

局部光污染分析:多层评价模型综述

摘要: 光污染是全球许多社区和生态系统日益关注的问题。为了衡量一个地区的光污染水平,本文建立了一个**光污染系统模型**,通过选择几个相关指标来反映一个地区的光污染风险。对于四个不同的区域,我们的光污染系统模型很好地代表了它们的主要特征,这便于提出有针对性的政策。

首先,我们确定了交通、生态、能源和社会四个主要指标,并在每个主要指标下设置了几个次要指标,形成了光污染系统模型。最后,采用熵权法确定权重,建立各指标与光污染风险的关联关系。

接下来,我们使用 K-means 聚类算法将收集到的数据分为四类,并总结了保护地、农村社区、郊区社区和城市社区四个区域的指标数据分布。将这四类的聚类中心作为四个区域的数据代表。然后,对 4 个区域的数据进行评价,得出保护地光污染得分为 0.053,农村社区光污染得分为 0.174,郊区社区光污染得分为 0.359,城市社区光污染得分为 0.872。其中,城市社区的光污染程度最高。最后,通过次要指标得分分析四个区域各自的光污染情况。

为了确定三种可能的干预策略,我们将每个区域的前 10%作为理想愿景,将其与区域平均值进行比较,并确定针对每个策略的一个或两个主要目标的策略,以降低光污染水平。然后,我们使用一个量表量化了每种策略对目标的影响,该量表分为高(20%-50%)、中(10%-20%)和低(2%-10%)。最后,我们得到了三个可行的策略:绿色基础设施策略(围绕生态指标)、能源策略(围绕能源指标)和城市规划策略(围绕交通和社会指标)。

最后,我们将意大利托斯卡市区和塞浦路斯 Latsia 郊区作为应用目标。将我们设计的三种策略替换为计算对该地区可能产生的最小和最大影响。对比三种策略的效果,得出能源策略最适合托斯卡市区,光污染系数 LPR 降低水平为 4.8%~11.65%;城市规划策略最适合 Latsia 郊区,光污染系数 LPR 降低水平为 3.26%~7.51%。然后,我们分析了策略对小指标的影响,并从详细的角度总结了这两种策略影响区域的原因。最后,我们对本文提出的光污染系统模型进行了敏感性分析,结果表明该模型在实践中达到了预期的效果,证明了本文提出的模型是可靠的。

关键词:光污染系统模型;K-means 聚类算法;熵权法

目录

局部光污染分析:多层评价模型综述.....1

1 介绍.....4

 1.1 问题背景.....4

 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 光污染系统模型.....6

 4.1 主要指标和子指标讨论.....6

 4.1.1 交通.....6

 4.1.2 生态.....7

 4.1.3 能源.....7

 4.1.4 社会.....7

 4.2 各指标归一化.....9

 4.3 使用熵权法计算模型中各指标的权重.....9

5 光污染系统模型在四地区的应用.....9

 5.1 利用 K-means 聚类获得代表性数据.....9

 5.1.1 K-means 聚类算法步骤.....9

 5.1.2 算法调优.....10

 5.1.3 聚类结果.....10

 5.2 四个地点的光污染结果显示.....11

6 三种可能的干预策略.....12

 6.1 确定目标指标.....12

 6.1.1 量化战略对各指标的影响.....13

 6.2 基于主要指标的三种干预策略.....14

 6.2.1 针对生态指标的绿色基础设施战略.....14

 6.2.2 能源指标的能源战略.....15

 6.2.3 交通与社会指标的城市规划策略.....16

7 光污染系统模型在实践中的应用.....18

 7.1 城市对象.....18

 7.1.1 方法学计算.....18

 7.1.2 战略结果分析.....19

 7.2 城郊建筑.....20

 7.2.1 方法选择.....20

7.2.2 策略结果分析20

8 敏感性分析 21

9 模型评价与进一步讨论 22

 9.1 优势 22

 9.2 缺点 22

10 结论 22

参考文献 23

公众号：数学建模老司机

1 介绍

1.1 问题背景

光污染是世界各地许多社区和生态系统日益关注的问题。它是由过度或不当使用人造光引起的，这会对环境以及人类和其他生物的健康和安全产生负面影响。例如，光污染会扰乱鸟类的迁徙模式，使它们迷失方向，感到困惑。夜间暴露在人造光下会扰乱人类的昼夜节律，导致睡眠质量不佳和相关的健康风险，如肥胖和糖尿病。

光污染的影响因当地发展水平、人口、生物多样性、地理和气候而异。为了有效地解决光污染问题，重要的是要开发一种广泛适用的测量模型，并讨论可针对不同地区量身定制的干预策略。

1.2 问题重述

考虑到问题陈述中确定的背景资料和限制条件，我们需要解决以下问题：

问题 1: 创建一个可以广泛应用的测量模型，以识别给定地点的光污染风险水平。

问题 2: 使用测量模型评估具有不同特征的四个不同地点的光污染风险水平：受保护的土地区域、农村社区、郊区社区和城市社区。

问题 3: 解释可用于解决光污染的三种潜在干预策略，并描述可采取的具体行动来实施每种策略。讨论每种策略在减轻光污染的负面影响方面的潜在影响。

问题 4: 使用测量模型选择两个地点进行评估，并确定每个地点最有效的干预策略。对模型的结果进行分析，并确定所选择的干预策略，以降低每个站点的光污染风险水平。

问题 5: 对于使用测量模型评估的其中一个地点，并且确定了有效的干预策略，创建一页传单来推广该地点的策略。

1.3 我们的工作

由于这方面的研究还很薄弱，我们应该进一步研究这一问题。我们的研究示意图如图 1 所示。首先，开发了一个包含 4 个主指标和 9 个子指标的评价模型，并通过收集多个权威数据站点的相关数据，使用熵权法(Entropy Weight Method)来确认所有指标的权重。然后，使用 k-Means 聚类算法总结指标在四个区域的分布，并为每个区域找到一个代表性的值。并将数据代入评价模型，对数据进行分析。为了给出合适的策略，将每个区域最好的前 10% 的数据作为理想愿景，与整个区域的平均数据进行比较，找到策略的重点。

结合弱点分析和现有研究，我们提出了三种具有可行性的策略。为了便于后续的影响评估，我们使用排名来量化每个策略对指标的影响程度。最后，我们探讨了这些策略在托斯卡市区的应用意大利和塞浦路斯 Latsia 郊区，分析最优策略以及最优策略对该地区不同指标的影响。

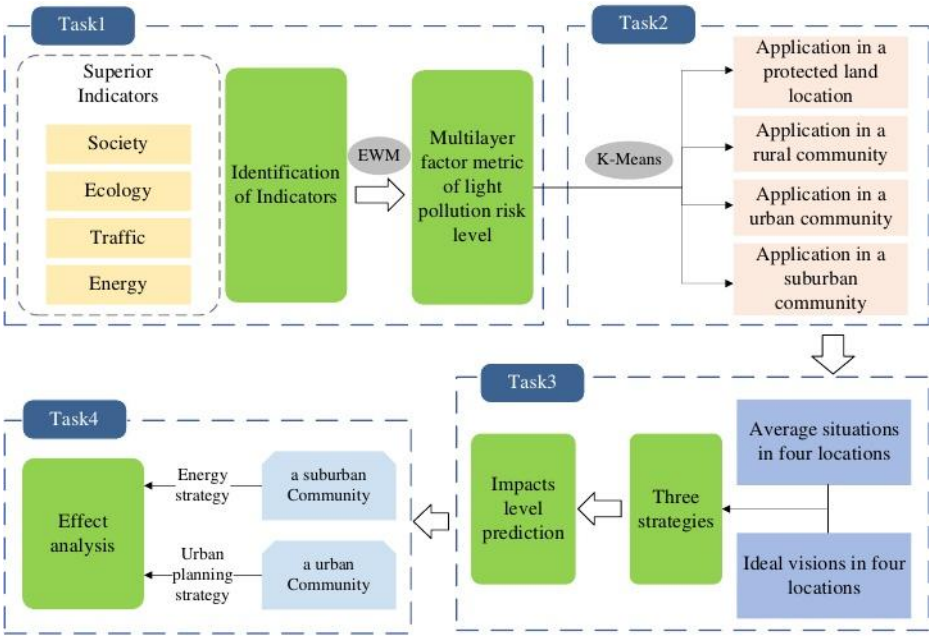


图 1:我们的研究流程图

2 假设和理由

假设:本文选取的光污染风险评价指标中，平均照明光度指标为夜间光度。

理由:照明造成的光污染主要来自夜间商业聚集区的路灯和 LED 广告招牌[5]，白天照明可以忽略不计，限制光污染的主要途径是限制夜间灯光的亮度。

假设:夜间使用的路灯、LED 广告牌等发光设备亮度不变，使用过程产生的光污染程度不变。

理由:LED 灯等照明设备在正常工作时将保持固定功率，变化可以忽略不计，因此被认为会造成固定水平的光污染。假设:农村地区、郊区、保护区和城市地区的光污染水平不受纬度、经度、海拔等地理位置的影响。

理由:天气条件是随机的，无法预测，因此为了简化模型，本文提出的光污染评价模型忽略了这些影响。

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
<i>TRA</i>	Regional traffic light pollution risk indicators
<i>ECO</i>	Regional ecological light pollution risk indicators
<i>ENE</i>	Regional energy light pollution risk indicators
<i>SOC</i>	Regional social light pollution risk indicators

<i>LPR</i>	Regional Light Pollution Total Risk Indicator
<i>RD</i>	Road density in the region
<i>SD</i>	Density of species in the region
<i>PC</i>	Vegetation cover
<i>PD</i>	Population density
<i>BD</i>	Building density
<i>BT</i>	Building type, mainly used to measure the height of buildings in the area
<i>BH</i>	Building height

4 光污染系统模型

光污染系统模型描述了不同因素对一个地区光污染水平的影响。这个复杂的模型受到许多环节和因素的影响。其框架如图 2 所示。我们使用交通、社会 and 生态三个主要指标来衡量光污染水平。为了便于后续的计算，我们引入三个符号来表示主要指标：

$$(TRA,ECO,ENE,SOC) \tag{1}$$

其中TRA,ECO,ENE和SOC分别代表交通、生态、能源和社会。每个主要指标都由几个小指标组成，其细节将在第4.1节中描述。如下图所示，我们在模型中总共考虑了9个子指标。我们描述了在光污染水平方面的三个主要指标(TRA,ECO,ENE和SOC)的线性组合的结果LPR：

$$LPR = w_1TRA + w_2ECO + w_3ENE + w_4SOC \tag{2}$$

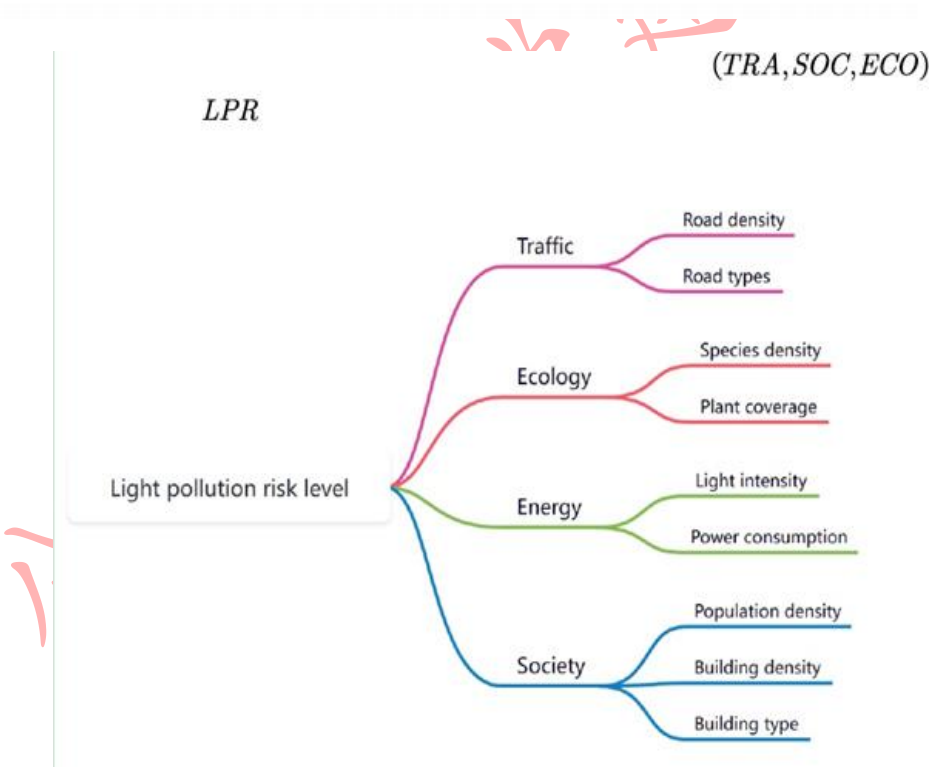


图 2:光污染系统模型框架

4.1 主要指标和子指标讨论

在建立光污染系统模型的过程中，我们使用了 4 个主指标和 9 个子指标。我们将对此进行详细阐述。

4.4.1 交通

研究认为，该区域的交通发展程度对当地的光污染有重要影响[1]，交通道路上人造光的主要来源是照明的路灯和过往车辆所产生的光，以及路面产生的反射。随着城市及周边地区的快速发

展，交通道路的规模也随之扩大，而在自然保护区和农村地区，大都有主干道贯穿其中，因此选择交通发展程度作为衡量区域光污染风险的一级指标。

在对夜间人造光遥感影像的分析显示[1]，根据道路分类，由于不同级别的道路有不同的照明需求和特点，不同级别的道路呈现出不同的人造光强度。例如，高速公路和主要道路可能需要更亮的照明，这将导致产生更多的人造光，而住宅街道需要较少的照明，产生较少的人造光。

主要光污染来自一级、二级和三级道路，并受道路密度影响[1]，本文忽略其他类别道路光污染的影响。因此，将区域交通发展对光污染风险因子的响应方程定义为：

$$TRA = (b_0 + b_1 y_1 + b_2 y_2 + b_3 y_3) \times e^{RD} \quad (3)$$

TRA 是交通发展对光污染的响应程度。 y_1, y_2, y_3 分别表示该地区一、二、三级道路的数量。 b_0 是一个常数项。这些系数 b_1, b_2, b_3 分别为每条道路对交通量的影响系数。在Yan和Tan的研究[1]中，相关系数 b_0, b_1, b_2, b_3 分别计算为0.1432、0.3383、0.2164和0.4456，上述值将在本文后续计算中取。

RD 表示该区域的道路密度。道路密度是指路网的总里程与给定区域内的面积之比。在道路密度高的地区，照明密度更大，导致人工光集中，产生明亮的漫射光。

4.1.2 生态

一个地区的生态状况可以显著地反映该地区的光污染风险[2][3]。光污染会对一个地区的生态系统造成严重威胁。一方面，它会影响当地物种的数量，光污染会在夜间混淆动物导航或扰乱动物栖息地，导致大量动物死亡，并且光污染可能会影响一些物种的迁徙[2]，从而降低当地物种的数量和密度。另一方面，光污染会干扰植物物候，从而影响植物的生长周期。然而，绿色植被由于具有吸收辐射的特性，可以用来减轻光污染[3]，因此增加植物覆盖度可以有效地减轻光污染的风险。

本文选择生态作为衡量该区域光污染风险的首要指标，从物种密度和植物覆盖这两个次要指标中计算。生态状况定义为物种密度与植物盖度的乘积，具体如下：

$$ECO = SD \times PC \quad (4)$$

ECO 为生态条件对光污染的响应程度， SD, PC 分别为物种密度和植物覆盖指数。为了更好地反映光污染的风险，物种密度指数需要同时反映该地区的物种数量及其每年光污染的趋势，因此将物种密度指数定义为：

$$SD = \left(1 + \frac{1}{h_i}\right)^{\frac{h_{i-1}}{h_i} \times 100\%} \quad (5)$$

h_i 是该地区当前的物种密度， h_{i-1} 是该地区前一年的物种密度。取当前区域物种密度的倒数，物种密度越高，光污染风险越低。以物种密度变化趋势倒数为

指标，当物种密度趋势增加时，密度的作用被放大，当物种密度趋势减少时，密度的作用被减

小，从而更好地反映光污染的风险。局部物种密度可以简单地从面积 m 和局部物种密度计算出来为：

$$h_i = \frac{q}{m} \times 100\% \quad (6)$$

植物盖度是指当地植被种植面积占总面积的百分比，则 PC 可从面积 m 和当地植物种植面积简单计算为：

$$PC = \frac{p}{m} \times 100\% \quad (7)$$

4.1.3 能源

能源是响应光污染风险的一个非常直观的指标。随着经济的发展和城镇化的推进，以提升城市夜景为主的休闲区和商业集中区逐年增加，这在一定程度上导致了夜间人造光的泛滥，造成了严重的光污染[4]。功耗是主要的次要指标，另外，通过世界各国减少光污染的政策，我们知道降低室内外灯光亮度、限制商业区LED照明水平是目前的主要策略[4][5]，因此本文选择功耗和区域平均光强作为能源指数的两个次要指标。

4.1.4 社会

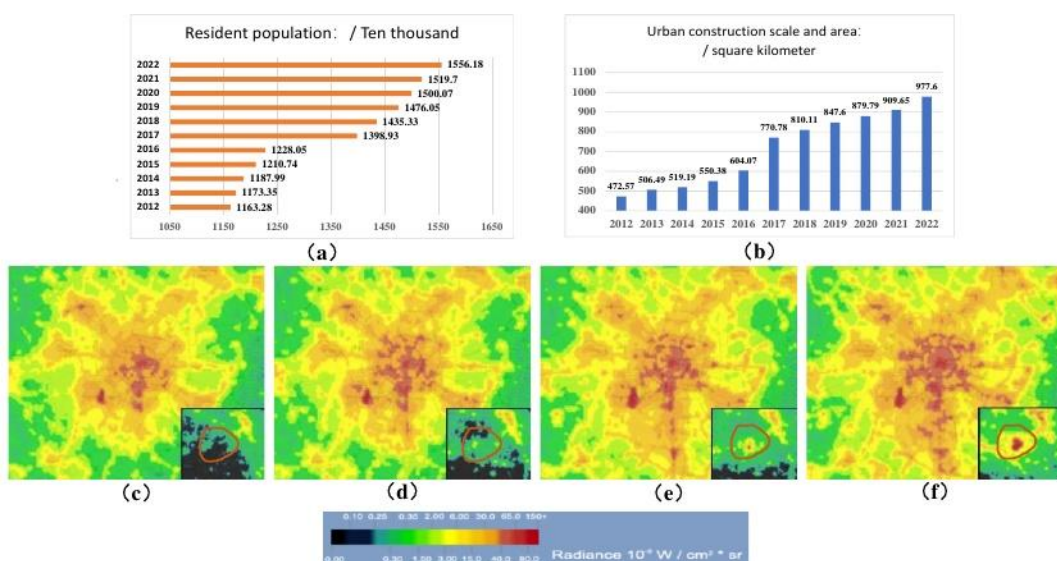


图 3:(a) 2012-2022 年成都常住人口(b)城市建设面积成都 2012 - 2022 年(c)-(f)成都市区光污染

VIIRS 图像和 2012 年、2015 年、2018 年、2021 年的天府国际机场

社会因素是光污染风险响应的主要指标，如图 3 所示，(c)-(f)分别为 2012 年、2015 年、2018 年和 2021 年成都城区及周边地区可见光红外成像辐射计(VIIRS)图像地图。VIIRS 图像用于视觉响应和测量该区域的光污染情况[5]，从图中我们可以清楚地得出结论，随着，我们可以清楚地看到，随着城市建设和人口的扩张，成都的光污染情况一直在增加。影像地图右下角为天府国际机场周边区域(圈内部分为天府国际机场)，该机场自 2016 年开始建设，2021 年正式通车，更明显地体现了社会因素对光污染状况的影响。

综合以上分析，本文选取人口密度、建筑密度、建筑类型三个主要方面，形成社会因素。社会指标对光污染风险的贡献程度定义为：

$$SOC = PD \times \sqrt{(BD - PC) \times BT} \quad (8)$$

SOC 为社会指标对当地光污染风险的响应程度。 PD 和 BD 分别为当地人口密度和建筑密度。建筑密度是指某一区域内建筑物的密度。建筑密度较高的区域，如繁华的商业区，通常需要较多的照明设施，而密集的建筑会产生较多的漫反射，造成严重的光污染[5]。它们可以很容易地通过当地人口 s 、建筑数量 r 的面积分别计算为：

$$PD = \frac{s}{m} \times 100\% \quad (9)$$

$$BD = \frac{r}{m} \times 100\%$$

BT 建筑类型，主要用来测量该地区建筑的高度。研究表明，高层建筑由于建筑体量大、光耗大，造成了较多的光污染和高能耗[5]。但建筑高度的平均值可能会受到其极小最大值的影响，因此定义了建筑高度聚集指数 BI 来衡量区域建筑的高度状况。假设某一区域内的建筑高度呈正态分布[4]，将该分布模型的累积概率 BI ，定义为：

$$BI = \int_{|BH_{avg} - BH_{med}|}^{BH_{avg} + BH_{med}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \exp\left(-\frac{(x - \max(BH_{med}, BH_{avg}))^2}{2\delta^2}\right) \quad (10)$$

BH_{avg} ， BH_{med} 分别为该地区建筑高度的平均值和中位数。在这个正态分布模型中， δ 通常设置为0.2[6]。这意味着建筑高度在区间内下降的概率越高， $[|BH_{avg} - BH_{med}|, BH_{avg} + BH_{med}]$ ，离高度越近。 BI 越大，平均高置信度越高。因此， BT 被定义为：

$$BT = BH_{avg}^{BI} \quad (11)$$

4.2 各指标归一化

我们选择的指标包括非常大的指标和非常小的指标。同时不同指标的单位是不同的，所以对评价模型产生影响。而且我们选择的指标应该具有相同的维度，越大表示光污染越强，所以我们给出了不同的数据处理方法。

4.2.1最大值归一化方法

对于人口密度、建筑密度、道路密度等对光污染效益增强的指标，采用最大化归一化方法。

f(x)=x/x_max(12)

4.2.2最小值归一化方法

对于植物覆盖层和其他有减弱光污染效果的指标，采用最小化归一化方法

f(x)=1-x/x_max(13)

4.3 使用熵权法计算模型中各指标的权重

熵权法是一种利用数据本身的规律客观分配权重的方法。 首先计算各指标的信息熵：

e_j=-1/ln n sum(p_ij ln(p_ij))(14)

式中，e_j为第j个指标的信息熵，p_ij为第j个指标中第i个数据的权重，n为数据数。

然后计算信息效用值并进行归一化，得到权重

d_j=1-e_j
W_j=d_j/sum(d_j)(15)

式中d_j为第j个指标的信息效用值，w_j为第j个指标对应权重，m为指标个数。

表 2:光污染系统模型的权重

Table with 4 columns: Traffic, Ecology, Energy, Society. Rows include indicators like Road density, Species density, Light intensity, Population density, Road types, Plant coverage, Power Consumption, Building density, and Building type with their respective weights.

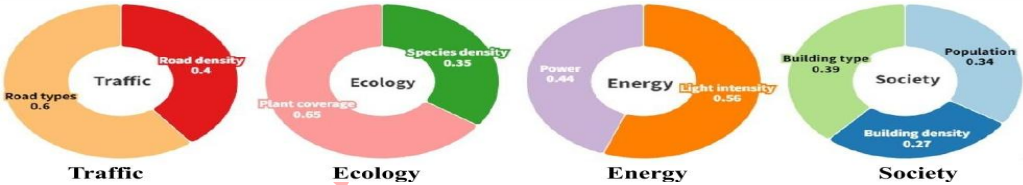


图 4:指标环权重图

5 光污染系统模型在四地区的应用

保护地位置、农村社区、郊区社区和城市社区是四个不同的区域。但这四个区域的样本比较多，所以我们收集相关数据并聚类，得到这四个区域各自的代表性数据。然后将这些数据纳入光污染系统模型(Light Pollution System Model)，计算代表性结果。

5.1 利用 K-means 聚类

在这项研究中，我们收集了来自世界不同地区的 8 个环境指标的数据。这些数据来自世界银行、联合国、各国统计局和其他科学出版物等公开来源。我们使用之前的模型来计算所需的指标:人口密度、建筑密度、建筑类型、物种密度、植物生长趋势、植物覆盖度、道路密度和道路类型。

我们使用 K-means 聚类对指标进行分类并确定其分布模式，该聚类根据彼此的相似性对数据点进行分组。该算法迭代地将数据点分配给聚类，并更新每个聚类的质心，直到实现收敛。

K-means 聚类模型适合于世界不同地区的环境指标聚类，因为它使我们能够识别指标分布的模式，并在地理区域之间进行比较。本研究使用的 8 个指标是可量化的，可以标准化，以确保它们在分析中权重相等。通过使用 K-means 聚类，我们可以根据数据点之间的相似性对它们进行分组，并识别代表不同地理位置的聚类。

5.1.1 K-means 聚类算法步骤

1.初始化星团的数量和它们质心的初始位置。

- 2.根据每个数据点与质心之间的欧几里得距离，将其分配给最近的质心。
- 3.更新每个素数的位置，取分配给它的所有数据点的平均值。
- 4.重复步骤 2-3，直到质心收敛，即不再改变。

5.1.2 算法调优

首先，根据我们想要比较的四个地理位置(受保护的土地、农村社区、郊区社区和城市社区)，随机初始化中心，并将集群的数量设置为 4 个。

我们运行K-means算法进行了100次迭代，并使用聚类内平方和（WCSS）和轮廓系数来评估聚类质量。测量每个数据点与其指定质心之间的距离的平方和WCSS，WCSS距离越小表示聚类较好。WCSS可用以下公式进行计算：

$$WCSS = \sum (x_i - c_i)^2 \tag{16}$$

其中 X_i 为数据点， C_i 为质心，并添加分配给质心的所有数据点。剪影系数测量了数据点在其指定的聚类中的匹配程度。剪影系数越高，聚类效果越好。轮廓系数的计算公式如下：

$$S = \frac{(b - a)}{\max(a, b)} \tag{17}$$

α 其中为一个数据点与同一集群中所有其他数据点之间的平均距离， b 是一个数据点与最近邻近集群中所有数据点之间的平均距离。

最后，我们使用散点图将结果可视化，并根据分配的聚类数据点对结果上色。我们还计算了每个聚类的每个指标的均值和标准差，以提供数据的描述性总结。

这种方法使我们能够确定环境指标的分布模式，并将其与不同的地理位置进行比较。

5.1.3 聚类结果

数据的聚类图如下图所示，其中的红十字表示当前区域数据的聚类中心。

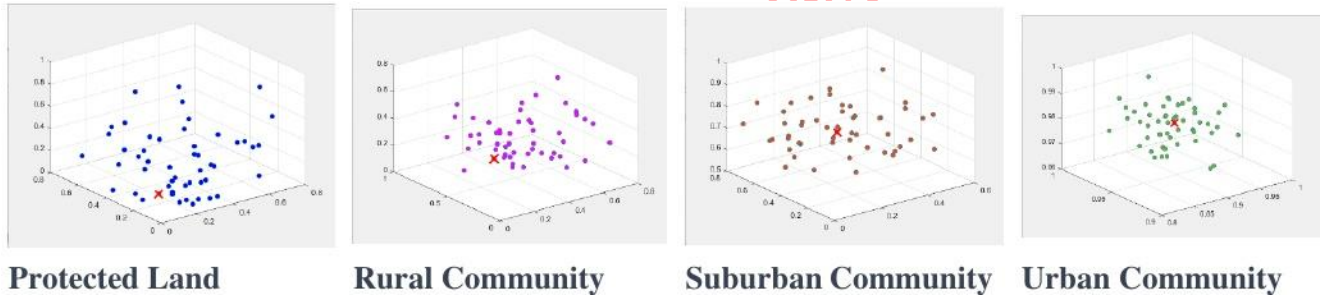


图 5:按区域划分的聚类图

最终到四个区域的聚类间隔如下图:

表 3:9 个因子的原始区间值

	Protected Land	Rural Community	Suburban Community	Urban Community
Population density	0-100	100-500	500-3000	3000-10000
Building density	0%-5%	5%-30%	30%-80%	80%-100%
Building height	0-2	2 to 5	5 to 10	10 to 50
Species density	-2% to +5%	-5% to +5%	-5% to +5%	-5% to +5%
Plant coverage	10% to 80%	10% to 80%	30% to 50%	10% to 30%
Road density	0 to 0.5	0.5 to 1	1 to 5	5 to 10
Road types	0 to 10,000	10,000 to 50,000	50,000 to 100,000	100,000 to 1,000,000
Light intensity	0 to 0.5	0.5 to 10	10 to 100	100 to 1000
power consumption	0-2000	2000-6000	6000-13000	13000-30000

我们选取聚类质心代表区域的指标水平，如下图所示(数据归一化为 0 到 1 的值):

表 4:所有指标的代表性数据

	Protected Land	Rural Community	Suburban Community	Urban Community
Population density	0.00094	0.0234	0.2536	0.8931
Building density	0.005	0.039	0.065	0.895
Building type	0.0132	0.2786	0.4625	0.8512
Species density	0.3542	0.8276	0.6259	0.1423
Plant growth trends	0.2341	0.9327	0.6882	0.0495
Plant coverage	0.9813	0.7154	0.4234	0.2452
Road density	0.07058	0.12537	0.72435	0.94816
Road types	0.0532	0.2981	0.7146	0.9267

5.2 四个地点的光污染结果显示

根据 5.1.3 中各区域的数据，光污染得分可计算如下:

Table 5: light pollution results in four locations

	Protected Land	Rural Community	Suburban Community	Urban Community
Society	0.001925878	0.035849	0.08061	0.250204
Ecology	0.033322987	0.058009	0.097816	0.136571
Traffic	0.005077418	0.014869	0.064629	0.201415
Energy	0.000159192	0.002961	0.066892	0.233923
LPR	0.053480414	0.174683125	0.359560795	0.87296586

LPR

光污染程度从高到低依次为城市社区、郊区社区、农村社区和保护地。这也与总体情况一致。

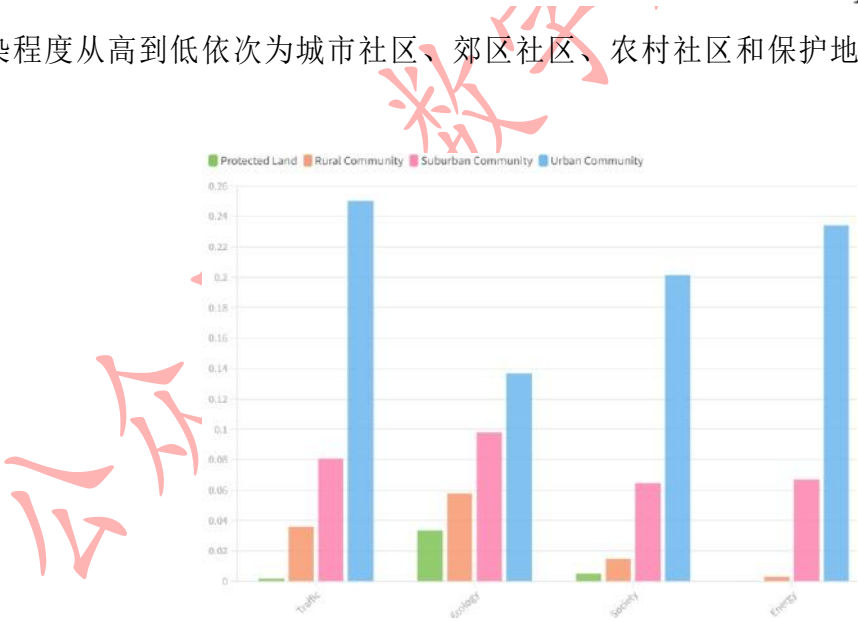


图 6:光污染系统模型在四个地区的应用情况

上图柱状图更直接地反映了不同主要指标下四个地区光污染程度的差异:

二、保护地:

道路交通水平低，反映了该地区人类活动和发展有限。具有相对较高的生态健康水平，因为该地区通常因其自然、文化或历史重要性而受到保护。社会活动水平相对较低，因为该地区通常人口不密集或不发达。

农村社区:

存在中等水平的道路交通，反映了该地区存在一定的人类活动和发展。具有相对较高的生态健康水平，这可能是由于较低的发展水平和更多的自然栖息地。社会活动水平适中，反映了一个社区的存在，这个社区更分散，人口密度更低。

郊区社区：

道路交通水平高于农村地区，反映该地区发展水平和人口密度较高。具有中等水平的生态健康，这可能是由于该地区的发达地区和自然地区的混合。社会活动水平高于农村地区，反映了该地区人口更密集、更发达的性质。

城市社区：

道路交通水平非常高，反映该区域人口密度高、发展水平高。生态健康水平较低，因为自然栖息地经常被人工环境所取代，绿地较少。社会活动水平最高，反映了城市环境中人口密度高、活动和便利设施多样。

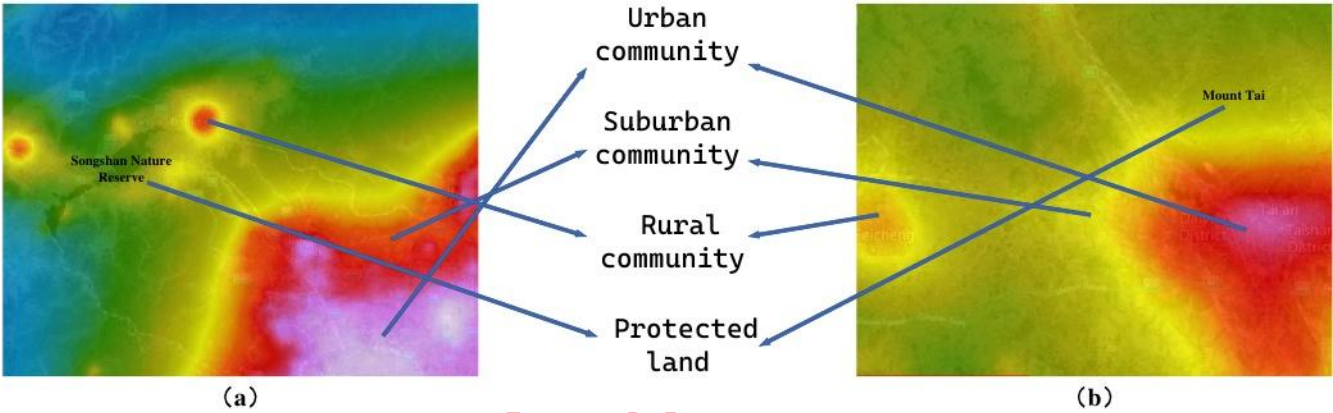


图 7:保护地、农村社区、郊区社区、城市社区区域特征(a)北京周边地区 VIIRS 图像(b)北京 VIIRS 图像泰山自然保护区周边区域

6 三种可能的干预策略

为了设计三种可行的干预策略，我们决定首先从现有数据中计算出干预目标。然后，我们以主要目标为大方向设计了三种干预策略，并利用光污染的多层因子模型计算了三种策略在四个领域的效果。

6.1 确定目标指标

为了为光污染程度较低的地区建立一个可实现的目标，我们使用前面每个地区的数据计算了四个地区的目标指标。我们选择使用每个指标闪回排名中前 15%的数据的平均值作为目标。

$$M_j = \frac{\sum_{k=1}^{n \times 15\%} S_k}{n \times 15\%}$$

(18)

四个地区的计算目标水平及各自的平均水平如下：

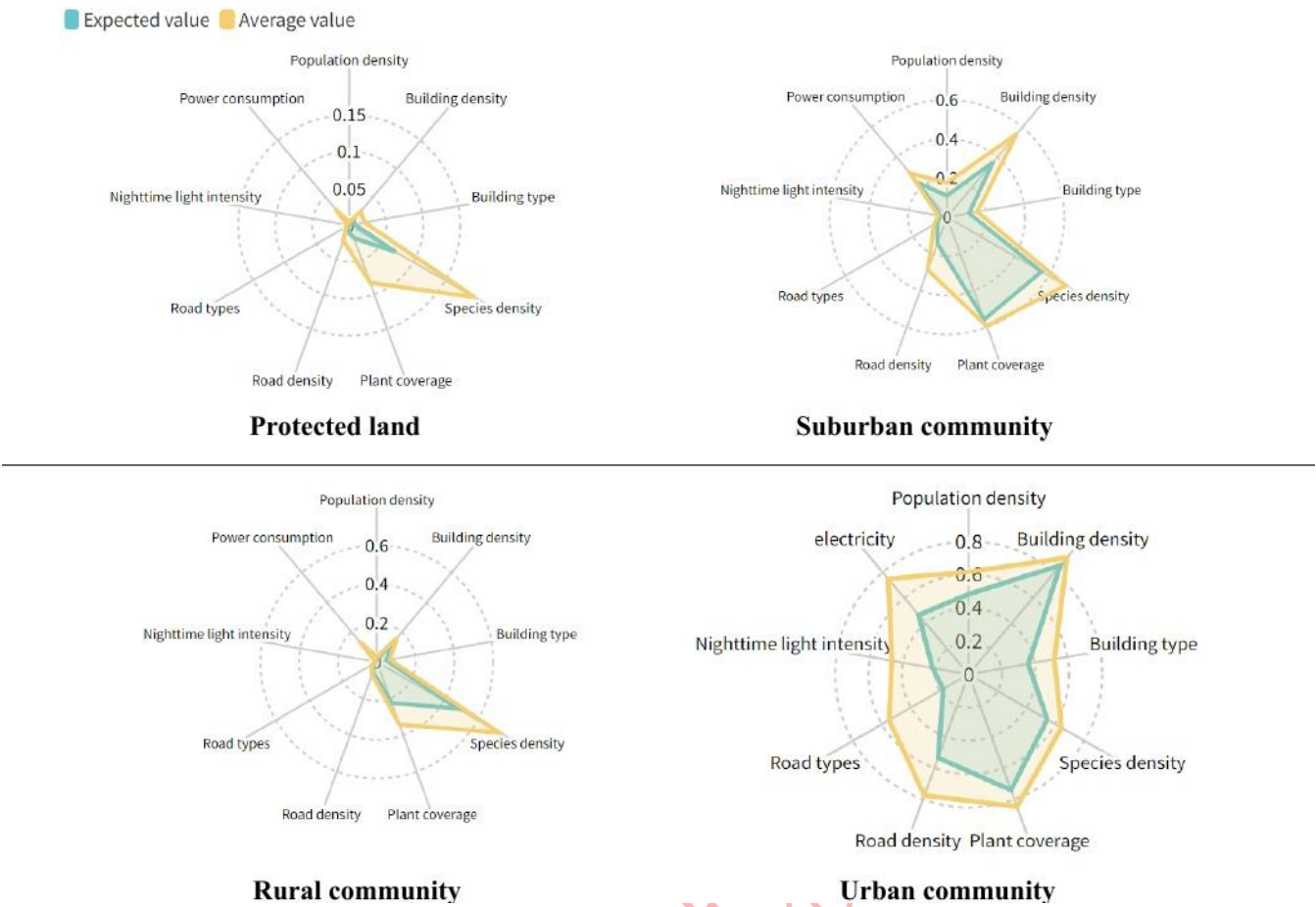


图 8:四个地区的平均水平和目标指数对比

从图 6 中我们可以看到，四个地区的平均水平与目标水平基本存在一定距离。通过比较四个站点每个因素的预期得分和平均得分，我们能够识别出一些可以从平均水平提高到预期水平以减少光污染的因素。

在受保护土地方面，可以改善的因素有人口密度、建筑密度、建筑类型、物种密度、植物覆盖、道路密度、道路类型、夜间光照强度和用电量。这些因素的预期得分均高于平均分，说明各方面都有提升空间。

在郊区社区方面，可以改善的因素是人口密度、建筑密度、建筑类型、夜间光照强度、用电量。这几个因素的预期得分均高于其平均分，说明这些地区还有提升的空间。

在农村社区方面，可以改善的因素是建筑密度、建筑类型、植物覆盖、道路密度、道路类型、夜间照明强度、用电量。这几个因素的预期得分均高于其平均得分，说明这些领域仍有提升空间。

在城市社区方面，可以改善的因素是植物覆盖、夜间光照强度和用电量。这些因素中的每一个的预期得分都高于它们的平均得分，这表明这些领域还有改进的空间。

总体而言，减少光污染最需要关注的因素是人口密度、建筑密度、光强和用电量。通过实施减少这些因素影响的政策和实践，我们可以在创建更可持续、更环保的社区方面取得进展。

6.1.1 量化战略对各指标的影响

在前面的分析中，我们发现平均水平与目标水平差异较大的小指标往往集中在一个主要指标上，这意味着我们可以设计以单一主要目标作为改进大方向的策略。同时，我们需要考虑到策略

对其他主要指标的影响。为了量化战略对各指标的影响，我们查阅了相关论文，将影响强度分为高、中、低三个级别，每个级别的定义如下。

高:指那些能够显著改变指标的措施。这些措施可能需要在设计和持续维护方面进行大量投资，但它们可以产生最大的影响，并对减少光污染做出最显著的贡献。

中等:是可以对指数产生一定程度影响的措施，并有可能将平均水平与目标水平之间的距离缩短 10-20%。虽然这些措施可能不如高影响措施有效，或者在实施过程中可能受到阻碍，但它们仍然可以起到一定的作用为减少光污染做出重大贡献。

低:该措施是指在实施时对指数影响很小或没有影响的措施。低影响措施带来的光污染潜在减少量，一般在平均水平与目标水平之间距离的 2-10% 范围内。虽然这些措施可能并不有效，但它们仍然可以对减少光污染做出微小的贡献，并且可能不那么耗费资源。

6.2 基于主要指标的三种干预策略

我们的光污染模型有四个主要指标，其中交通方式和社会改善比较相似。所以我们要针对这两个主要目标合并政策。最后，我们设计了三种干预策略：

6.2.1 针对生态指标的绿色基础设施战略

1. 战略介绍

通过改造城市和郊区的植物覆盖，绿色基础设施项目可以成为减少光污染影响的综合方法。该项目可以利用一系列政策和规划行动来提高这些地区植物覆盖的数量和质量。可以使用以下三种方法。

a) 促进植树。

鼓励在市区和郊区植树，特别是在光污染严重的地区。树木可以帮助阻挡多余的光线，提供荫凉，这可以减少从表面反射的光量。植被也会遮挡视线。这在经常使用大型户外灯的商业区尤其有效，这可能导致光污染。建议种植适合黑暗天空的植物。这些植物的高度较低，叶片不反光，可以减少向上反射的光线，减轻光污染的影响。

b) 增加自然绿地的数量。

如公园、森林和自然保护区，这些空间可以作为“黑暗区域”，有助于减少光污染对野生动物和人类健康的影响。这可能包括促进使用绿色屋顶和墙壁，鼓励在城市地区种植树木和其他植被，制定和执行要求在新建和重建项目中使用绿色空间的法规。还可以开展教育活动，提高人们对植被覆盖在减少光污染和其他环境挑战方面重要性的认识。

c) 管理和维护植被。

这包括定期修剪、施肥和病虫害控制。适当的植被管理可确保植被保持健康，并有效减少光污染及其对环境 and 人类健康的影响。

总体而言，以增加城市植被覆盖为重点的综合政策是减少光污染、提高城市整体健康和可持续性的有效途径。有了正确的政策和行动，我们可以为所有人创造更有活力、更绿色、更可持续的社区。

2. 战略对指标的影响

基于之前设计的定量模型，我们评估了绿色基础设施项目对所有指标的影响程度。

该措施的主要影响指标是植被覆盖。因此，我们认为该措施对植物覆盖指标的贡献为“高”，同时考虑该措施对其他指标的影响。

绿色基础设施项目对所有指标的影响如下表所示。

表 6:绿色基础设施战略的影响

Indicator	Impact level	reason
Population density	Medium	Increasing plant coverage can reduce population density in cities and sub-urbs by mitigating the effects of urban heat islands, thus making these areas more livable and comfortable
Building density	Low	The increase in green space may reduce the number of buildings, but the existing buildings are rarely demolished directly due to socio-economic needs
Building type	Medium	Using green walls and planting vegetation in and around the building helps reduce the reflection of light from the surface of the building
Species density	Medium	Increasing plant coverage can provide habitat for a wide range of plant and animal species, thereby increasing species diversity and density indicators of the measure's main impact
Plant cover	High	It is the main indicator
Road density	Low	The increase in vegetation cover does not affect the number of roads
Road types	Medium	Planting vegetation along the road can provide aesthetic and environmental benefits, such as insulation from lights and reducing the urban heat island effect. When road lights are filtered to a certain extent, the road equivalent grade can be regarded as reduced
Light intensity	Medium	Increased plant cover helps reduce light pollution at night because vegetation helps filter and absorb light, thus making the sky darker
Power consumption	Low	Increased vegetation cover does not affect power consumption

6.2.2 能源指标的能源战略

1.策略介绍

造成这个问题的两个关键因素是电力消耗和夜间光线强度。为了解决这一问题，我们提出了一项综合战略，通过电力消耗和夜间光强度管理来减少光污染，包括城市和地区当局可以实施的几项行动。

a)对城市或地区的户外照明和电力消耗进行全面审计

这一行动可以识别出光污染严重的区域，以及可以实施用电量和夜间照明强度变化的区域。这种审计可以使用 GIS 软件和其他工具来进行，这些工具可以用来创建研究区域的户外照明和电力消耗的地图和可视化。根据这次审计的结果，下一步的行动是制定和实施照明规范和标准。要求使用节能和对黑暗天空友好的照明技术，如 LED 灯。使用屏蔽灯具，其设计目的是将光线向下引导，减少散射到大气中的光量。这应该包括对完全切断灯具和其他将光线向下引导并减少眩光的技术的要求。

b)智能照明系统的实施

该系统可以根据存在和调节室外照明的亮度和方向人和动物的运动。这些系统还应包括自适应照明解决方案，可以根据不断变化的照明需求和条件进行调整，以减少不必要的能源消耗和光污染。通过结合这些技术，我们可以减少室外照明的光污染，同时减少能源消耗和温室气体排放

c)为企业和组织提供税收抵免和退税等激励措施

使用可再生能源技术

促进可再生能源在户外照明和其他应用中的使用，为使用这些技术的企业和组织提供税收抵免和退税等激励措施。这可以通过使用限制敏感区域(如自然保护区、公园和住宅区)户外照明的位置和密度的分区法规来补充。这些规范还可以包括对室外照明使用可再生能源的要求。此类照明规范和标准应与该地区的利益相关者合作制定，包括城市或地区政府官员、照明设计师和工程师以及环保组织。

d)开展教育活动

这项运动可以提高人们对减少光污染重要性的认识，并促进使用节能和对黑暗天空友好的照明技术。这些活动可以针对企业、房主和普通公众，并可以通过各种媒体渠道进行，包括电视、广播和社交媒体。

总的来说，结合这些措施和其他措施的政策可以显著减少光污染。价值的确切百分比变化将取决于实施的具体政策和行动，以及合规和执行的水平。

2.战略对指标的影响

基于之前设计的定量模型，我们评估了绿色基础设施计划对所有指标的影响程度。

对于能源指标，干预策略的主要影响是在光强度(Light intensity)和功耗(Power consumption)上，该策略对这两个指标的影响被认为是“高”。对于其他指标，我们也结合实际情况给出了合理的判断。

能源项目对各指标的影响如下表所示。

表 7:能源战略的影响

Indicator	Impact level	Reason
Population density	Medium	Reducing electricity consumption and nighttime light intensity helps mitigate the urban heat island effect, thereby reducing population density in urban areas
Building density	Low	Reduced power consumption and nighttime light intensity will not affect the number of buildings
Building type	Medium	Reducing power consumption and nighttime light intensity can lead to the use of more energy efficient and environmentally friendly building designs and improved building types
Species density	Medium	Reducing nighttime light intensity helps improve habitats and ecosystems for many plant and animal species, thereby increasing species density
Plant coverage	Low	Reduced power consumption and light intensity at night do not affect vegetation cover
Road density	Low	Reduced power consumption and nighttime light intensity will not affect the number and length of roads
Road types	Medium	Use more energy efficient lighting and create "dark areas" to reduce the road's impact on light pollution, resulting in a more environmentally friendly road type
Light intensity	High	Indicators of the main impact of the measure
Power consumption	High	Indicators of the main impact of the measure

6.2.3 交通与社会指标的城市规划策略

1.策略介绍

城市光污染已被认为是一个日益严重的问题，导致其扩散的因素有很多，包括建筑密度、建筑类型、道路密度、道路类型和照明强度。为了解决这个问题，可以通过适当的城市规划和设计来实施几种策略。

a)制定分区条例

使用这一策略来管理土地使用和开发。例如，这些法规可以对一个区域内的建筑物数量、建筑物的高度和大小、允许的室外照明数量、允许的照明灯具类型等进行限制。通过执行这些规定，可以减少建筑物产生的光量，从而减少光污染。

b)使用合适的建筑材料

选择吸收光而不是反射光的材料可以显著减少光污染。此外，使用限制光逃逸量的窗户处理也是有效的。通过将自然光融入建筑设计中，可以减少所需的人工照明量。这可以通过包括天窗、中庭或允许自然光进入建筑物的大窗户的建筑设计来实现。

c)降低道路密度

降低道路密度的效果是通过对道路网络进行战略规划，优先考虑替代交通方式，减少道路宽度来实现的。降低道路密度可以通过促进公共交通和非机动交通，如骑自行车和步行来实现。这样可以减少对道路照明的需求，从而减少光污染。

d)混合用途开发

将住宅、商业和绿色空间整合在一个开发项目中，可以减少光污染。这可以通过鼓励或执行混合用途开发的分区规定来实现。

总之，通过实施这些策略，光污染水平可能会有效降低。不过，实际效果将取决于实施的具体政策以及合规和执行的水平。此外，由于建筑设计和施工的变化可能需要时间才能实施，因此可能需要几年时间才能看到这些政策的全面效果。

2.战略对指标的影响

基于之前设计的定量模型，我们评估了绿色基础设施项目对所有指标的影响程度。

对于交通和社会指标，干预策略的主要影响是光强度和功耗，因此我们认为该策略对这两个指标的影响为“高”。对于其他指标，我们也结合实际情况给出了合理的判断。城市规划战略对各指标的影响如下表所示。

表 8:城市规划战略的影响

Indicator	Impact level	Reason
Population density	Medium	Optimizing the structure of urban buildings and roads can dredge the population of urban functional areas, thus reducing the population density of urban areas
Building density	Medium	Create zoning ordinances that can limit the number of buildings in an area. However, the impact is expected to be somewhat limited by the greater obstacles to alterations or redevelopment of built areas. It has great influence on the new urban area
Building type	Medium	The use of appropriate building materials can promote more energy efficient and environmentally friendly building designs and improve building types
Species density	Low	Integrating urban space can increase species density by adding more green space
Plant coverage	Low	The optimization of urban functional area helps to increase plant coverage
Road density	High	Intelligent planning of road networks allows for more efficient transport with shorter road miles, thus reducing road density
Road types	Medium	Intelligent planning of road networks can lead to greener road types
Light intensity	Medium	Fewer roads and buildings will consume less electricity
Power consumption	Medium	As the number of roads and buildings decreases, so does the need for light, so the intensity of lighting decreases

7 光污染系统模型在实践中的应用

我们选择了城市和郊区两个区域作为目标，并引入了第 6 部分的三个策略。由于在之前的模型中，策略对指标的影响是一个范围，因此对于每个策略，我们计算两个预测值。这两个形成的区间构成了我们的预测结果。

7.1 城市对象

7.1.1 方法学计算

我们选择意大利城市托斯卡作为我们的应用目标，因为它的发展水平相对中等，可以有效地代表城市的平均水平。此外，该城市靠海，符合现代城市指标分布的特点。以这座城市为个案研究，可以有效体现我们方法的普适性，同时我们的研究结果更接近实际情况。

将这三种策略分别代入计算，得到的结果如下：

表 9:对托斯卡的影响

	Green infrastructure strategy		Energy strategy		Urban planning strategy		Urban original factors
	Lower limit	Upper limit	Lower limit	Upper limit	Lower limit	Upper limit	

Society	0.196959	0.202317	0.196959	0.202317	0.196653	0.202072	0.207491
Ecology	0.122015	0.126975	0.127189	0.129303	0.128268	0.130167	0.130641
Traffic	0.139678	0.145637	0.139678	0.145637	0.127503	0.149771	0.149771
Energy	0.212157	0.223261	0.172029	0.207897	0.207897	0.219854	0.23181
LPR	0.670809	0.69819	0.63586	0.68516	0.660322	0.701863	0.719712
LPR's Degree of reduction	6.79%	2.99%	11.65%	4.80%	8.25%	2.48%	

从上表可以看出，能源项目的光污染 LPR 降低程度无论下限还是上限都是最低的。可见，对于这个城市来说，能源项目效果最好。

7.1.2 战略结果分析



图 9:能源战略实施后托斯卡的变化

在降低城市光污染风险水平方面，能源战略是最有效的。因此，我们根据上图分析能源策略如何影响城市的光污染水平。

(四)主要指标

从 4 个主要指标来看，能源因素对光污染的贡献显著降低，社会 and 交通因素对光污染的贡献略有降低。而生态因子变化不大，可能是因为城市受到功能需求的制约，无法对生态环境进行大规模改善。

(五)二级指标

接下来我们来看社会、能源、交通等发生变化的因素。我们特别关注它们的子指标。

- 1.由于战略中改善照明条件和用电量的行动，光强度和用电量因素显著降低。城市需要大量照明，消耗大量电力，这一策略可以显著减少光污染。
 - 2.社会指标下的人口密度和建筑类型略有下降。这是因为减少夜间的用电量和光照强度，有助于缓解城市热岛效应，从而降低城市地区的人口密度。对建筑物内的照明进行优化，使以前高度照明的建筑物可能变得不那么明亮，从而改善建筑物类型。
 - 3.交通指示灯下的道路类型略有减少。原因与建筑类型类似，即照明的优化提升了道路类型。
- 总体而言，虽然能源策略对生态因素影响不大，但很明显，能源、社会 and 交通因素都在降低城市光污染水平方面发挥着重要作用。通过实施节能照明技术和促进可持续城市发展实践，我们可以创造更宜居、可持续和有弹性的城市环境。

7.2 城郊建筑

7.2.1 方法选择

我们选择了塞浦路斯 Latsia 郊区作为我们的应用目标。这个地区虽然在塞浦路斯以外并不出名，但却是该国郊区社区的代表，住宅区和商业区混合在一起，人口密度适中。我们在这方面的计算可以有效地应用于塞浦路斯其他类似的郊区社区或具有类似特征的其他国家。将这三种策略分别代入计算，得到的结果如下：

表 10:对 Ltsia 的影响

	Green infrastruc- ture strategy		Energy strategy		Urban planning strategy		Urban original factors
	Lower limit	Upper limit	Lower limit	Lower limit	Upper limit	Lower limit	
Society	0.075012	0.077461	0.075012	0.077461	0.07361	0.076339	0.079068
Ecology	0.096822	0.098887	0.098589	0.099682	0.099328	0.100273	0.100509
Traffic	0.043803	0.045665	0.043803	0.045665	0.035277	0.041828	0.046249
Energy	0.05818	0.059826	0.05078	0.056642	0.056642	0.058596	0.060549
LPR	0.273817	0.281839	0.268184	0.279449	0.26486	0.277036	0.286375
LPR's degree of reduction	4.39%	1.58%	6.35%	2.42%	7.51%	3.26%	

从上表可以看出，在结果的下限和上限值中，城市规划项目的光污染水平 LPR 降低都是最低的。这意味着，对于这个城市来说，使用城市规划项目获得的效果是最好的。

7.2.2 策略结果分析

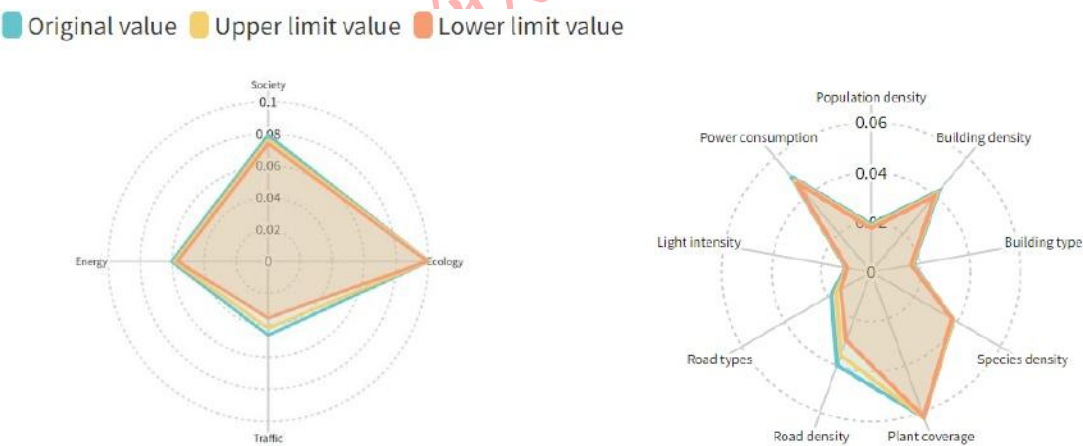


图 10:城市规划战略实施后拉脱维亚的变化

在降低光污染风险水平方面，城市规划策略最为有效郊区社区，以及这一战略对指标的影响，需要从多个角度进行分析。

四、主要指标

从四个主要指标看，道路因素对光污染的贡献明显降低，交通因素的贡献略有降低。生态因子变化很小，因为郊区往往是城市的主要扩张区域，污染较多的工厂可能会规划到郊区，因此郊区的生态环境较为固定，不宜进行优化。社会因素变化很小，因为郊区本身的人口密度和建成度比城市要低，所以城市规划政策对郊区的影响有限。

(五)次要指标

接下来，我们来看已经发生变化的交通和能源因素。我们特别关注它们的子指标。

1.二级指标道路密度明显降低。城郊公路网的四种典型形态为带状公路网、分支公路网、网状公路网和环形公路网，具有路网多、混合的特点。因此，对路网进行智能规划，可以以更短的道路里程实现更高效的交通，从而降低道路密度。较低的道路密度可以避免路灯光源过度集中，降低光污染水平。另一个次要指标——道路类型略低。对路网进行智能规划，可以形成更加环保的道路类型。在居民区附近规划合理的道路类型，可以减少路灯对居民的干扰，从而减少光污染。

2.能耗指标下的功耗因子略有降低。这是因为当道路和建筑物的数量减少时，对光的需求也会减少，因此照明的强度也会降低。

总体而言，尽管城市规划策略对生态因素影响不大，但很明显，交通和能源因素在降低郊区光污染水平方面都发挥着重要作用。通过实施健全的城市道路和建筑规划设计，我们可以创造更绿色、更可持续、更智能的郊区环境。

8 敏感性分析

对所建立的光污染风险多层评价模型进行了敏感性分析，以第四个问题中的托斯卡纳城区为例，使用最合适能源情景的城区对能源指标最敏感。

当能源、社会、交通和生态的二级指标之一以相同比例增加时，城市区域的光污染风险对能源变化的响应应该最为显著。

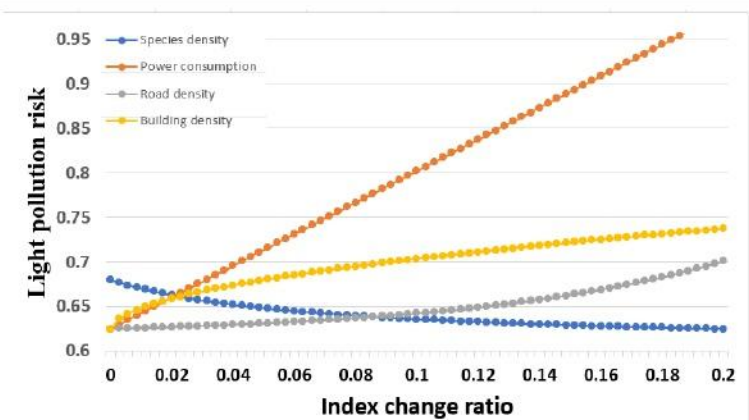


图 11:敏感性分析结果

对上述分析进行敏感性分析:在保持其他指标不变的情况下，逐步增加社会指标中的建筑密度、交通指标中的道路密度、生态指标中的物种密度和能源指标中的用电量，计算光污染风险的变化。结果如下图所示。

从现实世界的经验和相关文献来看，很明显，当区域建筑密度、用电量和道路密度增加时，预期的光污染风险应该会增加。当物种密度增加时，预期光污染风险应该降低。从图 3 可以看出，实验结果与预期一致。

结果分析表明，对于该城市区域，当相关指标变化比例相同且能源指标增加时，光污染风险变化最为显著，则表明该城市区域对能源指标最为敏感，这与问题四中采用能源相关政策的结果一致。而不同指标变化对光污染风险的影响程度，以及光污染风险对各指标的敏感程度，与问题二中对城市区域特征的分析一致，如:电能消耗大的城市区域、商业区和人口密集的城市区域等。

以上分析表明，本文所建立的光污染多层评价模型更为可靠。

9 模型评价与进一步讨论

9.1 优势

接近现实:我们将影响一个地区光污染风险水平的因素分为四类，并为每个行业选择了两个及以上重要指标。因此，我们的模型可以被认为是对现实的更好的模拟。我们选择的每一个指标都可以从联合国、世界知识产权组织、世界银行和各国统计局等权威数据源中收集。我们的模型有足够的技术支持。

数据处理:我们结合现有研究使用聚类算法处理数据，使用聚类中心表示平均值。在计算数据时，我们还对数据进行了适当的归一化处理，使结果不受幅度的影响。

合理性:该模型很好地解释了光污染的原因。我们研究了过去 20 年来选定地区的光污染趋势，发现这与现实相符。同时，通过考察不同指标的趋势，得出了符合直觉和常识的结论。

目的:采用熵权法确定各指标的权重，避免个人主观因素对模型准确性的影响。

稳健性:敏感性分析表明，数据波动对我们的模型影响很小，说明我们的模型可以有效抵抗数据误差和波动，具有良好的稳定性。

9.2 缺点

虽然尽了最大的努力收集世界所有地区的数据，但由于数据库的限制，郊区社区和受保护的地理位置的数据仍然存在一些缺失，这对结果的准确性产生了负面影响。

我们的模型不包括政治和文化环境等因素的定量分析，因此我们的模型在实际应用中会有局限性。

我们在指标的选择上还有改进的空间，有些指标可以用更合适的数据来表达。

10 结论

我们提出了一个光污染的多层模型，该模型考虑了四个主要方面:社会、生态、交通和能源。该模型还应用于受保护土地、农村社区、郊区社区和城市社区四个领域，评估其光污染风险因素。为了缓解光污染，提出了三种干预策略:绿色基础设施项目、能源项目和城市规划项目，并在每个区域实施了四个项目。结果表明，缓解城市地区光污染最有效的策略是能源项目，而对于郊区，则是城市规划项目。

参考文献

[1] Z. Yan and M. Tan, Changes in light pollution in the Pan-Third Pole's protected areas from 1992 to 2021, Ecological Informatics (2023), <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102016>

[2] Megha Khanduri a , Ruchika Sah a,* , Aishwarya Ramachandran a , Syed Ainul Hussain a , Ruchi Badola a , Ulrika Candolin b , Franz Holker " c,d. Spatial-temporal expansion and determinants of light pollution in India's riparian habitats, <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106952>

[3] Xihong Lian a,b , Limin Jiao a,b,* , Jing Zhong a,b , Qiqi Jia a,b , Jiafeng Liu a,b , Zejin Liu. Artificial light pollution inhibits plant phenology advance induced by climate warming, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118110>

[4]Ying Hao, Peng Zhang, Feng Gao, Yu Bai\ . Analysis of light pollution management poli-cy and In terference light limit standard of LED advertising screen. DOI:10. 19316 / j. issn. 1002-6002. 2022. 03. 22

[5]Kai Feng, Luoxi Hao, Lin Zeng. Discussion on the evolution characteristics of municipal lighting pollution -- taking VIIRS image as the analysis object. DOI 10. 3969/j. issn. 1004^40X. 2022. 06. 001

[6] Jiayu Li , Bohong Zheng , Komi Bernard Bedra , Zhe Li , Xiao Chen. Effects of residential building height, density, and floor area ratios on indoor thermal environment in Singapore. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114976>

[7] Chengdu Municipal Bureau of Statistics. Chengdu Statistical Yearbook. Chengdu Statistical Yearbook, http://cdstats.chengdu.gov.cn/tjgzxxw/c112635/tjxx_listTime1.shtml?0201_020109


Reducing Light Pollution in Urban Communities

Light pollution is a growing concern in our urban community.

The excess lighting that spills into the night sky not only wastes energy, but also negatively impacts wildlife, human health, and the beauty of the night sky. But there is hope! We have developed a comprehensive energy strategy to reduce light pollution in our community.

Actions:

- ✧ **Audit of Outdoor Lighting:** We will conduct an audit of outdoor lighting and electricity consumption in our community. This will help us identify areas with high levels of light pollution and areas where changes in power consumption and night lighting intensity can be implemented.
- ✧ **Intelligent Lighting System:** We will implement an intelligent lighting system that adjusts the brightness and direction of outdoor lights based on the presence and movement of people and animals.
- ✧ **Incentives for Renewable Energy:** We will provide incentives such as tax credits and rebates to businesses and organizations that use renewable energy technologies for outdoor lighting.
- ✧ **Educational Campaigns:** We will launch educational campaigns to raise awareness of the importance of reducing light pollution and promote the use of energy-efficient and dark sky friendly lighting technologies.



We encourage everyone to join us in this effort and become a part of the solution. Let's work together to protect our planet and preserve the beauty of the night sky.