

光线越亮，阴影越深

摘要：光污染是一种新的环境污染源，它给社会、人类，甚至整个生态系统带来各种不良影响。因此，我们建立了宽泛的光污染风险评估模型和灵活的干预策略模型，以减少光污染的影响。

首先，建立了基于 GE 矩阵的风险评估模型。我们的团队从社会、经济和生态健康三个维度中选取了 10 个指标建立了一个体系(图 ure3)。然后将指标重新划分为人工光损害系统(DS)和需求系统(RS)。通过投影寻踪法求出指标的权重。接下来，我们将两个系统的分数分别定义为 DSI 和 RSI。以 DSI 和 RSI 为 GE 矩阵的纵横坐标轴，将 GE 矩阵划分为 9 个区域(I~IX)和 3 个层次(A、B、C)。A、B、C 级依次降序排列。

其次，忽略区域内差异，将风险评估模型应用于中国 4 个区域:成都(市区)、金堂(郊区)、幸福村(农村)、白水河自然保护区(保护区)。结果表明，成都光污染风险等级为 b 级，金堂为 c 级，幸福村和白水河自然保护区为 A 级。

第三，建立了干预策略制定的目标规划模型。我们引入优先因子 P_i 和正、负偏置变量(d^+ , d^-)，从三个维度实施针对特定区域的灵活干预策略。我们将所有约束的(d^+ , d^-)的加权和作为目标函数。然后通过三维次指标(方程 10)建立约束条件。进一步，我们讨论了三种有针对性的干预策略:社会、经济和生态与健康策略。例如，社会干预策略主要控制人工光强度等社会维度的行动。而其他两个维度的干预则是次要的。每个策略的具体行动及其对光污染风险的影响详见 5.2。

为了在特定区域选择最有效的干预策略，我们引入了干预优化指数(intervention Optimization Index, IOI)。基于目标规划模型，通过改变优先级因子和调整约束条件，选择与 IOI 最小值相对应的策略。并以成都和金堂为例进行了干预策略模型的应用。成都的最优策略是社会干预策略，金堂的最优策略是经济干预策略。采用 GE 矩阵对干预前后的光污染风险水平及各项指标进行对比分析。成都的光污染风险等级由 B 提高到 A，金堂的光污染风险等级由 C 提高到 B。干预后，成都和金堂的 IOI 分别下降 13.4%和 11.1%。

最后，分析了干预策略目标规划的 4 个约束参数的敏感性和鲁棒性。值得一提的是，我们引入了 MAPE 指数来检验我们模型的稳健性。结果表明，成都和金堂目标规划的 MAPE 分别为 1.5%和 3.0%。我们的模型是非常稳健的。

关键词:光污染;投影寻踪;GE 矩阵;优先因子;目标规划

目录

光线越亮，阴影越深..... 1

1 介绍..... 3

 1.1 问题背景..... 3

 1.2 问题重述..... 4

 1.3 我们的工作..... 4

2 假设和理由..... 5

3 记号..... 5

4 光污染风险评估模型..... 6

 4.1 重组索引——建立 DS 和 RS 系统..... 6

 4.2 PP:风险评估模型的求解..... 7

 4.3 我们的衡量标准:通过 GE 矩阵进行风险评估..... 8

 4.4 应用:中国四种不同类型的地点..... 9

5 光污染干预模式..... 11

 5.1 光污染风险体系再分析..... 11

 5.2 基于优先级的干预策略模型..... 12

 5.3 干预策略的选择..... 14

 5.4 案例研究:成都市、金堂县..... 14

6 灵敏度和稳健性分析..... 17

7 模型评估和进一步讨论..... 18

 7.1 优势..... 18

 7.2 缺点..... 19

参考文献..... 20

附录..... 22

1 介绍

1.1 问题背景

随着城市化的快速发展，利用外部照明来照亮城市夜间活动的趋势在全球范围内呈上升趋势。光污染问题最早是在 20 世纪 30 年代由国际天文学会提出的，该学会认为，光污染是城市为照亮天空而进行室外照明，对天文观测造成的负面影响。

国际上将光污染分为白光污染、人造日光污染和彩色光污染三类。白光污染主要是由于建筑物反射造成的，彩色光污染主要用于室内娱乐。本文只讨论室外人造光带来的人造天。

光污染造成的危害对人类社会和生态环境有很大的影响。[1] 随着城市的发展和人口的不断增加，私人、商业和公共使用的照明数量越来越多。人们可以在夜间出行、生产、交易和消费，这给城市带来了巨大的经济效益。然而，过多的光线对人们的身心健康有不良影响，引起许多疾病。与此同时，从事某些职业的人，比如司机，经常面临白光污染。这对他们的视力造成了极大的伤害。过度和不合规地使用光会导致交通事故和其他问题，这反过来给人们带来一定的经济损失。

生态光污染对自然环境中生物的行为和种群生态有明显的影响。光污染会导致生物方向的迷失和错位(尤其是夜行动物)，以及睡眠时间表的混乱。这反过来又可能影响它们的觅食、繁殖、迁徙和交流。

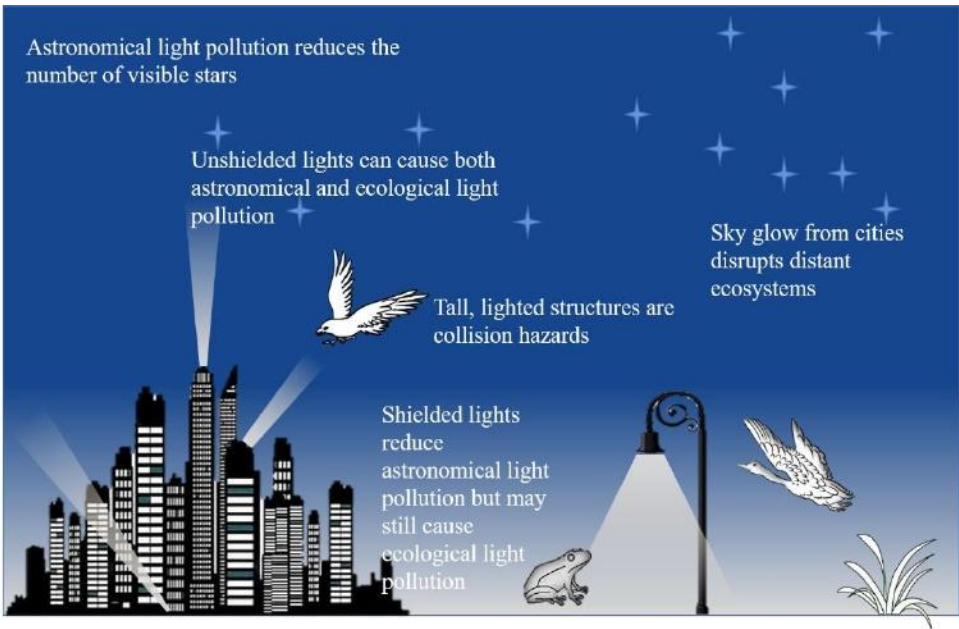


图 1:生态与天文光污染示意图

今天，人们的生活和社会的正常运转离不开人造光。例如，街道照明使人们在夜间正常、安全的出行成为可能。

路灯的普及降低了犯罪率。人造光的负面影响:光污染无法通过盲目禁止使用人造光来改善。应该采取措施，把一个地方具体的经济、生态、人口等方面结合起来。因此，我们的团队建立了一个模型来识别一个地方的光污染风险水平，提出干预策略，并分析其影响。

1.2 问题重述

为了制定有效的光污染干预政策，有必要研究如何在不同的地方测量和减轻光污染的影响。我们的团队承担了以下工作：

建立光污染风险等级评估模型。

对 4 个不同区域的光污染风险水平进行评估，并结合实际情况对评估结果进行分析。

制定三项详细的干预政策，并分析其对光污染影响的潜在影响。

选择两个地点，确定最有效的干预策略，研究干预策略对该地点光污染风险水平的影响。

制作一页单张，宣传本地光污染干预策略。

1.3 我们的工作

首先，我们构建了以社会、经济、生态、健康为第一指标的体系。将人口密度等 10 个因素纳入第二指标。然后构建人工光伤害系统(DS)和人工光需求系统 RS，根据二级指标是属于需求还是属于伤害，将二级指标分为两个系统。采用 DSI 和 RSI 评分分别评价两个系统的光污染风险等级。指标的权重是通过将 40 个国家的数据插入 PP(投影追踪)方法来确定的。然后，将 DSI 和 RSI 得分与 GE 矩阵相结合，综合评价光污染风险水平。我们将该模型应用于中国成都、金堂县、幸福村和白水河自然保护区。得到了这四个地区的光污染风险等级，并对结果进行了分析。

然后构建光污染干预模型。在第二个指标的基础上，分析第二个指标之间的关系，为制定干预策略做准备。然后，我们构建了目标规划模型。我们的目标是减少光污染，改善或维持现有的社会、经济和生态健康秩序。引入优先因素来反映干预策略的优先级。然后，我们提出了三种干预策略：社会干预策略、经济干预策略、生态与健康干预策略。同时，对这三种干预策略的具体措施和效果进行了探讨。根据第一个问题所建立的体系，结合实际情况，针对每一种战略提出了具体措施。我们还分析了这些行动对光污染效果的影响。

在此基础上，提出干预优化指数(intervention optimization index, IOI)。通过改变优先因素的选择，求解目标规划模型，计算出 IOI 的值。

结合 GE 矩阵对三种干预策略的效果进行评价，选择出最优的干预策略。

最后，我们选择成都和金堂县，通过我们的模型分别得到两个地区最有效的策略和具体行动。我们进一步探讨了

这些策略对风险水平的影响。

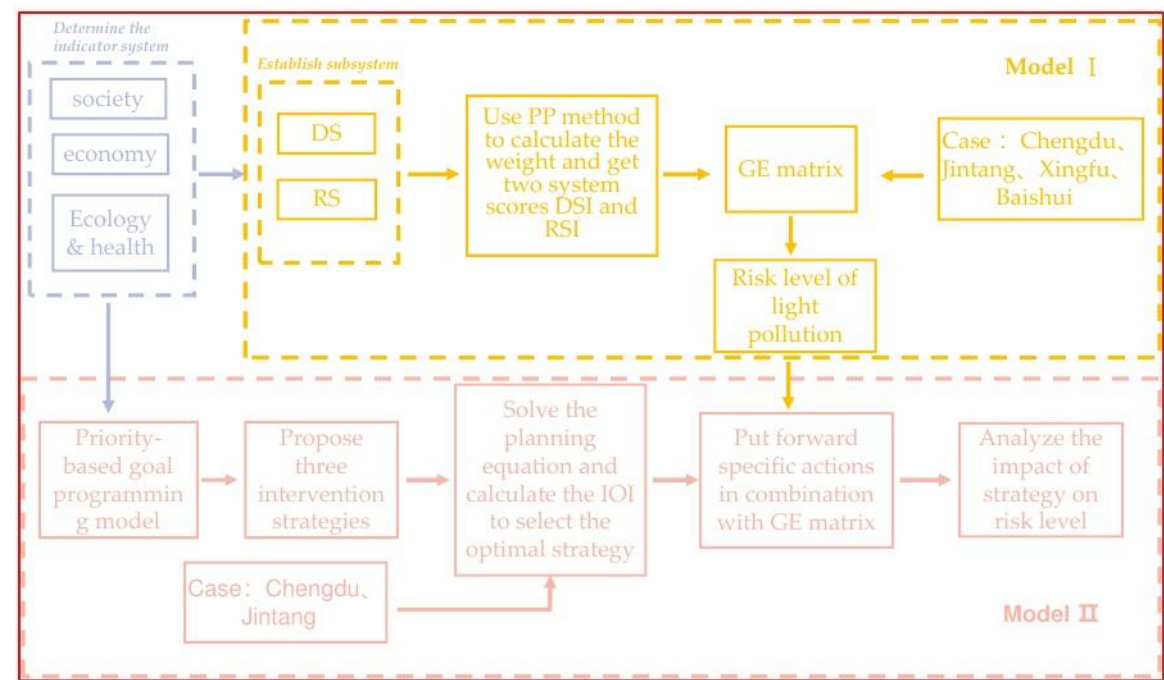


图 2:我们的工作

2 假设和理由

光污染的风险评估和干预策略的制定应考虑到经济、社会、生态等因素。不可能对所有可能的情景都进行建模。所以我们做了一些合理的假设来简化模型，每个假设都有相应的解释：

假设 1:所研究的区域是一个完整的单元，不考虑其内部的区域差异。

Justification1:我们选择研究的区域差异很大，但这些区域的整体特征是显著的。因此，我们可以忽略内部不同地方的差异。这项研究是我们深入研究的前提。

假设 2:在制定策略时忽略政府成本等因素。

Justification2:有些因素影响不大，或者忽略一些因素可以简化模型。

假设 3:假设次级指标之间的数学关系是相互独立的。

Justification3:有利于模型的建立和策略的提出。

3 符号

本文使用的关键数学符号列于表 1。

表 1:本文使用的符号

Symbol	Description
DSI	An index that reflects the magnitude of a positive effect
RSI	An index that reflects the magnitude of a negative effect
ω_j	The weight of the secondary index ($i = 1, 2, \dots$)
z_i	One-dimensional space projection ($i = 1, 2, \dots$)
r_{ij}	The distance between the projected eigenvalues
S_w	The standard deviation of the projected eigenvalue
D_w	The local density of the projection eigenvalues
x_{ij}	Second Grade Index ($i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, 5$)
P_k	priority factors ($k = 1, 2, \dots, n-1$)
d_m^+	the target value is not allowed to be reached ($m = 1, 2, \dots$)
d_m^-	the target value is allowed to be exceeded ($m = 1, 2, \dots$)
IOI	the intervention optimization index

4 光污染风险评估模型

光污染风险水平的评估是提出特定区域光污染干预策略的重要前提。根据相关文献[3][4][5]，光污染与社会、经济和生态健康相互作用。我们综合考虑光污染与上述这些因素之间的内生相关性。然后提取 3 个一级指标和 10 个二级指标，初步建立如图 3 所示的光污染风险体系。

此外，我们没有考虑很多冗余因素，这将为后续的模型优化消除不必要的障碍，从而有利于后续的指标机制分析。

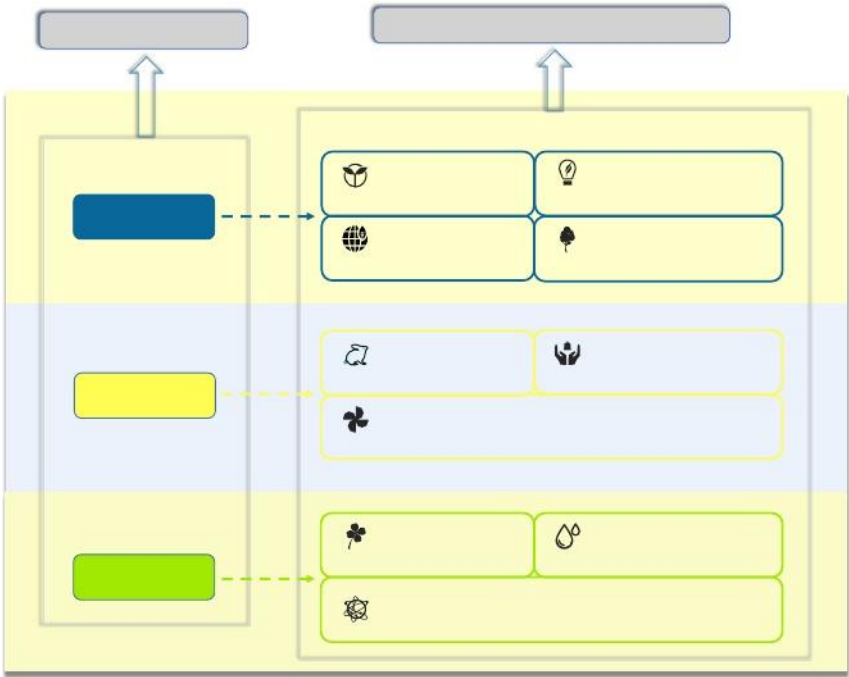


图 3:光污染风险等级指标体系

4.1 重组索引——建立 DS 和 RS 系统

一般来说，风险评估需要考虑利弊、供需关系等因素。光污染风险的度量应该基于两个角度：

- a)过度使用人造光的危害，包括对社会、人民生活的不利影响和对生态环境的破坏。
- b)人造光对人类正常工作和生活的要求。这主要体现在工业生产、城市建设等生产活动中。

考虑二级指标与光污染风险的关系，对二级指标进行了重新分类，并对 DS(人工光损害系统)和 RS(人工光需求系统)两个评价子系统进行了梳理。各子系统的具体指标如下表所示。

表 2:二级指标的符号表示法

DS Indicators	NRC	EC	GGE	BIO	DCLP
Symbolic Notation	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}
RS Indicators	PD	ALI	QPLE	GR	PVPI
Symbolic Notation	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}

*表中所有指标均为二级指标的缩写。详细的二级指标及其类型见附录。

因此，我们可以得到各系统与分类指标之间的线性关系。将这两个子系统的得分作为评价光污染风险的效益指标，分别计算为 DSI 和 RSI。我们定义了 w 的权重。所以我们得到了下面的公式：

$$DSI = \sum_{i=1}^5 w_{1i} x_{1i}^* \quad (1)$$

$$RSI = \sum_{i=1}^5 w_{2i} x_{2i}^* \quad (2)$$

其中， x_{1i} ， x_{2i} 特别是指最小-最大归一化后的数据。在后面的模型中，我们继续使用 x_{1i} ， x_{2i} 来表示已经处理过的数据。

接下来，我们选取全球 40 个不同程度受光污染影响的国家，利用投影寻踪法 (projection pursuit method, PP) 对 CS 和 RS 评价模型进行求解和分析。

4.2 PP:风险评估模型的求解

投影寻踪法的基本原理是通过某种组合将高维数据投影到低维空间，并通过最大化投影指标来体现原始高维数据的特征。我们可以通过对一维数据的分析来研究和评价高维数据。在 DS 和 RS 系统下，采用投影寻踪法对各指标分别赋值权重。最后，将加权结果转化为一维空间的投影分数。

投影追踪的步骤如下：

1. 分析子系统指标(DS 和 RS)。对指标进行积极、规范的处理。
2. 构造线性投影。从不同方向观察数据，寻找最优的投影方向，充分体现指标的特点。我们随机选取一些投影方向 $w=(w_1, 2w, 3w...w)m$ ，并计算投影索引函数的大小。确定最大指标函数的投影解作为最优投影方向。对于第 i 个样本，其一维空间投影可表示为：

$$z_i = \sum_{j=1}^m w_j x_{ij} \quad (3)$$

3. 构造投影指标函数。根据最优投影方向的定义，我们希望投影特征值的分布 z_{toi} 满足：

1. 作为一个整体，投影集群尽可能分散开来。
2. 局部投影点尽可能密集。

为了满足上述条件，可以将目标函数构造为：

$$\max Q(w) = S_w D_w \quad (4)$$

其中 S_w 为投影特征值的标准差， D_w 为投影特征值的局部密度。公式如下：

$$S_w = \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z}_w) / (n-1)} \quad (5)$$

$$w = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R - r_{ij}) u(R - r_{ij}) \quad (6)$$

式中 r_{ij} 投影特征值之间的距离， $r_{ij}=|Z_i-Z_j|$
 $(i, j=1,2, \dots,n)$ 。 $u(t)$ 是阶跃函数，即 $u(t)= \begin{cases} 0, & t<0 \\ 1, & t\geq 0 \end{cases}$ 。 R 为估计参数局部散点密度，取 $R=0.1\max(r_{ij})$ 。
 四、优化投影方向。综上所述，为了找到最优的投影方向 w ，我们建立了一个非线性优化模型：

$$\max Q(w) = S_w D_w$$

{

$$s. t. \begin{cases} \sum_{j=1}^m w_j^2 = 1 \\ 0 < w_j < 1 \\ S_w = \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z}_w)/(n-1)} \\ D_w = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R - r_{ij})u(R - r_{ij}) \\ u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \\ r_{ij} = |z_i - z_j| \\ R = 0.1\max(r_{ij}) \end{cases}$$

(8)

这是一个复杂的非线性优化。我们考虑使用 GA 算法来优化求解过程。我们利用 MATLAB 的 ga 工具箱得到了优化后的投影权值 $32w=(1w, mw, w, \dots, w)$ 。最后，将权重结果用雷达图表示(图 4)，我们认为得到的权重是通用的，这个结果在后来的模型中仍然使用。

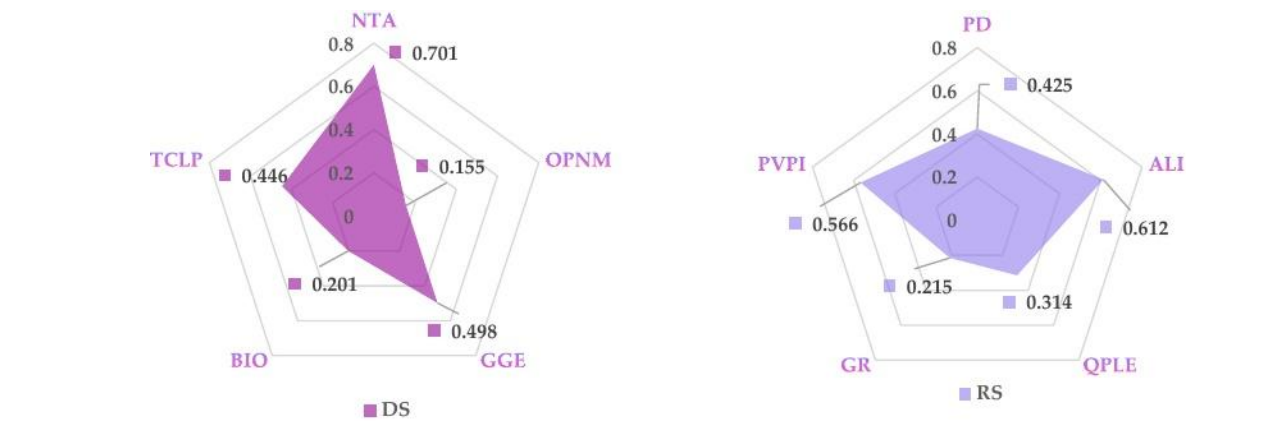


图 4:重量雷达图

通过 DSI、RSI 和指数的线性关系，可以分别计算出 DS 体系和 RS 体系的得分。两个评价光污染风险水平的分数。

4.3 我们的衡量标准:通过 GE 矩阵进行风险评估

为了更好地评价某一地区的光污染风险水平，我们仔细考虑了 DS 和 RS 之间的意义和关系，并采用 GE 矩阵辅助分析。GE 矩阵，也被称为麦肯锡矩阵，是分析企业战略的有效工具。通过引入多个因素，量化得分，来衡量企业竞争力和市场吸引力。确定业务在企业经营战略中的地位，从而制定符合企业发展的战略。

我们认为 DSI 和 RSI 从两个维度反映了光污染的相对风险(收益和危害)，这类似于企业经营战略中企业竞争力与市场吸引力的关系。然后以 DSI 为横轴，RSI 为纵轴，根据其描述光污染风险等级

分布在 GE 矩阵上。将计算得到的 DSI 和 RSI 进行归一化处理，使其值在(0,1)之间。根据实际情况，将 DSI 和 RSI 分为三个等级(表 X)。

表 3:指数分类

The value of DSI	Level	The value of RSI	Level
0~0.3	Low	0~0.3	Low
0.3~0.7	Medium	0.3~0.7	Medium
0.7~1	High	0.7~1	High

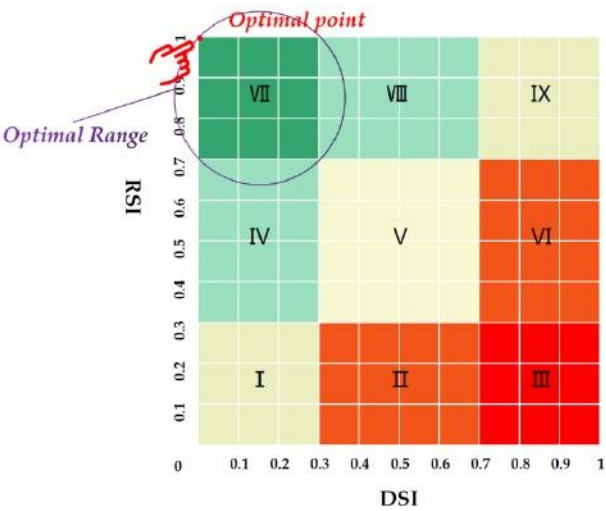


图 5:GE 矩阵图

我们将 GE 矩阵可视化(图 5)。由于 DSI 和 RSI 都分为三个级别，因此 GE 矩阵分为九个部分。然后结合 GE 矩阵对光污染风险进行评价：

- 1) DSI 表示人造光造成的负面影响的大小。DSI 越高，评价对象受到人工光的破坏程度越大，不利于生态环境的可持续发展。RSI 是指由人造光引起的积极影响。RSI 越高，系统对人造光的需求和依赖就越大。为了维持正常的社会生活和经济发展，人类仍然需要大量使用人工光源。
- 2) DSI 越小，RSI 越大，光污染相对风险越低。我们将 VI、VII、VIII 区设为 A，将 I、V、IX 区设为 B，将 II、III、VI 区设为 c，同一等级区域的光污染风险相似。A、B、C 区域的风险等级依次降低。
- 3)同时，我们认为区域 VII 是 GE 矩阵中的理想区域，其光污染风险程度相对较低。将坐标(0,1)设为最优理想点。

4.4 应用:中国四种不同类型的地点

中国是光污染最严重的国家之一，人口众多，地理环境丰富。因此，我们将光污染风险评估模型应用于中国。首先，收集全球数据作为样本分析，然后选择四川省作为案例研究对象。然后，将风险评估模型应用于以下四个地点:成都市(城市社区)、金堂县(郊区社区)、幸福村(农村社区)、白水河自然保护区(受保护的地理位置)。各指标收集到的数据见表 4。此外，我们结合 GE 矩阵与当地实际情况进行对比分析。

下面列出了一些要点:

本文成都的范围仅包括成都市区的几个主要区，并不是成都所辖的所有区。

金堂县是成都城郊较为集中的地区，故作为评价对象之一。

自然保护区的人口密度极低，但仍有少数工作人员留在这里。

为方便评估当地光污染风险水平，本节暂不考虑当地政策的影响，仅收集分析相关数据。

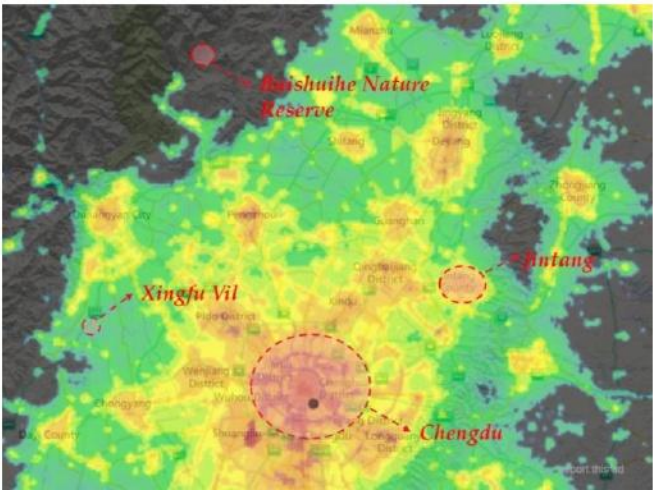


图 6:光污染分布图

根据权威文献[6][7][8] 和网站[9][10]收集的数据，我们对重要数据(部分)进行了整理，如表 4 所示。

表 4:四个地点的部分数据

	PD	ALI	QPLE
Chengdu	2868	204.93	1559880
Jintang	838	145.16	43330
Xingfu Vil.	384	1.70	3321
Baishuihe Na- ture Reserve	15	0.03	169

将各指标下 4 个区域的数据代入上述构建的 DS 和 RS 两个评价子系统，得到相应的 DSI 和 RSI。具体数值如下面的方形条形图所示。根据 DSI 和 RSI 的值，在 GE 矩阵图中追踪对应的点：

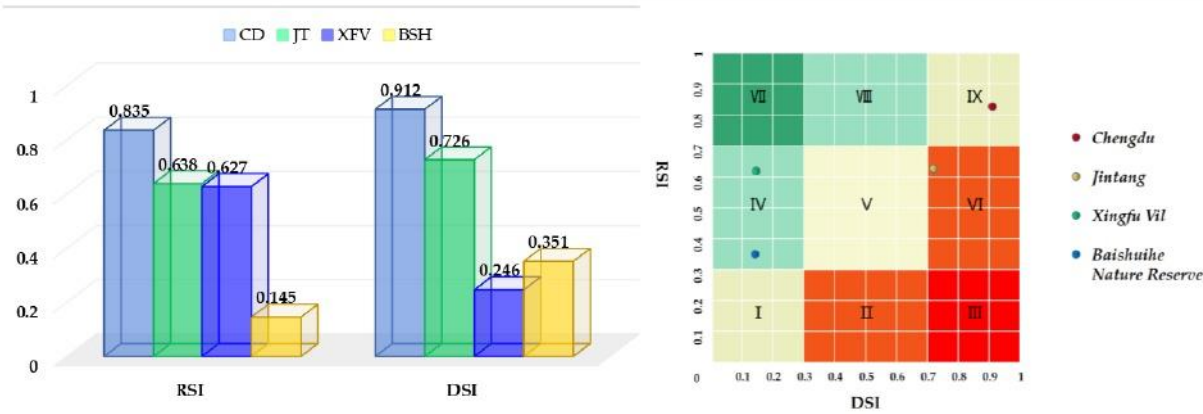


图 7:Index 值(左)和 GE 矩阵图中的点(右)

上图为四个区域的 GE 矩阵，以及 DSI 和 RSI 的直方图。根据 4.3 中的光污染风险评价方法，得出成都为 B 区，金堂为 C 区，幸福村和白水河自然保护区为 a 区。下面对四个区域的光污染风险进行说明：

成都:RSI 得分较高,说明成都人工照明需求较大。成都作为四川省的核心和重要枢纽,近年来城市扩张和人口增长迅速。市区承载着一个城市的住房、工业和商业。成都发展了夜间经济,并建立了大型服务业,如夜市。道路照明、机场、高铁等都需要使用大量的人工照明。成都夜间经济产生的巨大效益离不开夜灯的使用。

然而,高 DSI 分数表明成都也遭受了更多的人工照明损失。过度使用人工照明,使得城市在夜间过于明亮,会对居住在城市中的人产生一定影响。整夜开着商业街广告牌的灯,造成了资源的浪费,也引发了一些民事纠纷。大量的车辆由于使用了错误的灯,导致夜间发生了大量的交通事故。生态问题严重。

成都郊区的金堂县的 RSI 相对较高。金堂靠近成都市中心,吸引了许多人在那里定居。郊区主要用于住房和工业。没有繁华的商业街,不需要给城市产生巨大的经济效益。郊区人口多,私人和公共设施使用人工照明较多,几乎不需要大量照明商业街。

金堂 DSI 指数较高。由于郊区主要是人居住的地方,过度人工照明的负面影响很明显。对人的身体和生活环境的危害比较大。同时,由于这一地区的建设规划管理制度不完善,存在着比较明显的过度使用人造光的现象。

兴福村,成都附近的一个村庄。RSI 得分很高,但低于郊区的人。农村社区的照明需求主要来自于人们的生活和农业生产。农村人口比郊区少,是没有的大型服务业、夜市等,少点夜间照明就能满足需求。由于该地区靠近成都这样的大城市,农村人口和需求比其他地区(特别是偏远地区)要大,人造光的积极影响也更大。农村自然环境面积占动植物的比重较大。该区域的 DSI 值较低,说明光污染损失相对较小。人和生物受到光污染的程度较低。

白水河自然保护区 RSI 指数较低,对光照的需求较少。低 DSI 表示光污染。保护区的人口通常较少,因此对照明的需求自然较低,但有些保护区有旅游区,对自然环境有影响。此外,护林员夜间在森林巡逻或点亮一些监控设备,也会造成该地区的弱光污染。

综上所述,成都和金堂的光污染风险较高,这也是由于城市化不可避免的负面影响。但是,可以采取适当的干预措施,在不影响人类正常生活需求的情况下,减少或削弱其负面影响。兴福村和白水河自然保护区的光污染风险水平较低,因为自然生态系统和野生动物占据了大部分面积。因此,人造光更容易扩散到自然环境中,对大量野生动物造成重大影响。因此,仍然需要适当的干预措施来限制该地区的光污染。

5 光污染干预模式

在上一节中,我们开发了一个可以广泛评估光污染风险水平的模型,并对中国的区域进行了评估。在本节中,我们期望提出三种不同的干预政策,以有效干预不同地区的光污染。此外,我们将我们的干预政策应用到具体的地方,并分析它们对该地方光污染风险水平的影响。

5.1 光污染风险体系再分析

在制定某一地区光污染干预策略时，应综合考虑各种影响因素。根据上文建立的指标体系(图 3)，可以建立系统的干预策略。我们发现，光污染风险体系下部的二级指标存在内在关联，可能影响光污染危害程度，也可能反映对人造光的需求。

因此，我们从三个维度出发，即第一级指标(社会、经济、生态和健康)，并对第二级指标进行相关性分析。一级指标和光污染之间的关系也必须得到。结合实际情况，我们在光污染干预的角度下考虑了三种可行的措施。

接下来，我们使用 Vensim 将分析结果可视化，如图 8 所示。

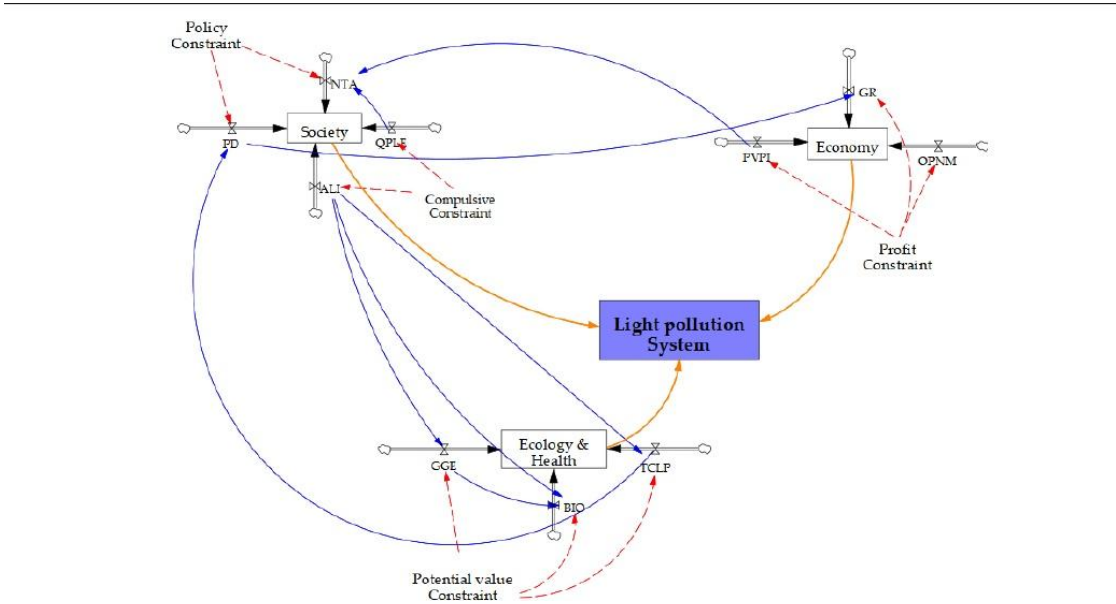


图 8:光污染系统的系统动力学分析

5.2 基于优先级的干预策略模型

我们将干预策略的采用视为目标规划:即从三个维度(社会、经济、生态与健康)提出干预策略的目标。在减少光污染的同时，努力改善或维持社会、经济 and 生态的现有秩序。我们的干预策略应该是有偏向的，比如把重点放在社会维度的光污染干预上，而其他两个维度的干预则被视为次要的。

因此，我们从多目标规划中汲取灵感，引入了优先因素。我们认为对光污染的干预在不同的维度上是优先的。干预程度是通过目标规划通过优先因素来体现的。对于 n 个优先因素，我们指定:

$$P_k \gg P_{k+1}, k = 1, 2, \dots, n - 1$$

其中， $P_k \gg P_{k+1}$ 表示 P_k 优先级高于 P_{k+1}

我们以成都为例，仍然使用 4.4 中 2022 指标的数据。同时，我们在目标规划中考虑了正偏离变量(d_i^-)和负偏离变量(d_i^+)。偏差变量表示决策值中没有达到目标值的部分。因此，与线性规划中的刚性约束不同，包含偏差变量的约束被称为软约束(目标约束)。如果我们希望干预从高到低依次为:社会、生态与健康、经济，那么目标规划模型应该是:

$$\begin{aligned}
& \min y = P_1 d_1^+ + P_2 (d_2^- + d_2^+) + P_3 d_3^+ \quad (9) \\
& \text{s. t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^5 \omega_{1i} x_{1i} \geq 1.1 \sum_{j=1}^5 \omega_{2j} x_{2j} \\ x_{11} - 0.001 x_{21} + d_1^- - d_1^+ = 0 \\ x_{23} + x_{24} + x_{25} + d_2^- - d_2^+ = 200 \\ x_{15} + x_{22} - 0.15 x_{14} + d_3^- - d_3^+ = 0 \\ x_{12} \leq 150 \\ x_{ij}, d_m^-, d_m^+ \geq 0 \quad (i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, 5; m = 1, 2, 3) \end{cases} \quad (10)
\end{aligned}$$

约束条件下， ω_{1i} 和 ω_{2j} 为 4.2 中投影寻踪法获得的指标权重。我们对 RS 和 DS 系统应用刚性约束，要求 RSI 比 DSI 高 10%。在约束中，包含 d_1^+ 表示不允许达到目标值，包含 d_1^- 表示允许超过目标值，包含 $(d_1^- + d_1^+)$ 表示刚刚达到目标值。我们的目函数，y 应该测量并最小化所有约束的正负偏差，并对每个维度的二级指标进行不同程度的约束。

例如，约束条件 $x_{11} - 0.001 x_{21}$ ，表示夜间交通事故数量不应大于人口密度的 1‰。， $x_{15} + x_{22} - 0.15 x_{14}$ 表示光伏产业与夜市服务业的总产值之和不超过 GDP 的 15%。 $x_{23} + x_{24} + x_{25} = 20$ 的约束条件，，表明 GGE、BIO、TCLP 的亏损不超过 200 亿元。每个指标的数值都可以用 MATLAB 求解。

我们主要是从社会维度来关注光污染干预，因此给予优先考虑，即优先考虑 P_1 。生态与健康和经济排在第二位，我们分别优先考虑 P_2 和 P_3 。我们根据本地的实际情况给每个优先级分配权重。， P_1 考虑为 P_2 关系的两倍， P_2 考虑为 P_3 关系 1.5 倍的关系。我们根据优先级的高低定义了三种主要的干预策略 P_1 ：社会干预策略、经济干预策略和生态健康干预策略。我们的干预策略具有很强的针对性，下面的图解释了几个相关的干预措施。根据不同的偏倚，分析二级指标，我们得到以下干预策略，对相关干预措施的解读如图 9 所示。

社会维度

按照国际暗天协会规定，人工配光，减少光侵现象[11]。合理规划绿地和色彩空间。建立健全光污染防治法律体系，统一光污染防治标准。(三)利用达到照明目的所需的最低强度的光源。

经济维度

减少不必要的照明。使用计时器或占用传感器关闭灯，或者在不需要时手动关闭灯。照明是为了方便人们在光线昏暗的空间里活动。然而，在一些夜间人类活动很少的地方，人造光的强度非常高，不仅造成了能源的浪费，而且加剧了该地区的光污染。调整使用的灯的类型，这样发出的光波是那些不太可能造成严重光污染问题的。

生态与健康维度

限制温室气体排放。人工光源会产生二氧化碳等温室气体，破坏生态环境。减少照明产生的温室气体，也是减少光污染危害的一种方式。在野生动物聚集的区域尽量少使用或不使用人工光源。野生动植物已经适应了自然的生活方式，人类的活动往往会对它们产生负面影响。人类应该尽量避免自己的活动对野生动植物的影响。

事实上，光污染的原因是多方面的，其影响也是复杂的。因此，有许多可能的干预策略，这里只是简要列出一些可用的具体措施以及采取这些行动的潜在影响。

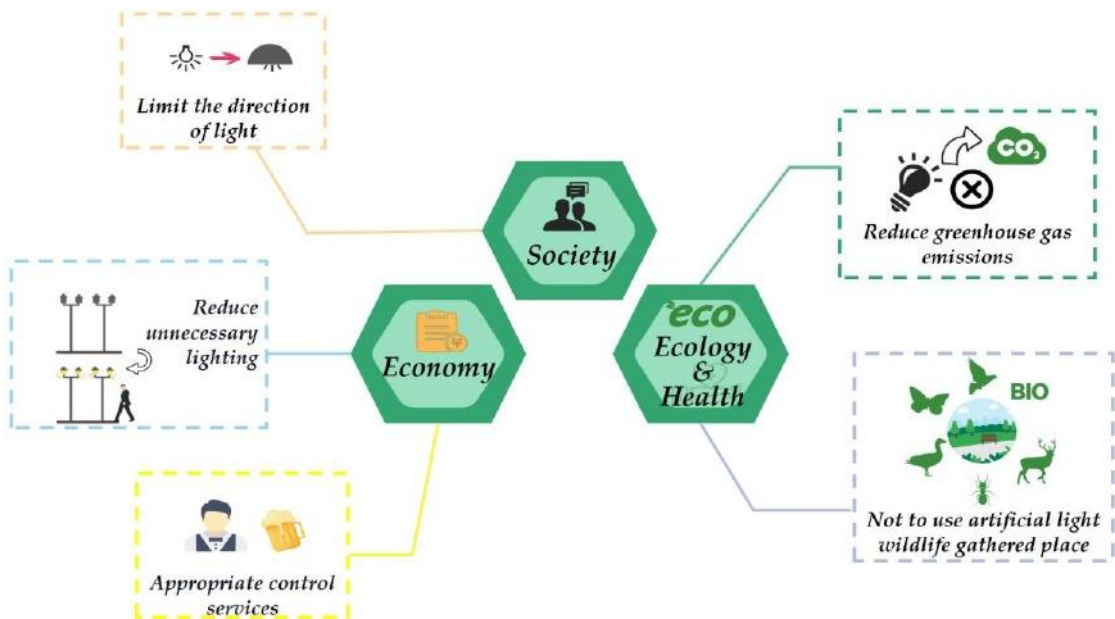


图 9:干预策略的概念图

5.3 干预策略的选择

接下来，我们可以重复优先级干预策略模型。通过改变社会、生态与健康、经济的优先级，适当调整约束条件，并求解目标规划，可以得到组 3-3 的优化干预策略数据。然而，仅凭干预策略数据，我们无法确定哪些优先级最有可能减少光污染。

因此，我们结合 GE 矩阵得到启发，通过计算最优点(0,1)之间的距离，提出干预优化指标(IOI)。并对干预策略的效果进行评价。我们认为，IOI 值越小，该干预策略对光污染风险水平优化的效果越好。这是一种优化系统综合的评价方法。其计算公式为：

$$IOI = 100 \times \sqrt{(DSI - 0)^2 + (RSI - 1)^2} \tag{11}$$

IOI 的大小由 DSI 和 RSI 决定，本文的 IOI 区间值在 0 ~ 141.4 之间。现实中，由于局限性，我们无法达到最优理想点，只能无限接近。

5.4 案例研究:成都市、金堂县

为了检验本文提出的干预政策的有效性，本文以成都市和金堂县为研究对象。由于成都市和金堂县在经济水平、现代化程度等实际条件上存在较大差异，因此干预策略的优先级也应有所不同。同样，同一干预维度的具体行动也会略有不同。这体现在两个区域的目标规划和约束条件的差异上。例如，在人工光强的约束条件方面，成都市和金堂县是不同的。我们的约束条件比较全面，涉及三个干预维度。成都的目标规划见 4.2 节，金堂县的目标规划如下：

$$\min y = P_1 d_1^+ + P_2 (d_2^- + d_2^+) + P_3 d_3^+ \tag{12}$$

$$s. t. \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^5 \omega_{1i} x_{1i} \geq 1.08 \sum_{j=1}^5 \omega_{2j} x_{2j} \\ x_{15} + x_{22} - 0.12x_{14} + d_1^- - d_1^+ = 0 \\ x_{23} + x_{24} + x_{25} + d_2^- - d_2^+ = 18 \\ x_{11} - 0.001x_{21} + d_3^- - d_3^+ = 0 \\ x_{12} \leq 110 \\ x_{ij}, d_m^-, d_m^+ \geq 0 \ (i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, 5; m = 1, 2, 3) \end{array} \right. \quad (13)$$

然后，我们将我们的干预策略模型应用于成都市和金堂县。将模型的想法与一个特定的区域环境相结合的过程是，

Algorithm : Intervention Strategies for Specific Locations

Input: Objective planning of intervention strategies model

Output: $IOI_{optimal}$, optimal intervention strategies

```

1:   Initialize objective function  $y, P_1, P_2$  and  $P_3$ ;
2:    $IOI = []$ ; //Set the list of solutions
3:   Max number of iterations=6;
4:    $k \leftarrow 0$ ;
5:   while ( $k < \text{Max number of iterations}$ )
6:     if no optimal solution to the equation then
7:       adjust the constraints appropriately;
8:     else
9:       figure out the optimal solution ( $x_{11}, x_{12}, \dots, x_{24}, x_{25}$ );
10:       $RSI \leftarrow \sum_{i=1}^5 \omega_{1i} x_{1i}; RSI \leftarrow \sum_{i=1}^5 \omega_{2i} x_{2i}$ ;
11:       $IOI[k] \leftarrow 100 \times \sqrt{(DSI - 0)^2 + (RSI - 1)^2}$ ;
12:      change  $P_1, P_2$  and  $P_3$  for different dimensions ;
13:       $k++$ ;
14:     end if
15:   end while
16:    $IOI_{optimal} \leftarrow \min(IOI)$ ; //Obtain the optimal intervention strategies
17:   return  $IOI_{optimal}$ ;

```

进一步，我们得到了上述 6 种不同干预策略下成都和金堂县的 IOI。通过绘制IOI 气泡图(IOI 值尽可能小，图 10)，我们可以得到什么样的优化区域光污染更全面的干预策略，并得到最优的 IOI。成都采用社会干预策略较好，金堂县采用经济干预策略较好。

更具体地说，成都从高到低的重点是社会、生态健康、经济，金堂从高到低的重点是经济、生态健康、社会。

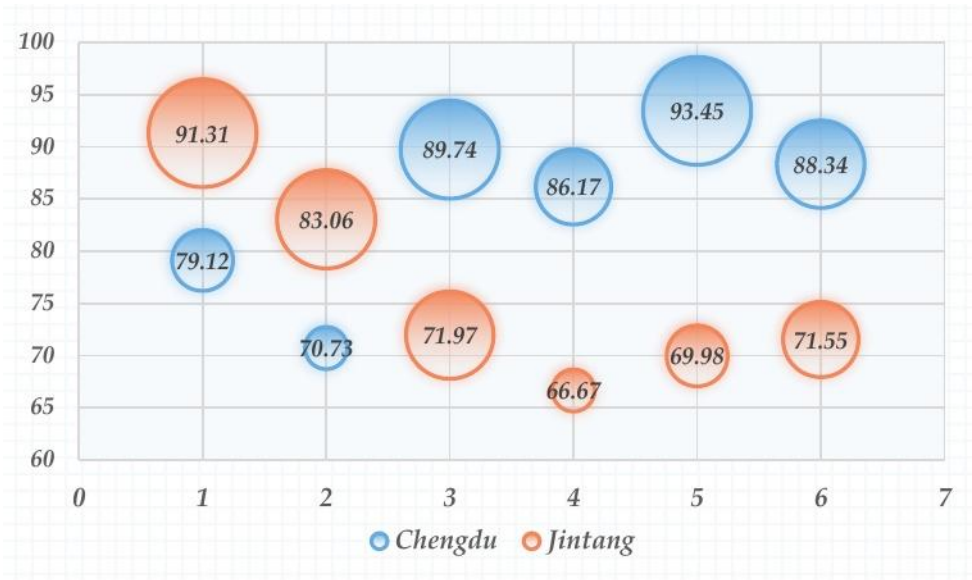


图 10:IOI 的气泡图

表 5:目标规划的结果

Second grade in-dexes	PD(x_{11})	ALI(x_{12})	QPLE(x_{13})	GR(x_{14})	PVPI(x_{15})
Chengdu	2506.81	143.45	1513985	37.76	3.63
Jintang	822.64	101.61	62496	1.81	0.13
Second grade in-dexes	NTA(x_{21})	OPNM(x_{22})	GGE(x_{23})	BIO(x_{24})	TCLP(x_{25})
Chengdu	1.56	2.42	81.15	76.87	41.98
Jintang	0.93	0.09	7.63	5.91	5.41

通过求解目标规划得到二级指标(表 5)、DSI 和 RSI 的最优值。以 DSI 和 RSI 为坐标绘制 GE 矩阵图，干预策略后的优化效果可以直观看到。结合 GE 矩阵分别讨论了两个站点的相应干预策略。

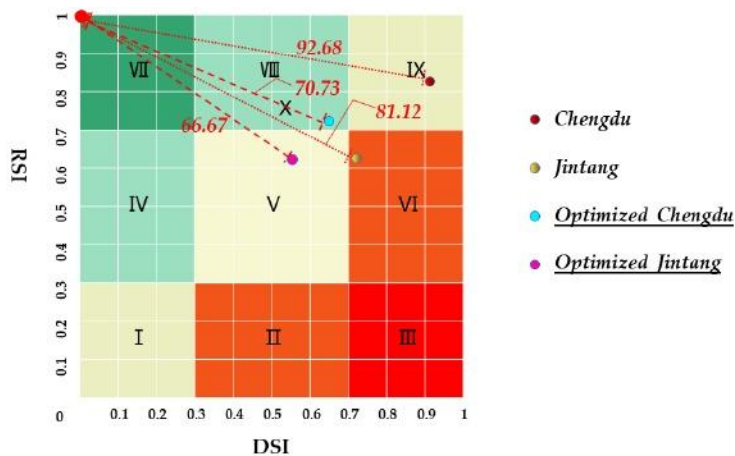


图 11:GE 矩阵图中的最优结果

a)成都

分析:对于成都的光污染风险干预，我们从社会维度出发，分别约束人口密度和灯具数量，控制夜间交通和城市。同时，维护被光污染严重破坏的鸟类生态多样性，关注人类健康。经济约束相对宽松，主要是尽量维持电力供应和夜市的正常运转。

GE 矩阵可以从宏观上反映干预策略实施后的预期结果。城市人造光需求指数 RSI 略有下降，光污染水平明显改善。干预策略实施后，成都光污染风险指数有望达到 A 级。

我们使用百分比柱状图(图 12)对优化前后的一些重要二级指标进行对比。根据表 5 的优化结果，具体提出干预措施。

干预策略:

要达到明显的优化效果，需要将 ALI 降低 30%。

※加强交通管控，严格控制夜间交通事故数量。优化城市照明系统规划，根据人口密度

以及照明需求程度，划分主照明强区和弱照明区。◆降低霓虹灯和 LED 屏幕的亮度，尽量使用单色光，减少彩色灯光造成的杂乱。

<s:1>公共照明系统尽量减少对住宅建筑内部的影响，

将光污染相关疾病的医疗费用降低 20%。建立完善的法律制度，为光污染的控制和治理制定标准。

限制城市高空的光照强度，减少对空中动物的影响。宣传光污染知识，为居民提供环境保护

提高意识和主动性。

基于优先级的规划模型的结果可以作为参考每个领域要实现的目标。

b)金堂

分析:针对金堂县的光污染风险干预，从经济维度进行分析。调整产业结构，特别是人工光消耗大的扩张型产业。光伏产业产值的利润也受到严格限制。生态上约束以温室气体为主的人造光造成的能量耗散，保护生物多样性。在社会维度上，为了保持相对稳定，我们的约束更加宽松。

GE 矩阵可以在宏观上反映我们实施干预策略后的预期结果。郊区金堂县的光污染指数 DSI 可从 0.726 降至 0.554。IOI 下降了 17.81%。实施干预策略后，金堂县光污染潜在风险得到改善，有望达到 B 级。

我们用百分比柱状图(图 12)对优化前后的一些重要二级指标进行对比。根据表 5 的优化结果，具体提出干预措施。

干预策略:

控制夜市和夜市的营业时间。

限制光伏企业产值(PVPI)利润降低 20%。

重点保护受光污染严重的农村鸟类。采用更节能的新型光源，减少温室气体排放

光源制造产生的排放量减少 15%。

基于优先级的规划模型的结果可以作为每个领域要实现的目标的参考。

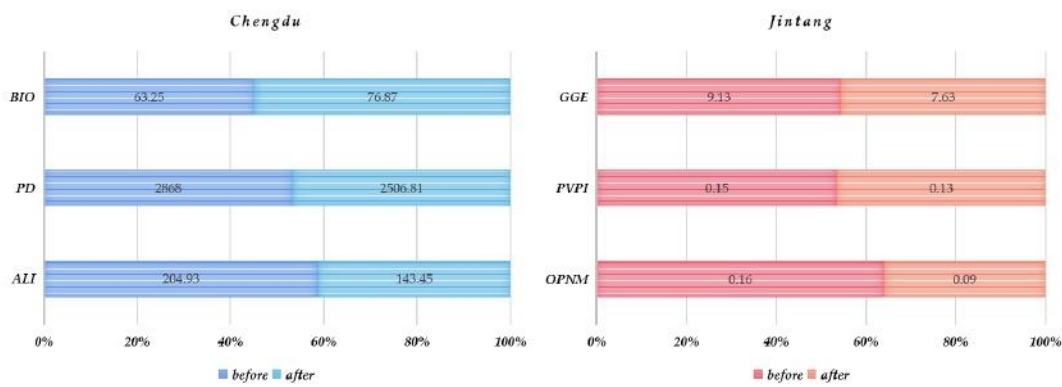


图 12:百分比直方图

6 灵敏度和稳健性分析

现实中获得的统计数据往往是不准确的，我们的模型输入可能会有一些偏差。这些偏差可能会影响我们模型的结果。因此，我们对光污染干预策略模型进行了敏感性分析。

我们分别设置适当的步长来改变光污染干预规划模型约束条件的参数。求解模型，评估每个模型的 IOI 值。灵敏度分析的结果如图 13 所示。

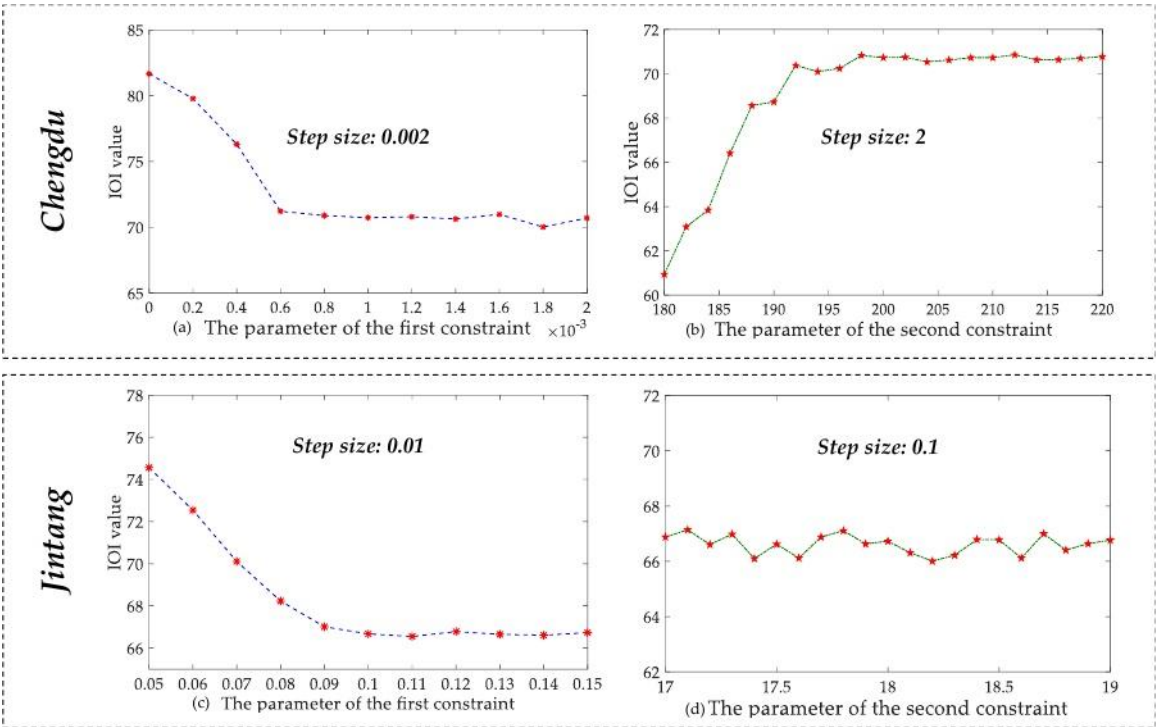


图 13:敏感性分析

上图分别为成都和金堂光污染干预目标规划四个参数的灵敏度。可以看出，当图 a、b、c 中的参数值分别为 0.6192、0.09 时，出现拐点。在拐点之后，随着参数的变化，模型的输出 IOI 值趋于稳定。值得一提的是，4.1 中我们在目标规划中选择的参数处于一个稳定区间。图 d 中的 IOI 值在 66.67 左右略有波动，说明该参数不敏感。此外，我们发现图(a)和图(c)中的参数与 IOI 在一定程度上呈显著负相关，IOI 在 (0.6×10^{-4}) 和 $(0.05, 0.09)$ 分别下降了 13.4% 和 11.1%。因此，在实际干预模型中，需要对上述两个参数进行合理控制。

表 7:平均绝对百分比误差

MAPE(%)	Model robustness
< 10	High robustness
10 – 20	Good robustness
20 – 50	Reasonable robustness
> 50	Weak robustness

最后，我们从预测评价指标 MAPE 中得到启发，引入 MAPE 来检验模型的稳健性。MAPE 代表平均绝对百分比误差，反映了模型的鲁棒性。用于判断模型的 MAPE 标准如表 x 所示。我们计算了稳定范围内各参数对 IOI 变化的 MAPE。为模型的 MAPE 选择最大 MAPE。成都干预规划模型的 MAPE 为 1.5%，金堂干预规划模型的 MAPE 为 3.0%。从表 7 可以看出，我们干预策略的目标规划具有很强的鲁棒性。

7 模型评估和进一步讨论

7.1 优势

(1)我们引入 GE 矩阵来衡量光污染的风险水平。从效益和危害两个维度建立多个客观指标，利用投影寻踪法求得各指标的权重，对光污染进行综合评价。

(2)目标规划模型可以灵活调整优先级。引入优先因子，可以为多个目标安排主次顺序，达到不同的优化效果。因此，决策者可以根据不同的侧重点选择具有最佳优化效果的政策。

7.2 缺点

(1)我们提供的干预策略不考虑实施成本。政府在采取具体的干预措施时，往往需要支付一定的成本，比如用新的节能灯、关灯代替旧的照明灯具，政府需要投入资金购买这些灯具。因此，更好的干预策略应该考虑投入的成本与收益之间的关系。

(2)缺乏更具代表性的指标。由于对光污染的研究尚未建立统一的标准，国际上对光污染的具体数据收集不足，现有数据反映光污染程度不全面。



参考文献

- [1] Xiao D S, Yang S. A review of population spatial distribution based on nighttime light data [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(3) : 10—19.
- [2] Longcore T, Rich C. Ecological light pollution[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2004, 2(4): 191-198.
- [3] Hao Ying, Li Wenjun, Zhang Peng, Zhang Jinyan, Xu Yang, & Sun Hongbo (2014). A review of light pollution research at home and abroad. China's population·resources and environment(S1), 3.

- [4] Gallaway, T, Olsen, R. N, & Mitchell, D. M. (2010). The economics of global light pollution. *Ecological Economics*, 69 (3), 658-665.
- [5] Pawson, S. M., & Bader, M. (2014). Led lighting increases the ecological impact of light pollution irresp.
- [6] Liao Shunbao, & ze-hui li. (2004). The relationship between population distribution and land use and the spatial experiment of population data in Sichuan province. *Resources and environment of the Yangtze River basin*, 13(6) , 557-561.
- [7] Wang aiying, Shi gang. Light pollution in urban nightscape lighting. *Urban Planning* (4) , 95-96.
- [8] Hong Yu. (2018) . Street lamp and urban society: A study centered on Chengdu Street Lamp Management Institute (1939-1949) . Doctoral dis-sertation, Sichuan Normal University.
- [9] List of continents by GDP (nominal). (2020, 2). Retrieved from Wikipedia:
[https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_continents_by_GDP_\(nominal\)](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_continents_by_GDP_(nominal))
- [10] Light pollution statistics. (2022). Retrieved from Wikipedia:
https://www.lightpollutionmap.info/LP_Stats/
- [11] Light pollution . (2022). Retrieved from encyclopedia article by TheFreeDictionary

附录

First Grade Index	Second Grade Index	Unit	System	Effect
Society	Population density (PD)	Population/km ²	R	+
	Number of traffic accidents at night (NTA)		D	—
	The average light intensity (ALI)	million lux	R	+
	Quantity of public lighting equipment (QPLE)	thousand	R	+
Economy	The growth rate of GDP (GR)	billion per year	R	+
	The operating profit of the night market (OPNM)	billion per year	D	—
	Production value of photovoltaic industry (PVPI)	billion per year	R	+
Ecology & Health	The expense of greenhouse gas emissions (GGE)	billion	D	—
	The loss of biodiversity (BIO)	billion	D	—
	The treatment caused by light pollution (TCLP)	billion	D	—

使用投影追踪评估模型的 40 个国家的 DSI 和 RSI 结果:

Country	DSI	RSI	Country	DSI	RSI
Afghanistan	0.412	0.785	Lebanon	0.886	0.794
Argentina	0.261	0.423	Malaysia	0.854	0.717
Australia	0.312	0.784	Mexico	0.621	0.505
Bhutan	0.884	0.745	New Zealand	0.300	0.647
Brazil	0.801	0.812	Nigeria	0.438	0.644
Canada	0.312	0.948	North Korea	0.446	0.598
Chile	0.644	0.721	Norway	0.300	0.761
China	0.771	0.743	Oman	0.866	0.735
Denmark	0.446	0.902	Pakistan	0.871	0.632
Egypt	0.700	0.806	Portugal	0.808	0.759
Finland	0.211	0.841	Romania	0.396	0.487
France	0.401	0.695	Russia	0.899	0.902
Germany	0.331	0.774	South Korea	0.926	0.761
Greece	0.294	0.861	Spain	0.523	0.844
India	0.924	0.941	Thailand	0.716	0.649
Iraq	0.841	0.753	Tonga	0.276	0.335
Ireland	0.774	0.641	Ukraine	0.622	0.617
Italy	0.521	0.861	United States	0.796	0.859
Japan	0.746	0.896	Vietnam	0.914	0.861
Jordan	0.209	0.417	Yemen	0.197	0.498