

少光污染，亮星空

摘要：你有多久没看到壮观的星空了？如今，世界上 80% 的人口生活在天光之下。随着光污染的持续增长，越来越多的人开始重视这个问题。在本文中，我们建立了光污染评估模型，并提出了对抗光污染的三种策略。

在任务 1 中，我们根据城市规划图将待评估区域划分为 8 个网格，并使用熵权法(EWM)将与光污染相关的 3 个因素整合为一个总归因指数。然后，考虑到相邻区域之间光污染的相互作用，我们创新地使用光栅法和该指数引入光污染指数(LPI)的概念。光污染指数对经济、生态、人体健康有直接影响，导致光污染风险。我们利用层次分析法得到光污染风险等级(LPRL)，并用它来识别一个地点的光污染风险等级。

在任务 2 中，我们将任务 1 中的模型应用于加拿大的萨斯卡通。通过计算，我们得到了保护区、农村社区、郊区社区和城市社区的平均 LPRI。结果分别为 0.0665、0.1529、0.2726 和 0.3397，这意味着郊区社区和城市社区的风险更高。然后绘制 LPRI 的热图，如图 8 所示，以准确反映每个网格的情况。最后，利用 k 均值算法对郊区社区和城市社区各网格的 LPRI 进行分类。我们将网格分为五组，并确定哪些网格处于极端风险区域。

在任务 3 中，我们提出了三种可能的干预策略来解决光污染问题。网格移动策略通过移动网格来优化城市布局，从而减少 LPRI。调控策略通过降低照度和照明时间，从源头上消除光污染。补偿策略选择通过一定的经济成本来实现 LPRI 的下降。

在任务 4 中，我们将三种策略应用于萨斯卡通的郊区社区和城市社区。通过计算，网格移动策略可以有效地降低 LPRL。但是，我们需要考虑城市搬迁的高成本。为了比较补偿策略和监管策略，我们引入了策略强度因子的概念。对于相同的策略强度因子，两种策略减少的 LPRI 水平如图 15 所示。最终，我们得出结论，监管策略对这两个领域更有效。

此外，我们对模型进行了敏感性分析，调整了固定步长约束条件的参数，评估了优化效果。对模型的优缺点也进行了分析。我们还写了一份传单来宣传萨斯卡通的监管策略。

关键词：光污染;光栅法;k 均值算法;策略强度因子

目录

少光污染，亮星空1

1 介绍4

 1.1 问题背景4

 1.2 我们的工作4

2 假设和理由4

3 符号5

4 数据收集5

5 光污染风险等级评价模型5

 5.1 区域的栅格化6

 5.2 指数分析与建模7

 5.3 光污染综合指数8

 5.3.1 基于 EWM 的窄光污染综合指数8

 5.3.2 卷积核8

 5.4 光污染风险评估模型9

 5.4.1 经济指数(EI)9

 5.4.2 生态多样性指数(BDI)10

 5.4.3 人类健康指数(HHI)10

 5.4.4 社会稳定11

 5.4.5 光污染风险等级(LPRI)11

6 模型应用与验证12

 6.1 城市和郊区的风险水平12

 6.2 保护地和农村社区风险水平13

 6.3 基于 K-means 聚类的光污染风险等级分析。13

7 干预光污染的三种策略14

 7.1 策略一:基于模拟退火算法的网格移动策略15

 7.2 策略 II:基于强度因子的调控策略15

 7.3 策略 III:基于强度因素的补偿策略16

8 萨斯卡通的干预策略16

 8.1 移动萨斯卡通的网格16

 8.2 调控还是补偿17

9 灵敏度分析18

10 个优点和缺点18

 10.1 优势18

 10.2 缺点19

公众号：数学建模老司机

1 介绍

1.1 问题背景

我走过了最远的城市灯光，这是罗伯特·弗罗斯特诗歌《熟悉黑夜》第一节的结尾。对于大多数当代人，尤其是当代城市居民来说，在我们这个电气化的 24 小时社会中，这样的壮举变得极其困难。虽然人工夜间照明为社会发展带来了许多进步和可能性，但误用造成的光污染对生态环境、身心健康等带来了不容忽视的负面影响。



图 1:光污染是如何改变我们对夜空的认知的？

然而，与其他环境问题相比，光污染受到的关注相对较少，仍然停留在科学文化的“黑暗”中。同样重要的是，通过光污染的概念，人工夜间照明造成的环境问题很少受到关注。因此，建立一个数学模型来测量和缓解一个地方的光污染是势在必行的。

1.2 我们的工作

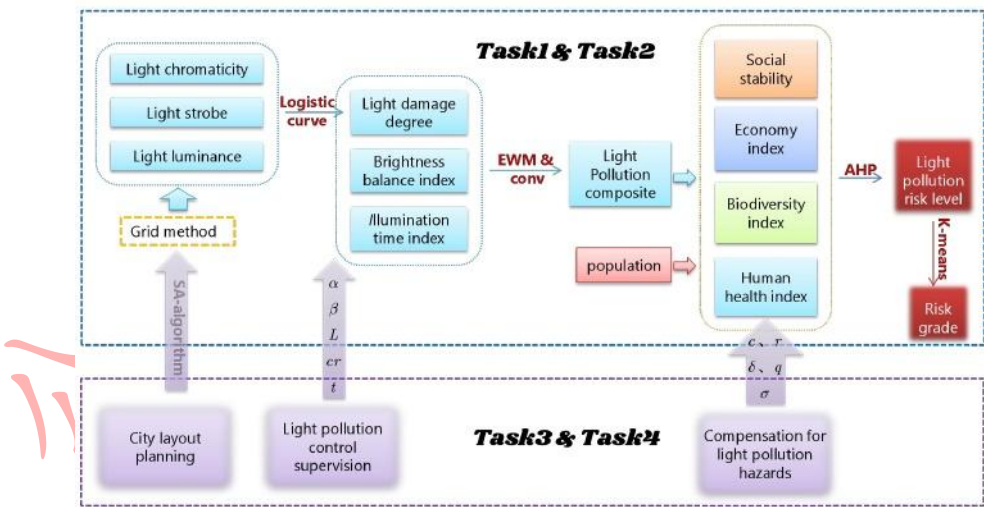


图 2:工作概况

2 假设和理由

我们做了以下假设来帮助我们建模。这些假设是我们后续分析的承诺。

•我们没有提到的这些因素对系统的影响很小。这是因为在现实中，影响光污染风险水平的因素太多，无法全部考虑。因此，这种假设是合理的，有助于避免在构建模型时出现不必要的麻烦。

我们从在线数据库中收集的数据是准确、可靠和相互一致的。因为我们的数据来源都是国际组织的网站，所以我们有理由假设他们的数据质量很高。

④划分网格时，将不同种类区域交界处的网格划分为网格物种中占据面积最大的种类。对于光污染风险等级的评估，我们忽略了这样做所造成的误差。

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
x	The horizontal sequence value of a grid, as an integer
y	The vertical sequence value of a grid, as an integer
$p(x,y)$	The light damage degree at (x,y)
$cr(x,y)$	The brightness balance index at (x,y)
$t(x,y)$	Scores for evaluating the illumination time at (x,y)
LPI	Light pollution composite index
EI	Economic index
BDI	Ecological diversity index
HHI	Human health index
$LPRI$	The index to evaluate Light pollution risk level
γ	Strategy implementation intensity factor

4 数据收集

我们使用的数据主要包括卫星图像和全球灯光亮度值、光污染和环保信息、人口密度等指标等。数据来源汇总见表 2。

表 2:数据源整理

Database Names	Database Websites Data
NASA	https://www.nightlights.io/
IDA	https://www.darksky.org/
Maps	© 2021 Mapbox © OpenStreetMap
Light Pollution Map	www.lightpollutionmap.info/
Google Scholar	https://scholar.google.com/

5 光污染风险等级评价模型

在制定可广泛检验的光污染风险水平评价指标之前，需要建立一个综合指标来评价一个场地的光污染水平。为此，我们首先确定空间模型对区域进行栅格化处理，选取与光污染密切相关的核心指标进行分析计算，并对栅格化网格进行细化，建立更为严谨的光污染综合指数。之后，我们通过数据研究，从四个方面对某一区域的光污染风险水平进行评估。

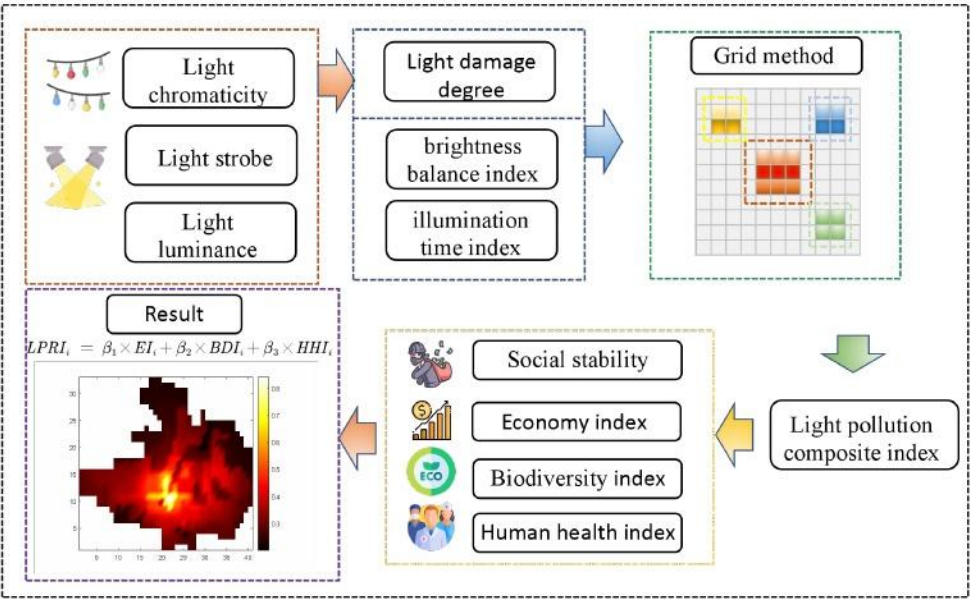


图 3:模型构建过程的可视化

5.1 区域的栅格化

前人的工作给了我们一些启示。在城市的不同区域，人工照明的使用表现出显著的差异。例如，由于区域功能的原因，城市商业区的亮度水平比住宅区高得多。因此，为了调查空间分布问题，本研究采用网格方法。

按照城市规划网的划分规律，将网格划分为商业网格、住宅网格、工业网格和无人区四种截然不同的类型。具体介绍如下:商业网格:这类网格主要由经济活动水平较高的商业区和商业中心组成，主要集中在城市，也有少量分布在城镇和农村。许多商业区频繁使用射灯、泛光灯、霓虹灯、灯箱、LED 广告屏等照明设备来达到宣传和吸引人群的作用，但人工光源应用不当会产生相反的效果，造成电力资源的严重浪费和光污染问题。

住宅电网:住宅电网主要由住宅区组成，包括公寓楼和独栋住宅，由于功能原因，这些区域最容易受到光污染。近年来，由于城市化的原因，各个地区的居住区光污染逐渐变得更加严重，表现为光侵入和内部照明不适当。

工业网格:工业网格包括专门用于工业活动的区域，如制造业、物流和仓储。主要集中在城市和郊区等受光污染影响较小的地区。

无人区:顾名思义，是指人口稀少的特殊区域，如荒野、保护区等。

这些网格可以很容易地在图 4 中可视化:

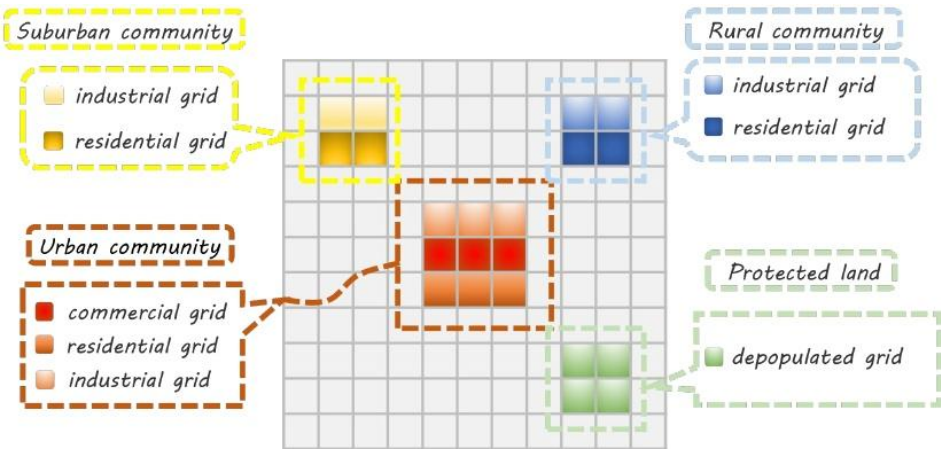


图 4:不同区域的四种网格类型

5.2 指数分析与建模

针对不同的区域，我们建立了三个评价指标: 光损害程度、亮度平衡指数和照明时间指数。

5.2.1 指标建立

(1)光损伤程度

光损伤程度是一个以光对人体造成的危害为中心的评估指标，它与光的强度，特别是夜空的亮度密切相关。有研究表明，人造光对人体造成的损害在不同地区有所不同，损害程度随着亮度的上升而增加，直到达到峰值水平。为了简化计算，我们基于 Volterra 模型的结构形式，构建了一个光损伤程度相对于光亮度的微分方程:

$$\frac{dp(x,y)}{dL(x,y)} = L(x,y)\left(1 - \frac{L(x,y)}{N}\right)$$
 (1)

城市中的霓虹灯，红、绿、蓝等饱和灯箱等这类形式的光线过多、色彩过多，容易造成光杂，即光的过度组合;商场里的广告屏、广场上的 LED 灯经常出现肉眼难以察觉的频闪，容易引发头痛、人眼辨别能力下降等不良现象。考虑到城市夜间的协调性和可持续性，光损伤应考虑到光的色度和光频闪现象。因此，最终可以得到修改后的表达式:

$$\frac{dp(x,y)}{dL(x,y)} = L(x,y)\left(1 - \frac{L(x,y)}{N}\right) + \alpha L(x,y) + \beta L(x,y)$$
 (2)

式中，分别为光色度和光频闪的校正因子。

由于光色度和光频闪的影响在不同区域可能有所不同，因此也应对校正因子进行相应的分类。表 3 给出了相关参数的估计值。

表 3:不同区域的参数估计

categories		α	β
Urban community	Commercial grid	0.1645	0.1623
	Residential grid	0.1061	0.1053
	Industrial grid	0.0815	0.0727
Suburban community	Residential grid	0.0546	0.0527
	Industrial grid	0.0325	0.0303
others		0	0

(2)亮度平衡指数

在许多研究中，光污染的严重程度是以受人造光源影响的夜空亮度与其自然亮度(即对比度)之比来表征的。因此，在评价夜间光环境时，不仅要考虑照度水平，还要考虑光的空间分布。为了解决空间中亮度的不均匀性，本文提出了基于光分布均匀性和亮度对比的亮度平衡指数，可用于评估光污染的影响。

$$cr(x,y) = \frac{L(x,y) - L_{min}(x,y)}{L_{max}(x,y)}$$
 (3)

(3)照明时间

在一定的光强下，曝光时间越长，光污染的累积效应越严重。相反，当光线很强但持续时间很短时，根据经典物理理论，这不会造成光污染。因此，在光污染的控制中，照射时间是一个不可忽视的因素。为了简化计算，我们选取了一些临界值进行下面的划分。

表 4:三方计分表

Illumination Time(h)	Score
$t \geq 12$	1
$8 \leq t < 12$	0.67
$t < 8$	0.33

5.3 光污染综合指数

5.3.1 基于 EWM 的窄光污染综合指数

EWM 计算中各指标的权重由指标的信息熵决定，信息熵反映了指标的可变性程度。信息熵越高，说明该指标在评价中的显著性越强。因此，利用 EWM 确定光污染指数计算中各指标的权重是一种客观的方法。

对数据进行预处理后，我们获得了 15 个地区近三年的数据。由于这些指标都是正面的，我们对数据进行了标准化：

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_{ij})}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} \quad i = 1, 2, 3 \tag{1}$$

其中 X_{ij} 表示第 j 个网格的第 i 个指示符值的原始数据，而 $\min(X_{ij})$ 和 $\max(X_{ij})$ 表示第 j 个网格第 i 个指标的最小值和最大值数据。

信息熵由 Eq.5 可得。

$$\begin{cases} P_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^3 Y_i} \\ E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^3 P_{ij} \ln P_{ij} \end{cases} \tag{2}$$

$$\lim_{P_{ij} \rightarrow 0} P_{ij} \ln P_{ij} = 0 \tag{3}$$

根据信息熵，各指标的权重可由式 7 计算。

$$W_i = \frac{1 - E_i}{k - \sum E_i} \quad (i = 1, 2, 3) \tag{4}$$

基于以上讨论，我们对各指标进行了权重赋值，权重结果如下：光损伤度(85.73%)、亮度平衡指数(4.82%)、照射时间(9.45%)。在这些计算权重的基础上，我们有

$$LPI^* = \alpha_1 \times p + \alpha_2 \times cr + \alpha_3 \times t \tag{5}$$

需要注意的是，这个计算忽略了区域与周围环境之间光污染的影响。但在现实情况下，区域间光污染的影响也是一个不容忽视的关键因素。

5.3.2 卷积核

在考虑一个区域受人造光影响的程度时，不仅要考虑该区域的综合光污染指数，还要考虑其邻近区域的光污染指数。因此，我们引入光污染系数，表示不同区域对其的影响。

$$LPI'(x,y)=\begin{bmatrix} LPI^*(x-1,y+1) & LPI^*(x,y+1) & LPI^*(x+1,y+1) \\ LPI^*(x-1,y) & LPI^*(x,y) & LPI^*(x+1,y) \\ LPI^*(x-1,y-1) & LPI^*(x,y-1) & LPI^*(x+1,y-1) \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} LF(x-1,y+1) & LF(x,y+1) & LF(x+1,y+1) \\ LF(x-1,y) & CF & LF(x+1,y) \\ LF(x-1,y-1) & LF(x,y-1) & LF(x+1,y-1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$CF=1-\sum_{i=-1}^1\sum_{j=-1}^1LF\left(x+i,y+j\right) \quad (2)$$

需要注意的是，i和j不能同时为0。

表 5:不同区域的 LF 值

region	LF	region	LF
Urban Commercial District	0.05	Suburban residential District	0.02
Urban residential District	0.04	Suburban Industry District	0.01
Urban Industry District	0.03	Countryside and Protected land	0

5.4 光污染风险评估模型

要全面评价光污染对一个地区的累积效应，必须从多个角度进行评估。考虑到课题的背景和目标，我们选择使用经济影响、生物多样性、人类健康和社会稳定四个标准来综合评估电网的风险水平。

5.4.1 经济指数(EI)

人工光源的开发利用带来了显著的经济效益。然而，光的过度使用导致了光污染，产生了重大的社会成本，包括对生物多样性、人类健康、天文观测和能源消耗的不利影响。据估计，仅在美国，光污染每年就浪费了价值近 70 亿美元的能源。因此，建立一个更合理的评估模型来衡量光污染与经济之间的关系是至关重要的，这将使我们能够更好地管理相关的经济问题并有效缓解它们。

考虑到道格拉斯函数的基本理论和假设，我们开发了耦合轻经济函数(为了简化模型，只考虑夜间经济):

- 我们介绍了技术的作用，但没有考虑技术对时间的影响，即技术的作用本质上是恒定的
- 我们将光污染造成的经济成本简化为与光污染程度大致线性相关。

是拟合经济损失和光污染指标参数的线性因子。

我们采用极大似然估计来拟合参数，并使用 MATLAB 进行计算。相关参数的估计如表 6 所示。

表 6:参数估计结果

Parameter	Value
c	0.4356
α	345.4
r	-5.007

5.4.2 生态多样性指数(BDI)

在过去的一个世纪里，人工夜间照明的范围和强度显著增加，对野生动物的生物学和生态学产生了重大影响。例如，夜间人工照明会造成鸟类碰撞和死亡，扰乱鸟类迁徙，抑制两栖动物繁殖等影响。

Gleason(1922)提出了一个衡量生态多样性的数学公式:

在我们的模型中，光污染指数的增加抑制了物种和种群的数量，影响程度基本符合 s 型曲线。因此，对数据进行拟合后，我们认为生物多样性指数 BDI 如式 13 所示。

$$\begin{cases} BDI = B_0 - \frac{B_0}{1 + e^{-10 \cdot LPI + 6.5}} \\ B_0 = \frac{S}{\ln A} \end{cases} \tag{1}$$

我们认为，不同区域生物多样性指数曲线差异的主要原因是不同区域群落中物种 S 的数量不同，从而导致 b 的差异。总的来说，在同一区域内，排序从大到小依次为:保护区>农村社区>郊区社区>城市社区。

以保护区和城郊为例，图 5 显示了两个区域生物多样性指数曲线的差异。幸运的是，BDI 较高的地区通常表现出较低的光污染水平。然而，这强调了需要关注光污染对农村和保护区的影响，因为同样的 LPI 可能造成更大的生态破坏。此外，由于不同地区的 BDI 计算公式仅相差一个乘数，因此它们的快速下降点表现出相同的 LPI 强度。

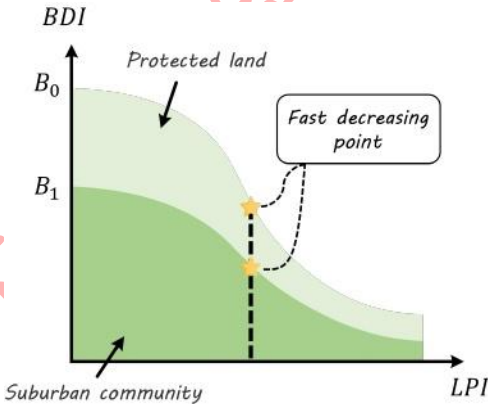


Figure 5: BDI's graph

5.4.3 人类健康指数(HHI)

夜间照明中常见的光污染形式有光侵入、眩光带、光杂波。长期暴露在光线侵入和强烈眩光下，会增加患白内障和黄斑变性等眼疾的风险。根据美国疾病控制和预防中心的数据

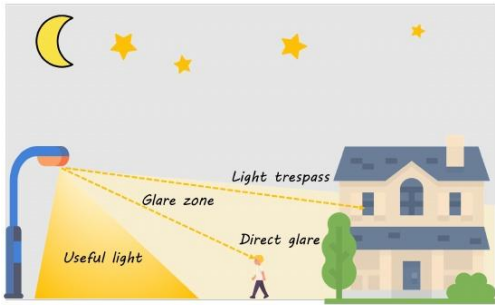


Figure 6: The different components of light pollution

在美国，近一半的失明病例是由光线侵入和眩光造成的。图 6 可视化了光污染的常见形式和关系。

我们假设光污染引起疾病的概率和光污染的严重程度成线性关系，则有：

$$HHI = \sigma \cdot LPI \cdot \rho \quad (1)$$

5.4.4 社会稳定

许多人认为夜间照明不足会使他们更不安全，因为犯罪分子倾向于瞄准光线不足的地区。因此，不断上升的犯罪率被用来促进增加户外照明。然而，Kurt W. Riegel 认为，这样的研究仅限于少数小区域。从更广阔的角度来看，考虑整个城市或整个国家，就会发现不一致之处。例如，美国联邦调查局进行的一项研究发现，总犯罪率和室外照明亮度一起增加。根据这项研究，我们可以得出结论，人造光和犯罪率之间没有必然的相关性。因此，我们最终决定忽略这个指标。

5.4.5 光污染风险等级(LPRI)

在评价一个区域的光污染风险等级时，首先需要对该区域内所有网格的指标值进行归一化计算。我们首先假设一个区域内有 n 个网格，我们用 i 来表示某个特定网格的个数。如前一节所述，经济指标(EI)和生态多样性指标(BDI)是评估光污染风险水平的负面指标，而人类健康指数(HHI)是正面指标。因此，所有数据都应平等地进行初步归一化处理，得出如下公式：

$$\begin{cases} EI'_i = \frac{\max(EI_i) - EI_i}{\max(EI_i) - \min(EI_i)} \\ BDI'_i = \frac{\max(BDI_i) - BDI_i}{\max(BDI_i) - \min(BDI_i)} \\ HHI'_i = \frac{HHI_i - \min(HHI_i)}{\max(HHI_i) - \min(HHI_i)} \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

在评估权重时，我们在这里使用的 AHP 是最广泛采用的方法。实际上，主观方法保留了更多的科学合理性，因为客观方法无法实现某些标准。使用主观法可以不顾各指标的本质，反映出三个指标之间的相对重要性，自然地确定权重。因此，我们将主观 AHP 作为我们的主要方法而不是其他方法。

在决定权重时更客观的模型。通过建立判断矩阵，计算一致性比，得到三个因素的权重系数，使我们能够建立光污染风险等级模型。

$$LPRI_i = \beta_1 \times EI_i + \beta_2 \times BDI_i + \beta_3 \times HHI_i \quad (2)$$

通过使用加权平均值，我们可以大致估算出特定区域的光污染风险水平。

$$\overline{LPRI} = \frac{\sum_{i=1}^n LPRI_i}{n} \quad (3)$$

我们可以利用加权平均值来估计特定区域的光污染风险水平。然而，需要注意的是，使用平均值来估计一个地区的风险水平并不是一种全面或严格的计算方法。考虑到一个地区的地理环境、气候、空间分布等因素，我们建议评估者在评估特定地区的风险水平时，对光污染的内部水平进行详细的分析。

6 模型应用与验证

在本节中，我们选择了加拿大的中型城市萨斯卡通作为我们的研究对象。在萨斯卡通城市规划的基础上，对城市和萨斯卡通郊区进行网格化。我们还选择了城市周边的一个农村社区和一块保护区，进行了同样的操作。具体划分如图 7 所示。

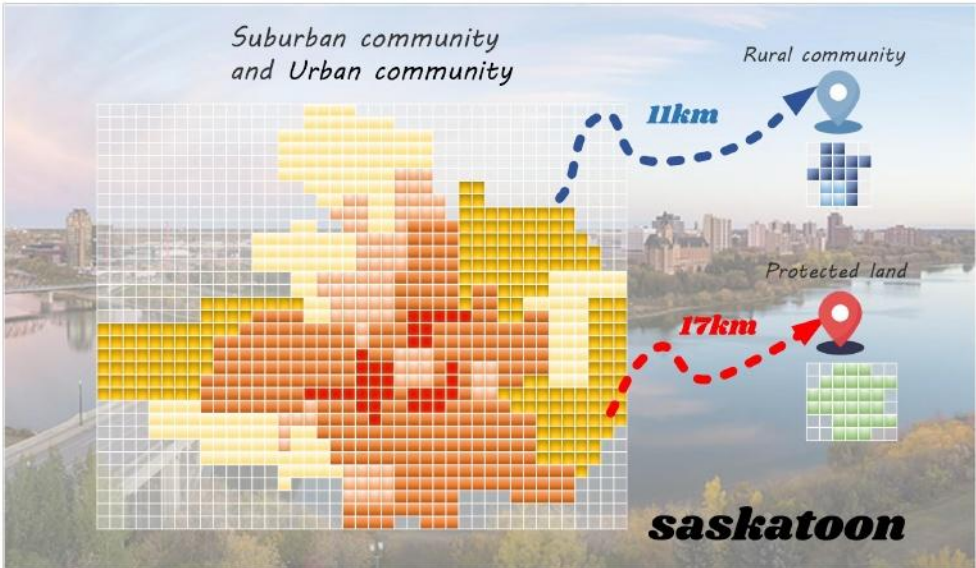


图 7:网格化萨斯卡通

6.1 城市和郊区的风险水平

一般来说，城市和郊区是光污染最严重的地方，因此经常成为光污染研究的重点。利用 MATLAB 建立的评价模型，求解了城市和郊区光污染风险等级的 LPRI 热图。结果如图 8 所示。

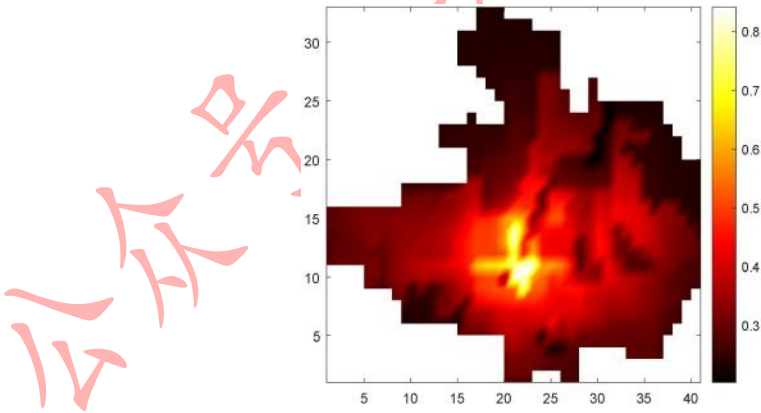


图 8:LPRI 热图

从图 7 可以看出:

- 1. 光污染最严重的地区对应于商业区和一些商业区住宅区在城市中心，而在城市边缘则普遍较少光污染。这与我们已经知道的是一致的。
- 2. 同时可以观察到，一些靠近市中心的区域也较少光污染。通过对比光污染风险等级图和人口密度地图上，我们认为这些区域的出现主要源于两个方面:
 - (1)在靠近城市的位置存在人口密度较小的区域中心由于一些外部因素。在这些地区，光污染对人类的影响健康指数会降低，导致光污染风险等级保持在 a 相对较低的水平。

(2)在靠近城市中心的位置存在少量的工业区，根据该模型的人体健康指数评价方法，工业区因光污染造成的健康损害比居民区小，因此光污染风险等级也会降低。

为了评价各类型区域的光污染风险水平，我们计算了各类型区域的平均光污染风险水平，结果如图 9 所示。

从图 8 中我们可以看到:

- 1.城市光污染风险水平总体高于郊区，符合预期，因为城市的亮度水平会高于郊区。
- 2.商业区的光污染风险水平明显高于其他地区区域，主要是因为商业区域之间会有很强的互动。
- 3.居住区的光污染风险水平高于工业区，因为根据城市规划的要求，工业区一般远离市中心，光污染对健康的影响程度相对于居住区要低一些。

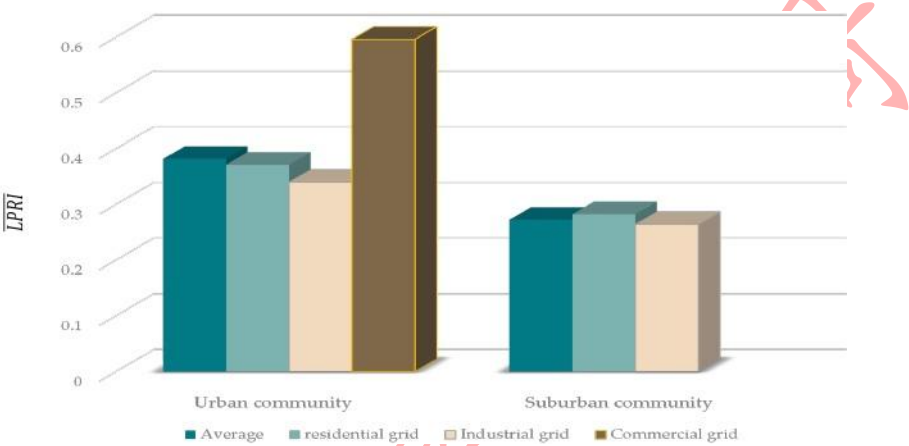


图 9:不同区域的风险水平

6.2 保护地和农村社区风险水平

由于农村和保护区的网格类型相对简单，面积小，数据有限，我们将不深入研究其内部光污染的空间分布，而是使用 Eq.(17)进行粗略评估。

$$\overline{LPRI}_{rural} = 0.1529 \qquad \overline{LPRI}_{protected} = 0.0655 \qquad (1)$$

与城市和郊区社区相比，农村和保护区的平均光污染风险水平相对较低。然而，这一发现是针对加拿大的具体情况的，因为加拿大国土面积大，人口少，在农村和保护区与城市之间有一个重要的缓冲区。因此，农村和保护区受到城市光污染的影响较小。尽管如此，在一些人口密度较高的国家，离城市较近的农村和保护区的光污染风险可能接近甚至超过郊区的风险。这是由于农村社区的生物多样性指数对光污染的敏感度更高。尽管对农村和保护区光污染的研究数量有限，但随着光污染水平的增加，对光污染的风险给予足够的重视至关重要。然而，由于篇幅限制，我们在此不再进一步讨论这个问题。

6.3 基于 K-means 聚类的光污染风险等级分析。

我们已经提前获得了每个网格的光污染风险等级，并绘制了热图。但我们还需要确定每个网格的光污染风险等级分类，以便于进一步分析。

我们在这篇文章中的研究重点是城市和郊区的光污染，所以我们将在这里讨论这两个区域。采用 k 均值聚类方法将这两个区域的网格光污染风险等级划分为 5 类:极端风险区、高风险区、中风险区、低风险区和安全区。得到的分类标准如图 10 所示。

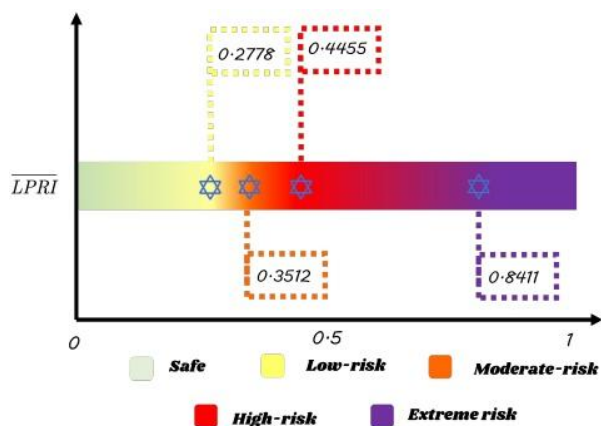


Figure 10: Classification standards and their respective critical points

基于上述分类标准，我们通过目测计算每种网格的光污染风险水平，得到了每种网格在这五组中所占的百分比分布。得到的结果如图 11 所示。

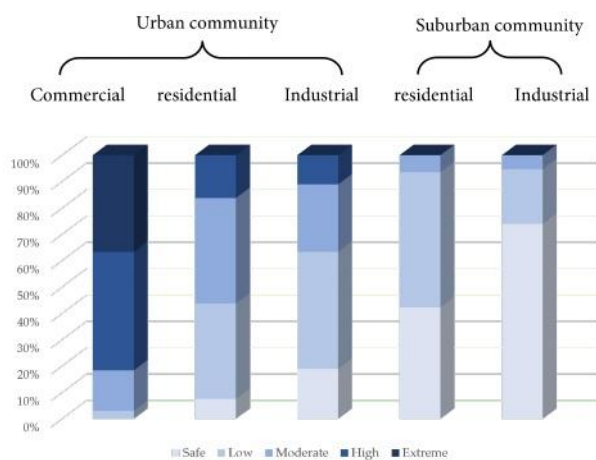


图 11:各类型的百分比统计

从图 10 可以看出:

- 1.商业区域最多的是极端风险区和高风险区，极端风险区基本集中在商业区域。
- 2.城市居住区光污染问题也比较突出，高风险区和中风险区分布十分普遍。
- 3.同时，考虑到居住区的特殊性，良好的居住区环境对提高人们的幸福感有着重要的作用。因此，居住区的光污染问题必须引起高度重视。
- 4.郊区光污染相对较低，不存在极端风险区和高风险区，与前文分析一致。
- 5.对于整个城市和郊区来说，高风险区和中等风险区只占很小的一部分，这与帕累托原则是一致的。

7 干预光污染的三种策略

基于光污染风险评估模型的建立与应用，我们从不同角度制定了三种干预策略。下面，我们将讨论这三种策略的具体实施情况及其对光污染的潜在影响。

7.1 策略一:基于模拟退火算法的网格移动策略

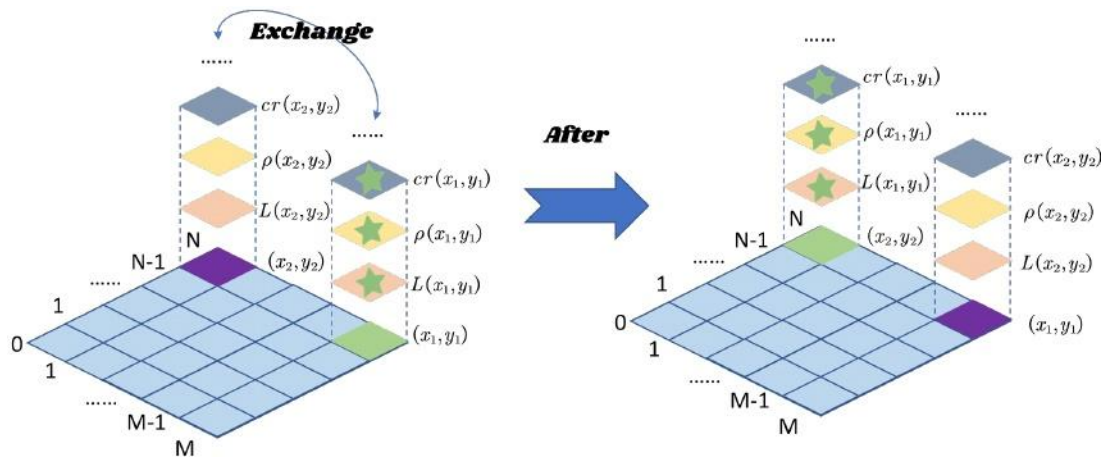


图 12:指标会随着网格的变化而变化

假设 2:我们在“移动”网格时，要尽量减少对城市其他功能的影响，所以我们增加了以下限制:每个网格必须被与网格相同类型的 8 个网格包围，这样网格之间才能相互协调，提高城市的效率。

基于以上两个假设，我们选择使用模拟退火算法来解决这个优化问题。我们的目标是使光的总和最小。

$$LPRI_{total} = \sum LPRI(x,y) \quad (x,y) \in R \tag{1}$$

R为外选区域。为方便起见，将网格的初始状态记为s。该状态不仅包含网格的坐标分布，还包含每个网格对应的参数信息。当网格交换时，S变为新状态S'，表示为伪代码如下：

Algorithm : Simulated annealing algorithm for optimal grid distribution

Input: $LPRI_{total}(0), S, T_0, \alpha (0 < \alpha < 1)$

Output: $LPRI_{total}(5000)$

$T = T_0$

for $t = 1$ to 5000 do

Randomly select two grids for exchange

Calculate the value of $LPRI_{total}(i)$ on the equation

If $LPRI_{total}(i) > LPRI_{total}(i-1)$

$S \leftarrow S'$

else

$\Delta = LPRI_{total}(i-1) - LPRI_{total}(i)$

$r = Random()$

If $r < \exp(-\Delta/T)$

$S \leftarrow S'$

else

$LPRI_{total}(i) = LPRI_{total}(i-1)$

$T = \alpha T$

end

7.2 策略 II:基于强度因子的调控策略

针对光污染问题，国际暗天组织提出了“负责任的户外照明五项原则”：

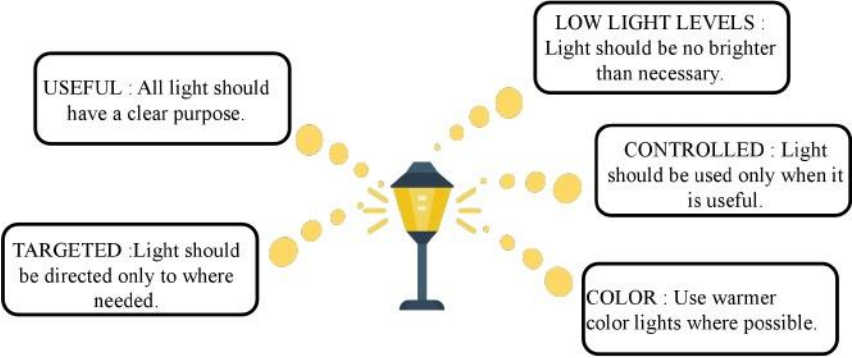


图 13:负责任户外照明的五项原则

然而，在生产和日常生活中，大多数企业和个人并不能自觉地遵守这些原则。因此，政府有必要建立并执行相关法律法规，对这些原则的执行情况进行监督。我们制定了战略实施强度因子，并将其数值指定为{1、2、3、4、5}，分别表示{弱、弱、中、强、强}五个级别的强度。

通过这种监管方式，可以更好地执行户外照明的五项原则。对应我们的模型，会降低光亮度 L 、光色度校正系数 α 、光频闪校正系数 β 、亮度平衡指数 cr 以及照明时间 t 。

由于亮度的降低受到很多限制，所以我们认为亮度的降低比较困难。因此，我们将策略强度因子每增加一级，光度降低 1%，其他参数设降低 3%。

$$FA_1' = FA_1 \times (1 - \Theta_1)^{\gamma_1}$$

(1)

表 7 The relationship between FA_1 and Θ_1

FA_1	α	β	L	cr	t
Θ_1	3%	3%	1%	3%	3%

7.3 策略 III:基于强度因素的补偿策略

除了直接调节光的使用，我们还可以通过政府宏观调控来补偿光污染造成的危害，例如对产生光污染的企业和工厂征税，将税收用于基础设施建设以及与减少光污染有关的技术和新材料的开发，以减少光污染对健康、生物多样性的影响。

如 7.2 节所述，我们指定值为{1、2、3、4、5}的强度因子来表示五个战略实施强度等级{弱、弱、中等、强、强}的因素。

由于税收战略的实施是以牺牲一定的经济效益为代价来补偿光污染对健康和生物多样性的危害。考虑到强度因子对模型中各参数大小的影响，将每次策略强度增加的效果具体规定如下：

与经济指标相关的参数技术影响因子减少 3，线性因子增加 3，即经济效益减少，成本增加。

与生物多样性指标和线性因子相关的影响因子增加 3，即经济效益降低，成本增加。生物多样性参数 10(记为)和 6.5(记为)相关的影响因子减小 3，与人体健康指标相关的参数增大 3，即光污染对生物多样性和健康的危害减小。

据此，我们得到如下表达式:

$$FA_2' = FA_2' \times (1 - \Theta_2)^{\gamma_2}$$

(1)

表 8 The relationship between FA_2 and Θ_2

FA_2	c	r	δ	q	σ
Θ_2	3%	-3%	3%	3%	-3%

8 萨斯卡通的干预策略

我们将制定的干预策略应用于萨斯卡通的城市和郊区社区，并对光污染水平进行模拟，通过分析干预后光污染水平的变化来获得最有效的干预策略

8.1 移动萨斯卡通的网络

对于一个城市的布局，我们最关心的是两个位置:

(1)城市中心，这里的商业区可以对周边地区产生显著的影响，合理的商业区布局可以有效减少这个位置的光污染。

(2)城郊边界，城郊生物多样性指标受光污染影响较大，该位置布局不合理可导致整体光污染水平上升

由于篇幅限制，我们仅对上述两个地点的部分区域进行了优化计算。最终的布局如图 14 所示。

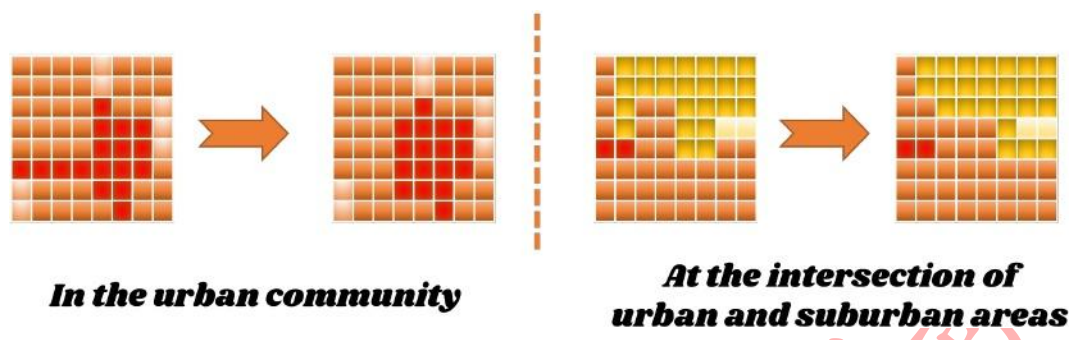


图 14:干预后网络集的变化

我们可以观察到，商业区倾向于在市中心区域聚集在一起。主观上，这可以减少商业区对周边环境的影响，说明这种优化结果的合理性。同样，在城市与郊区的过渡地带，城市网格也倾向于聚集在一起，这可以减少城市对郊区的生态影响。此外，人们普遍认为，合理的城市布局应该由商业区、住宅区和工业区依次组成，从中心到郊区。我们的优化结果与这种布局是一致的，从而体现了实用性。

然而，在实践中，这种优化往往面临巨大的外部阻力，并且需要巨大的成本。因此，我们不建议在发达的城市使用这种方法进行优化。尽管如此，我们相信这种方法可以作为规划新城的参考。

8.2 调控还是补偿

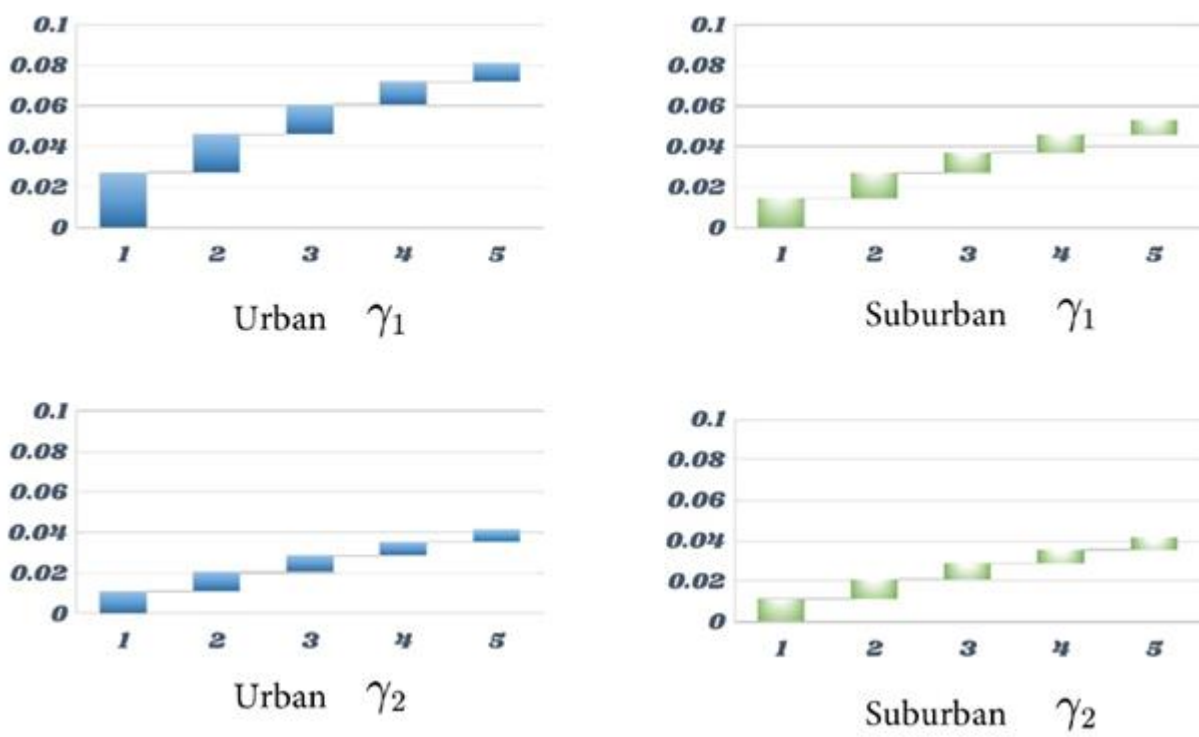


图 15:不同策略因素影响下，不同区域各指标的变化情况

可以看出，战略 II 的实施力度越高，各地区光污染风险水平越低，即战略 II 的实施降低了光污染风险水平。随着战略 III 实施力度的加大，在战略力度较小时，各区域光污染风险水平下降，但下降幅度远小于所造成的风险水平下降幅度在相同的策略强度下使用策略 II。随着战略 III 强度的持续增加，虽然其他区域的风险水平均有所下降，但城市商业区和郊区工业区的风险水平有所回升。具体分析各指标变化可知，这是由于过度征税阻碍了城市商业区和郊区工业区部分企业和工厂的经济发展，而经济指标的过多下降反而使得我们模型中的光污染风险水平出现反弹，这说明战略 III 的实施强度不宜过高，而应适度。

总之，策略 II 对光污染风险水平的影响更大，而其影响一直是较大且正的。策略 III 对光污染风险水平的影响主要为正，但小于策略 II。且强度过大会阻碍经济发展，因此具有一定的负面影响。因此，对“负责任户外照明原则”的监管越强越好，而征税要适度，不能太小，也不能太大。这也符合我们的生活常识，说明我们的模式有很大的合理性。

9 灵敏度分析

由于卷积核中的权重因子是通过查阅文献主观选择的，不恰当的参数选择会影响模型的正确性，因此我们分析了城市商业区的光污染系数对周围栅格的敏感性。模型中使用的城市商业区光污染系数为 0.05，因此指定以 0.002 的步长在 0.04 到 0.06 之间变化，以分析这种变化对光污染风险水平的影响。

因此，计算结果如图 16 所示。

可以看出，随着城市商业区光污染系数的变化，光污染风险等级的变化并不明显。也就是说，模型中主观选择的系数的变化不会引起模型的剧烈变化，这说明我们的模型是稳定的。这也反映了一个事实，即每个网格的风险等级主要取决于自身的指标，而不是周围的网格。这一结果与我们的一般认知是一致的。

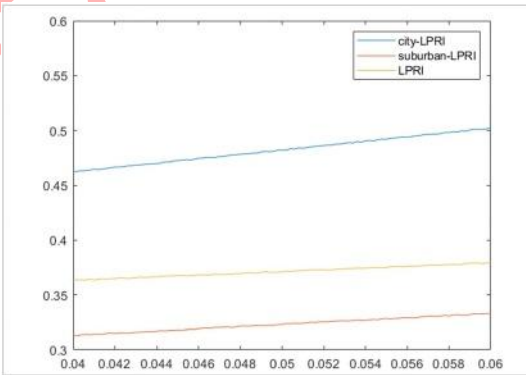


Figure 16: Sensitivity analysis of LF

10 个优点和缺点

10.1 优势

- 该模型根据城市规划图将城市划分为商业区、住宅区和工业区，并将郊区和农村地区划分为住宅区和工业区工业领域，充分考虑各个地区之间的差异。研究成果具有广泛的适用性，可用于评价各区域光污染风险水平。

- 该模型采用基于网格的方法对不同区域进行分类，通过计算每个网格的指标，准确获取每个小区域的光污染风险等级，使模型更加准确和有针对性。通过卷积计算，模型量化了每个网格对其周边网格的影响，同时考虑到属于不同类型区域的网格对周边网格的影响不同，使模型更加全面。

- 该模型创新性地提出了城市布局规划策略，为未来城市建设提供了新的思路。从预防和补偿的角度提供降低光污染风险等级的具体措施，对策略的评价符合预期。

10.2 缺点

- 由于数据集中数据不足，所有指标都进行了简化，需要在更完整的数据集基础上补充指标的影响因素。仅对一个地区进行了光污染风险专项评估，案例研究不足。

- 该模型相对复杂，需要从各种来源收集大量数据。而且，由于网格化过程，该算法需要大量的计算资源，需要大量的人力和物力来实现。

参考文献

[1] Liu Ming, Zhang Baogang, Pan Xiaohan, et al. Research on Evaluation Indicators and Methods for Light Pollution in Urban Lighting Planning[J]. Journal of Illuminating Engineering, 2012, 23(4): 22-27.

[2] Hu Jiayu. Evaluation and Prevention of Light Pollution in Night Scenery Lighting of Xi'an Main Urban Area [D]. Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.

[3] Riegel K W. Light Pollution: Outdoor lighting is a growing threat to astronomy[J]. Science, 1973, 179(4080): 1285-1291.

[4] Stone T. Light pollution: A case study in framing an environmental problem[J]. Ethics, Policy & Environment, 2017, 20(3): 279-293.

[5] Gallaway T, Olsen R N, Mitchell D M. The economics of global light pollution[J]. Ecological economics, 2010, 69(3): 658-665.

[6] Centers for Disease Control and Prevention <https://www.cdc.gov/>



Restore the Starry Sky

Background



Less than 100 years ago, everyone could look up and see a spectacular starry night sky. Now, due to the light pollution, millions of children across the globe will never experience the Milky Way where they live. 80 percent of the world's population lives under skyglow. In the United States and Europe 99 percent of the public can't experience a natural night!

What is light pollution?

The inappropriate or excessive use of artificial light – known as light Pollution . Components of it include : glare , skyglow , light trespass and clutter . The definition of them are show in the figure beside.



How Bad is Light Pollution?

According to research , light pollution has caused :



Disrupting the ecosystem



Effecting crime and safety



Harming human health



Increasing energy consumption



Take Action !

In order to restore the disappearing stars, we have developed mathematical models and made case studies to come up with fruitful policy recommendations , which can reduce light pollution by approximately 23.17% at the source. Therefore, we are now calling on everyone to act together to support the implementation of these following measures!



All light should have a clear purpose. Before installing or replacing a light, determine if light is really needed and think more about the ecological, health and energy impacts of this light. Preventing light pollution starts with small daily tasks.



Consider using reflective paints or self-luminous markers for signs, curbs, and steps to reduce the need for permanently installed outdoor lighting as well as save energy.



We recommend that the government urge companies to use controls such as timers or motion detectors to ensure that light is available when it is needed, dimmed when possible, and turned off when not needed.



Limit the amount of shorter wavelength (blue-violet) light to the least amount needed. Light where you need it, when you need it, in the amount needed, and no more. The government also needs to regulate everyone to use shielding and careful aiming to target the direction of the light beam so that it points downward and does not spill beyond where it is needed.