

关掉灯，点亮星星

摘要：光污染是人类活动造成的一种环境污染，对野生动物、植物和人类健康都有负面影响。随着城市化和工业化的不断发展，光污染问题日益严重。因此，光污染风险水平的评价和提升就显得尤为重要。

首先，我们收集了来自 55 个地区的 10 个指标的数据，并将这 10 个指标分为光、社会 and 自然三个领域。然后结合层次分析法、熵权法和变异系数法计算各指标的组合权重，构建光污染指数 (LPI) 公式，进而构建 LSN 评价模型。最后，我们使用模糊聚类分析将所有地点划分为四类，从而将光污染水平划分为四类。

其次，我们选择纽约市、贝尔维尤、塞多纳和黄石国家公园作为每一种地点类型的代表。采用 LSN 评价模型，计算出其 LPI 分别为 35.55、41.33、76.94、84.18。由此得出它们的光污染等级分别为一级、二级、三级、四级。

第三，提出了三种干预策略及其具体行动，构建了 PIA-NN 模型，研究了具体行动对光污染效应的潜在影响。这三种干预策略分别是：降低人工光强度 & 加强宣传教育 & 扩大植被面积。我们结合 Spielman 相关系数和 BP 神经网络模型，定量反映了三种干预策略对光污染效应的“潜在影响”。

接下来，我们选取了塞多纳和纽约市两个具有代表性的地区，利用 PIA-NN 模型和 LSN 评价模型，探讨了三种干预策略对这两个地区光污染水平的影响。结果表明，对于这两个地区来说，降低人造光强度是降低光污染风险水平最有效的干预策略。

最后，我们将选择纽约市作为活动的地点，并围绕其相应的最有效的干预策略设计一个漂亮的传单。

关键词: LSN 评价模型; LPI; PIA-NN 模型; 层次分析法

目录

关掉灯，点亮星星 1

1 介绍 4

 1.1 问题背景 4

 1.2 我们的工作 4

2 假设和论证 5

3 符号 5

4 光-社会-自然(LSN)评价模型 6

 4.1 建立评价体系 6

 4.1.2 社会 8

 4.1.3 自然 8

 4.2 指标权重的确定 9

 4.2.1 层次分析法 9

 4.3 LSN 评价模型的建立 11

 4.3.1 光污染指数 (LPI) 的计算 11

 4.4 LSN 评价模型的应用 12

 4.4.1 案例I: 城市社区 12

 4.4.2 案例II: 一个郊区社区 12

 4.4.3 案例III: 一个农村社区 13

 4.4.4 案例IV: 受保护的地理位置 13

5 可能的干预策略 14

 5.1 策略建议和具体行动 14

 5.1.1 策略I:降低人工光强度 14

 5.1.2 策略II: 加强宣传教育 15

 5.1.3 策略III: 扩大植被面积 15

 5.2 潜在影响分析-神经网络(PIA-NN)模型 15

 5.2.1 模型的建立 16

 5.2.2 结果与分析 16

6 哪种策略效果最好? 17

 6.1 亚利桑那州塞多纳的结果 18

 6.2 纽约市的结果，纽约 18

 6.3 最终结果 18

7 灵敏性分析 19

8 模型评价和进一步讨论 19

 8.1 优势 19

8.2 缺点 20

8.3 进一步讨论 20

9 结论 20

参考文献 20

公众号：数学建模老司机

1 介绍

1.1 问题背景



光污染最早是在 20 世纪 50 年代由天文学家提出的。^[1]随着城市化进程的加快和经济的发展，人们对夜间照明的需求逐渐增加。同时，人类在夜间过度使用或不合理地使用人工光源，破坏了自然的黑暗。根据国际暗天协会的数据，全球 80% 以上的人口生活在受光污染影响的地区，^[2]欧美约 99% 的城市居民无法在夜间观测到银河系。^[3]在全球许多大城市，夜晚的亮度甚至可以达到白天的水平。

光污染问题正日益影响着人们的日常生活，包括工作和休闲活动。它不仅扰乱了我们美丽的夜空，也对人类健康、安全和生态环境产生了负面影响。根据天文学研究，没有光污染的晴空可以显示大约 7000 颗星星，而在大城市里只能看到 20-60 颗星星。夜间过多的人造光会扰乱生物体的昼夜节律，导致睡眠质量差，失眠率更高。而且，过多的光线照射人眼，会损伤视网膜和虹膜，导致视力急剧下降。在光线充足的城市街道上，远光灯也会对街道对面的行人或司机造成短暂的“视力丧失”，从而导致交通事故的发生率更高。此外，光污染还会改变植物的生长周期，影响野生动物的迁徙模式。

因此，光污染问题迫切需要全球的关注和监管

1.2 我们的工作

首先，我们提出了光-社会-自然(LSN)评估模型，该模型用于评估一个地点的光污染风险水平。具体来说，该模型考虑了许多反映光污染的指标。基于这些指标，我们建立了一个二次评价体系。考虑到不同的方法都有其局限性，各指标的权重由层次分析法(AHP)、熵权法(EWM)和变异系数法(CVM)相结合确定。我们选择了全球 55 个具有代表性的地点，并根据相关数据计算其光污染指数，并通过模糊聚类确定不同的光污染程度。

其次，选取美国 4 个不同类型的地点，利用 LSN 评价模型计算每个地点的光污染指数，并结合当地实际情况分析结果的合理性。

然后，在我们之前构建的指标中，我们在考虑其可行性的情况下，提出了三种干预策略。对于每种干预策略，我们都提供了具体的行动。我们还建立了一个 PIA-NN 模型来分析这些行为对光污染效应的潜在影响。结果将被可视化并进行合理性分析。

随后，我们从 Task 2 中选取了两个地点作为研究对象，利用 PIA-NN 模型和 LSN 评价模型分析了三种干预策略对其光污染风险水平的影响，并进行了相应的分析。

最后，我们将选择纽约市作为活动的地点，并围绕其相应的最有效的干预策略设计精美的传单。

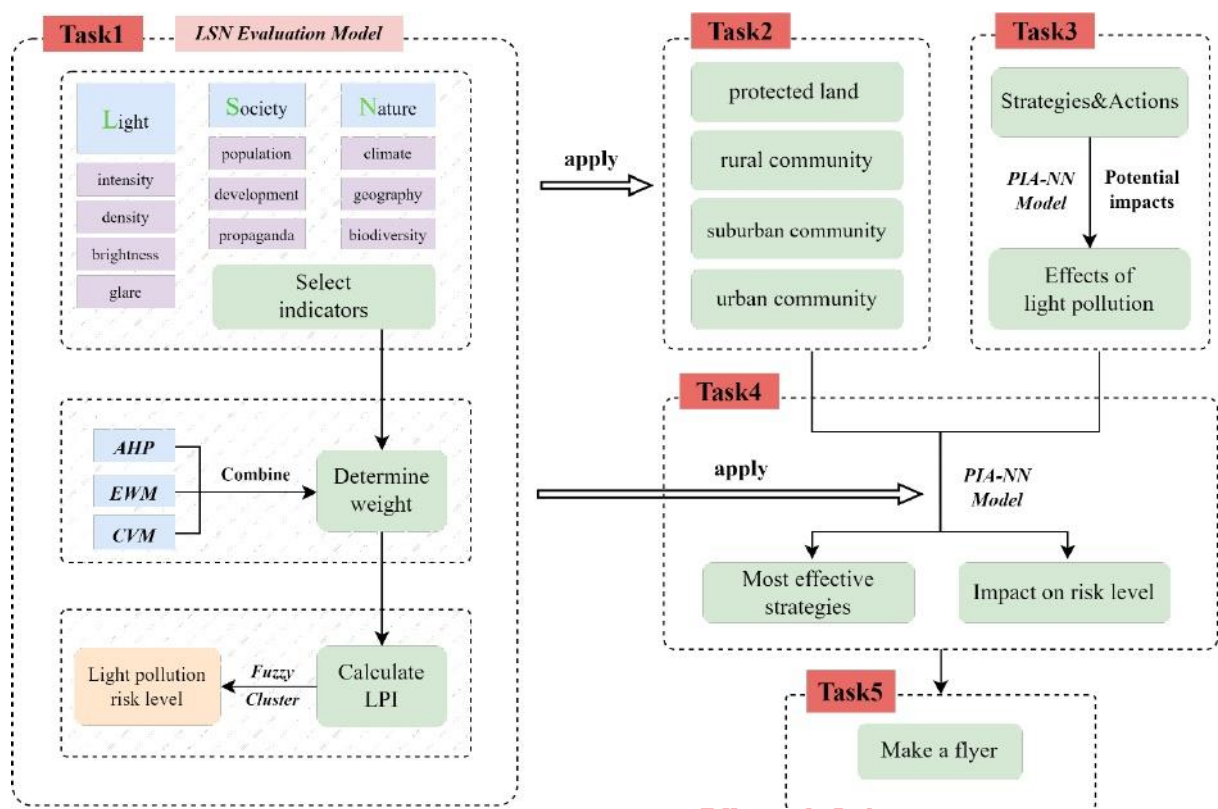


图 1:我们论文的结构

2 假设和论证

假设 1:本文将 LPI (Light Pollution Index, 光污染指数)定义为一个区域的光环境得分。LPI 值越高，区域光污染程度越低。

理由:一个地区的光污染水平越低，说明该地区的光环境越好。根据人们的使用习惯，条件越好对应的分数越高是很常见的。

假设 2:在相关分析中，只保留相关性强的因素，去除相关性小的因素。

理由:影响光污染的因素很复杂。如果把相关性较低的因素也考虑进去，会使研究结果不那么重要，甚至可能得出误导性的结论。

假设 3:假设从互联网上收集的数据是真实可靠的。

理由:在研究光污染的过程中，我们选择了世界上最典型的地区，因此数据的广泛性得到了保证；所有数据均来自官方网站，因此数据的可靠性得到了保证

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	Unit
L	Value of Light	-
S	Value of Society	-
N	Value of Nature	-
$S_{location}$	Value of the area	km^2
trp	Atmospheric transparency	m
wet	Atmospheric humidity	%
h	Altitude	$feet$
t	Sunshine duration	h
S_{green}	Green area	km^2
C_{wild}	Species of wild animals	-
ω	Indicators weight	%
LPI	Light Pollution Index	-

*其他符号说明将在正文中给出。

4 光-社会-自然(LSN)评价模型

在本节中，我们建立了光-社会-自然(light - society - nature, LSN)评价模型，从广义上衡量一个区域内某个地点的光污染风险水平。首先，在确定了各个层次的指标后，我们建立了综合评价体系。^[4]然后通过组合权重法确定各指标的权重。最后，我们计算出光污染指数(LPI)，从而识别出一个地点的光污染风险等级。

考虑到在大范围内不同地点的光污染风险水平差异很大，在讨论光污染风险水平时，我们应该选择尽可能小的地点，比如一个社区或一个居民区，而不是选择一个国家或一个城市这样的大区域。因此，我们在全球范围内筛选了 55 个具有代表性的站点，并将这 55 个站点的相关数据作为本文的数据库。在此基础上，建立了光-社会-自然(Light-Society-Nature, LSN)评价模型。

4.1 建立评价体系

在查阅大量前人研究和相关论文的基础上，我们总结出反映光污染风险水平的三个关键因素：光因素(L)、社会因素(S)和自然因素(N)，并将其作为评价体系的一级指标。经过进一步的思考和归纳，我们将指标具体化，选择了 10 个具体指标作为评价体系中的二级指标。^[5]具体评价体系如下，如图 2 所示。

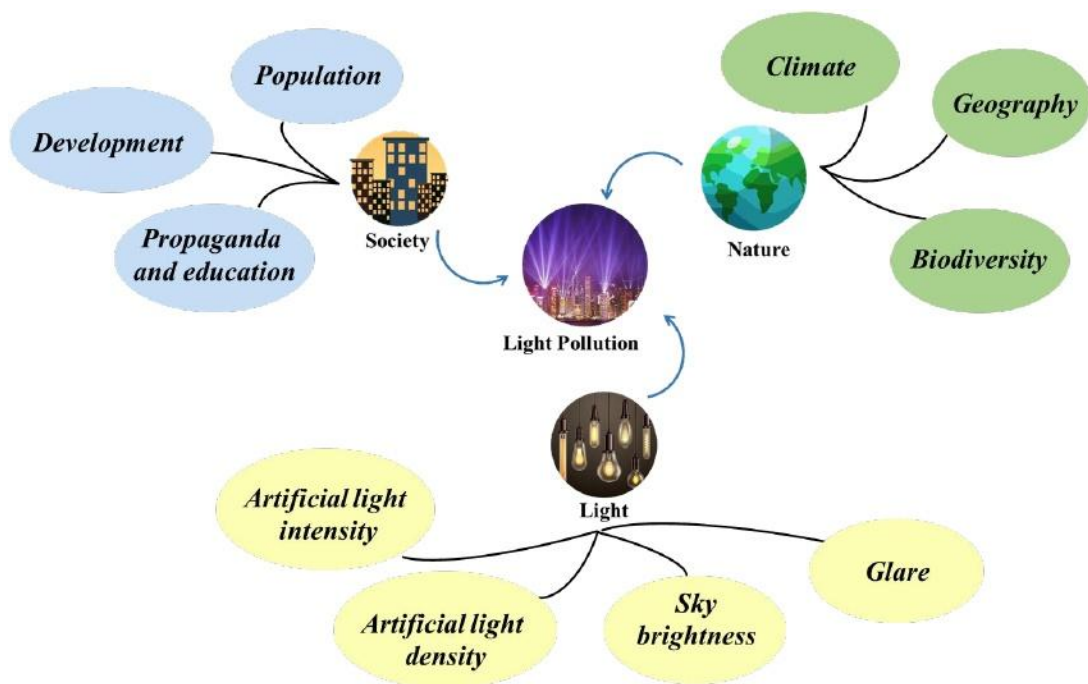


图 2:评价体系示意图

4.1.1 光

光因素是决定光污染风险水平的最重要因素。经过大量的文献查阅和严格的分析，我们最终确定具体的光因子包括以下四点：

L_1 人造光强度

人造光强度是指人类活动产生的光的亮度。在光污染研究中，人造光强度是一项重要指标，用于衡量夜间人造光对周围环境的强度和影响。人工光强度通常采用光度计或相关测量仪器进行测量，测量单位为坎德拉/平方米($\mu\text{cd}/\text{m}^2$)，表示单位面积内光源的亮度。人工光强数据可通过光污染图官网获取。

L_2 人工光密度

人造光密度是指某一地点的人造灯的数量，通常用单位面积的灯数来表示，如每平方公里的路灯数。人造光密度高，意味着一个区域内的照明灯具较多。这些灯会在夜间产生更多的人造光。因此，人造光密度是影响光污染的重要因素之一。

为了便于确定人工光密度的具体数值，我们定义一个地点的人工光密度可以用 arti -的比值来表示根据对其定义的理解，人造光强(L_1)与面积(S_{location})之比的定义公式如下：

$$L_2 = \frac{L_1}{S_{\text{location}}} \quad (1)$$

S_{location} 可以通过国家统计年鉴获得。

L_3 天空亮度

天空亮度是指天空中某一区域可见的亮度水平，通常用单位面积光通量来表示，如月光或星星的光通量每平方米。它与光污染密切相关。光污染越严重，天空亮度就越高，会降低夜间空气透明度，阻碍星光和月光。

天空亮度的增加会对生物环境和生态系统产生负面影响。例如，它会影响夜行动物的行为和迁徙，干扰植物生长和物种繁殖，扰乱人类的昼夜节律和生理节律，甚至影响人类健康。

不同地区的天空亮度可以通过光污染地图网站获取。

L₄眩光

眩光指的是一种视觉状态，在这种状态下，极亮的光源与背景形成鲜明对比，导致眼睛不适，降低能见度。^[6]眩光对光污染程度有显著影响，眩光值越高，表明一个地区的光污染越严重，眩光值越低，表明光污染程度越低。

眩光最常见于室外，如建筑物的玻璃幕墙，在阳光照射下会产生强烈的眩光，严重影响人们的安全，破坏城市生活环境，并可能造成交通安全隐患。

根据国际上常见的眩光计算公式，并结合了解眩光的含义，其值由以下公式确定：

$$L_4 = -8 \cdot \frac{L_1}{S_{location}} \cdot \lg \frac{0.25}{L_3} \quad (2)$$

4.1.2 社会

社会因素是光污染的重要影响因素之一。社会因素包括区域人口、区域发展水平、教育、宣传力度等诸多方面。这些因素影响人们对光污染的认识和态度，从而影响他们的行为。在建立光污染评价体系时，社会因素是必不可少的组成部分。

S₁人口

一个地区的人口是指居住在特定地区的人数，这与光污染密切相关。一方面，随着人口的增加，对照明的需求也随之增加。另一方面，人口数量也决定了光污染的范围。一般来说，人口越多的地区，人工光源的水平就越高密度和光污染。相反，在人口较少的地区，光污染程度可能相对较低。

不同地区的人口数据可以从各国的国家统计年鉴中获取。

S₂发展

区域发展水平通常是指经济、社会和环境的发展水平，可以用 GDP 等指标来衡量。

不同地区的 GDP 可以从各国的国家统计年鉴中得到。

但需要注意的是，区域发展水平的提高，并不一定会导致光污染水平的提高。发达的城市地区往往人工光源较多，光强也较高，但也有较为先进的技术和管理手段，能够有效控制光污染问题。另一方面，发展水平较低的地区可能缺乏足够的技术和资金来控制光污染，这可能导致更高层次的光污染。

S₃宣传教育

一个地区关于光污染的教育和宣传水平通常是指该地区关于光污染的宣传和教育的程度。这包括传播有关光污染、其有害影响和预防措施的知识。加强宣传和教育可以提高公众对光污染的认识，增加对光污染的关注，从而减少该地区的光污染。

为了定量描述一个地区对光污染的教育和宣传程度，我们以公众对光污染的关注程度作为衡量标准。这可以通过计算该地区谷歌趋势上与光污染关键字相关的搜索次数来实现。

4.1.3 自然

自然因素与光污染有着密切的关系。自然因素对光污染的影响主要包括区域气候、地理位置、生物多样性等方面。在建立光污染评价体系时，要考虑区域的自然环境特征，量化自然因素对光污染的影响。

N₁气候

气候是指某一特定地区的长期平均天气状况，包括大气透明度、湿度、温度和气压。^[7]气候对光污染的影响是复杂的。我们参考前人的研究，选择大气透明- *Ency(trp)*和湿度(*wet*)作为衡量气候影响的主要指标。影响光污染的因素的值由下式确定：

$$N_1 = trp' + wet' \quad (3)$$

其中， trp' ， wet' 是标准化的 trp ， wet 是通过标准化从国家大气管理局获得的原始数据而获得的。具体标准化公式如下：

$$trp'_i = \frac{\max\{trp_1, \dots, trp_{55}\} - trp_i}{\max\{trp_1, \dots, trp_{55}\} - \min\{trp_1, \dots, trp_{55}\}} \quad (i = 1, 2, \dots, 55) \quad (4)$$

$$wet'_i = \frac{\max\{wet_1, \dots, wet_{55}\} - wet_i}{\max\{wet_1, \dots, wet_{55}\} - \min\{wet_1, \dots, wet_{55}\}} \quad (i = 1, 2, \dots, 55) \quad (5)$$

N₂地理位置

一个地区的地理包括纬度、经度和海拔等因素。这些因素影响当地的日照时数、大气密度、地形等因素，进而影响当地的光污染情况。例如，在高纬度地区，冬季日照时数较短，需要增加照明设施的亮度和数量，以维持正常的生产和生活活动，这增加了光污染的风险；而在较高海拔地区，人类活动相对较少，夜间人造光较少，因此光污染程度较小。据此，我们选取海拔(h)和日照时数(t)作为衡量地理位置对光污染程度影响的主要指标的值由下式确定：

$$N_2 = h' + t' \quad (6)$$

其中， h' 是标准化的数据 h ， t 从国家大气管理局获得的原始数据而获得的。具体标准化公式如下：

$$h'_i = \frac{h_i - \min\{h_1, \dots, h_{55}\}}{\max\{h_1, \dots, h_{55}\} - \min\{h_1, \dots, h_{55}\}} \quad (i = 1, 2, \dots, 55) \quad (7)$$

$$t'_i = \frac{t_i - \min\{t_1, \dots, t_{55}\}}{\max\{t_1, \dots, t_{55}\} - \min\{t_1, \dots, t_{55}\}} \quad (i = 1, 2, \dots, 55) \quad (8)$$

生物多样性是指该地区生命形式的多样性，与光污染密切相关。在夜间，光污染会对生态系统造成破坏。同时，生物多样性的丧失也会加剧光污染的影响，导致严重的光污染。考虑到动植物因素，我们选择了绿地 (S_{green}) 和野生动物物种 (C_{wild}) 作为生物多样性的主要指标。 N_3 的值由以下公式确定：

$$N_3 = \frac{S_{green}}{S_{location}} + \frac{C_{wild}}{S_{green}} \quad (9)$$

其中， S_{green} 和 C_{wild} 可通过每个国家的国家林业局的官方网站获得。

4.2 指标权重的确定

确定指标权重的方法有很多。为了使我们的模型更加准确，我们决定使用组合加权法来计算所有指标的权重。本文提出的组合加权方法结合了主观加权法中的层次分析法(AHP)和客观加权法中的熵权法(EWM)和变异系数法(CVM)。由于 AHP 的判断比较主观，容易因决策者的主观影响而发生改变。同时，由于数据的高度敏感性，可能会因为数据本身的原因而产生误差。因此，我们的组合加权法综合了这些方法，帮助我们减少误差，提高精度。

4.2.1 层次分析法

首先，根据之前选择的指标构建一个层次图，如下图 3 所示。

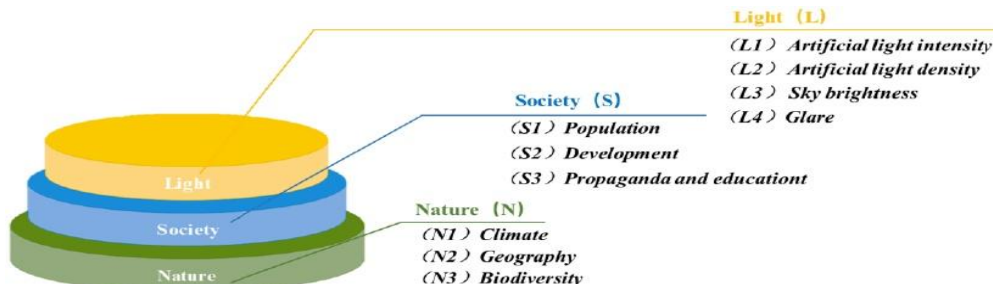


图 3:层次图

然后我们分别为一级指标和每组二级指标构建判断矩阵：

$$A = (a_{ij})_{n \times n}$$

其中， a_{ij} 表示 X_i 相对于 X_j 的重要性， n 表示每组指标的整体数量。由于篇幅有限，我们将不展示判断矩阵。

计算每个指标的权重，并执行一致性检查。用该方法计算出的各指标的权重记为 w_j 。

4.2.2 熵权法

首先，将数据库中 55 个地点的指标数据进行汇总，形成一个原始矩阵 x 。因为指标的类型不同，我们需要对原始矩阵进行归一化。接下来，为了消除维度的影响，我们需要对归一化矩阵进行标准化，然后得到矩阵 y 。我们将本文指标的归一化和标准化过程结合起来，具体计算公式如下：

$$x_{ij}' = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}} \tag{10}$$

$$x_{ij}' = \frac{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}} \tag{11}$$

$i=1, 2, \dots, 55$ ，表示之前评价体系中第 i 个区域的第 j 个指标。

然后，我们使用熵权法(EWM)计算指标的权重。我们计算概率矩阵 P_{ij} 。

根据信息论中的自信息和熵的概念，我们可以计算出各评价指标的信息熵，得到：

$$E_j = - \frac{1}{\ln 55} \sum_{i=1}^{55} P_{ij} \ln(P_{ij}) \tag{12}$$

$d_j=1-E_j$ ，它被定义为信息效用值. 每个指标都是通过对下面的信息效用值进行规范化给出的。归一化由下式确定：

$$\omega_j = \frac{d_j}{\sum_j d_j} \tag{13}$$

用该方法计算出的各指标的权重记为 ω_{j2} 。

4.2.3 变异系数法

此外，我们采用变异系数法(CVM)来加权我们的指标。首先，对原始矩阵 X 进行归一化，得到矩阵 Z 。

然后，根据前面的数据库，我们对每个指标的 55 个数据求出均值和标准差，从而计算变异系数如下：

$$CV_j = \frac{\sigma_j}{\mu_j} \tag{14}$$

最后，对变异系数进行归一化，得到各指标的权重：

$$\omega_j = \frac{CV_j}{\sum_j CV_j} \tag{15}$$

用该方法计算出的各指标的权重记为 ω_{j3} 。

4.2.4 组合权重

通过以上三种方法，我们计算出三种不同的权值，每一个指标。为了使模型更加准确，我们选择了三个权重的平均值作为每个指标的最终权重，以最小化误差。

$$\omega_j = \frac{\omega_{j1} + \omega_{j2} + \omega_{j3}}{3} \tag{16}$$

各指标权重的最终结果如下图 4 所示。

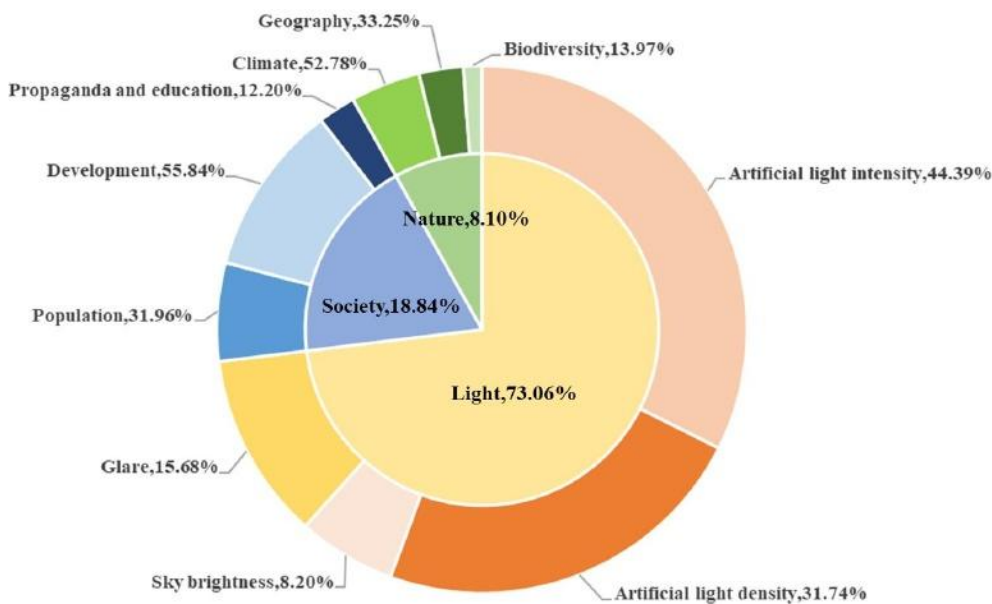


图 4:各指标的组合权重图

4.3 LSN 评价模型的建立

考虑光、社会 and 自然对光污染的影响，我们建立了 LSN 评价模型。在这个模型中，我们引入 LPI(光污染指数)来定量描述光污染的风险水平。此外，根据选定的数据库，通过模糊聚类分析将 LPI 值划分为 4 个区间，即将光污染风险等级划分为 4 个等级。

4.3.1 光污染指数 (LPI) 的计算

经过前面的努力，我们可以知道每个指标的数据来源及其计算方法。每个指标的权重是通过组合加权法得到的。将指标 L、S、N 所对应的权重作为这三个指标对 LPI 的影响程度，即权重越大，说明该指标对 LPI 的影响越严重。据此，本文合理而极具创造性地构建了 LPI 的计算公式：

$$LPI = 100 \cdot (\omega_L \cdot L + \omega_S \cdot S + \omega_N \cdot N)$$
 (17)

同样，基于相同的线条，我们构建了 L、S 和 N 的公式：

$$\begin{cases} L = \omega_{L_1} \cdot L_1' + \omega_{L_2} \cdot L_2' + \omega_{L_3} \cdot L_3' + \omega_{L_4} \cdot L_4' \\ S = \omega_{S_1} \cdot S_1' + \omega_{S_2} \cdot S_2' + \omega_{S_3} \cdot S_3' \\ N = \omega_{N_1} \cdot N_1' + \omega_{N_2} \cdot N_2' + \omega_{N_3} \cdot N_3' \end{cases}$$
 (18)

4.3.2 光污染风险等级的确定

将前文中 55 个典型地点的数据放入 LSN 模型中，计算每个地点的 LPI 值。然后，利用模糊聚类分析将所有地点划分为 4 类，从而将光污染等级划分为 4 个等级，定义为：I 级:重度污染，II 级:中度污染，III 级:轻度污染，IV 级:未污染。具体的等级分类如下表所示：

表 2:光污染规模

Grade	I	II	III	IV
Light pollution risk level	Heavy pollution	Moderate pollution	Minimal pollution	Unpolluted
LPI	<40	40~60	60~80	>80

由上表可以看出，根据某一地点的 LPI 值，可以确定该地点的光污染风险等级。

一级(重污染)地点的光污染最严重，人工光的强度和密度都非常高，如发达城市的中心；

II 级(中度污染)地点光污染程度中等，如城市外围工业区、居民区；

III 级(轻度污染)地点光污染现象较少，如农村或田野；

IV 级(未污染)地点，几乎没有光污染现象，区域大部分未受人类活动影响，如国家公园和自然保护区。

4.4 LSN 评价模型的应用

在本节中，我们根据 Task 2 的要求，在美国境内选择了四种不同类型的地点。我们收集了相关指标数据，并应用建立的 LSN 模型来确定每个地点的光污染水平。

表 3:选址表

Type	Location
An urban community.	New York City, New York
A suburban community	Bellevue, Washington
A rural community	Sedona, Arizona
A protected land location	Yellowstone National Park

4.4.1 案例I: 城市社区

城市社区是人口密集、建筑集中、基础设施发达的地区，人们在这里从事经济活动，社会生活丰富。我们选择纽约纽约市作为我们的研究地点，相关数据如下:

表 4:纽约纽约市的数据

$S_{location}$ (km2)	1213.4
Artificial light intensity ($\mu\text{cd}/\text{m}^2$)	11700
Sky brightness ($\text{mag}/\text{arc sec}^2$)	17.4
Population	8336817
GDP (\$)	95159
Wet (%)	65
Atmospheric transparency (miles)	6
Altitude (feet)	16
Sunshine time (h)	2055
S_{green} (km2)	20
$Count_{wild}$	37

将上述数据放入 LSN 评价模型中，纽约市的 LPI 值为 35.55，属于 I 级，表明光污染程度非常严重。

纽约市拥有高人口密度和城市基础设施。高人口密度意味着城市里有很多人造光源，包括路灯、建筑灯、照明标志等。高层建筑反射和散射光线，形成一种被称为天光的现象，这也增加了光污染的程度。造成纽约市光污染的另一个因素是该市作为经济和文化活动中心的角色。纽约市的许多商业、文化机构和公共场所都营业到深夜，而纽约市的旅游业也严重依赖光线充足的景点和地标。这意味着这座城市需要大量的户外照明，这可能是一个重要的光污染来源。

4.4.2 案例II: 一个郊区社区

郊区社区是一个区域，通常位于较大的城市地区的郊区。它是住宅和商业开发的混合。郊区社区通常有低到中等的人口密度，单户住宅，并且靠近较大的城市地区。因此，属于中等亮度环境的范畴。我们选择华盛顿的贝尔维尤作为研究地点，其相关数据如下：

表 5:华盛顿贝尔维尤市数据

$S_{location}$ (km2)	94.5
Artificial light intensity ($\mu\text{cd}/\text{m}^2$)	3420
Sky brightness ($\text{mag}/\text{arc sec}^2$)	18.7
Population	147599
GDP (\$)	72357
Wet (%)	75
Atmospheric transparency (miles)	8
Altitude (feet)	62
Sunshine time (h)	1778
S_{green} (km2)	53
$Count_{wild}$	57

将上述数据输入到 LSN 评价模型中，华盛顿贝尔维尤的 LPI 值为 41.33，为 II 级。这意味着贝尔维尤有中等程度的光污染。

虽然郊区离市中心有一段距离，但对于那些想要远离拥挤的城市地区的人来说，郊区是最好的选择。这就导致了郊区人口的不断增加，室外的人工照明也越来越多，这就不可避免地导致了一定程度的光污染。

4.4.3 案例III: 一个农村社区

农村社区是指城市或郊区以外的区域。它的典型特征是开阔的空间、自然景观和较小的人口密度，包括小城镇、村庄和偏远地区。农村社区获得现代基础设施和服务的机会有限，因此是低亮度环境区。我们选择亚利桑那州塞多纳作为研究区域，相关数据如下:

表 6:亚利桑那州塞多纳的数据

$S_{location}$ (km2)	49.7
Artificial light intensity ($\mu\text{cd}/\text{m}^2$)	90.6
Sky brightness ($\text{mag}/\text{arc sec}^2$)	21.54
Population	10356
GDP (\$)	48385
Wet (%)	45
Atmospheric transparency (miles)	120
Altitude (feet)	1344
Sunshine time (h)	278
S_{green} (km2)	58
$Count_{wild}$	35

将上述数据代入 LSN 评价模型，得到亚利桑那州塞多纳的 LPI 值为 76.94，对应等级为III。这意味着塞多纳的光污染更少。

这是由于它距离主要城市较远，人口密度低。然而，随着城市的扩张和农村地区户外照明需求的增加，就连农村社区也开始受到光污染的影响。比如 LED 照明在农村地区的普及，导致了光污染的增加，扰乱了人类和野生动物的自然睡眠模式。

4.4.4 案例IV: 受保护的地理位置

在保护地上，几乎没有常住人口，因此人造光的强度和密度都很低，几乎不受光污染的影响。这些都是天然的黑暗环境，比如国家公园和自然保护区。

黄石国家公园是美国西部的一个国家公园，主要位于怀俄明州。它成立于 1872 年，是世界上第一个国家公园。黄石国家公园是户外运动爱好者的天堂，也是国际黑暗天空公园。因此，我们选择黄石国家公园作为我们的研究地点，相关数据如下：

表 7:黄石国家公园数据

$S_{location}$ (km2)	8983
Artificial light intensity ($\mu\text{cd}/\text{m}^2$)	1.46
Sky brightness (mag./arc sec2)	21.99
Population	0
GDP (\$)	0
Wet (%)	65
Atmospheric transparency (miles)	150
Altitude (feet)	2546
Sunshine time (h)	250
S_{green} (km2)	93
$Count_{wild}$	67

将上述数据输入到 LSN 评价模型中，得到黄石国家公园的 LPI 值为 84.18，属于高值，对应于四级，说明公园光环境良好，受光污染影响最小。

这与黄石国家公园作为重点保护区，为减少公园内的光污染，保护夜间的自然环境做出了许多努力是一致的，比如在夜间关闭非必要的灯，鼓励游客使用对野生动物和人类干扰较小的红色滤光手电筒。这样一来，黄石国家公园就能保持自然的夜间环境。

5 可能的干预策略

光污染是影响人们生产和生活的日益严重的问题。光污染改变了我们对夜空的想法，对环境产生影响，影响我们的健康和安全。为了减轻光污染的负面影响，我们提出了三种可能的干预策略，并指出了它们的具体行动。然后，我们基于 Spearman 相关系数和 BP 神经网络模型构建了 PIA-NN 模型，用于分析这些具体行动对光污染效应的潜在影响。

5.1 策略建议和具体行动

从前一篇论文构建的评价体系来看，影响光污染水平最显著的因素是 light、Society 和 Nature，并在其下分为十个具体指标。我们针对三个不同的指标，并考虑它们的适用性。最后，我们提出了三种干预策略及其具体行动，以解决光污染问题。

5.1.1 策略I:降低人工光强度

过多的人工光强度会使夜晚的天空变亮。这不仅会影响人类的昼夜节律和健康，还会影响野生动物的摄食和迁徙，从而破坏生态平衡。因此，降低特定区域的人造光强度，可以大大缓解光污染，减轻其有害影响。

要降低人工光强度，可以采取具体措施：

优化照明设备:用小功率 LED 灯取代大功率照明设备;在居民区和建筑走廊使用声控传感器灯。

调节照明使用:将照明设备限制在必要的区域, 如室内区域和需要夜间安全的区域;拆除没有居民的郊区和农村地区的照明设备。

减少夜间活动:尽量减少夜间的大型集会和庆祝活动, 或减少其规模和频率。

智慧城市规划:在城市规划中, 将灯具设计成屏蔽的, 只将光线直射到需要照明的区域, 而不会将光线分散到周围环境中……

5.1.2 策略II:加强宣传教育

我们可以通过教育提高公众对光污染的认识, 促进对其有害影响的关注。这将鼓励公众参与到预防光污染中来, 最终缓解这个问题。为了加强我们的努力, 我们可以采取以下行动:

张贴宣传海报:在公共场所、社区和学校张贴海报, 向公众宣传光污染, 提高公众意识。

举办社区活动:在社区开展宣传活动, 如讲座、研讨会、展览等, 帮助公众了解人工光污染的影响以及减少光污染的方法。

利用媒体外展:利用各种媒体渠道, 如电视、广播、报纸、杂志和互联网, 宣传减少光污染及其有害影响的重要性。

加强学校教育:透过学校课程、校园简报、教学影片等, 向学生提供有关光污染的知识和方法, 鼓励学生积极参与和倡导环境保护。

5.1.3 策略III:扩大植被面积

扩大植被面积是减少光污染的有效途径, 因为植被可以阻挡和吸收光污染。植被可以吸收一定波长的光污染, 也可以反射和散射光, 从而降低光污染的程度。植被的叶面积和密度越大, 对光污染的吸收和反射能力就越强。因此, 扩大植被面积可以解决光污染问题。以下是扩大植被覆盖的一些具体行动:

植树:在城市和农村种植各种类型的树木, 可以增加植被覆盖率, 缓解光污染。

绿化建筑:在城市地区, 在建筑物和道路上种植树木、草坪等绿色植被, 可以增加城市植被覆盖率, 通过植被的反射和散射, 减少光污染。

保护现有植被:保护现有的森林、草原、湿地等, 防止过度开发和破坏, 可以保持植被对光污染的缓解。

5.2 潜在影响分析-神经网络(PIA-NN)模型

首先, 我们确定了三个直接影响因素:人工光强度、宣传教育和生物多样性, 它们将受到三种干预策略的直接影响。

接下来, 我们计算了三个直接影响因素与其他因素之间的斯皮尔曼相关系数, 并确定了与每个直接影响因素密切相关的间接影响因素。

要分析具体行动对光污染效应的潜在影响, 了解这些间接影响因素的变化趋势和程度至关重要。

为了实现这一目标, 我们开发了**潜在影响分析-神经网络(PIA- NN)模型**。通过构建神经网络, 我们获得了间接影响因素响应相应直接影响因素的变化趋势和程度, 并分析了具体行动对光污染效应的潜在影响。

5.2.1 模型的建立

要研究具体行动对光污染效应的潜在影响，首先需要确定三种直接影响对光污染其他因素的影响。为此，结合本文的数据库，我们开发了 PIA-NN 模型。

为了探究各因素之间的关系，我们对各因素的正态性进行检验，发现只有天空亮度数据是正态的。^[8]因此，我们选择斯皮尔曼相关系数来衡量各因素之间的相关性。^[9]斯皮尔曼相关系数的具体计算如下：

$$r_s=1-\frac{6\sum_{i=1}^n d_i}{n(n^2-1)}$$

(19)

由斯皮尔曼相关系数计算可知，人工光强度与人工光密度、眩光和天空亮度呈显著正相关，与生物多样性呈显著负相关。此外，宣传教育与人工光强、天空亮度、眩光呈显著负相关，与生物多样性呈显著正相关。最后，生物多样性与天空亮度、眩光呈显著正相关。

在获得上述三组对应因子之间的相关性后，我们利用 Matlab 中的 Neural Fitting app，在前面数据库的基础上，建立了三个神经网络，分别是：

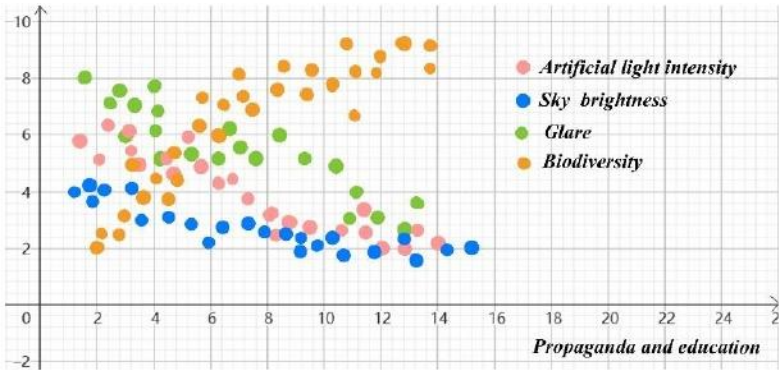
- 1.人工光强度与人工光密度、眩光、天空亮度、生物多样性之间的神经网络。(策略一)
- 2.宣传教育与人工光强度、天空亮度、眩光、生物多样性之间的神经网络。(策略二)
- 3.生物多样性与天空亮度和眩光之间的神经网络。(策略三)

通过这三个神经网络，我们可以清楚地看到，随着三个直接影响的变化，相应的间接影响的变化趋势和程度。

5.2.2 结果与分析

根据上述 PIA-NN 模型，我们得到了三组间接影响及其对应的直接影响的变化趋势，分别为：
(策略一)人工光密度、眩光、天空亮度和生物多样性随人工光强度的变化趋势。
(策略二)人工光强度、天空亮度、眩光、生物多样性趋势与宣传教育
(策略三)与生物多样性相关的天空亮度、眩光趋势。

结果如下图所示：



(b):策略II

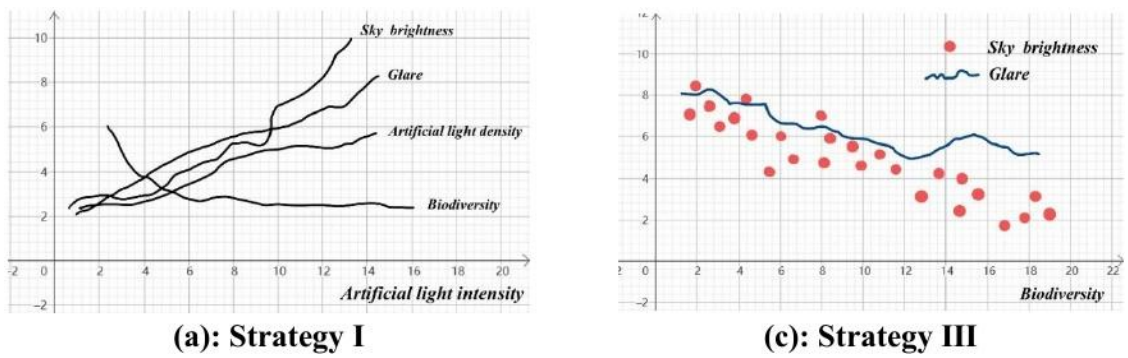


图 5:PIA-NN 的结果

从上图我们可以得出结论:

从图(a)中可以看出,随着人工光强度的降低,人工光密度、天空亮度和眩光均下降,其中天空亮度下降最明显,眩光次之,人工光密度下降最弱,而与此同时,生物多样性明显增加。这表明,第一种策略的具体作用将导致夜晚变暗,这进一步响应了生物体的昼夜节律,提高了人们的睡眠质量,同时为野生动物提供了更好的生态环境;此外,夜间的眩光会减少,道路交通也会更安全;而且生物多样性会增加,说明该地区的生态环境有所改善,更适合人类、动物和植物生活。

从图(b)中可以看出,随着光污染意识和教育的增强,人工光强度、天空亮度、眩光明显降低,生物多样性仍在增加。这表明,第二个战略的具体行动将提高人们的意识,积极参与光污染防治行动,从而降低人工光强度,给城市一个夜晚和一个星空;眩光的减少可以有效降低人们眼疾的发病率,从而对人们的健康产生积极影响;生物多样性的增加可以为人类提供更好的生存环境。

从图(c)中可以看出,随着生物多样性的增加,天空亮度和眩光都有明显的下降趋势,天空亮度下降的程度更加明显。这说明,第三种策略的具体行动具有类似于前两种情况的潜在影响,改善了人们对天空的印象,降低了交通事故的发生率,对人们的身心健康带来了积极的影响。

6 哪种策略效果最好?

在本节中,我们将研究在不同地区分别实施这三种干预策略的不同效果。在前面 4.4 节对 4 个不同地区光污染水平评价的基础上,考虑到不同地区干预策略的可行性,我们选择了两个具有代表性的地区。一个是亚利桑那州的塞多纳,一个低光污染的农村社区,另一个是纽约市,纽约,一个高光污染的大城市,我们在这两个地区模拟了三种不同干预策略的实施。本文提出的三种干预策略将分别直接影响人工光强度、宣传教育力度和生物多样性这三个指标,并且由于这三个直接影响指标与某些其他指标之间存在相关性,因此这三个直接影响指标的变化将导致相应间接影响指标的变化,并且我们运用前一篇文章中建立的三个神经网络来预测每一组间接影响指标的变化。

PIA-NN 模型使我们能够在战略实施和目标实现后获得该区域的指标值。最后,通过对比战略实施前后该地区的 LPI,我们可以清楚地看到战略对该地区光污染风险水平的影响。

为了排除时间和强度对策略效果的影响,我们将每个策略的预定义目标设定为:该策略增加或减少相应的直接影响指标的程度相同,例如增加或减少 10%。以此作为战略实施后计算区域 LPI 的依据。

6.1 亚利桑那州塞多纳的结果

在亚利桑那州塞多纳实施三种不同干预策略的结果如下:

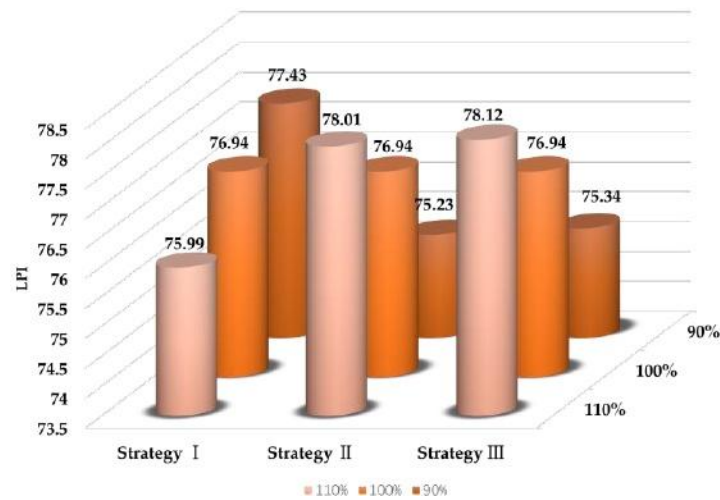


图 6:亚利桑那州塞多纳的结果

上图显示策略 1 是亚利桑那州塞多纳最有效的干预措施。当策略一的目标为 90%时，即当策略一的实施将人工光强度降低到 90%时，社区的 LPI 显著增加。然而，值得注意的是，一旦人工光强度增加，例如增加到 110%，该区域的 LPI 也会迅速下降。策略 II 和策略 III 都增加了 LPI，但没有策略 I 那么多。

6.2 纽约市的结果，纽约

纽约纽约市实施三种不同干预策略的结果如下:

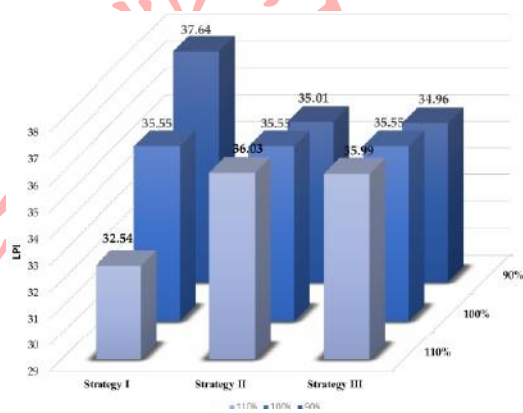


图 7:纽约纽约市的结果

从上图可以看出，纽约市纽约市的 LPI 很低，属于严重光污染级别。虽然本文提出的三种干预策略的实施会提高纽约市、纽约的 LPI，但这些策略的实施仍然使纽约市、纽约处于严重光污染级别。战略 i 的 LPI 提高最快，预定目标为 90%。战略 II 和战略 III 的实施对该地区的 LPI 值影响不大，但相比之下，战略 II 比战略 III 更有效。

6.3 最终结果

对比前两张图，我们可以得出结论，策略 I 在减少光污染方面在亚利桑那州塞多纳和纽约市纽约的实施效果最好，预期目标相同，但不同之处在于策略 I 对纽约市纽约的影响更为明显。区别在于策略 I 对纽约市，纽约有更明显的影响。

策略 I 是从源头上防止光污染。由前文分析可知，人工光强度与人工光密度、眩光、天空亮度密切相关，是影响光污染的主要因素，在 LSN 评价体系中所占权重较大，因此降低人工光强度对提高 LSN 评价体系中的 LPI 效果显著。

7 灵敏性分析

在构建 PIA-NN 模型时，我们分别验证了人工光照强度、宣传教育力度、生物多样性等指标之间的相关性，并筛选相关指标构建神经网络。有可能是对问题考虑的不完整，导致忽略了一些与人工光强度、宣传教育力度、生物多样性相关的指标，而这些指标可能会产生影响。为了测试这种可能的影响，我们重建了具有眩光、生物多样性和天空亮度的人工光强度神经网络，并通过改变人工光强度来观察原始模型与具有眩光、生物多样性和天空亮度的该模型之间的关系。所得结果如下。

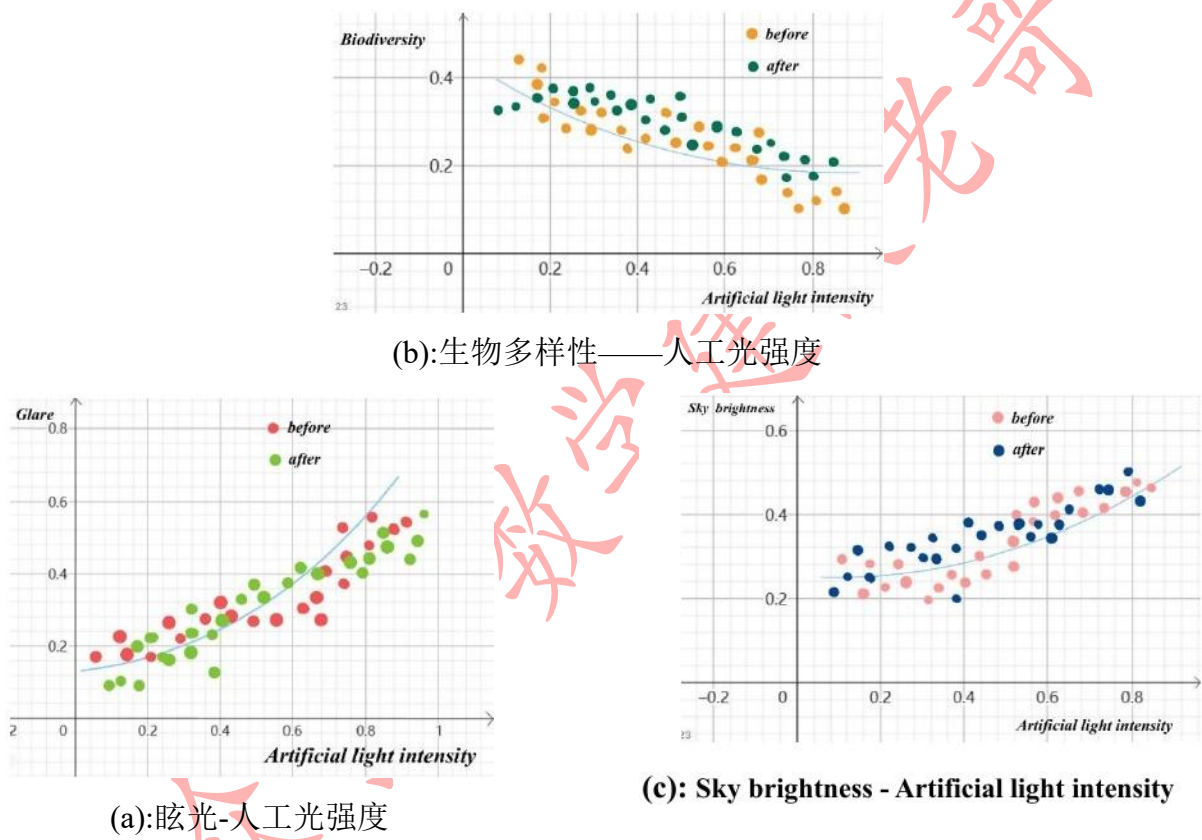


图 8:PIA-NN 的结果

从图中可以看出，在改变人工光强后，使用前后两个神经网络预测的三个指标的值比较接近。由此可见，去掉人工光密度这一指标，对眩光、生物多样性和天空亮度的分析几乎没有影响。还表明，未考虑的因素不影响现有因素的分析，模型具有鲁棒性。

8 模型评价和进一步讨论

8.1 优势

为保证研究结果的可靠性，本文使用的数据均为官方网站提供的最准确、最新的数据。此外，本文还考虑了各种因素，试图综合考虑问题。因此，本文的研究结果具有很高的参考价值。

我们考虑了光、社会 and 自然方面的各种指标，使我们的评价模型更加全面、准确、客观。

本文结合神经网络模型构建了 PIA-NN 模型。在寻找指标之间的相关性时，神经网络通过包含足够神经元的隐藏层来近似任意复杂度和任意精度的连续函数。与其他线性模型相比，神经网络模型具有优越的性能，使其结果更加准确。

我们的模型的结果也符合常识和经验。

8.2 缺点

由于时间有限，本文只选取了 55 个地区的数据作为我们的数据库，并建立了 LNS 评价体系，通过模糊聚类分析将光污染大致分为四类，但 LPI 值的取值范围并不明确。

模型中使用的数据不完整。由于客观原因，我们无法获得所需指标的全部数据，这些数据不可避免地存在缺失值。虽然我们已经对缺失值进行了处理，但模型拟合的准确性仍然会受到一定程度的影响

8.3 进一步讨论

由于本文的数据库只有 55 个区域，因此基于该数据库的光污染风险等级分类可能存在偏差。因此，我们可以收集更多不同地区的数据，形成数据库进行分析，得到更准确合理的光污染风险等级分类标准。

9 结论

本文建立了一种具有广泛适用性的光污染风险评价模型。我们选择了全球 55 个具有代表性的地点，并将这些地点的相关数据作为本文的数据库。将所有数据纳入 LSN 评价模型，计算每个区域的 LPI 值，然后通过模糊聚类分析将 55 个区域划分为 4 类，从而将光污染等级划分为 4 个等级，定义为:I 级:重度污染，II 级:中度污染，III 级:轻度污染，IV 级:未污染。

基于上述模型，我们选择纽约市、贝尔维尤、塞多纳和黄石国家公园作为每一种区位类型的代表。LPI 值分别为 35.55、41.33、76.94、84.18。由此得出其光污染风险等级分别为 1 级、2 级、3 级、4 级。

为了有效地解决光污染问题，我们提出了三种可能的干预策略，并指出了具体行动。最后，我们构建了一个 PIA-NN 模型来分析这些具体行动对光污染效应的潜在影响。

基于上述模型，我们选择塞多纳和纽约市作为研究对象。分别针对这两个地区模拟了三种不同的干预策略。结果表明，在降低两个地区的光污染水平方面，实施策略 1 是最有效的。

参考文献

- [1] Liu Ming, Li Weishan, Hao Qingli, Guo Xiaowei. Review on monitoring methods and models of urban night sky brightness [J]. Journal of Lighting Engineering, 2017, 28(03): 45-50.
- [2] Falchi, Fabio, et al. "The new world atlas of artificial night sky brightness." Science advances 2.6 (2016): e1600377.
- [3] Falchi, Fabio, et al. "The new world atlas of artificial night sky brightness." Science advances 2.6 (2016): e1600377.
- [4] Liu Ming, Zhang Baogang, Pan Xiaohan, et al. Research on evaluation index and method of light pollution in urban lighting planning [J]. Journal of Lighting Engineering, 2012, 23(4): 22-27, 55. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1004-440X.2012.04.004.
- [5] Cao Meng. Study on evaluation system of night light pollution in residential areas of Tianjin [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. DOI: 10.7666/d.y1531280.
- [6] Xu Qiaoyun. Research on glare Pollution Evaluation of building Glass Curtain Wall [J]. Daily Appliances, 2019(08): 26-29.
- [7] Cinzano, P., Falchi, F., & Elvidge, C. D. (2001). The first world atlas of the artificial night sky brightness. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 328(3), 689-707.
- [8] Kline R, Kline R B, Kline R. Principles and Practice of Structural Equation Modelling [J]. Journal of the American Statistical Association, 2011, 101(12).
- [9] Hauke J, Kossowski T. Comparison of Values of Pearson's and Spearman's Correlation Coefficients on the Same Sets of Data [J]. Quaestiones Geographicae, 2011, 30(2): 87-93.



TURN OUT THE LIGHTS TURN UP THE STARS

- **Last time you saw stars?**

**Too much light pollution
washes out our night sky**

More than 80% of the world
lives under light-polluted skies

**Light pollution affects
our health and safety**

Disrupts sleep for 50% of
city dwellers.

- **Address light pollution,**

3 STEPS!

1. Only light:
if needed,
when needed, &
where needed.

2. Prefer LED:
use warm-white
or amber LED lights

3. Downlighting:
keep it low
& shielded

COMAP'S ILLUMINATION CONTROL MISSION (ICM)

