

不同地区的光污染评价模型与实例研究

姜依凡¹, 贾卓越², 王怡霖², 金晶亮^{3,*}

(1. 南京邮电大学 软件学院, 江苏 南京 210023)

(2. 南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210023)

(3. 南通大学 理学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 随着社会经济的快速发展, 环境问题日益凸显, 其中光污染就是一种新型的环境污染。受多种因素影响, 不同地区的光污染水平不尽相同。文章构建一个适用于分析不同地区光污染水平的评价模型。首先, 从社会经济、环境和夜间照明强度三个方面选择了与之相关的 7 个指标构建指标体系; 其次, 采用熵值加权法和层次分析法中的判断矩阵来获得各指标的综合权重; 接着, 通过 TOPSIS 加权得到光污染水平分数。借助聚类分析将光污染水平划分为 4 个等级: 轻度、中度、重度和严重。然后, 选取分别对应城市社区、郊区社区、农村社区和保护地这 4 种类型地点, 分别为: 上海、开封市、张家口市和神农架林区, 计算这些地点的光污染分数并判断等级。与实际相较发现, 该模型可以准确评估不同类型地区的光污染水平, 传递有效信息。最后通过灵敏度分析, 进一步证明了该模型的稳定性和准确性。

关键词: 光污染指标; 评价模型; 熵权法; 聚类分析

1 引言

光的出现极大便利了我们的生产生活。随着城市的进步和发展, 夜间灯光的光照时长和范围呈现快速增长的趋势。然而, 光的过度使用最终造成了一种新型环境污染, 即光污染。光污染不仅会影响自然环境中的动植物生长, 也会对人类的身心健康造成极大的危害。近年来, 国内外许多研究人员潜心研究光污染, 希望能够找到合适的应对方法。总的来说, 研究方向可以总结为: 光污染的构成与观测、光污染建模的数据确定和光污染影响的分析。首先, 一般观点是光污染主要包含白亮污染、日间污染和彩色污染这三部分。刘昭丽和江霜英^[1], 考虑了全天的光污染情况, 而大多数国内外研究者只研究夜间的光污染。随着地理系统信息的发展, 研究者开始利用卫星遥感获取数据。2011 年, 美国宇航局和国家海洋与大气管理局联合发射卫星 (SNPP), 生成人类活动区域人工光辐射地图^[2]。2018 年, 由武汉大学及其他机构共同发射了全球首颗专业夜光遥感卫星^[3]。该卫星能提供更加丰富的光照信息, 具有变化检测能力。其次, 光污染建模的数据空间主要有两种类型: 二维空间和三维空间。Treanor^[4] 结合城市人口和大气中光束的计算, 引入最早的光污染数学模型。刘鸣等^[5] 利用二维数据, 如图像数据和遥感数据来建立模型。征汶^[6] 结合高度和其他信息建立了三维空间的数据模型。Katz

收稿日期: 2023-06-29

资助项目: 国家自然科学基金 (71603135); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (KYCX223327)

* 通信作者

和 Levin^[7] 在不同方向 (向上、水平、向下) 测量地面的人造光环, 能够分析不同方向的光污染的不同。最后, 光污染对生物种群的影响从宏观和微观两个角度分析。汤雪峰^[8] 探讨了来自不同光源对生物体微血管的影响, 但更多的学者关注的是大面积光污染在宏观上对生物的习性和健康的影响。Lao 等^[9] 研究了偏振光影响鸟类飞行, 撞建筑物的行为。

光污染所带来的危害范围和影响程度越来越大, 引起了社会的广泛关注。世界上不同地区的 3900 多个城市都开展了关灯接力的环保活动^[10]。当今在光污染方面的研究大多数针对光污染组成的分类, 光污染的防治措施方向以及局部区域光污染数据模型的建立, 而光污染的数据集多选择由遥感卫星所获取的数据, 存在较少结合主从多方面数据并广泛适用各类型区域的光污染评价体系。为了评估特定地区的光污染水平以便后续开展针对性应对政策, 本文主要做了以下工作: 首先, 开发一个评价光污染水平的光污染指标体系, 且该体系对各种不同地点都有适用性。其次, 将该模型应用于四个具有不同特点的目标区域。最后通过计算结果证明了该模型的合理性和敏感性分析的稳健性。

2 方法准备

2.1 熵权法

熵权法是一种客观的对指标进行赋权的方法。根据信息熵的定义, 可以利用熵值来计算每个指标的权重, 这可以为多指标的综合以及客观评价提供帮助^[11]。图 1 中阐述了方法的具体步骤。

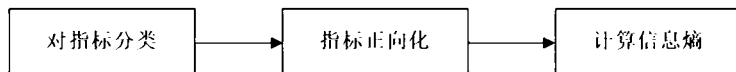


图 1 熵权法的计算过程

不同的指标具有不同的含义。一般来说, 指标的类型分为两种: 正向型和负向型。正向型指标是指: 指标值越大, 得到的结果也会越大, 对结果是正向影响的; 而负向型指标是指: 指标值越大, 得到的结果会为越小, 对结果是负向影响的。在进行综合评价时, 所有的指标需要进行一致化, 可以都转化为正向型指标^[6]。在转化时, 正向型指标保持其原始值, 而负向型指标需要做以下处理:

$$x'_{ij} = x_{\max} - x_{ij}, \quad (1)$$

其中, x_{ij} 和 x'_{ij} 分别代表第 j 个样本的第 i 个指标在正向化处理前和后的值, x_{\max} 表示第 i 个指标所有样本值中的最大值。

然后, 利用下面的公式进行数据标准化, 使所有数据在同一数量级上

$$r_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m x'^2_{ij}}}, \quad (2)$$

得到第 i 个指标在第 j 个样本中所占的指标比重, 也就是计算该指标的变异大小

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^m r_{ij}}, \quad (3)$$

于是, 每个评价指标的信息熵和权重就可以被计算求得

$$E_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}, \quad (4)$$

$$W_{ei} = \frac{1 - E_i}{\sum_{i=1}^n (1 - E_i)}. \quad (5)$$

2.2 层次分析法

AHP 是一种结合了定性和定量的分析方法^[12], 它的主要思想是在各指标之间构建一个重要性判断矩阵. 通过判断矩阵, 可以计算出最大特征值与相应的特征向量, 从而得到权重. 由于熵权法是一种较为客观的计算方法, 融合层次分析法后, 可以从主观上分析每两个指标之间的关系, 有助于确保我们的结果更加合理.

判断矩阵是一种用数值来度量某一个因素针对所有其他因素的重要性程度. 根据重要性标度法, 我们对指标体系中每两个指标的重要性进行比较, 得到二维重要性判断矩阵 A , 其形式如下:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中, a_{ij} 表示第 i 个指标相较第 j 个指标的相对重要性, n 就是指标体系中的指标个数.

为了确保判断矩阵的正确性, 一致性测试是必不可少的. 只有当主观构建的判断矩阵通过一致性测试, 才证明该矩阵是合理的. 通过计算判断矩阵的最大特征值 λ_{\max} 和一致性指标 CI , 进行一致性测试:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (7)$$

由此引入随机一致性比率 CR

$$CR = \frac{CI}{RI}. \quad (8)$$

在公式中, RI 是关于判断矩阵的平均随机一致性的参数. RI 的值由 n 决定, 相应的关系如表 1 所示.

表 1 RI 和 n 的对应关系

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

最后, 对判断矩阵的每一列进行归一化处理, 然后将新矩阵的每一行相加, 得到每个指标的主观权重, 记为 W_{ai} .

2.3 TOPSIS

Topsis 是一种常用的综合评价方法, 它可以充分利用原始数据的信息. 相较于线性求和法, Topsis 可以准确地反映评价方案之间的差距, 该方法中的两个基本概念是最优解和不理想解^[11]. 最优解就是其属性值达到所有方案的最优值, 而不理想解表示的是最差的选择. 如果其中一个方案最接近最优解, 则此方案为最佳方案.

通过前面的工作, 在熵权法部分得到了代表指标的更统一的数据 r_{ij} . 借助由前面方法综

合得出的权重值, 最终的得分被量化为对第 i 个指标对应的样本值与所有样本值之间最大和最小距离的综合计算的结果.

以下是最大距离的计算公式:

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n W_i (R_i^+ - r_{ij})^2}. \tag{9}$$

以下是最小距离的计算公式:

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n W_i (R_i^- - r_{ij})^2}, \tag{10}$$

其中, R_i^+ 表示第 i 个指标所有样本值中的最大值, 而 R_i^- 则是最小值. 随后, 评价分数可以被计算出:

$$LPI = \frac{D_j^-}{D_j^+ + D_j^-}. \tag{11}$$

可以看出, 当 D_j^+ 越小, 结果越趋向于 1.

3 模型建立

3.1 光污染指标体系

随着光污染的范围不断扩大、影响程度逐渐增加, 它将对交通安全、经济、能源、人类健康、自然环境等方面产生严重影响^[13]. 为了平衡光污染的各评价角度, 从社会经济、环境和夜间照明强度三个方面确定光污染评价指标.

步骤 1 选择主要的评价指标

通过阅读相关文献以及综合考量后, 构建了如表 2 所示的光污染指标体系.

表 2 指标体系

度量	方面	指标	单位	符号	类型
LPI	社会	人均 GDP ^[14]	美元	X_1	+
		人口密度	人/千米	X_2	+
		公共教育支出比 ^[15]	百分比	X_3	-
	环境	绿化覆盖率	百分比	X_4	-
		年平均降水量	毫米	X_5	+
	夜间灯光强度 ^[16]	通电率	百分比	X_6	+
		千人口夜间灯光幅度	10^{-9} 瓦/(平方厘米·球面度)	X_7	+

注: 类型表示 2.1 节中的正向型和负向型.

步骤 2 计算指标权重

每个指标的最终权重由通过熵权法得到的 W_{ei} 以及由层次分析法得到的 W_{ai} 并结合赋予的权重所构成, 公式如下:

$$W_i = \alpha W_{ei} + \beta W_{ai}. \tag{12}$$

由于当前未有关于衡量层次分析法和熵权法所得权重在评价同一问题时的重要性取值的方法, 出于客观考虑, 在本文中, $\alpha=0.5$, $\beta=0.5$, 即两者所得的结果重要性均等.

4 实例分析

4.1 光污染指标模型的求解

为了使模型具有普适性,需要大量准确且可靠的数据. 本文收集并整理互联网上的信息,最终搜集到全球 145 个国家或地区的数据,且将它们应用到模型中,这些数据可以有效帮助模型的求解及确保其准确性. 主要数据来源见表 3.

表 3 参数的值和说明	
数据库	网址
World Bank	https://data.worldbank.org.cn/
VIIRS Country statistics	https://www.lightpollutionmap.info/LPstats/
NOAA	http://www.noaa.gov/web.html

在计算每个指标的最终权重之前,需要对判断矩阵进行测试. 参数值如表 4 所示. 由于 $CR < 0.1$, 因此本文所构建的判断矩阵是可靠的,并可以通过一致性测试.

表 4 参数的值和说明		
参数	值	说明
λ_{\max}	7.1898	最大特征值
CI	0.0316	一致性指标
CR	0.0233	一致性比率

在光污染指数体系的基础上,结合本文所收集的全球 145 个国家或地区的数据,计算出指标的权重. 光污染指标体系中各指标的权重结果如表 5 所示.

表 5 指标权重							
指标	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
W_{ci}	0.241	0.421	0.011	0.025	0.079	0.018	0.205
W_{ai}	0.159	0.109	0.036	0.047	0.027	0.255	0.367
W_i	0.200	0.265	0.023	0.036	0.053	0.137	0.286

由于需要评价不同地点的光污染水平,因此需要根据它们所受光污染的不同程度来进行等级划分. 为了简化问题,采用层次聚类法,SPSS 帮助对这 145 个国家或地区的结果进行聚类. 然后根据聚类的结果确定不同光污染水平的得分范围与分级. 光污染水平及其相应的得分范围见表 6.

表 6 聚类结果	
光污染程度	分数范围
轻度光污染	[0, 0.133)
中度光污染	[0.133, 0.252)
重度光污染	[0.252, 0.359)
严重光污染	[0.359, 1]

最终, 本文随机选择了 15 个国家或地区的 LPI 以及其对应的光污染程度分级的结果. 见表 7 和图 2 所示. 与实际情况相比, 模型所得出的结果与现实情况相差无几.

表 7 15 个国家的 LPI

序号	国家	LPI	排名	序号	国家	LPI	排名
1	巴林	0.2958	3	9	阿曼	0.2512	6
2	中国	0.0750	95	10	波兰	0.0947	57
3	芬兰	0.1884	15	11	卡塔尔	0.3583	2
4	德国	0.1371	32	12	新加坡	0.6738	1
5	希腊	0.1225	40	13	瑞典	0.1617	21
6	日本	0.0837	76	14	美国	0.2013	12
7	印度	0.1295	36	15	赞比亚	0.0417	141
8	卢森堡	0.2764	4				

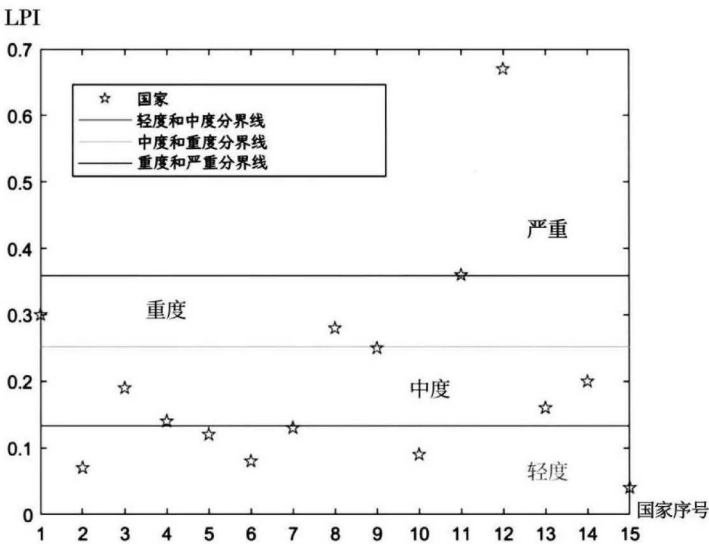






图 2 15 个国家的光污染等级分布

4.2 光污染指标模型的应用

在此节中, 光污染指标模型将用来评估本文所选代表性地点的光污染水平. 这些代表性地点是: 上海、开封市、张家口市和神农架林区, 它们对应着四种不同类型的地点: 城市社区、郊区社区、农村社区和保护地. 根据这四个地区分别搜集指标数据并带入模型求解它们的 LPI , 并判断结果是否可以印证模型的正确性.

由于缺少每千人夜间照明的直观性数据, 因此将中国的市、县级区域所划分的数据以及从美国 NOAA 所获得的 NPP/VIIRS 数据导入到 ArcGIS 中, 再对四个地点的灯光数据进行了投影、重采样、剪裁和去噪等预处理. 最后, 计算出四个地点的该指标的值, 同时得到每个地点的光强分布图. 具体数据见表 8.

表 8 光污染区地图以及相关数据

地点	上海	开封	张家口	神农架林区
光污染地图				
X_1	22600	6956.52	5514.28	6552
X_2	3923	1200.56	113.29	20.48
X_3	15	16.69	13.59	7.1
X_4	26	45.85	50	90.97
X_5	1554.6	997.56	461.2	1170.2
X_6	100	100	100	100
X_7	76.32	46.32	22.79	1.43

从表 9 的结果可以看出, 通过本文所建立的光污染指标模型得出的结果与实际情况相符合, 因此该模型可准确判断各类型地区的光污染情况, 其具有较强的普适性. 并且在上述结论的基础上, 结合指标数据的变化, 最终也产生了比较准确的结果. 这也反映出该模型可以从更全面、更综合的角度评估不同地区的光污染风险水平.

表 9 4 个地点的 LPI 和光污染等级

地点	神农架林区	张家口	开封	上海
LPI	0.0699	0.0742	0.1561	0.4157
光污染等级	轻度光污染	轻度光污染	重度光污染	严重光污染

4.3 灵敏度分析

在确定最终权重 W_i 时, 两个参数是 $\alpha=0.5, \beta=0.5$, 但这两个参数的值并不是固定的. 因此对其进行灵敏度分析是非常必要的, 需要观察它们的变化会对光污染指数 LPI 产生怎样的影响. 分别设置系数 0.1、0.3、0.5、0.7 和 0.9 进行敏感性分析. 结果如图 3 所示.

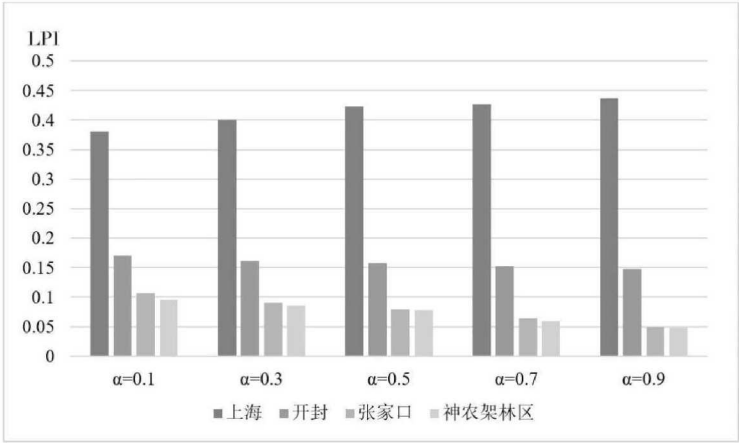


图 3 参数 α 的灵敏度

从图 3 中可以看出, 系数的变化不会对模型的结果产生很大的影响. 4 个地点之间的相对关系基本不变, 各个地点的 LPI 变化也很微小, 可以说本文构造的模型是稳定的.

5 本方案的优势

其一, 根据资料搜集, 国内对光污染的研究不足, 缺乏有关对光污染水平的综合性评价方案; 其二, 本文在指标的选择上考虑了多重方面, 不单单只选择能够反映光照情况的直接指标, 还从经济和环境角度选择指标进行辅助判断, 而现今存在的大部分方法只选择直接相关性的指标例如遥感数据等. 与本文相类似的综合性指标评价体系, 如江萌萌^[17]从经济、生态、物种多样性三个方面构建的光污染风险水平评价指标体系, 其中缺少了直接相关性指标; 其三, 本文 Topsis 方法中用于计算的权重是由层次分析法和熵权法两相结合所得, 通过该方式获取的权重值在具有客观性的基础上辅以主观性, 结果会更加合理和准确. 但现存的综合性光污染评价方案中仅使用了熵权法; 其四, 在对结果进行分类时, 本文使用层次聚类分析, 该算法可解释性好, 且有研究表明^[18]其算法能产生高质量的聚类, 优于较多聚类算法; 其五, 本文用于求解模型的数据集较大, 共搜集了全球 145 个国家地区的数据作为支撑, 因此模型的稳定性较好.

6 总 结

本文建立了一个评价光污染水平的多层模型. 首先, 评价的指标从三个方面: 经济、环境和夜间灯光强度考虑, 并选择了合适的七个具体指标, 初步建立了一个与光污染程度相关的综合评价指标体系. 为了使各指标的权重更加合理和科学, 本文将 AHP 方法得到的主观权重与熵权法得到的客观权重相综合. 最终确定的权重值是两者相加的结果, 在本文中, 所选取的两个权重的系数都是 0.5. 接着, 用 Topsis 方法来优化光污染风险的得分. 为增加模型的说服力, 通过搜集大量的数据, 将模型应用于 145 个地区, 并借助聚类分析构建了四个光污染程度等级: 轻度 (0~0.132), 中度 (0.133~0.251), 重度 (0.252~0.358), 严重 (0.359~1). 最后, 以 4 个各具显著特点的地区: 保护地、农村社区、郊区社区和城市社区的具体选址, 用光污染指标模型计算这些地区的光污染风险分数. 从结果来看, 本文所提出的评价模型基本符合实际情况. 通过灵敏度分析进一步证明了该模型是合理和客观的.

参考文献

- [1] 刘昭丽, 江霜英. 玻璃幕墙光污染环境影响评价案例分析 [J]. 四川环境, 2009, 28(5): 85-90.
- [2] Elvidge C D, Baugh K, Zhizhin M, et al. VIIRS night-time lights[J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(21): 5860-5879.
- [3] 郭晗. 珞珈一号科学试验卫星 [J]. 卫星应用, 2018(7): 70.
- [4] Treanor P J. A simple propagation law for artificial night-sky illumination[J]. The Observatory, 1973, 93: 117.
- [5] 刘鸣, 郝庆丽, 刘玥. 遥感技术在城市夜间光污染研究中的应用进展 [J]. 照明工程学报, 2019, 30(2): 109-116.
- [6] 征汶. 光污染测量方法 [J]. 灯与照明, 2021, 45(3): 9-14.
- [7] Katz Y, Levin N. Quantifying urban light pollution — A comparison between field measurements

- and EROS-B imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 177: 65-77.
- [8] 汤雪峰. 实验探索光污染对生物体的影响 [D]. 南京航空航天大学, 2006.
- [9] Lao S, Robertson B A, Anderson A W, et al. The influence of artificial light at night and polarized light on bird-building collisions[J]. Biological Conservation, 2020, 241.
- [10] 刘鸣, 张宝刚, 潘晓寒, 等. 城市照明规划中光污染评价指标与方法研究 [J]. 照明工程学报, 2012, 23(04): 22-27, 55.
- [11] 陈超, 曹永策. 基于熵权 TOPSIS 的我国上市房地产企业融资能力评价研究 [J]. 辽宁工业大学学报 (社会科学版), 2023, 25(3): 25-27.
- [12] 黄梦婷, 李建国. 基于层次分析法的河湖健康评价研究 [J]. 水利技术监督, 2023, 2: 13-15, 64.
- [13] 谢莉, 房巧丽, 吴彦瑜, 等. 中国光环境质量管理体系研究 [J]. 环境保护科学, 2013, 39(4): 93-96.
- [14] Xiao Q L, Wang Y, Zhou W X. Regional economic convergence in China: A comparative study of nighttime light and GDP[J]. Frontiers in Physics, 2021, 9: 525162.
- [15] Geng Y Q, Huang F C. Coupling coordination between higher education and environmental governance: Evidence of western China[J]. PloS one, 2022, 17(8): e0271994.
- [16] 王智德, 袁景玉, 姚胜, 等. 夜间人工照明光污染研究现状 [J]. 照明工程学报, 2021, 32(3): 94-99.
- [17] 江萌萌. 基于熵权法与 TOPSIS 方法的光污风险水平评价 [J]. 光源与照明, 2023(6): 40-42.
- [18] 石燕霞. 经济技术指标的统计聚类与分类方法探索 [J]. 环渤海经济展望, 2023(9): 164-166.

Model and Case Study of Light Pollution Evaluation in Different Regions

JIANG Yi-fan¹, JIA Zhuo-yue², WANG Yi-lin², JIN Jing-liang³

(1. School of Software, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

(2. School of Computer Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

(3. School of Science, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: With the rapid development of society and economy, environmental problems are becoming more and more prominent, and light pollution is a new type of environmental pollution. Influenced by various factors, the light pollution level varies in different regions. In this paper, an evaluation model is constructed for analyzing the light pollution level in different regions. First, seven indicators related to socio-economic, environmental, and nighttime lighting intensity are selected to build the indicator system; then, the entropy weighting method and the judgment matrix in hierarchical analysis are used to obtain the comprehensive weight of each indicator; finally, the light pollution level score is calculated by TOPSIS. With the help of cluster analysis, the light pollution level is divided into four levels: mild, moderate, severe, and serious. Meanwhile, relevant data corresponding to four types of locations: Shanghai, Kaifeng City, Zhangjiakou City and Shennongjia Forest Area, respectively, are selected to calculate the light pollution scores and judge the levels of these locations. Compared with the actual, it was found that the model can accurately assess the light pollution level in different types of areas and convey effective information. Finally, the stability and accuracy of the model were further demonstrated by sensitivity analysis.

Keywords: light pollution index; evaluation model; entropy weight method; cluster analysis