

关掉灯，打开星星!

“在地球上，即使在最黑暗的夜晚，光也永远不会完全放弃他的统治。”

——儒勒·凡尔纳《地心游记》

摘要：随着现代科技的快速发展和人工光源的过度使用，光污染造成的问题越来越严重。因此，适当设计和实施干预策略来解决这些问题值得我们重视。本报告旨在构建光污染风险水平评估模型，并就如何有效减少光污染的负面影响提供可信的建议。

建立了三个模型:模型一:生态-社会-生态(ESE)模型;模型 II:光污染风险评估(LPRA)模型和模型 III:互联-ese 模型(I-ESE)模型。

对于 ESE 模型(模型一)，我们首先将光污染风险抽象为经济、社会和生态三个子系统，并构建 ESE 模型。对于经济子系统，我们通过 logistic 序列计算人口增长，并测量经济系统中的光污染。对于社会子系统，我们考虑了五种类型的土地以及亮度阈值，并获得了受光污染影响的土地比例。对于生态子系统，我们设置 a

公式用生物体的数量结合光强值来计算受影响生物体的数量。

对于 LPRA 模型(模型二)，我们使用基于 Google 搜索指数的层次分析法(AHP)来量化某一地区的光污染风险等级(RL)，并将我们的模型应用于 284 个地区。之后，我们使用 K-means 算法创建了风险等级的度量体系，并构建了四个等级:轻微(0.0443 ~ 0.1678)、中度(0.1705 ~ 0.2542)、严重(0.2568 ~ 0.3698)和严重(0.3976 ~ 0.6186)。以鄂尔多斯为保护地，昭通为农村社区，清远为郊区社区，广州为城市社区，其 RL 得分分别为 0.1332、0.1778、0.2574 和 0.5154，风险等级分别为轻度、中度、重度和重度。

对于 I-ESE 模型(模型 III)，在 ESE 模型的基础上，通过建立两个子系统之间的联系，构建了互联互通(I)-ESE 模型，并通过非线性拟合得到 ECL 与 SCL、ECL 与 ENL 之间的定量关系。基于 I-ESE 模型，我们提出了三种有效的干预策略:1.降低光强;减少对社会的影响，以及 III。划定暗夜保护区及其相应行动。

更具体地说，我们选择广州和昭通进行进一步讨论，并确定它们的最优战略:广州的战略 I 和战略 II，昭通的战略 II 和战略 III。然后，我们使用 I-ESE 模型来衡量这些策略的总体影响，特别是在广州和昭通，并使用 GE 立方体将影响可视化。实施 20 年后，广州的风险水平从 0.5153 下降到 0.0309，昭通从 0.1678 下降到 0.0885。

最后，对我们模型的灵敏度和鲁棒性进行了检验。当我们将成本设置为原始数据，增加或减少 50%时，风险水平的总体趋势差异不大，因为曲线保持相似，验证了我们模型的灵敏度和鲁棒性。

关键词:光污染，ESE 模型，LPRA 模型，AHP, K-means 算法，GE Cube

公众号: 数学建模光哥

目录

关掉灯，打开星星!..... 1

1 介绍..... 5

 1.1 问题背景..... 5

 1.2 问题重述与我们的工作..... 5

2 假设和理由..... 6

3 符号..... 6

4 建立 ESE 模型.....6

 4.1 照明数据的预处理.....7

 4.2 经济子系统评价..... 7

 4.3 社会分系统中的评价.....8

 4.4 生态分系统评价..... 9

5 光污染风险评估(LPRA)模型..... 11

 5.1 数据处理..... 11

 5.2 基于 Google 搜索索引的层次分析法 AHP 模型..... 11

 5.3 光污染风险等级严重程度量表..... 12

6 LPRA 模型的应用..... 12

 6.1 284 个地区的应用..... 12

 6.2 四地申请..... 13

7 基于 I-ESE 模型的干预策略..... 15

 7.1 建立互联- ese (I-ESE)模型..... 15

 7.2 定量影响评估..... 16

 7.3 策略一:降低光照强度..... 16

 7.4 策略二:减少光污染对社会的影响..... 18

 7.5 策略 III:划定暗夜保护区..... 19

8 案例分析:昭通与广州..... 19

 8.1 有效性分析:策略 I..... 19

 8.2 有效性分析:战略二..... 20

 8.3 有效性分析:策略三..... 21

 8.4 最优策略的选择..... 21

9 敏感性分析..... 22

10 优劣势..... 22

 10.1 优势..... 22

10.2 缺点23

参考文献。 23

附录 A..... 23

公众号：数学建模老哥

1 介绍

1.1 问题背景

据估计，地球上超过十分之一的陆地面积在夜间会受到人造光的影响，如果算上天光，这一比例将上升到 23%。[1]人造光彻底改变了人类的日常生活方式，在带来好处的同时，也导致了越来越严重的问题。人类和环境健康比以往任何时候都更严重地受到人工照明热潮的影响。不幸的是，我们现在正面临着科学家所说的“光污染”，它在几个方面对生态系统、经济和我们的社会构成了巨大的威胁。要解决这一问题，光污染对某一地点影响的测量方法，以及适当干预策略的设计都值得我们关注。一些大城市已经意识到光污染的严重性，并率先进行治理探索，但在法律依据缺乏和公众意识方面的问题已经暴露出来。在 ICM 的挑战下，我们决定建立一个模型来评估光污染，并确定相应的干预策略。

1.2 问题重述与我们的工作

考虑到背景资料和确定的限制条件，我们需要采取几项措施来解决以下问题：

- 问题重述:制定一个指标来识别和评估某一地点的光污染风险水平。

- 我们的工作:我们首先将光污染风险抽象为三个子系统，并计算了经济、社会和生态子系统的光污染风险。

- 问题重述:将我们的指标应用于四种不同类型的地点:受保护的地理位置，农村社区，郊区社区和城市社区。

- 我们的工作:使用基于谷歌搜索指数的 AHP，我们量化了某一地区的光污染风险水平。然后，我们选择了鄂尔多斯、昭通、清远和广州进行进一步的讨论。

- 问题重述:描述三种可能的干预策略及其相应的行动及其对光污染的潜在影响。

- 我们的工作:我们在三个不同的方面提出了三种有效的干预策略以及相应的具体行动。为了评估这些策略的影响，我们获得了不同方面的风险水平之间的定量关系。

- 问题重述:选择我们的两个地点，并确定在某些地点最有效的干预策略，以及它们的具体影响。

- 我们的工作:我们选择广州和昭通，通过 I-ESE 模型并评估其在 GE 立方体中的影响。

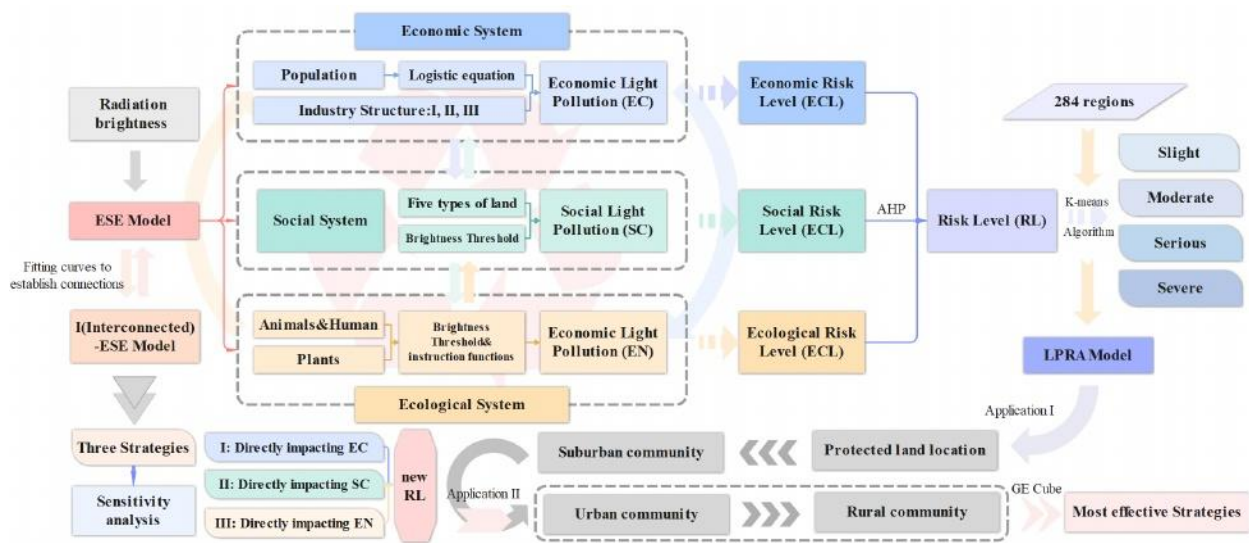


图 1:我们的研究流程图

2 假设和理由

假设:生物体的种群密度保持稳定和恒定。

理由:环境保持稳定,因为自然灾害很少发生,而出生率和死亡率通常相似。

假设:一、二、三产业结构不变。

理由:由于我们研究的地区经济发达,这些国家的产业升级基本上已经完成,因此第一、第二、第三产业的比例变化可以忽略不计。

假设:不考虑人工光在农业生产中的应用

理由:与第二产业和第三产业相比,人工光源在农业中的应用并不广泛。因此,第一产业使用的人造光比例相对较小,负面影响可以忽略不计。

假设:在考虑我们 LPRA 模型的评分时,只考虑所选区域,没有考虑其内部影响和区域间的相互作用。

理由:由于风险水平的所有方面并非仅由某一指标反映,它可能是许多因素共同作用的结果。

3 符号

Symbol	Definition
EC	Total amount of light pollution produced in the economic system
SC	The rate of light-pollution-risked land
EN	Total number of organisms affected by light pollution in an area
RL	Light pollution risk level of a certain location
ECL	The light pollution risk level in economy
SCL	The light pollution risk level in society
ENL	The light pollution risk level in ecologic system

4 建立 ESE 模型

光污染是指存在不必要的、不适当的或过度的人工照明。[2]过多的光污染冲淡了宇宙的视野，增加了能源消耗，干扰了天文研究，破坏了生态系统，同时影响了人类和野生动物的健康和安全。因此，我们必须评估我们目前因光污染而面临的这些不同方面的风险。

根据《国家地理》[3]的研究，光污染的主要影响可以分解为三个方面，从而我们分别在经济系统、社会系统和生态系统中确定光污染的风险等级。然后，我们可以建立我们的光污染风险评价模型:经济-社会-生态系统模型，本文简称为 ESE 模型。为此，我们的 ESE 模型是三个子模型的组合，将在下面的段落中分别介绍，它们都如图 2 所示:

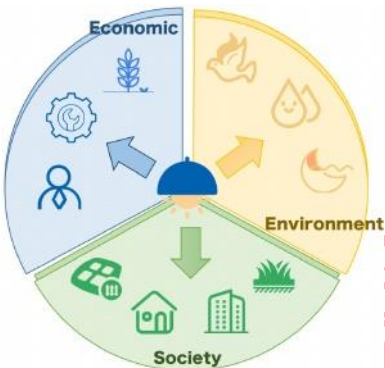


图 2:光污染风险细目

4.1 照明数据的预处理

数据预处理是一种将这些原始数据转换成人们非常想要的形式的方法，以便从中获得有用的信息，这些信息在评估光污染风险时被输入到我们的模型中

某区域的等级。我们从 LPSTI[8]中获取夜间照明原始影响(DN)的灰度值数据，然后剔除小于零的 DN 值。然后，我们对该区域的夜间照明数据进行辐射计量校正，其辐射校正方程如下:

$$L = DN^{\frac{2}{3}} \times 10^{-10} \tag{1}$$

其中，L 为校正后的辐射亮度值，DN 为原始灰度值。

4.2 经济子系统评价

光污染产生巨大的成本，在美国，每年的成本接近 70 亿美元。[4]为了评估经济系统中光污染的风险水平，我们考虑了经济系统中人口积累的现象。由于经济系统是一个复杂的、相互关联的系统，对人口的初始影响将导致对风险水平的指数级高的后续影响。受人口动力学方法[5]的启发，我们将 N 表述为如下式 2 中的逻辑增长函数:

$$\frac{dN}{dt} = r \times N \times (1 - \frac{N}{N_m}) \tag{2}$$

其中 N 代表某一位置的种群，N_m 代表种群的最大化。R 表示人口的自然增长率。然后我们可以通过分离变量、积分、重排来求解 logistic 方程，得到 N 值的解析解:

$$N(t) = \frac{N_m}{(\frac{N_m}{N_0} - 1)e^{-rt} + 1} \tag{3}$$

在考虑经济系统的成分结构时，产业被分为第一、第二和第三产业。我们合理地假设，在研究期间，这三种产业的比重保持不变。在计算出人口增长的预测值后，我们可以用下面的公式 4 来定义经济系统(EC)产生的光污染总量:

$$EC = \sum_{i=1}^3 N \times PC_i \times PLP_i \times tm_i$$

(4)

式中， PC_i 分别表示经济系统中第一、第二、第三产业的比重， PLP_i 表示第一、第二、第三产业的人均光污染。 tm_i 表示 该行业使用人造光的时间长度。

基于 联合国 [9]的数据，我们将全球过去十年的总人口和人口增长率数据进行了可视化，其中:WRL 代表世界数据，LMC 代表中低收入国家，UMC 代表中高收入国家，HIC 代表高收入国家，如图 3 所示。然后，图 4 分别显示了第一、第二、第三产业的占比。可以很容易地得出结论，在过去的十年中，不同经济部门的比例保持不变，这反映了我们假设的合理性。

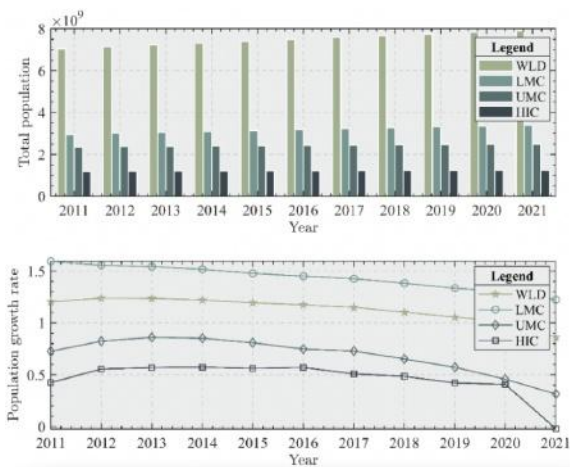


图 3:总人口和增长率

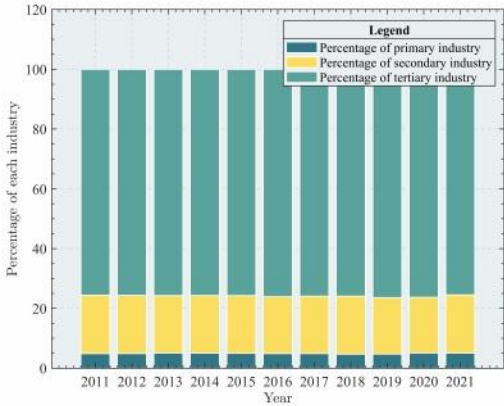


图 4:行业占比

为此，我们得到了计算经济系统产生的光污染总量的公式，因此光污染风险等级取决于经济系统受光污染的影响程度，可以用 EN 表示。

4.3 社会分系统中的评价

除了经济效应，光污染对社会方面的影响是不可否认的。低水平的人造光可能导致更高的犯罪率，因此在影响特定地点的积极和消极影响之间存在权衡。

考虑到光污染的水平 and 途径因不同的土地利用目的而异，我们将某一地点的土地分为四种类型:商业用地、住宅用地、行政用地、绿地和其他。为了更好地代表光强过高或过低时对社会环境的不同影响，我们将阈值区间设置如下:

- 光强小于阈值区间的左端点——犯罪问题的潜在风险高
 - 光照强度大于阈值区间的右端点——潜在风险高
- 交通事故

基于夜间照明设计的相关研究[8]，我们区分了不同的土地用途及其各自的特征，从而分别计算出相应的阈值区间。结果如表 1 所示。

表 1:不同土地类型的阈值区间

Classification	Characteristics	Threshold intervals
commercial land	used for the sale of goods and services	10~20
residential land	used for housing	3~6
administrative office land	for non-profit facilities	15~25
green land	main existential form to improve urban ecology	≤ 3
others	/	2~5

根据 The night sky in The World[9]的数据，我们获得了请求区域中落在阈值区间之外的每种土地类型的面积。因此，我们可以用阈值外面积占各类土地总面积的比例来计算光污染风险土地(SC)的比率，如式 5 所示：

$$SC = \frac{Area_{co} + Area_{re} + Area_{gr} + Area_{ad} + Area_{ot}}{Area_{total}}$$

(5)

其中， $Area_{co}$ 、 $Area_{re}$ 、 $Area_{gr}$ 、 $Area_{ad}$ 、 $Area_{ot}$ 为商业用地、住宅用地、行政用地、绿地等超出阈值区间的面积。 $Area_{total}$ 为所有类型的总面积。通过 SC 的计算，可以得到光污染风险土地的比例，从而评价某一地区的光污染风险水平。

4.4 生态分系统评价

夜间光污染超过一定程度，可能影响夜间活动生物物种的正常生存，如迁徙模式、作息习惯、栖息地形成等。因此，我们假设光污染风险等级在于动植物受光污染影响的程度。

一项针对美国各地约 3000 个城市地点的研究[10]发现，夜间持续暴露在人造光下的树木和其他木本植物比没有夜间灯光的树木和其他木本植物早几天开始长叶。不同温度下的明显差异如图 5 所示。

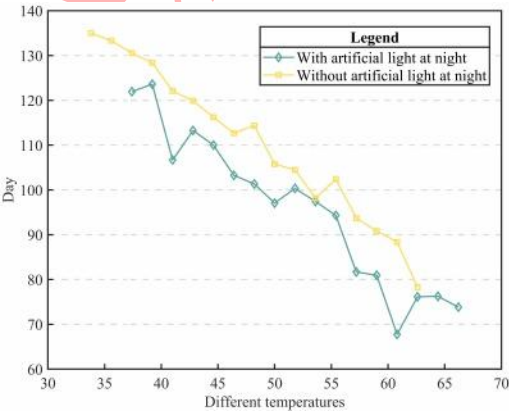


图 5:一年中叶芽发芽的日子

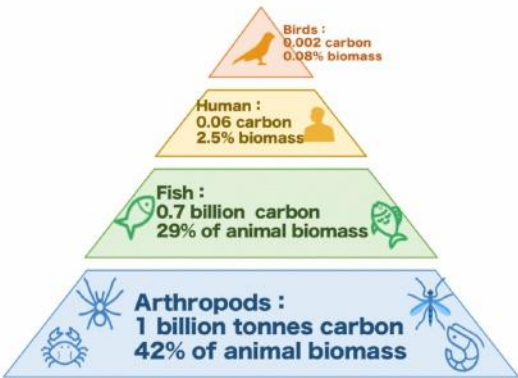


图 6:物种比例

对于生态系统的评价，我们选择了 7 个目标对象:啮齿动物、鸟类、普通鱼类、热带鱼、树木、普通人和光敏人，而部分物种的比例列在图 6 中。然后我们将它们分为三

类——水生动物(普通鱼类和热带鱼)、陆生动物(啮齿动物、鸟类和树木)和人类(普通和光敏)。下面的表 2 显示了光对动物和人类节律影响的照明阈值。[6]

表 2:光照作用的照明阈值

Classification	Illumination suppression threshold(lx)
Rodents	0.03
Birds	0.3 ~ 1
Tree	0
Common Fish	1
Tropical fish	0.3
Human(Photosensitive)	6
Human(ordinary)	40 ~ 350

前 4 个阈值来自 Yun, Hee-Kyung[7]的研究，而树木的阈值则基于一项关于夜间城市灯光对生长季节影响的研究。一项针对美国各地约 3000 个城市地点的研究发现，夜间暴露在持续人造光下的树木和其他木本植物比没有夜间灯光的树木早几天开始长叶。这种差异在不同温度下都很明显，因此我们将树木的阈值设为 0。

可以得出结论，一旦光强大于阈值，光污染就会影响活物种的正常生存。因此，我们使用以下公式来计算一个区域受光污染影响的生物体总数(EN)。基于前三类，我们分别计算了它们的 EN。

地球人:

$$EN_t = \sum_{i=1}^3 type_i \times pl_1 \times 1_A(lg \geq lm_i) \times R \tag{6}$$

然后，对于水生动物:

$$EN_a = \sum_{i=4}^5 type_i \times pl_2 \times 1_A(lg \geq lm_i) \times R \tag{7}$$

最后，对于人类:

$$EN_h = \sum_{i=6}^7 type_i \times 1_A(lg \geq lm_i) \times R \tag{8}$$

地点:

- $type_i$ 分别 表示啮齿动物、鸟类、树木、普通鱼类、热带鱼、普通人和光敏人类的种群密度。
- pl_i 表示陆地($i=1$)和水域($i=2$)所覆盖表面积的比例。
- lm_i 代表啮齿动物、鸟类、普通鱼类和热带鱼对褪黑素分泌阈值的抑制，见表 2。
- R 表示某一位置的总表面积。
- lg 表示该区域的光照水平。需要注意的是，该指令是有效的当光照强度大于阈值时， $1_A(lg \geq lm_i)$ 等于 1，反之等于 0。

由此得到式 9 中计算某区域内受光污染影响的生物总数(EN)的公式:

$$EN = EN_t + EN_a + EN_h \tag{9}$$

EN 越高, 表示某一区域受光污染影响的生物越多, 对生物圈的破坏越大, 生态系统的光污染风险越高。为此, 我们建立了生态风险模型, 并采用 EN 法对生态系统光污染风险进行评价。

为此, 我们建立了三个环环相扣的子模型——经济-社会-生态系统模型, 分别从三个方面评价光污染风险水平。通过 EC、SC 和 EN 三个指标, 我们可以使用后面介绍的 AHP 模型来具体评价某一地区的光污染风险水平。

5 光污染风险评估(LPRA)模型

5.1 数据处理

ESE 模型的三个子系统具有不同的得分指标维度。为了消除由于不同维度造成的数据影响, 我们首先对每个指标的数据进行归一化, 这意味着我们测量的分数被限制在 0 到 1 的范围内。由于三个子系统构成的风险水平是一个正指标, 我们使用以下公式进行归一化:

$$x_i^{new} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \tag{10}$$

x_i^{new} 表示归一化后的数据, x_i 表示初始数据, n 表示数据个数。

5.2 基于 Google 搜索索引的层次分析法 AHP 模型

为了衡量和评估一个地区的光污染风险水平, 我们考虑了其经济、社会和生态三个方面的风险。因此, 我们需要将标准化 ESE 模型的三个子系统:ECL、SCL 和 ENL 的分数结合起来, 形成指标 RL。

经济、社会和生态风险的风险水平。被认为是。然后我们建立初始比较矩阵。

$$M = (a_{ij})_{3 \times 3}$$

a_{ij} 表示索引 i 对索引 j 的相对重要性, 搜索索引可以在一定程度上反映特定时间人们关注的热度, 可以用来规避层次分析法的主观性。三个部分的搜索指数如下图所示。我们得到的“经济”搜索指数为 63.41, “社会”为 65.46, “生态”为 68.47。于是我们得到了矩阵中各指标的相对重要性:

$$M_0 = \begin{bmatrix} 1 & 63/65 & 63/68 \\ 65/63 & 1 & 65/68 \\ 68/63 & 68/65 & 1 \end{bmatrix}$$

归一化后的特征向量为(0.3214,0.3316,0.3469), 如图 8 所示。

因此, 取 $W = (0.3214, 0.3316, 0.3469)$ 作为 ECL SCL 和 ENL 之间的权重向量。

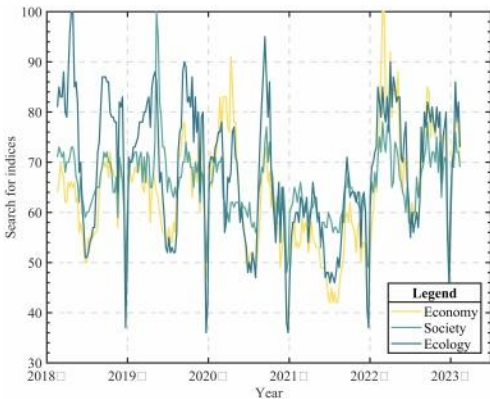


图 7:Google Search Index

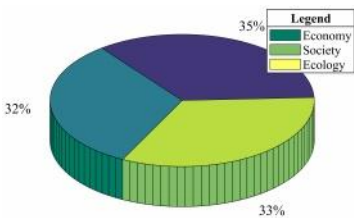


图 8:各组成部分的比例

一致性检验后，我们就可以完成风险等级的量化。基于权重向量 sw_0 ，我们计算公式 11 中的风险等级得分。

$$RL = W_1 \times ECL + W_2 \times SCL + W_3 \times ENL \tag{11}$$

其中 RL 表示光污染的风险等级。ECL、SCL 和 ENL 分别代表经济、社会和生态风险水平。

5.3 光污染风险等级严重程度量表

我们将中国全部 284 个地区划分为四个塑料垃圾严重程度等级。轻微，中度，严重和严重，通过使用 K-means 算法将数据集聚为三个，将数据集分为表 3 中的四个聚类。

表 3:基于 K-means 的分类

Degree	Slight	Moderate	Serious	Severe
Maximum Value	0.17050261270	0.25424527533	0.39769974082	0.61860669274
Minimum Value	0.04432992940	0.17050261270	0.25424527533	0.39769974082
Cluster Center	0.12108674	0.215758722	0.293293568	0.484986811
Number of regions	64	159	46	15

6 LPRA 模型的应用

6.1 284 个地区的应用

我们使用 LPRA 模型计算了所有 284 个地区的得分。具体的风险水平可以在附录 a 中找到。更重要的是，我们创建了图 9 来分析光污染水平的分布，并从中选择了四个类别来分析模式。

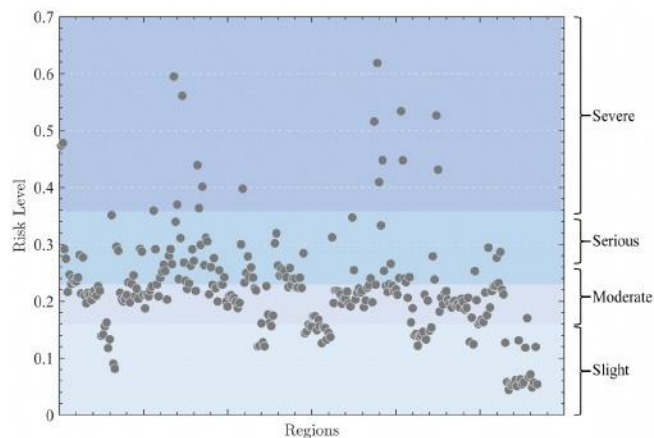


图 9:284 个地区的光污染风险水平

可以看出，光污染风险等级的分布呈现中部多、末端少的趋势。它显示了这些地区的均衡发展，高风险水平多集中在不太繁荣的城市，而低风险的村庄数量也较少。

同时，我们根据图 10 中的省级风险等级，绘制了中国各地区光污染风险热图。我们选择了四种不同类型的区域——受保护的地理位置、农村社区、郊区社区和城市社区——来测量和估计风险水平。



图 10:中国大陆地区光污染风险水平热图

6.2 四地申请

为了使结果更具代表性而又不失适应性，我们选择了鄂尔多斯、昭通、清远和广州四个不同的中国城市分别作为保护地、农村社区、郊区社区和城市社区的位置。

对于每个地点，我们收集了其人口、面积、气候等基础数据。来自国家统计局 [11]，以及上面提到的 ESE 模型中使用的数据。然后，使用 LPRA 模型分析每个地点的光污染风险水平，而每个指标(EC, EN, SC)的值由雷达图表示。对比结果如图 11 所示。

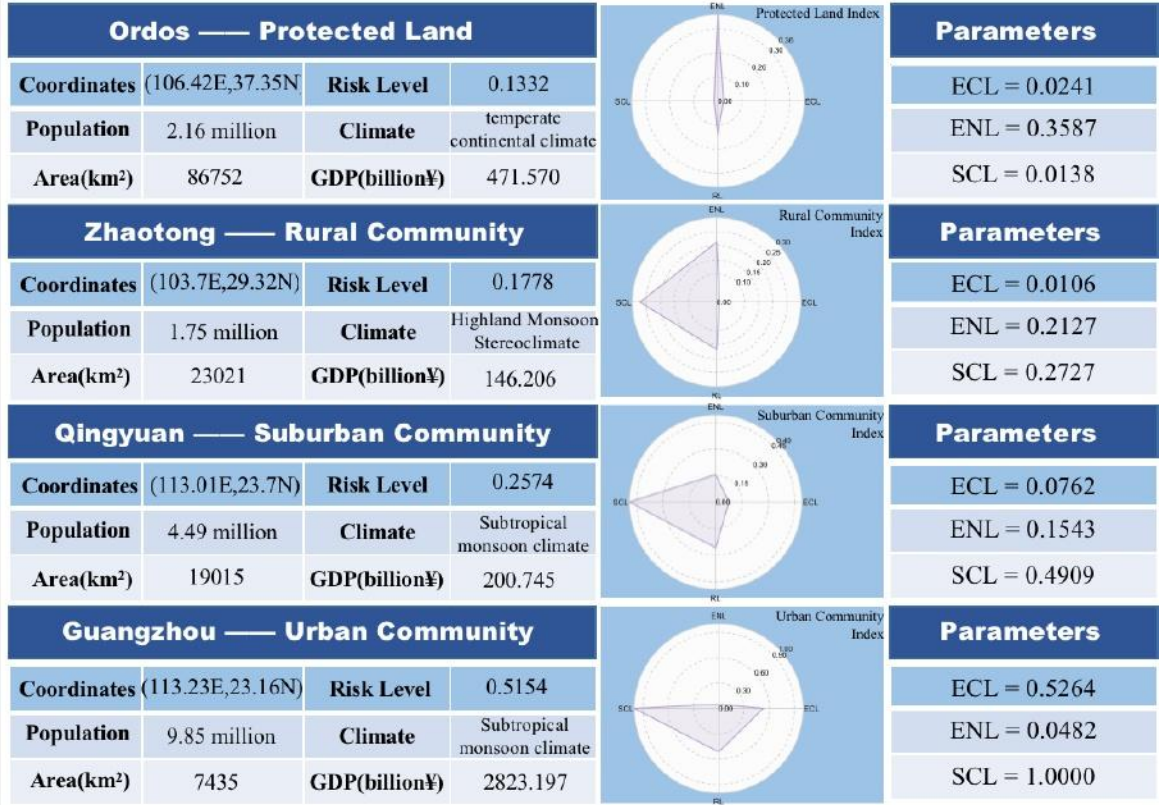


图 11:四个地点的信息

•保护土地

鄂尔多斯残鸥国家级自然保护区位于亚非沙漠东部边缘，2001 年被提升为国家级自然保护区，主要保护对象为残鸥等野生鸟类和沙漠生态系统[12]。因此，本文选择鄂尔多斯市为研究对象，对土地保护地光污染风险进行评价。

从图 11 可以看出，鄂尔多斯的 ENL 值显著高于其他三个位置，而 SCL 值显著低于其他三个位置。它们主要作为不同物种的栖息地，并有助于保护濒危物种，这与自然保护区的客观事实是一致的，而经济和社会方面通常不是自然保护区的主要考虑因素。这一结果充分证明了我们模型的有效性。

•农村社区

昭通地处云南乌蒙山腹地，境内 96.3%为山地，石漠化严重。交通不畅，技术水平不高，深山中的人们生存困难。因此，我们以昭通为农村社区，评估其光污染风险水平。

从图 11 可以看出，昭通的 ECL 和 SCL 在四个地点中都相对较低，说明昭通的经济系统受光污染的影响最小。由于昭通的经济生产主要依赖于农业，其光污染程度较轻，因此这一结果符合我们的假设，也符合实际情况。然而，相对落后的社会发展水平和极其不方便的交通导致了相对脆弱的社会方面。

•郊区社区

清远地处珠三角经济区边缘，地域辽阔，发展不平衡。就地理位置而言，清远是广东最宜居的城市，风景优美。从某种意义上说，它已经成为广东的后花园，因此我们将清远视为一个郊区社区并应用我们的模式。结果表明，清远地区由于生物储量低、种群数量多，具有较高的 SCL 和较低的 ENL。

•城市社区

广州是广东省会，也是中国的国际贸易中心和综合交通枢纽。因此，我们将广州作为一个城市社区来考虑并应用我们的模型是合理的。

从图 11 可以看出，广州的 SCL 和 ECL 最高，ENL 最低，这证实了我们的模型设置，因为广州的光污染国内生产总值和社会发展水平在现实中都很高。

7 基于 I-ESE 模型的干预策略

7.1 建立互联- ese (I-ESE)模型

经济、社会和生态系统相互依存，密不可分。任何政策都不能只对其中的一部分起作用。改变一个系统的风险水平会对其他系统产生潜在影响。

在建立 ESE 模型(模型 I)的过程中，我们确定了光污染风险

分别在经济系统、社会系统和生态系统中划分了三个层次，并在此基础上分别构建了三个模型。为了确定不同策略对场地光污染风险的总体影响，并评估其对三个子系统的潜在影响，有必要建立 ECL、SCL 和 ENL 之间的相关性。

在确定了三个子系统之间的联系后，我们需要测试两者之间的相关性。其中 ECL 与 ENL 呈显著负相关，ECL 与 SCL 呈显著负相关。因此，我们通过对具有相关性的变量构建非线性回归得到观测值和拟合曲线，如图 12 所示。

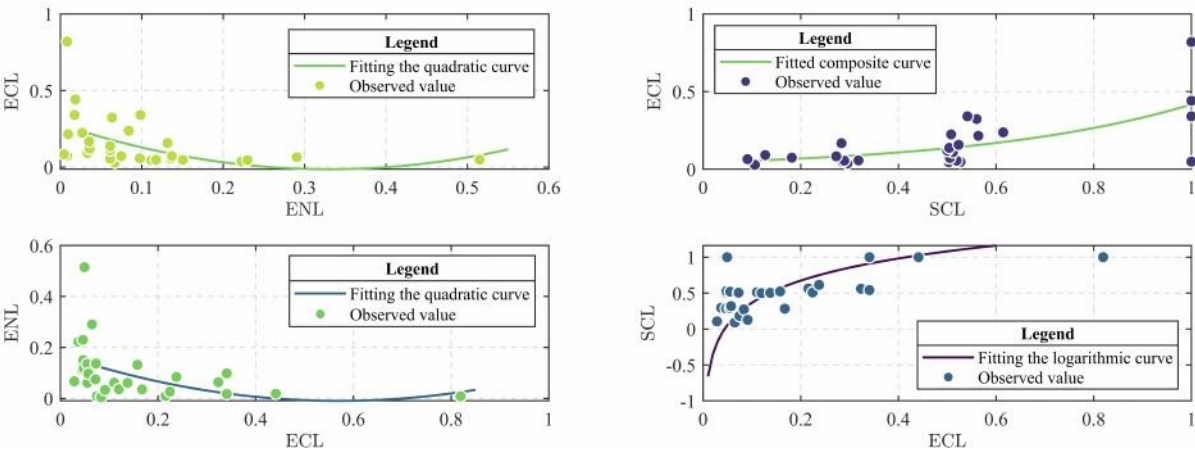


图 12:三个子系统的拟合曲线

同时，我们在表 4 中给出了二与二的定量关系。

表 4:子系统之间的数量关系

Serial No.	Curve Type	Equation
A	Quadratic curve	$ECL = 0.279 - 1.774 \times ENL + 2.686 \times ENL^2;$
B	Composite curve	$ECL = 0.044 \times 9.472^{SCL}$
C	Quadratic curve	$ENL = 0.171 - 0.634 \times ECL + 0.556 \times ECL^2$
D	Logarithmic curve	$SCL = \log_{9.472}(ECL)$

在此基础上，构建了三个子系统相互作用的风险评估系统 I-ESE 模型。

7.2 定量影响评估

为了评估战略对系统风险的影响，我们需要考虑风险评估的降低值(ΔX)。

为了评估每个策略对风险水平降低的影响，我们需要引入光污染投资成本(cost)。影响是用一个恒定的投资成本来估算的。考虑到各地区发展水平的差异，我们根据《2021 年生态环境统计年报》得出环境污染治理成本约占 GDP 的 8.43‰，为 cost = 0.000843 ×GDP。

在得到系统风险降低后，我们可以在式 12 中得到新的子系统风险水平(XL)。

$$XL_{new} = \frac{(X - \Delta X) - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

(12)

其中 X 代表三个子系统的风险，取 EC、SC 和 EN 的值。

其中一个子系统的风险水平受策略的影响，另外两个系统的风险水平受 I-ESE 模型的影响。由此，我们得到了三个指标——ecl、SCL 和 ENL。

在得到这三个子系统的风险水平后，我们将其代入模型 II (LPRA)的方程 11，得到实施(RLnew)策略后的风险水平。

基于这三个相互关联的子系统，我们在图 13 中提出了三个方面的具体策略。

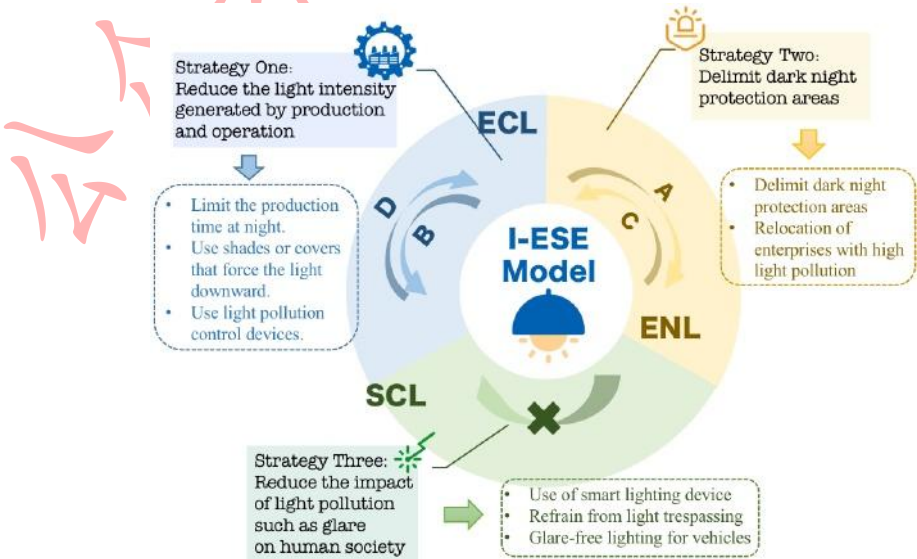


图 13:干预策略概述

7.3 策略一:降低光照强度

国际暗天协会估计，所有照明的 1/3 被浪费，每年造成 22 亿美元的损失。[14]降低光强的措施主要在于经济方面，因为光污染的经济影响可能和生态方面一样具有悲剧性。

具体行动

合理限制企业夜间生产经营时间

在非生产时间关掉不必要的灯可以极大地帮助减少光污染。适当限制一些高光污染行业的生产和经营时间，在经济上极大地有助于降低光强。

使用迫使光线向下的阴影或覆盖物

在制作过程中，使用遮光罩或遮光罩来帮助光线更好地聚焦在预期的照明区域是一种有效的方法。它们的使用产生较少的溢出，这可以是原始灯具的一部分，也可以单独购买。

使用光污染控制设备如今，有很多方法可以自动限制光线

配合照明控制使用。例如:使用调光器来降低光的强度，

运动传感器，只有当有人在该区域时，灯光才会打开，计时器控制灯光的打开和关闭。

潜在影响

该战略主要通过限制夜间的生产和操作时间来发挥作用。因此，企业减少生产经营时间(Δt)的公式如式 13 所示。

$$\Delta t = t_{initial} - t_{limit} = \frac{Cost}{P_2 + P_3} \tag{13}$$

其中 $t_{initial}$ ，表示企业停止生产经营的规定时间， t_{limit} 表示不干预的原有生产经营停止时间， P_2 表示第二产业 P_3 每小时平均产值，表示服务业每小时平均营业额。利用 Δt 和总体(N)，我们得到式 14 中 EC 的减少量(ΔEC)。

$$\Delta EC = N \times (PC_2 \times PLP_2 + PC_3 \times PLP_3) \times \Delta t + \Sigma \delta \tag{14}$$

PLP_2 表示 2 第二产业的光污染， PLP_3 表示第三产业的光污染，以及 $\Sigma \delta$ 表示余下措施所减少的光污染。

计算出 ΔEC 后，代入式 12，计算战略实施后的经济风险水平(ECL_{new})。然后，通过引入基于 I-ESE 模型的方程 C 和 D，推导出新的社会(SCL^{new})和环境(ENL^{new})风险水平。为此，光污染风险等级(RL_1^{new})由式 11 计算。

因此，我们根据改变策略后 SCL^{new} 和 ENL^{new} 的变化来衡量潜在影响，而风险水平(RL^{new})的变化表明总体影响。

综上所述，在简化模型的基础上，在不丧失通用性的前提下，我们将合理限制夜间企业的生产经营时间作为降低光强的主要措施，并评价其对 ECL 的影响。

7.4 策略二:减少光污染对社会的影响

夜间过多的人造光会扰乱周期，抑制褪黑激素的产生，对人体健康产生负面影响。此外，夜间能见度低带来的与安全相关的危险是由刺眼的灯光引起的，并导致我们社会中更多的光污染风险。

具体行动

使用智能照明设备

LED 灯技术在过去几年中发展迅速，这是帮助减少光污染的最佳类型的光，因为它们的光束比其他类型的光(如荧光灯或金属卤化物)更集中。因此，切换到 LED 照明，在不影响能见度的情况下降低亮度，能够有效地消除社会风险。

避免光线侵入使用明亮的户外灯光指向邻近的房屋可能会增加睡眠障碍的风险。因此，必须确保室外灯光不进入民居。例如，遮光罩有很多好处，包括减少眩光和改善夜视能力。

夜间驾驶车辆的无眩光照明夜间驾驶时的昏暗照明对于已经用人工照明照明的街道和高速公路来说已经足够了。因此，室外有眩光的灯应该换成低眩光的替代品。

潜在影响

这一措施的实施主要是通过智能设备的使用和扩展，因此需要计算需要更换的路灯数量，如式 15 所示。

$$Num = \frac{Cost}{P + P_{work}} \tag{15}$$

式 work 中 Num 表示需要放置的智能照明设备数量，P 表示智能设备价格，P_{work}表示施工价格。

在得到给定一定成本下需要更换的路灯数量后，通过更换前后路灯亮度的差值，可以计算出公式 16 中 SC 的减少量(ΔSC)。

$$\Delta SC = (light_{initial} - light_{smart}) \times Num + \Sigma \delta \tag{16}$$

其中 light_{initial} 表示原有路灯的亮度，light_{limit} 表示使用智能路灯后的亮度，Σδ表示剩余措施减少的光污染。

得到ΔSC，代入式 12，计算实施策略二后的社会风险水平(SCL^{new})。然后通过在我们的 I-ESE 模型中引入方程 B 来推导新的经济风险水平(ECL^{new})。然后，将式 11 代入，得到光污染风险等级 RL₁^{new}。

因此，我们通过评估实施该策略后 SCL^{new} 的变化来衡量潜在影响，风险水平(RL^{new})的变化表明总体影响。

7.5 策略 III:划定暗夜保护区

近年来，生态系统和光污染的矛盾越来越突出。由此可见，产业转型是协调经济发展与环境保护，实现可持续发展、降低光污染风险的关键途径。

具体行动

划定暗夜保护区

中国生物多样性保护与绿色发展基金会表示，鼓励具有一定生物密度规模的地点划定暗夜保护区，严格控制保护区内及周围的灯光使用。

•潜在影响为了更好地理解和全面实施战略三，我们最好为特定物种设立保护区。因此，计算保护区的实施程度就显得尤为重要，我们得到了公式 17 来建立保护区的面积。

$$Sq_{protect} = \frac{Cost}{C_{protect}} \tag{17}$$

- $sq_{protect}$ 表示一个地点的生态保护区面积。得到 $Sq_{protect}$ 后，我们可以对生态系统中的方程进行改进。既然光污染保护区的建立只需要考虑植物和动物。则可以计算 EN 的减少量(ΔEN)，如式 18 所示。

$$\Delta EN = \sum_{i=1}^3 type_i \times pl_1 \times 1_A(lg \geq lm_i) \times Sq_{protect} + \sum_{i=4}^5 type_i \times pl_2 \times 1_A(lg \geq lm_i) \times Sq_{protect} + \Sigma \delta \tag{18}$$

$\Sigma \delta$ 表示通过剩余的措施来减少光污染

计算出 ΔEN 后，代入式 12，计算战略实施后的生态风险水平(ENL^{new})。然后通过引入基于 I-ESE 模型的方程 A，推导出新的经济风险水平(ECL^{new})。然后，将式 11 代入，得到光污染风险等级 RL_1^{new} 。

因此，我们根据改变策略后 EN^{new} 的变化来衡量潜在影响，而风险水平(RL^{new})的变化表明了总体影响。

8 案例分析:昭通与广州

为了验证 I-ESE 模型并确定最有效的策略，我们选择了两个典型的城市:昭通与广州来应用我们的模型。

8.1 有效性分析:策略 I

随着战略一的进一步实施，ECL 的价值随着企业停止生产和服务的规定时间的提前而 t_{limit} 降低。基于我们的 ESE 模型(模型 1)中的 Logistic 模型，两个城市的人口都呈现增长趋势，因此 ECL 将随着人口的增长而持续上升。为了更直观地显示策略干预的影响，我们使用 d 值来表示策略一实施后与未实施策略一的风险水平之差，基于中国统计年鉴[12]2021 年的数据，我们计算了策略 new 一实施后的 $ECLT^{new}$ 、 ENL^{new} 、 SCL^{new} 和 RL^{new} 值 与未干预的 ECL、ENL、SCL 和 RL 值之间的差异，d 值如图 14 和图 15 所示。

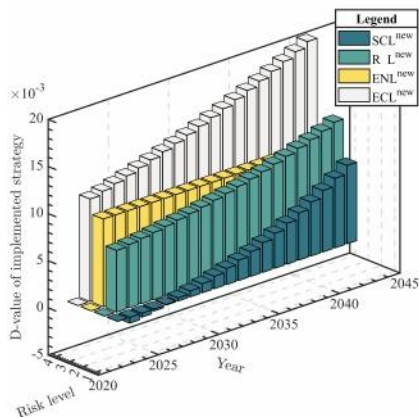


图 14:策略一在 GZ 的 d 值

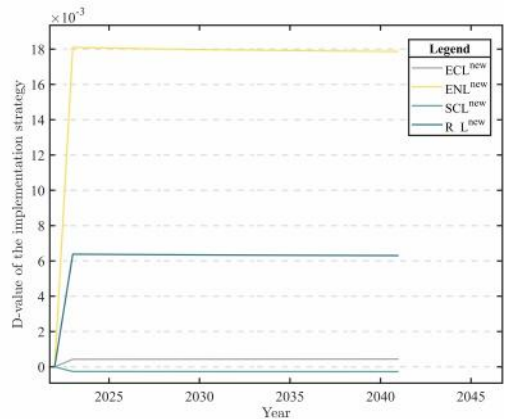


图 15:策略一在 ZT 中的 d 值

可以明显看出，广州实施“战略一”20年后，SCL、ECL 和 RL 的 d 值都在以越来越快的速度增长，ECL 的 d 值为 0.0197,SCL 的 d 值为 0.0083,RL 的 d 值为 0.0123。除 ENL 外，其他线均呈上升趋势，斜率为正，表明策略一在广州的社会经济方面相对有效。我们认为，广州人口多、经济体量大，主要导致光污染风险等级消除的空间更大。

昭通的 ENL 改善更明显，2041 年其 d 值达到 0.0178,SCL 和 ECL 的影响相对较小，ECL 的 d 值为 0.0004。到 2023 年，两者的 d 值均达到较高水平，ENL 为 0.0181,RL 为 0.0063。此后 d 值保持稳定，代表战略一在昭通三方面的影响趋于稳定。这与战略一由于其运输能力差、技术水平低，对经济和社会方面的影响相对没有有效传递的事实是一致的。

8.2 有效性分析:策略二

在智能设备的使用和推广方面采取了更多的措施，社会方面的改善体现在实施策略后的 SCL^{new} 的变化上。因此， ECL^{new} 、 ENL^{new} 、 SCL^{new} 和 RL^{new} 值和原始水平的值如图 16 所示。

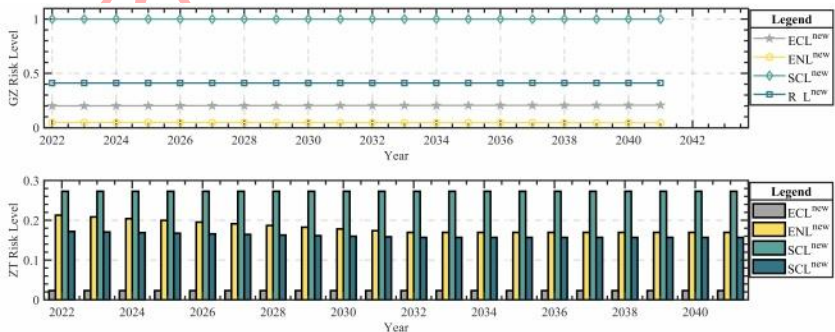


图 16:策略二的影响

可以看出，广州的 SCL 和 ECL 由于策略二的干预而大大降低，ECL 从 2022 年的 0.5264 下降到 2041 年的 0.0440,SCL 从 1 下降到 0.0229，这表明智能照明设备的干预不仅在社会方面，而且在生态方面都有很大的改善。同时，昭通的数据显示，在 2030 年，SCL 和 RL 达到相对较低的位置 0.0100 和 0.0885，此后保持稳定，而其他风险水平

保持相对不变。昭通的研究结果与现实情况一致，即居民居住密度低、出行频率低，可能会降低战略干预的影响。

8.3 有效性分析:策略三

对于策略三，我们确定了一系列行动，将严重光污染的产业转移到低生物密度地区，其改善将主要表现在两个城市的 ECL 下降。

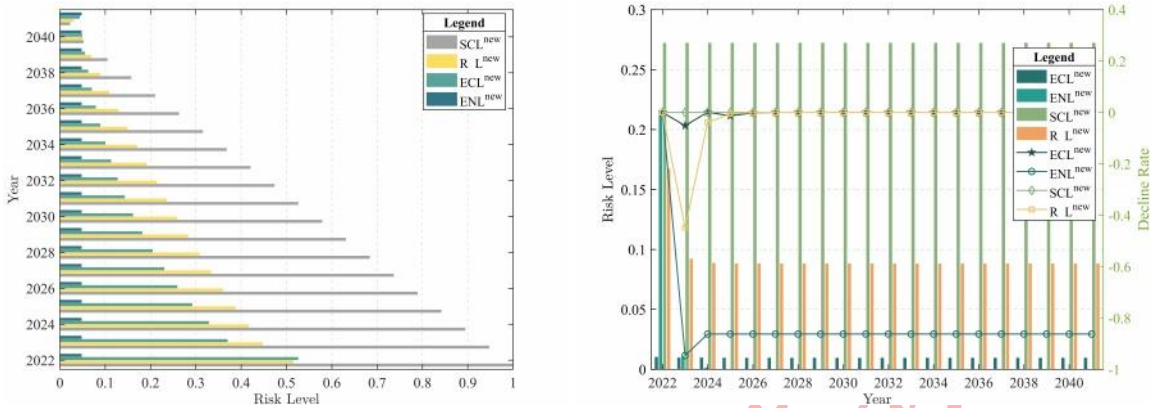


图 17:战略三对 GZ 的影响图 18:战略三对 ZT 的影响

从图 17 可以看出，通过对保护区的干预和特定产业的搬迁，广州的光污染风险水平没有明显的变化趋势，说明策略三对广州光污染风险水平的影响有限，部分原因是广州的生物密度相对较低。昭通的 ENL 在 2032 年达到相对较低的 0.1695 之前有一个向下倾斜的趋势，其他地区也保持稳定。

8.4 最优策略的选择

基于影响分析和我们的 I-ESE 模型，我们现在可以评估和比较三种策略之间的有效性，从而确定广州和昭通的最优策略。我们没有对不同风险水平进行平行比较，而是建立了 GE 立方体，更直观地展示了策略实施前后的 ECL、SCL、ENL 和 RI 的变化。我们在三维直角坐标系中分别建立广州和昭通的 GE 立方体，其中红点表示有和没有策略一的风险等级位置，蓝点表示有和没有策略二的风险等级位置，黄点表示有和没有策略三的风险等级位置，如图 19 和图 20 所示。

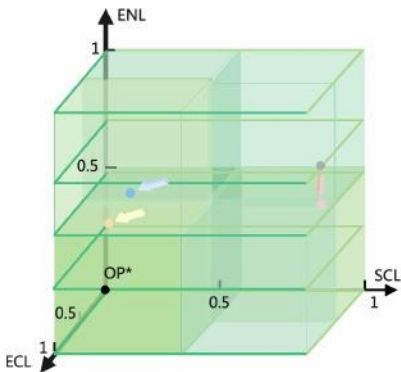


图 19:广州 GE 立方体

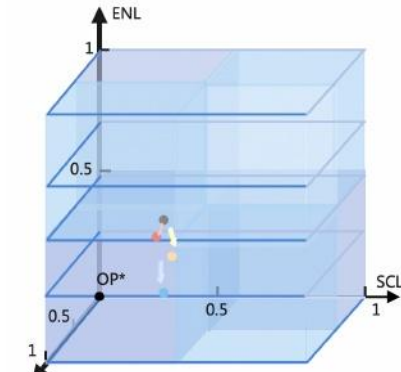


图 20:昭通 GE 立方体

很明显，对于广州来说，策略二在消除光污染的负面影响方面取得了巨大的进步，同时在昭通也产生了巨大的变化。为了比较两个位置的差异，我们绘制了一个 GE 立方

体，其中 x 轴表示 ECL, y 轴表示 SCL, z 轴表示 ENL。OP*表示光污染风险最小的最优
点

因此，我们分别针对这两个城市提出了最优策略:

•广州:战略二+战略一

我们选择战略二——减少光污染对社会的影响——作为实施的主要战略，战略一——降低光强——作为次要战略。这启发了广州的政策制定者在不忽视经济考虑的情况下推广智能照明设备的使用。

一旦实施这些策略，将在各个方面看到积极的变化，特别是在减少 SCL 和 ECL 方面，这在有效性分析中进行了评估，如图 19 所示。

•昭通:战略二+战略三

对于昭通，我们认为战略二是主要战略，战略二是划定夜间保护区的战略三。尤其要注意智能照明设备的使用，避免灯光越界，同时也要慎重限制企业夜间的生产经营时间。

在生态和社会方面的努力将会很明显，而正如我们刚才分析的那样，一般的光污染风险水平将会降低。

9 敏感性分析

由于各地用于光污染的投资价值差异较大，我们测试了不同投资金额的风险水平变化对 RL 的影响。通过调整 Cost，我们可以通过不同的策略直接或间接地影响 ECL、SCL 和 ENL，从而影响 RL。

我们设置成本增加 50%，原始数据减少 50%，并绘制广州和昭通病例敏感性分析结果。从图 21 和图 22 可以看出，整体改变投资后，三种策略的风险水平曲线趋势保持不变。这验证了我们模型的灵敏度和鲁棒性。

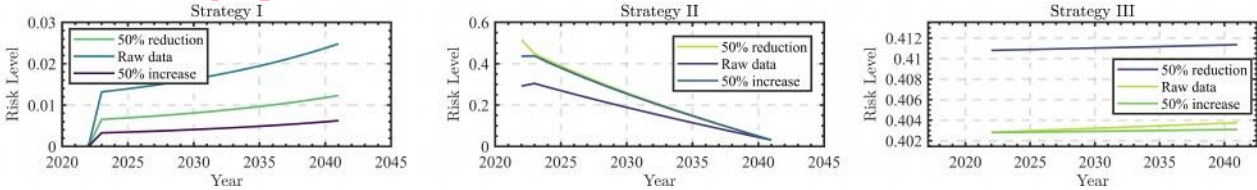


图 21:广州的敏感性分析

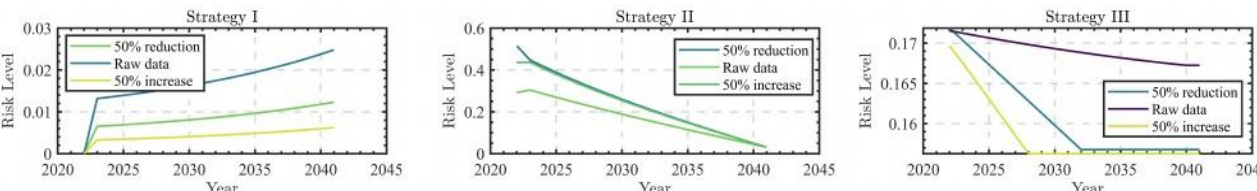


图 22:昭通的敏感性分析

10 优劣势

10.1 优势

•在我们的 ESE 模型中，我们设计了模拟算法，模拟了某一地点在经济、社会和生态方面的光污染风险水平，接近现实生活，具有一定的参考意义。

•我们在 LPRA 模型中建立了多层次的指标体系，第一级指标覆盖范围广，第二级指标更细致，所以我们构建的模型全面细致。

•经过仿真，我们发现我们的模型在实施最优策略后，在四个主要指标(ENL、SCL、ECL 和 RL)上有了显著的进步，说明我们的模型是有效的。

•我们考虑了经济、社会和生态方面的各种指标，从而构建了我们的模型比较全面、客观。

10.2 缺点

•由于一些数据不可用，我们的一些参数是基于半信半疑的猜测。

•尽管我们的模型考虑的问题指标非常全面，但由于一些指标数据缺失，我们只能在数据真实完整的情况下选择可以考虑的指标进行分析。

参考文献。

[1] Gaston, K.J., Duffy, J.P., Gaston, S. et al. Human alteration of natural light cycles: causes and ecological consequences. *Oecologia* 176, 917–931 (2014).

[2] https://en.wikipedia.org/wiki/Light_pollution

[3] <https://education.nationalgeographic.org/resource/light-pollution/>

[4] Terrel Gallaway, Reed N. Olsen, David M. Mitchell, The economics of global light pollution, *Ecological Economics*, Volume 69, Issue 3, 2010, Pages 658-665, ISSN 0921-8009

[5] <https://mathworld.wolfram.com/LogisticEquation.html>

[6] Grubisic M, Haim A, Bhusal P, et al. Light pollution, circadian photoreception, and melatonin in vertebrates[J]. *Sustainability*, 2019, 11:1-51.

[7] <https://doi.org/10.14249/eia.2019.28.1.63>

[8] <http://www.ldhyw.com/zcfg/csyjzmsjgf.asp>

[9] <https://data.un.org>

[10] <https://academic.oup.com/pnasnexus/article/1/2/pgac046/6569705>

[11] <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>

[12] <https://www.cma.gov.cn>

[13] <http://www.inquinamentoluminoso.it/dmsp/index.html>

[14] International Dark-Sky Association. *Practical Guide to Light Pollution*. Tucson, Arizona: International Dark-Sky Association, 2011.

[15] <https://www.darksky.org/light-pollution/wildlife/>

附录 A

Regions	RL	Regions	RL	Regions	RL	Regions	RL	Regions	RL	Regions	RL	Regions	RL	Regions	RL	Regions	RL	Regions	RL	Regions	RL
Beijing	0.473	Changchun	0.292	Huainan	0.254	Liaochen	0.224	Shenzhen	0.619	Meishan	0.193	Dalian	0.288	Hangzhou	0.439	Qingdao	0.32	Xiangtan	0.203	Deyang	0.215
Tianjin	0.478	Jilin	0.287	Ma'ansha	0.229	Binzhou	0.241	Zhuhai	0.409	Yibin	0.197	Anshan	0.214	Ningbo	0.363	Zibo	0.262	Hengyang	0.215	Shenyang	0.296
Shijiazhu	0.291	Siping	0.211	Huaibei	0.229	Heze	0.223	Shantou	0.333	Guang'an	0.189	Wushun	0.203	Wenzhou	0.299	Zaozhuar	0.245	Shaoyang	0.223	Suqian	0.218
Tangshan	0.275	Liaoyuan	0.187	Tongling	0.242	Zhengzhe	0.284	Foshan	0.448	Dazhou	0.204	Benxi	0.2	Jiaxing	0.401	Dongying	0.257	Yueyang	0.215	Jinan	0.302
Qinhuang	0.216	Tonghua	0.212	Anqing	0.199	Kaifeng	0.143	Jiangmen	0.253	Ya'an	0.199	Dandong	0.203	Huzhou	0.263	Yantai	0.247	Changde	0.219	Luzhou	0.194
Handan	0.247	Baishan	0.209	Huangsha	0.19	Luoyang	0.147	Zhanjiang	0.227	Bazhong	0.185	Jinzhou	0.211	Shaoxing	0.311	Weifang	0.253	Zhangjiaj	0.189	Zhuzhou	0.254
Xingtai	0.23	Songyuar	0.22	Chuzhou	0.21	Pingdings	0.159	Maoming	0.216	Ziyang	0.188	Yingkou	0.233	Jinhua	0.305	Jining	0.241	Yiyang	0.201	Haikou	0.279
Baoding	0.239	Baicheng	0.226	Fuyang	0.211	Anyang	0.156	Zhaoqing	0.23	Guiyang	0.206	Fuxin	0.198	Quzhou	0.212	Tai'an	0.225	Zhizhou	0.224	Panzhihu	0.206
Zhangjiaj	0.235	Harbin	0.359	Suzhou	0.205	Hebi	0.155	Huizhou	0.265	Liupansh	0.128	Liaoyang	0.23	Taizhou	0.26	Weihai	0.259	Yongzhou	0.228		
Chengde	0.235	Qiqihar	0.291	Liu'an	0.206	Xinxiang	0.174	Meizhou	0.227	Zunyi	0.171	Panjin	0.246	Lishui	0.228	Rizhao	0.228	Huaihua	0.24		
Cangzhou	0.241	Jixi	0.229	Maozhou	0.199	Jiaozuo	0.174	Shanwei	0.217	Anshun	0.124	Tieling	0.209	Hefei	0.276	Laiwu	0.24	Loudi	0.198		
Langfang	0.281	Hegang	0.209	Chizhou	0.188	Puyang	0.149	Heyuan	0.221	Kunming	0.253	Changyar	0.222	Wuhu	0.223	Linyi	0.239	Zigong	0.182		
Hengshui	0.213	Shuangya	0.241	Xuanche	0.197	Xuchang	0.168	Yangjian	0.211	Qujing	0.202	Huludao	0.204	Bengbu	0.199	Dezhou	0.224	Shaoguar	0.229		
Taiyuan	0.277	Daqing	0.251	Fuzhou	0.3	Luohe	0.156	Chengdu	0.431	Yuxi	0.16	Tianshui	0.052	Urumqi	0.12	Karamay	0.054	Zhongwe	0.057		
Datong	0.21	Yichun	0.264	Xiamen	0.398	Sanmenx	0.126	Dongguan	0.534	Baoshan	0.162	Wuwei	0.057	Ulanqab	0.081	Taizhou	0.271	Shangrao	0.175		
Yangquai	0.197	Jiamusi	0.253	Putian	0.233	Nangyan	0.154	Zhongsha	0.448	Chongqir	0.526	Zhangye	0.061	Baiyin	0.055	Changsha	0.347	Suizhou	0.19		
Changzhi	0.214	Qitaihe	0.203	Sanming	0.25	Shangqiu	0.152	Chaozhou	0.239	Lijiang	0.163	pingliang	0.051	Yulin	0.146	Ankang	0.221	Xianning	0.196		
Jincheng	0.211	Mudanji	0.28	Quanzhou	0.278	Xinyang	0.133	Jieyang	0.234	Pu'er	0.215	Jiuquan	0.131	Baise	0.211	Shangluo	0.212	Huanggai	0.217		
Shuozhou	0.202	Heihe	0.291	Zhangzhe	0.242	Zhoukou	0.145	Yunfu	0.206	linchang	0.175	Qingyang	0.063	Hezhou	0.133	Lanzhou	0.127	Xiaogai	0.204		
Jinzhong	0.213	Suihua	0.265	Nanping	0.26	Zhumadia	0.137	Nanning	0.242	Xi'an	0.294	Dingxi	0.054	Hechi	0.201	Jiayuguar	0.058	Jingzhou	0.204		
Yuncheng	0.219	Shanghai	0.595	Longyan	0.241	Wuhan	0.312	Liuzhou	0.163	Tongchue	0.189	Longnan	0.058	Bayannur	0.09	Zhenjiang	0.291	Fuzhou	0.156		
Xinzhou	0.21	Nanjing	0.339	Ningde	0.222	Huangsha	0.197	Guilin	0.188	Baoji	0.218	Xining	0.118	Hulunbuir	0.351	Yangzhou	0.262	Yichun	0.162		
Linfen	0.226	Wuxi	0.37	Nanchang	0.219	Shiyan	0.219	Wuzhou	0.14	Xieyang	0.226	Yinchuan	0.171	Sanyang	0.238	Yancheng	0.231	Ji'an	0.176		
Lvliang	0.218	Xuzhou	0.239	Jingdezhe	0.121	Yichang	0.219	Beihai	0.143	Weian	0.227	Shizuisha	0.067	Chifeng	0.162	Lianying	0.236	Yingtian	0.121		
Huhhot	0.139	Changzhe	0.311	Pingxiang	0.122	Xiangyan	0.216	Fangchen	0.122	Yan'an	0.276	Wuzhong	0.071	Tongliao	0.117	Huai'an	0.222	Ganzhou	0.226		
Baotou	0.141	Suzhou	0.561	Jiujiang	0.161	E'zhou	0.212	Qinzhou	0.138	Hanzhong	0.232	Guyuan	0.049	Chongzuo	0.153	Leshan	0.2	Suining	0.196		
Wuhai	0.156	Nantong	0.268	Xinyu	0.127	Jingmen	0.196	Guigang	0.14	Hanlin	0.286	Zhongwe	0.057	Nanchong	0.2	Neijiang	0.189	Guangyu	0.202		

公众号: 数学建模