 经计算，东京的风险分数为 86。
- 依据保险定价模型，保险公司为东京塔发行巨灾保险的最优保险费率为 3.8%。鉴于东京塔的特殊历史价值，保险公司可能适当提高保险费率。由此，东京政府每年需要花费 319,200 美元为东京塔购买巨灾保险。

日本东京塔案例分析

建筑价值评估



东京塔位置

- 2011 年日本东北部发生地震，东京塔遭受一定程度损坏，塔顶天线弯曲 2 度，导致部分广播信号传输中断，其实际使用价值逐渐降低。
- 东京塔作为旅游景点吸引了超过 300 万游客，累计游客量超 1.5 亿人次，是日本战后繁荣的象征，具有重要历史意义。
- 根据建筑保护模型计算，东京塔的 M_{score} 处于高保护等级区域。
- 所以，政府应考虑为东京塔购买巨灾保险，并加强日常监督和维护，特别是强化其抗震处理措施，以确保东京塔能够抵御自然灾害。

1

真题分析

2

文章解析

3

方法总结

方法总结

O奖队员伍编号	2400860	2401102	2401102	2410578	2410889	2413552
建模方法	Sperman - CRITIC; AHP; 最优化模型	ARIMA 模型; AHP	正态分布拟合; 泊松分布拟合; AHP; GE 矩阵; K - Means 聚类分析	AHP; TOPSIS法	目标规划法; EWM - TOPSIS 法	多目标优化; 改进熵权法; 多准则决策模型

谢谢大家

谢谢大家