

重铸神秘之因以对抗人造之光之神

摘要: 明亮的窗户、炽烈的路灯、脉动的霓虹灯.....人类正在慢慢被剥夺黑夜的权利。自从人造光发明以来,这种人造光逐渐开始影响动物、植物和人类的健康。令人痛心的是,本应带来便利的科技光却带来了危害。为了更好地测量和干预光污染的影响,我们研究光污染,以便更好地享受这种光。

建立了几个模型:模型一:污染量化模型;模型二:风险评估模型;模型三:干预策略模型。

为建立模型做准备,我们分析了光污染的构成和主要影响方面。通过将从官方数据库收集的大量数据的结果可视化,我们最初将重点放在了值得研究的领域。

模型一:根据一些文献和类似自然系统的研究结果,我们提出利用人为因素、社会因素和生态因素共 13 个指标,结合 EWM-AHP 算法,得到客观的光污染量化结果 *positiveQ*, *negativeQ*。然后我们随机选取 10 个光强区域与我们的模型计算结果进行比较, Pearson 相关系数为 0.8002,验证了我们模型的有效性。

对于模型 II:我们根据 ALARP 标准和“成本-风险”分析定义了一个光污染风险指标 Ω_{based} ,其中负影响增长率假设为正态分布。基于文献,我们计算出 6% 的期望,并应用 Ω_{to} 我们选择的四个区域,对一年后的光污染风险进行评估,并对其进行分析,提出对策。理论上,该模型允许对光污染风险进行中长期预测。

对于模型 III:我们分别对“能源”、“环境”、“人的安全”三种不同的策略及相关因素进行建模,最后通过耦合协调分析得出干预场景的可行性,并通过干预后的二级指标计算出三方面的最终评价值。我们选择协调指数分别为 5 和 3 的拉特兰和威斯敏斯特两个站点,基于耦合协调分析研究了三种干预策略的影响。结果表明,拉特兰农村地区的最佳干预策略是“人类友好策略”,该策略使人类健康指数得分提高了 10%。威斯敏斯特最好的干预策略是资源友好策略,将总分从 50.0080 提高到 59.6481。

最后,我们通过将 LPA 模型中环境部分的参数 r 上下调整 5% 来评估敏感性分析,结果表明我们的污染量化模型对干扰的抵抗力更强。之后,我们制作了一张传单,告诉英国威斯敏斯特地区的人们光污染的影响,以及实施宵禁的选择和好处。

关键词: EWM-AHP 算法, ALARP, 风险指标 Ω , 耦合协调分析

目录

重铸神秘之因以对抗人造之光之神 1

1 介绍4

 1.1 问题背景 4

 1.2 问题的重述 4

 1.3 文献综述 4

 1.4 我们的工作 5

2 假设与解释 6

3 记号6

4 模型准备 6

 4.1 光污染构成及影响 6

 4.2 数据概述 7

 4.2.1 数据收集 7

 4.2.2 数据筛选 7

5 LPA(光污染评估)模型8

 5.1 光污染影响量化8

 5.1.1 指标确定 8

 5.1.2 权重计算 11

 5.1.3 光污染定量结果 12

 5.2 风险评估 12

 5.2.1 风险评价准则 12

 5.2.2 风险因素 Ω 13

 5.3 模型验证 14

 5.4 案例研究 14

6 LPI(光污染干预)模型 16

 6.1 干预策略 16

 6.1.1 资源友好型策略 16

 6.1.2 环境友好型战略 16

 6.1.3 人类友好策略 17

 6.2 系统耦合模型 17

 6.2.1 耦合协调参数 17

 6.3 干预结果评价 18

 6.3.1 拉特兰干预结果 18

6.3.2 威斯敏斯特干预结果 19

7 敏感性分析 19

8 优势和进一步讨论 20

 8.1 优势 20

 8.2 进一步讨论 20

参考文献 21

公众号: 数学建模老司机

1 介绍

1.1 问题背景

“当我看到地球的照片时，我看到了环境灾难。这些不是珠宝，而是肿瘤。”凯尔西·约翰逊在她的 TED 演讲中说道，“光污染的问题——五种简单得可笑的解决方法”。光是世界的基本组成部分，也是文明的支柱之一。人造光的发明和使用，加速了人类文明的发展。



图 1:凯尔西·约翰逊演讲中展示的地球夜景

过度使用人造光也造成了严重的后果:天文光污染造成了夜空景象的退化，对宇宙深处的探索受到限制[1]，生态光污染不仅污染了空气、洋流等，还使植物的成熟延迟或加速，野生动物的迁徙模式发生变化的同时包括人类，肥胖、失眠、身心健康受损等。这些问题正在迅速增加。

人造光是一把双刃剑，它带来了祝福，也打开了潘多拉魔盒。如何通过适当的干预来减少光污染的影响，将是人类社会未来进步的关键问题和转折点之一。

1.2 问题的重述

光污染问题的治理是一个复杂的问题，需要充分考虑各种因素。要测量和减轻不同地点的光污染影响，我们需要完成以下几个问题:

- 创建一个广泛适用的指标，可以测量不同地点的光污染风险水平。
- 将该指标应用于四种不同的站点类型，并对调查结果进行逻辑分析。
- 提出三种潜在的干预方案来处理光污染，并讨论每种策略所需的精确步骤及其潜在影响。
- 将指标应用于两个地点，确定每个地点的最佳干预计划，并检查该干预策略如何影响该地点的风险水平。
- 制作传单，概述其中一个指定地点最有效的干预方法。

1.3 文献综述

我们以“光污染”为关键词检索文献，发现近年来关于这一问题的研究可以分为三个主要部分:光污染的构成、光污染建模数据空间的确定、光污染影响生物种群的方式。下面将主要讨论所提出的模型。

◆首先，就光污染的构成而言:光污染通常分为白光污染、白天污染和彩色污染，不同的是[2]中刘兆丽等人考虑了全天的光污染，而绝大多数作者只研究了夜间的光污染。

◆第二，光污染建模数据空间可分为二维和三维。M. 刘兆丽等部分使用图像数据、遥感数据等二维数据进行建模[3]，郑文等将高度等信息结合起来进行三维数据建模[4]。

◆最后，光污染对生物种群的影响有宏观和微观两个维度。唐雪峰等人探讨了不同光源的光污染对生物微血管系统的影响[5]，而更多的作者则在宏观层面探讨了广泛的光污染对生物习性和健康的影响。

对于光污染的不同关注点，不同研究方法的优缺点可以可视化地呈现在图 2 中。

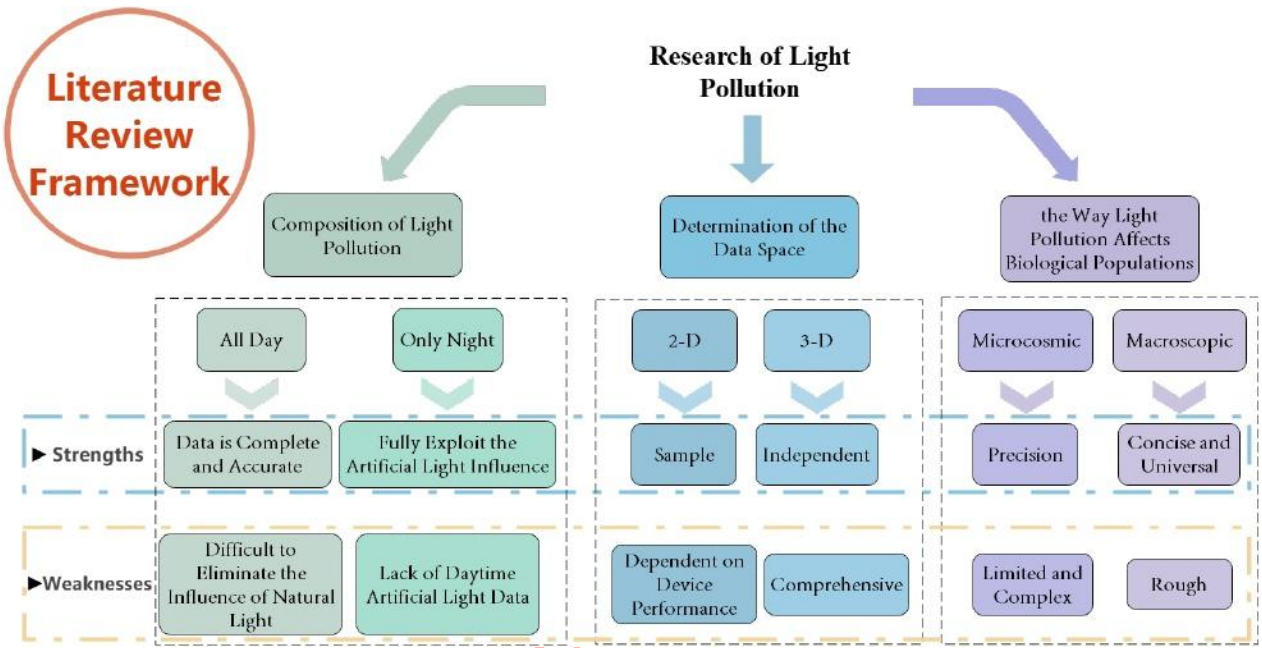


图 2:文献综述框架

1.4 我们的工作

这个问题实际上需要我们量化光污染的危害，并制定合理的策略来减轻其影响。为了避免复杂的描述，并直观地反映我们的工作流程，流程图如图 3 所示。

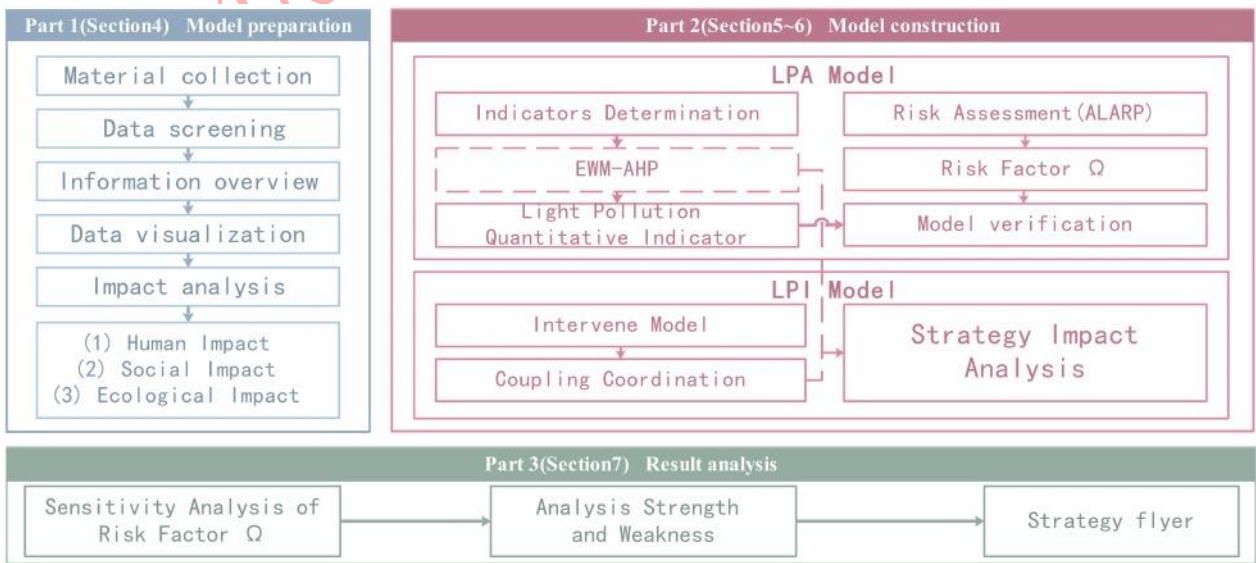


图 3:我们的工作流程图

2 假设与解释

考虑到那些实际问题总是包含着许多复杂的因素，首先我们需要做出合理的假设来简化模型，而每一个假设后面都紧跟着它对应的解释：

- ▼假设 1:我们使用的数据是准确有效的。
▲解释:本文数据直接来自各大在线官方数据库和已发表文献的最新结果。
- ▼假设 2:夜间的光污染主要为光污染，白天的光污染几乎可以忽略不计。
▲解释:由于白天生物习惯和生态规律的长期形成，在自然光的增强下，相比夜间光污染的影响，白天光污染的影响是最小的。
- ▼假设 3:我们所讨论的光污染中的自然光污染部分，以极光污染为代表。
▲解释:大部分自然光污染只在白天影响生物和社会，基于假设 2，我们认为这部分自然光污染可以被忽略，所以自然光污染部分只关注北极光污染来简化模型。
- ▼假设 4:我们的模型所研究的站点的生物种群组成，比如脊椎动物和无脊椎动物占生物种群的比例，是相对稳定的。
▲说明:“生物种群”是一个很大的概念，生物多样性使得光污染对每个生物的影响不同，所以我们做这个假设是为了更好地专注于光污染的量化和干预。

为了简化对个别部分的分析，我们做了额外的假设。这些假设将在适当的位置进行讨论。

3 符号

本文中使用的的一些重要数学符号列于表1。

表 1:本文使用的符号

Symbol	Description
$Q_{positive}$	Quantitative results of positive impact
$Q_{negative}$	Quantitative results of negative impact
$Score_x$	Scores of "x"-related indicators
$Area_x$	Area of region "x"
BR_x	Biological ratio of "x"
LB_x	Light brightness of region "x"
Num_x	Number of "x"
C_s	Change rate of "x"

*有一些变量没有在这里列出，将在每一节中详细讨论。

4 模型准备

4.1 光污染构成及影响

光污染是一个庞大而复杂的概念，大多数研究的共识是，污染源分为自然光污染和人工光污染，根据污染的成分分为白光污染、日间污染、彩色光污染，根据常见的污染形式可分为眩光、溢光、光侵入.....

光污染的构成十分复杂，但不可否认的是，无论何种光污染都会造成巨大的影响。大多数研究将光污染的影响分为社会经济、生态、生理 3 个方面，具体影响如图 4 所示。

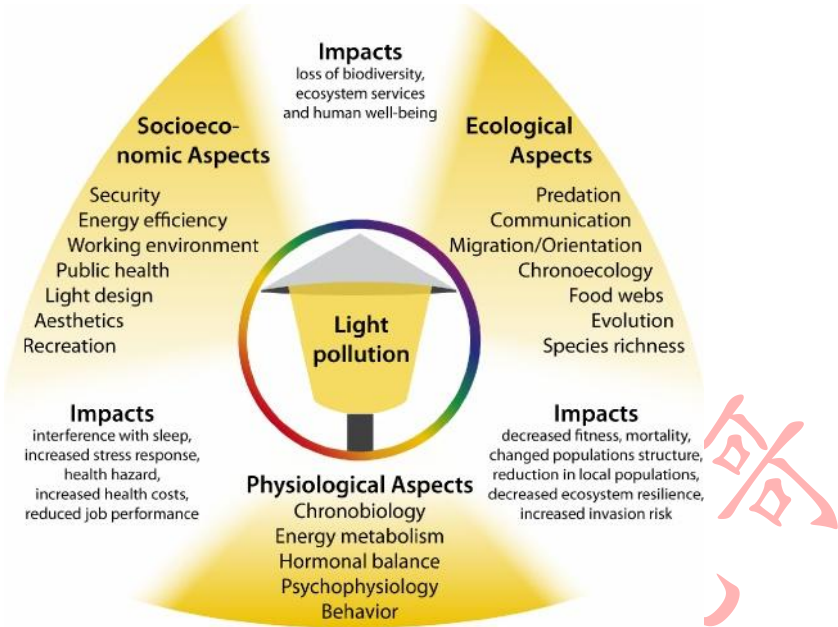


图 4:光污染的影响(来自文献[6])

4.2 数据概述

4.2.1 数据收集

这个问题并没有直接给我们提供数据，所以我们需要考虑在构建模型的时候收集什么数据，在构建模型的过程中收集什么数据。通过对问题的分析，我们收集到了表 2 中的主要数据。由于数据量太大，无法全部列出，因此将数据可视化是一种很好的方法。

表 2:主要数据描述和来源

Data Description	Data Source
Light Pollution-Related Indicators	https://www.ons.gov.uk/
	https://ourworldindata.org/
	https://hub.jncc.gov.uk/
Night Lighting	https://www.earthdata.nasa.gov/
	https://www.nightearth.com/
	https://www.ngdc.noaa.gov/
Remaining Mentioned Data	Various Related Literature

为了避免模型中更多未知因素的干扰，简化模型的复杂性，我们主要从 UK 收集数据，考虑到一个国家内部的地理、风俗等差异很小，对其进行了研究。

4.2.2 数据筛选

在各种可视化工具的帮助下，我们将部分数据呈现如图 5 所示。

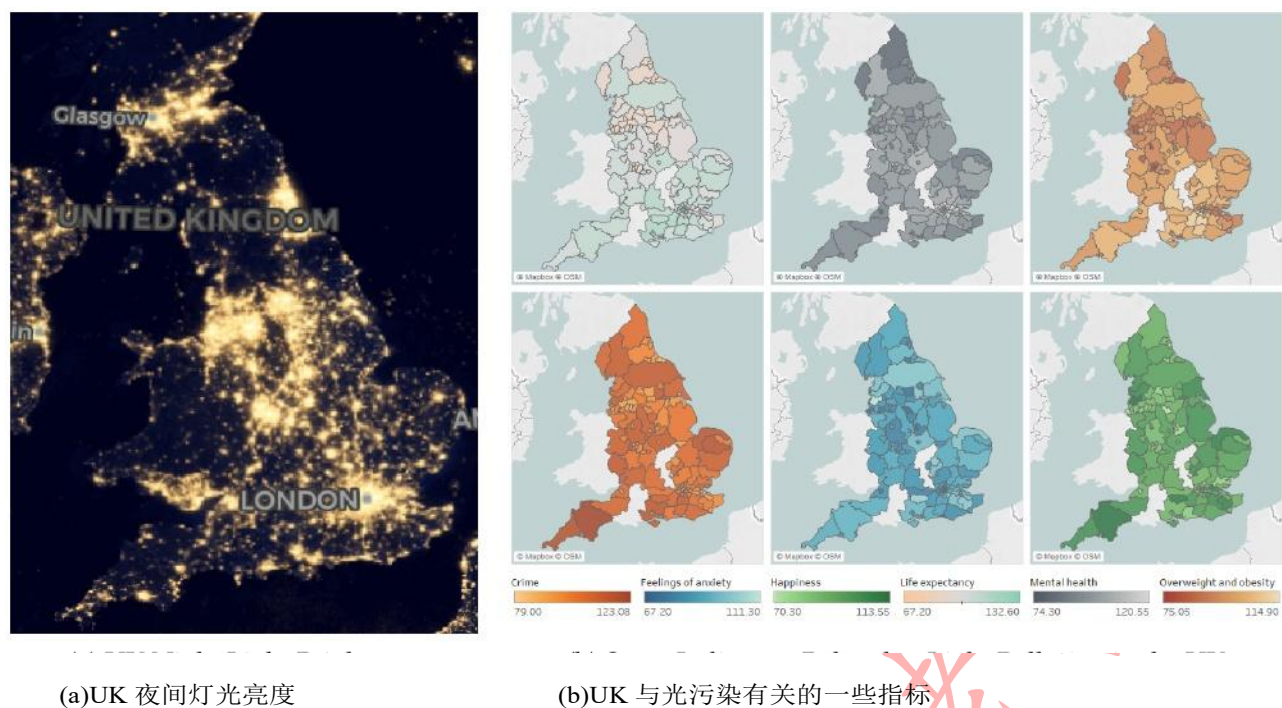


图 5:部分数据可视化

从图 5 中，我们可以观察到某些区域总是保持高或低水平的指标，这些区域将是用于案例研究的后续模型的绝佳选择。

5 LPA(光污染评估)模型

光污染是一个非常雄心勃勃的话题，基于我们的文献综述，我们选择建模光污染的宏观影响主要针对夜间，使用主要

二维数据在建模过程中简化了模型并少量使用

三维数据提高模型精度。

这一部分主要分为两个模型:光污染影响量化模型和光污染风险评估模型。光污染量化模型通过各种代表性数据对光污染的影响进行量化;光污染风险评估模型根据一定的风险评估标准对光污染风险进行评估。

5.1 光污染影响量化

5.1.1 指标确定

如图 4 所示，光污染的影响主要可以分为对人类的影响、对社会的影响、对生态的影响。因此，我们将这三个主要方面作为一级指标。

对于人体健康影响和社会影响，我们结合文献考虑了 73 个官方相关指标，最终保留了 10 个最具代表性的二级指标来构建我们的模型。在此基础上，我们从生态成分上补充了 3 个与生态环境相关的二级指标，完善了我们的定量模型。具体描述和选取的指标见表 3。

表 3:所选指标

Object	Indicators	Description
Human	DR	Death rate
	LE	Life-expectancy
	PHS	Physical health status
	OOR	Overweight and obesity rate
	MH	Mental health
	AE	Anxious emotions
	WB	Well-being
Society	GPC	GDP per capita
	UR	Unemployment rate
	CR	Crime rate
Ecology	EP	Environmental pollution
	RC	Resource consumption
	DS	Diversity of species

•人体健康影响

1. 身体健康

光污染危害可使长期活动和工作的人的正常细胞加速老化和死亡，并可能诱发各种疾病[7]。[8]表明，夜间的人造光可引起肥胖。在现有数据的基础上，我们通过光污染对“人类死亡率”(DR)、“预期寿命”(LE)、“身体健康状况”(PHS)和“超重和肥胖率”(OOR)的影响，具体测量了光污染对人类生理健康的影响。

2. 心理健康

根据不同的[8]，光线会对人的视觉、心理和情感产生不同程度的影响，随着时间的推移，影响会越来越大。长期生活在光污染环境中的居民会经历强烈的不适。

因此，我们专门用“心理健康”(MH)、“焦虑情绪”(AE)、“幸福感”(WB)来衡量人类的心理健康状态。

•社会影响

1. 社会发展

光的使用在一定程度上对一个地区的经济水平和发展做出了贡献，所以光在经济上起着积极的作用，我们用区域“人均 GDP”(GPC)来衡量这种积极的影响。

但与此同时，光的使用使工作时间明显增加，人均日常工作量的减少使一些人失业，这是光的负面影响之一，我们用“失业率”(UR)作为具体衡量标准。

2. 社会稳定

光污染使得治安管理越来越困难，特别是当人们身心健康受损、失业等负面状况出现时，犯罪也经常发生，所以我们用“犯罪率”(CR)这个指标来显示光污染对社会稳定的负面影响。

•生态影响

1. 资源消耗

光污染意味着大量自然资源被不当利用。根据获得的数据，我们绘制了下图 6，并计算出用电量和光污染之间的 pearson 相关系数为 0.85293，表明用电量和光污染呈正相关且强相关，这意味着用于发电的资源，如煤和石油，正在被过度使用或不当使用。

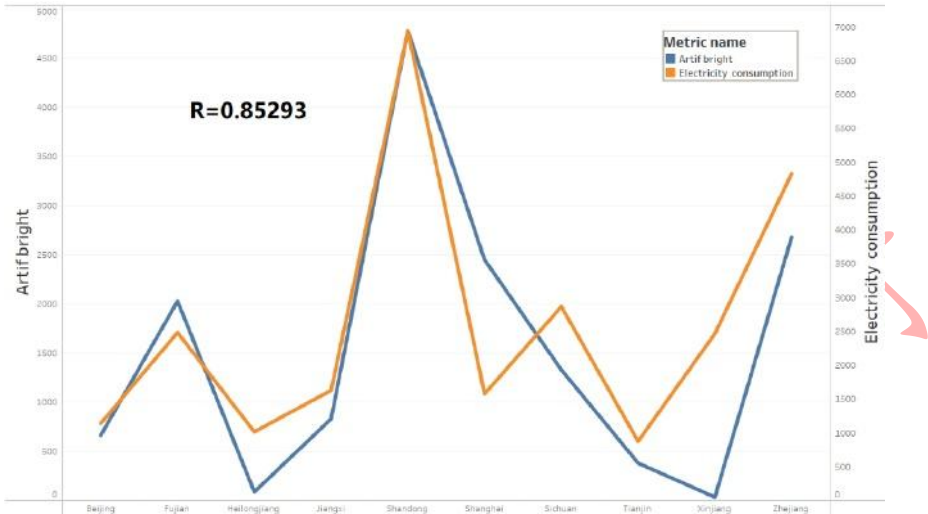


图 6:皮尔逊相关系数

假设世界上大部分地区以相同的方式使用自然资源，并且电力消耗和光产生之间的转化率是稳定的，我们可以基于电力消耗-消耗(EC)来表示“资源消耗”(RC)。资源消耗的计算方法如下:

$$RC = \frac{EC \cdot \alpha}{\beta} \tag{1}$$

式中 α 为用于发电的自然资源占比， β 表示发电转化率

2. 环境

由于光污染导致夜间能见度降低，对空气和空间环境造成污染，因此我们用天顶亮度与自然夜空亮度的比值来定义“环境污染”(environmental pollution,EP)。

根据 Treanor 模型[9]，天顶亮度与自然夜空亮度之比可定义为:

$$EP = \frac{L(r)}{L_N} = \left(\frac{A}{r} + \frac{B}{r^2} \right) \cdot e^{(-kr)} \tag{2}$$

其中值越大EP表示光污染扰动越大， $L(r)$ 为天顶亮度， L_N 为自然夜空亮度， $r(km)$ 为光源与观测点之间的距离。为 A, B 观测常数，与城市人口成正比，以意大利为例，观测常数为:

$$A = 1.80 \times 10^{-5} \cdot p, \quad B = 13.6 \times 10^{-5} \cdot p \tag{3}$$

其中 p 为城市人口数，取 $k= 0.026$ 。

我们把城市作为一个正方形，假设距离 $r=10$ 。

3. 生物学

我们收集了多个地区的生物多样性数据，并将光污染对生物多样性的影响因子定义为。考虑到这些地区面积大、地形多等因素，生物多样性也会相应多样化，光污染对每种生物的影响无法一概而论，因此为了保证评估的准确性，我们假设生物在每个地区分布均匀，同时标准化为每 lm^2 种。

我们将生物影响指标(DS)定义为生物物种 $B_{Area\ total}$ 数量与 γ_{per} 平方公里的乘积之和 [8]：

$$DS = \frac{B_{total}}{Area} \cdot BR_{vertebrate} \cdot \gamma_{vertebrate} + \frac{B_{total}}{Area} \cdot BR_{invertebrate} \cdot \gamma_{invertebrate} \quad (4)$$

5.1.2 权重计算

由于我们需要从人类健康、社会、生态三个层面进行计算 $Q_{negative}$ 和 $Q_{positive}$ ，基于以上分析，我们得到 $Q_{positive}$ ：

$$Q_{positive} = GPC \quad (5)$$

而在计算 $negativeQ$ 时，为了使模型更加合理，我们需要计算人类健康、社会、生态环境三个一级指标对应的 12 个二级指标的权重，得到 $negativeQ$ 如下公式：

$$Q_{negative} = \sum_{i=1}^{Num_{negative}} Indicator_i \cdot w_i \quad (6)$$

其中 $Indicator_{ii-th}$ 为负指标， w_i 是 $i-th$ 负指标所对应的权重和 $um_{negative}$ 是负指标的个数。

下面我们将主要关注每个负指标的权重的计算：

1. 数据归一化

我们需要对不同指标的数据进行标准化，以便在同一尺度上进行比较。对于不同类型的数据，我们使用不同的归一化方法。

对于“成本属性类型”，即数据类型越小越好，我们使用以下归一化方法：

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{\max \{x_i\} - x_{ij}}{\max \{x_i\} - \min \{x_i\}} \quad (7)$$

对于“效益属性类型”，即数据类型越大越好，我们使用以下公式进行归一化：

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - \min \{x_i\}}{\max \{x_i\} - \min \{x_i\}} \quad (8)$$

假设我们有 m 一组数据 Num_{Human} ，每一组中都有 $Ecology$ 上面的 $Num_{Society}$ / 倘或 um 指标。 $\geq ij$ 表示 $i-th$ 组中的 $j-th$ 数据。 $Max\{s1\}$ 表示该组中的 $i-th$ 最大数据。 $Min\{i_{明文}\}$ 表示 $i-th$ 组中的最小数据。

2. 熵权法

在对每个指标进行标准化得到标准数据后，我们用以下公式对数据进行归一化：

$$p_{ij} = \frac{\tilde{x}_{ij}}{\sum_{j=1}^m \tilde{x}_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, Num_{Human}/Num_{Society}/Num_{Ecology}; j = 1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

计算熵Eof the index:

$$E_i = -\frac{\sum_{j=1}^m p_{ij} \cdot \ln p_{ij}}{\ln m} \quad (i = 1, 2, \dots, Num_{Human}/Num_{Society}/Num_{Ecology}) \quad (10)$$

基于信息熵，我们将进一步计算权重wof the之前定义的每个评价指标计算如下:

$$\omega_i = \frac{1 - E_i}{\sum_{i=1}^n (1 - E_i)} \quad (11)$$

我们组成一个向量获得重量和叫向量的评价向量，表示为 $\Phi=(\phi_1\phi_2\cdots,\phi_{Num_{Human}/Num_{Society}/Num_{Ecology}})$;通过组合一个向量得到不同方面的影响，称这个向量作为“影响程度向量”，表示作为 $S=(S_1S_2\cdots,S_{Num_{Human}/Num_{Society}/Num_{Ecology}})$,然后最终的评估值是:

$$Score_x = \vec{\Phi} \cdot \vec{S}^T = \sum_{i=1}^{Num_x} \phi_i \cdot S_i \quad (12)$$

其中xrepresents 为“人类”、“社会”或“生态”。

5.1.3 光污染定量结果

由于我们的一级指标体系分为三个维度:人类健康、社会和生态，我们对这三个维度分别应用 EWM，客观地得到了各个指标的权重，如表 4 所示。

表 4:各指标的权重

Object	Indicator	Weight	Object	Indicator	Weight
Human	DR	0.2404	Society	UR	0.4498
	LE	0.1145		CP	0.5502
	PHS	0.1086		RC	0.257
	OOR	0.1569	Ecology	DS	0.3236
	MH	0.1789		EP	0.4194
	AE	0.1073			
	WB	0.0932			

为了给这三个一级指标赋予权重，从而得到最终的光污染风险评价值，我们采用 AHP(层次分析法)构建判断矩阵，得到三个一级指标的权重:

$$\delta = (0.1283, 0.2764, 0.5954) \quad (13)$$

其中判断矩阵的一致性比= 0.0053，一致性是可以接受的。

最终，我们的光污染风险安全评分计算如下:

$$Q_{negative} = \delta_1 \cdot Score_{Human} + \delta_2 \cdot Score_{Society} + \delta_3 \cdot Score_{Ecology} \quad (14)$$

5.2 风险评估

5.2.1 风险评价准则

简而言之，风险就是未来一段时间内投资与收益之间的不确定性。ALARP(尽可能低的合理可行)标准是风险评估的常用标准，目前仍被广泛用于选择可接受的风险和制定合理的风险控制计划[10]。

ALARP 标准将风险分为三个区域:不可接受的、合理接受的和广泛接受的，如图 7(a)所示。

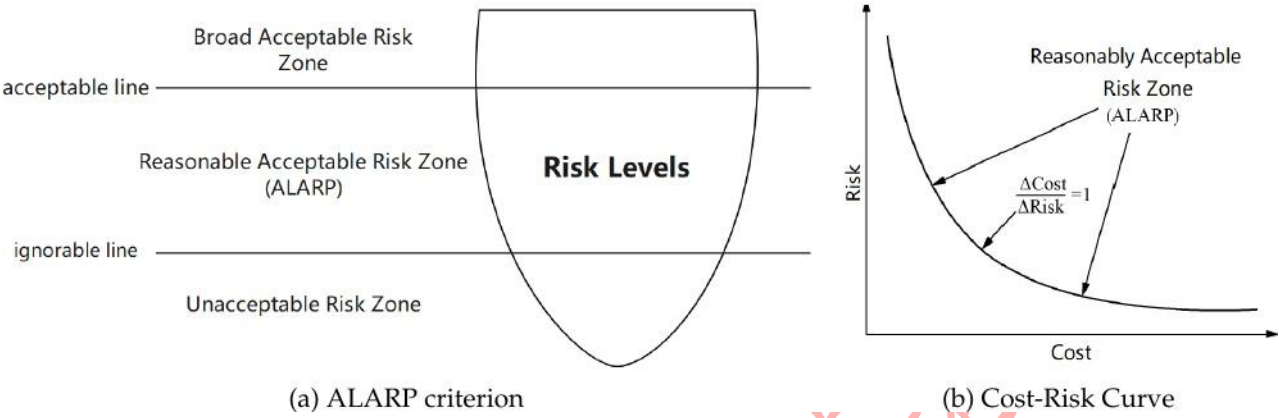


图 7:风险评估准则示意图

- 如果风险处于不可接受区域，则必须采取措施降低风险，而不管收益如何。
- 如果风险在广泛可接受的范围内，则风险处于非常低的水平，可以忽略不计。
- 两者之间的区域是合理可接受的区域，需要在经济可行的情况下尽可能降低风险，即通过图 7(b)中的“成本-风险”分析来判断是否采取风险控制措施。

5.2.2 风险因素Ω

在上述模型中，光污染在给社会经济层面带来积极影响的同时，也带来一系列负面影响。假设未来社会经济发展将带来人类、社会和生态的进步，我们认为光污染的风险来自于光污染的正面影响和负面影响的相互关系。

我们初步定义了风险因子Ωas:

$$\Omega = \frac{\overline{Q_{negative}}}{\overline{Q_{positive}}} \tag{15}$$

考虑到风险需要与对未来的预测和判断相结合，我们将风险评估期定义为一 年。由于人和生物在短期内难以发生变化，因此在负面影响中，主要是生态环境指标在评价期内发生变化，环境指标的变化带动了正面影响——GPC 的变化。

结合上述分析对Ω的定义进行修正，我们得到Ω:

$$\Omega = \frac{\overline{Q_{negative}} \cdot (1 + C_{negative})}{\overline{Q_{positive}} \cdot (1 + C_{positive})} \tag{16}$$

其中，生态环境指标的变异negative程度Cof我们假设符合正态分布，而 GPC 的变异positive程度Cof更为稳定。由此可见，风险因素的实际定义为:

$$\Omega = \frac{\overline{Q_{negative}} \cdot (1 + \frac{e^{-\frac{(C_{positive}-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma}}{\overline{Q_{positive}} \cdot (1 + C_{positive})}$$

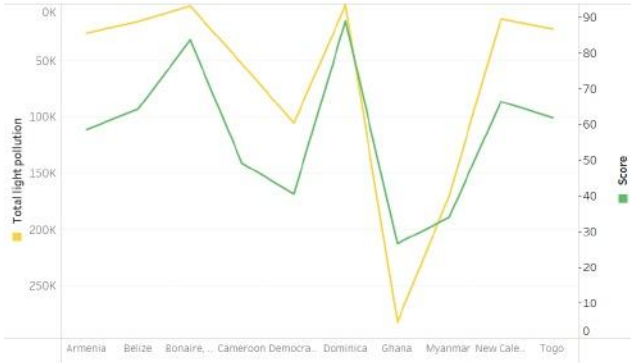
(17)

其中 μ 为的期望 $C_{positive}$ ， σ 为的方差 $C_{positive}$ 。

5.3 模型验证

Region	Light Pollution	Negative Impact
Dominica	1	1
Bonaire, Sint Eustatius and Saba	0.564061669	0.940177668
Togo	0.048416537	0.695940627
Myanmar	0.006225138	0.382548072
Democratic Republic of the Congo	0.010053727	0.456201507
Belize	0.069283009	0.723490386
Ghana	0.003758426	0.299561453
New Caledonia	0.080745814	0.746542224
Cameroon	0.02004345	0.553019229
Armenia	0.041596425	0.659057686

(a) Light Brightness and Negative Impact Values for 10 地区



(b) Data Line Chart

图 8:模型验证数据

我们随机选取了图 8(a)所示的 10 个区域，将其具有负面影响的光强进行归一化，可视化得到图 8(b)所示的折线图，并计算了这两个值的 **pearson** 相关系数，得到相关系数为 0.8002，高于 0.8，说明这两个数据之间的相关性极强，说明我们的模型能够在更大程度上有效测量光污染的影响。

5.4 案例研究

结合风险评价准则 **ALARP** 和风险因子 Ω ，我们得到以下风险评价标准[10]:

$$\Omega = \begin{cases} 0 \sim 0.35 & \text{Broad Acceptable Risk} \\ 0.35 \sim 0.9 & \text{Reasonable Acceptable Risk} \\ > 0.9 & \text{Unacceptable Risk} \end{cases}$$

(18)

选择英国作为主要研究国家，我们在三个不同密度层中各取一个区域，并选择一个政府或私人实体禁止开发的保护区，得到的四种不同类型的站点如表 5 所示。

表 5:所选地点的信息

Type	Location	Density of Population
Protected Land Location	Shropshire	101
Rural Community	Rutland	107.5
Suburban Community	Elmbridge	1,459.6
Urban Community	Westminster	9,514

将 **LPA** 模型应用于这四个站点，结合风险因子 Ω for 各得到安全等级评价的三个方面的值如图 9(a)所示，并在图 9(b)中做出以下判断和建议。

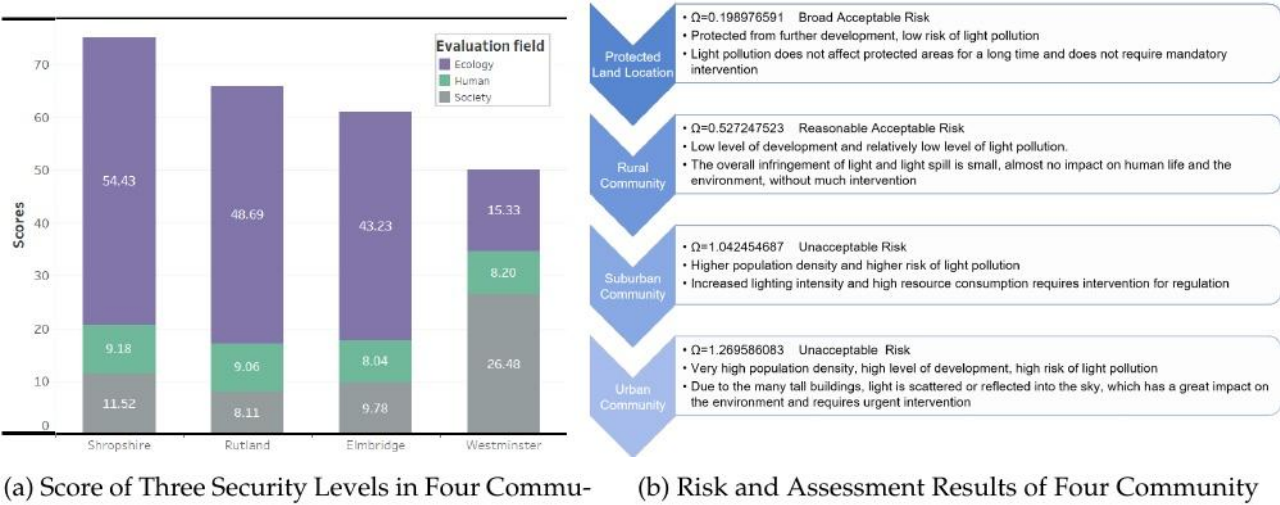


图 9:LPA 应用的结果

•人体健康方面分析

通过图 9(a)我们可以直观地看到，这四个地区的人类健康安全水平相差不大，我们的分析表明，城市的医疗安全状况良好，光污染对城市人类健康的影响可以通过医疗方面的技术领先来补偿。

•社交方面分析

保护区和农村地区的低光照会下意识地影响犯罪率，而高犯罪率导致这两个地区的社会安全水平远低于城市社区，这与社区低光照水平可能导致犯罪率上升的事实是一致的。光的积极贡献也得到了肯定。

•生态方面分析

光污染的生态影响最为显著，4 个区域间差异显著。人口密度高、商业区夜间活动多、人类活动多，导致城市和郊区人工光亮度高，生态破坏严重。下图 10 清晰地展示了不同地区的天空能见度，城市地区几乎看不到星星。

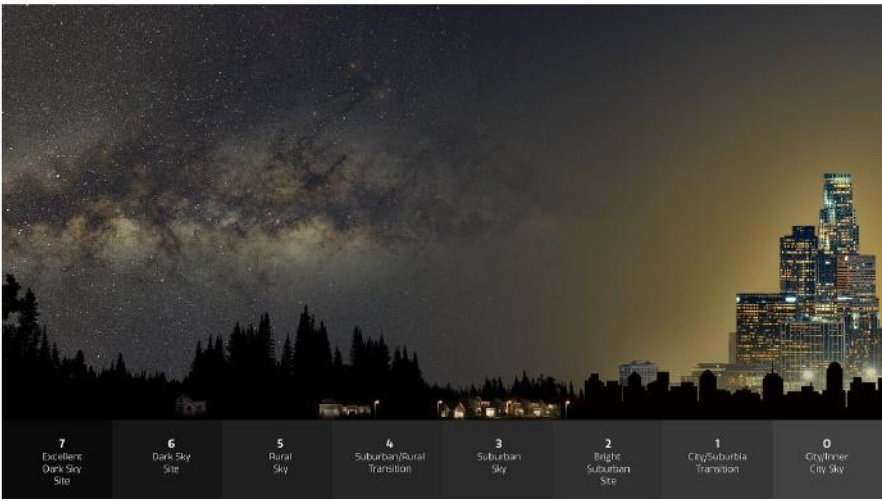


图 10:不同地区的星空状况

6 LPI(光污染干预)模型

6.1 干预策略

6.1.1 资源友好型策略

宵禁，指的是禁止夜间活动，针对各地光污染出台光滋扰条例。这里我们理解为限制夜间人造光的使用时间，这将直接影响到资源消耗。

首先，我们假设人们的心理健康不会受到宵禁的影响，如果实行宵禁，限制使用人造光的时间是固定的，我们将调控效率设为 $\langle e:1 \rangle$ ，即资源消耗的年减少率。第一个需要的资源消耗为 RC_0 ，那么我们就可以得到在 t 年减少的资源消耗总量

$$RC(t) = RC_0(1 - E)^t \quad (19)$$

由于光的使用减少，低亮度环境可能导致犯罪率上升，所以我们假设初始犯罪率为，犯罪率增长率 CR 为 r ，那么在 t 年的犯罪率

$$CR(t) = CR_0(1 + r_{CR})^t \quad (20)$$

考虑到犯罪率降低调控的不可控性，我们用逻辑回归进行模拟。我们引入政府调控后犯罪率的自然下降率为 γ ，降低犯罪率的目标量为 TC_0 。

$$CR_{reduce}(t) = \frac{CR_0}{(1 + \frac{CR_0}{TC_0} - 1)e^{-\gamma t}} \quad (21)$$

6.1.2 环境友好型战略

由于技术发展和人类活动的限制，通过照明干预减少城市天空辉光的效果有限。根据文献[11]，我们了解到，由于空气污染的减少而导致的大气气溶胶的持续减少也会降低光污染的风险。缓解空气污染的干预策略可以降低城市内外夜空的亮度。

来自文献研究的数据表明，从污染空气($OD = 0.3$)到清洁大气的变化导致夜空亮度下降 3.2 倍(S)，即对于距离观测者 1.3 km 的源，NSB 降低到其初始水平的 30%左右。观测点离光源越远，降低越显著 NSB 。为了简化模型，我们使用距离为 1.3 km 的观测点进行研究。

设每减少 0.01 air 对清洁大气减少空气污染所需的额外资源消耗($OD < 0.15$)为 R ，则减少空气污染所需的总额外资源消耗为：

$$RC_{extra} = \frac{(AOD - 0.15)}{0.01} \cdot RC_{air} \quad (22)$$

我们将减少的环境影响 NSB 指定为：

$$EP = 1.3EP_0 \quad (23)$$

生物效应是：

$$Biology = \frac{B_{total}}{Area} \cdot \frac{1}{LB(1 - 30\%)^t} \quad (24)$$

6.1.3 人类友好策略

文献[12]表明，与光谱线宽较宽的光源相比，光谱线宽较窄的光源对生物体的影响更大，所以在选择日常照明光源时，宜选用泛黄连续光谱较宽的光源，避免使用单一波长光源，以减少视觉单调和频闪污染。我们建议全面禁止波长小于 540 的户外光 nm ，以减少褪黑激素生成减少和昼夜节律紊乱对人类和动物的不利健康影响。

在相同的光输出下，白光 LED 照明产生的道路亮度比 $H<0.05<S$ 低 6% ~ 11%，我们折中选择 8.5%作为人工光亮度的降低率，并将人体健康指数的增长率设为 r_{PHS} ， t is 年的人体健康指数:

$$PHS(t) = PHS_0(1 + r_{PHS})^t \tag{25}$$

干预后第 1 t 年的生物影响 $Biology$ 为:

$$Biology = \frac{B_{total}}{Area} \cdot \frac{1}{LB(1 - 8.5\%)^t} \tag{26}$$

6.2 系统耦合模型

为了得到干预方案的可行性和最终评价值，我们首先进行了耦合协调分析，将原 LPA 模型中的三个一阶指标与三个方案干预后的 LPA 模型中的一阶指标进行了比较。

6.2.1 耦合协调参数

三个一级指标的耦合度为:

$$C_{LPA} = \sqrt[3]{\frac{Score_{Human} \cdot Score_{Society} \cdot Score_{Ecology}}{(Score_{Human} + Score_{Society} + Score_{Ecology})^3}} \tag{27}$$

协调指标为:

$$T_{LPA} = \alpha_{Human} \cdot Score_{Human} + \beta_{Society} \cdot Score_{Society} + \gamma_{Ecology} \cdot Score_{Ecology} \tag{28}$$

式中 $Human$ ，为 $Society$ 时延时 $Ecology$ 延时延，为相应系统的权值 γ represents，最终的耦合协调如下:

$$D_{LPA} = \sqrt{C_{LPA} \cdot T_{LPA}} \tag{29}$$

定义的协调度如表 6 所示:

表 6:定义的协调程度

Coordination level	Degree of coordination
1	Extreme disordered
2	Severe disordered
3	Moderate disordered
4	Mild disordered
5	Nearly disordered
6	Barely coordinated
7	Primary coordinated
8	Intermediate coordinated
9	Good coordinated
10	Quality coordinated

6.3 干预结果评价

对于什罗普郡保护区，在原始干预之前，三个影响方面的协调指数均为 8，我们认为不需要过多的干预。因此，我们选择协调指数为 5 的拉特兰和协调指数为 3 的威斯敏斯特两个地点来研究三种干预策略的影响。

6.3.1 拉特兰干预结果

干预前，未加权人类安全得分为 70.6022，社会安全得分为 29.3440，生态环境得分为 81.7827。应用 3 种不同干预策略后的协调指数分别为 5、7、7，其中干预策略 1 的协调性较差。应用三种策略后的不同得分对比如图 11 所示。

•干预策略 1:资源友好型策略

应用宵禁策略后，人、社会、生态得分分别为 70.6022、26.4082、83.5198。虽然资源消耗的减少带来了生态安全得分的提高，但由于夜间照明过少导致犯罪率上升，导致社会安全得分明显下降，再加上农村本身资源消耗较低，宵禁策略对农村并不有效。

•干预策略二:环境友好型策略

人文、社会、生态得分分别为 70.6022、29.3440、85.8223。该村的 AOD 为 0.25，清洁空气带来的额外资源消耗不显著，获得的 NBS 降低相当大，生态安全得分增加。但由于原农村社区生态得分为 81.7827，干预后变化较小。

•干预策略 III:人类友好策略

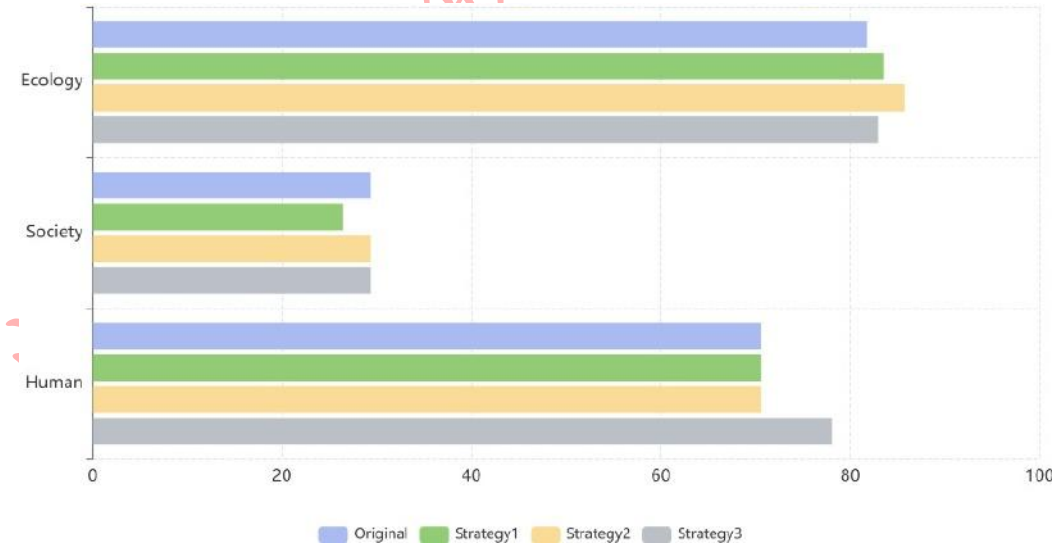


图 11:拉特兰三种策略的不同得分

人类、社会 and 生态的得分分别为 78.1381、29.3440 和 83.0021。根据相关文献我们定义 $PHSr=12.84\%$ ，人体健康得分提高了 10%，这是一个显著的改善，因此切换到波长较小的光源对农村人体健康有显著的影响，我们对农村实施了干预策略三。

6.3.2 威斯敏斯特干预结果

干预前，未加权人的安全得分分别为 63.8930、95.8180、25.7414。采用三种不同干预策略后的协调指数分别为 5、3、4。应用三种策略后的不同得分对比如图 12 所示:

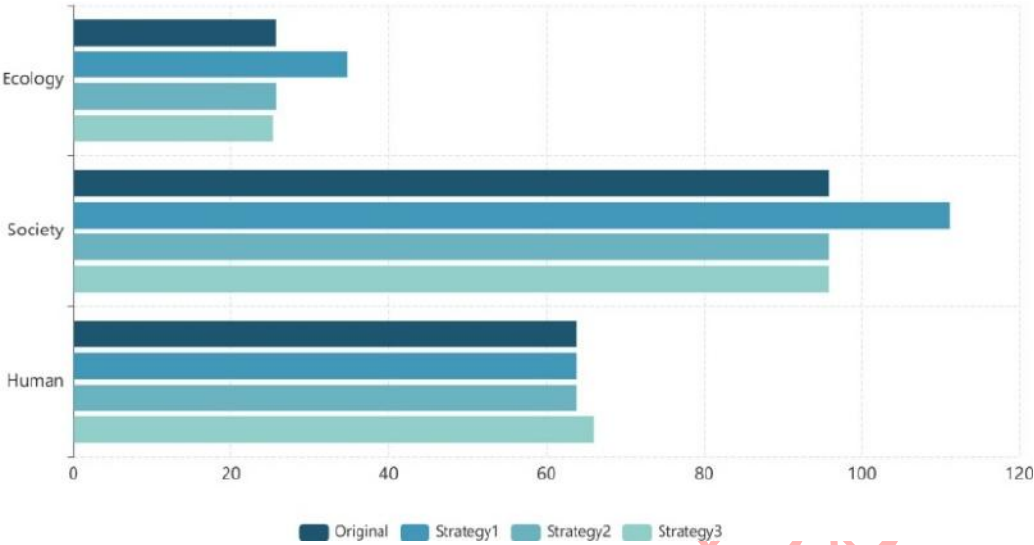


图 12:威斯敏斯特三种策略的不同得分

•干预策略一:资源友好型策略

应用宵禁策略后，人、社会、生态得分分别为 63.8930、111.2475、34.7695。这一策略的干预导致城市地区资源消耗显著降低，生态得分显著提高。此外，夜间灯光适宜，加上政府干预后，犯罪率也在一定程度上有所降低。这表明，在一般环境中，迫切需要宵禁策略来控制光污染的影响。

•干预策略二:环境友好型策略

人文、社会、生态得分分别为 63.8930、95.8180、25.7692。在这一策略中，虽然 NBS 的下降让生态环境得到改善，但城市地区原有AOD的 0.36，空气污染更严重，净化空气所需的资源消耗成本太大，该策略在城市无法奏效。

•干预策略三:亲民策略

人类、社会 and 生态得分分别为 65.9782、95.8180 和 25.3840。根据相关文献我们定义城市地区PHSr= 9.65%，城市地区原本人类健康得分较高，干预后人类健康安全得分有所提高，但由于基数大，变化不如策略 1，因此对于城市地区我们实施宵禁策略最有效。

7 敏感性分析

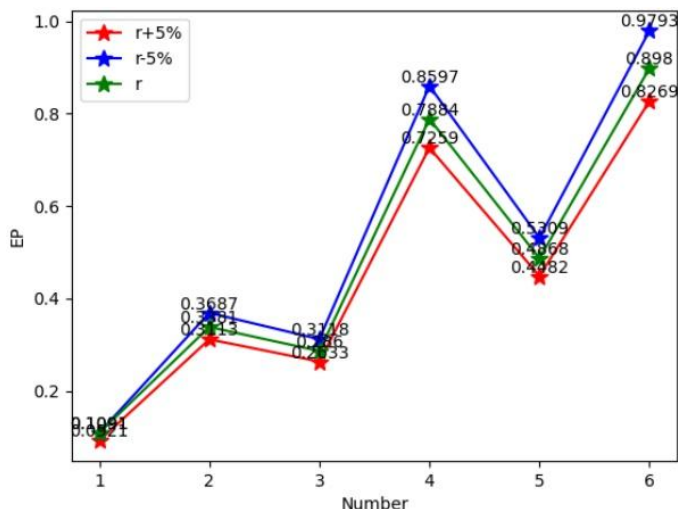


图 13: r 变更后按地区划分的 EP 变化情况

我们对 LPA 模型进行敏感性分析。为了验证的稳定性建立模型并确定模型是否会受到各种因素的干扰。我们原将距离参数 r 从 10 上下预设 5%，将得到的 6 个区域的环境影响指标 EP 与原比较结果进行对比，如图 13 所示。

可以看出， r 的变化对整体环境的影响不大，变化后的趋势与原来相同。当距离取值变化较小时，不符合我们对光污染环境影响的评估，其误差在可接受范围内。因此，我们可以认为我们的模型是稳定的，可以用来解决实际问题。

8 优势和进一步讨论

8.1 优势

- 我们的模型使用官方网站和官方期刊的最新数据库，为每个指标收集了 300 多个数据，研究结果具有很高的参考价值，可以应用于现实生活。
- 我们的 LPA 模型量化了光污染的影响，这使得模型的结果能够以高精度可视化。评价指标的选取参考了众多文献作品，选取的因素客观、有特征。
- 我们的模型鲁棒性强，易于扩展，因此只要提供相关数据，就可以用于模拟和预测任何国家或地区，提供更多相关指标将提高模型的准确性。
- 我们的 LPA 模型在加权指标时使用 AHP 和 EWM 的组合来确定权重。该方法在一定程度上弥补了 EWM 下指标权重随样本变化甚至过度依赖样本的缺点，同时降低了层次分析的主观性。

8.2 进一步讨论

- 我们进行干预策略评估时假设所有国家或地区都会积极配合我们提出的干预措施。在实际实施时，结果可能与我们的预测存在一些偏差。
- 我们的模型将自然灾害等的突然影响转化为光污染影响的正态分布变化率，因此我们的模型偏离了现实。

参考文献

- [1] Longcore T, Rich C. Ecological light pollution[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2004, 2(4): 191-198.
- [2] Zhaoli Liu, Shanying Jiang. Case analysis of environmental impact assessment of light pollution from glass curtain wall[J]. *Sichuan Environment*, 2009, 28(05): 85-90. DOI:10.14034/j.cnki.schj.2009.05.017.
- [3] M.Liu, Q.L.Hao, Y.Liu. Progress in the application of remote sensing technology in the study of urban nighttime light pollution[J]. *Journal of Lighting Engineering*, 2019, 30(02): 109-116+122.
- [4] Wen Zheng. Measurement method of light pollution[J]. *Lamps and Lighting*, 2021, 45(03): 9-14.
- [5] Xuefeng Tang. Experimental exploration of the effects of light pollution on living organisms[D]. The Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [6] Hölker F, Moss T, Griefahn B, et al. The dark side of light: a transdisciplinary research agenda for light pollution policy[J]. *Ecology and Society*, 2010, 15(4).
- [7] Falchi F, Cinzano P, Elvidge C D, et al. Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility[J]. *Journal of environmental management*, 2011, 92(10): 2714-2722.
- [8] S.L. Chen. The impact of light pollution on the environment and health[J]. *Chinese Tropical Medicine*, 2007, 7(6): 5.
- [9] Xiao-Ming Su. A Comprehensive evaluation of light pollution in residential areas[D]. Tianjin University, 2012.
- [10] Huangling Ouyang, Changsheng Qu. Exploration of acceptable risk level in environmental risk assessment of contaminated sites[J]. *Environmental Monitoring and Warning*, 2017, 9(04): 10-13.
- [11] Kocifaj, M., Barentine, J.C. Air pollution mitigation can reduce the brightness of the night sky in and near cities. *Sci Rep* 11, 14622 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94241-1>
- [12] Falchi F, Cinzano P, Elvidge C D, et al. Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility[J]. *Journal of environmental management*, 2011, 92(10): 2714-2722.

LIGHT POLLUTION

The night sky here needs you, Westminster

Effects of light pollution



LIGHT POLLUTION MAY HARM YOUR HEALTH.



LIGHT POLLUTION DEVASTATES WILDLIFE



LIGHT POLLUTION WASTES ENERGY AND MONEY.



LIGHT POLLUTION CAN MAKE YOU LESS SAFE.

Protecting the night sky starts with Curfew!

1 Time Limit



The curfew time is 11pm - 7am and the pre-curfew time is 7am - 11pm.

2

Zoned Dynamic Lighting

Exterior lights are only permitted to be used to illuminate entrances or exits or structures, parking lots or driveways, or for motion sensors that turn off after five minutes of activation.



You reap what you sow



- a. Improve the night environment.
- b. Better quality of life and health.
- c. Better protect ecological diversity.
- d. Save on city energy bills
- e. Starry night sky.

