

## 基于博弈组合——秩和比法的区域光污染风险分类研究

Jintang Gong, Chuhui Lin, Yonghuang Wu, Sisi Zheng\*

School of Mathematics and Statistics, Huizhou University, Huizhou, Guangdong

**【摘要】**随着社会的不断发展,光污染已成为区域治理与可持续发展领域的热点问题,对区域光污染风险等级进行准确、有依据的划分具有很高的研究价值。本文选取中国 31 个省区作为研究样本,结合社会发展、人口等 5 个层次,采用多阶段指标构建了光污染风险等级评价指标体系。采用层次分析法(AHP)和熵权法确定各指标的主客观权重,并基于博弈论通过最小化基本权重之间的偏差来确定组合权重。结果显示,权重排名前三的分别为地区人均 GDP、城镇人口密度和全体居民人均消费支出。在此基础上,建立了秩和比综合评价模型。31 个研究样本的光污染风险等级分为四个等级,其中高风险区 3 个,中高风险区 13 个,中等风险区 13 个,低风险区 2 个。

**【关键词】**熵权层次分析法;博弈论原理;秩和比综合评价法;光污染风险等级

**【基金项目】**广东省基础与应用基础研究基金省市联合基金项目(2022A1515110437);广东省高校重点平台与科研项目青年创新人才项目(2018KQNCX251);惠州学院 2021 年度院级教学质量与教学改革项目(X-JYJG2021047);惠州学院教授博士科研项目(2018JB016)

**【收稿日期】**2025 年 3 月 15 日

**【出刊日期】**2025 年 4 月 16 日

**【DOI】**10.12208/j.epm.20250004

### Study on regional light pollution risk classification based on game combination—Rank sum ratio method

Jintang Gong, Chuhui Lin, Yonghuang Wu, Sisi Zheng\*

School of Mathematics and Statistics, Huizhou University, Huizhou, Guangdong

**【Abstract】**With the continuous development of society, light pollution has become a hot issue in the field of regional governance and sustainable development. It is of high research value to make accurate and based classification of light pollution risk levels in a region. In this paper, 31 provinces and regions in China were selected as research samples, combined with social development, population, and other five levels, and multi-stage indicators were used to construct a light pollution risk level evaluation index system. The subjective and objective weights of each index were determined by the analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight method, and the combined weights were determined by minimizing the deviation between the basic weights based on game theory. The results showed that the top three weights were regional per capita GDP, urban population density, and per capita consumption expenditure of all residents respectively. On this basis, a rank-sum ratio comprehensive evaluation model was established. The light pollution risk levels of 31 research samples were divided into four levels, including 3 high-risk areas, 13 medium-high-risk areas, 13 medium-risk areas, and 2 low-risk areas.

**【Keywords】**Entropy-hierarchical analysis, Principles of game theory, Rank-sum ratio comprehensive evaluation method, Light pollution risk level

#### 1 简介

近年来,光污染引发的环境和社会问题日益严重。光污染的概念最早由国际天文学界在 20 世纪 30

年代提出,当时天文学家认为城市的明亮灯光对天文观测影响巨大<sup>[1-3]</sup>。光污染是一种新的环境污染源,主要包括白昼污染、人工日光污染和照明污染,

\*通讯作者: Sisi Zheng

注:本文于 2023 年发表在 OAJRC Environmental Science 期刊 4 卷 2 期,为其授权翻译版本。

同时，光污染现象也被称为光侵入、过度照明和杂散光。

如今，光污染更多地指任何过度或不当的人造光使用，简单来说，它是一种对人类和自然环境产生负面影响的光。其次，光污染的影响也难以忽视，它不仅改变星空视野，影响人类健康，还会对野生动物和生态环境产生负面影响。

学者们也对光污染的影响开展了相关研究。Khanduri 等<sup>[4]</sup>研究了 2012 年至 2020 年保护区内及附近光污染的存在情况，光污染严重影响了河岸动物群的活动。Czaja 等<sup>[5]</sup>研究了光污染如何影响城市乔灌木的春季发育，发现光污染会影响落叶乔木种的春季物候和生理，例如，光污染会降低杨树、灰树花、泡桐和油菜等树梢中可溶性糖的含量。苏<sup>[6]</sup>研究了居住区夜间光污染环境，主要包括眩光污染、侵入光污染和溢流散光污染，其研究目标是实现光污染环境定量评价，最终形成一套较为完善的居住区光污染定量评价模式。姜<sup>[7]</sup>研究利用熵权法和 TOPSIS 法建立光污染风险评价模型，选取经济社会发展水平、生态环境水平、生物多样性水平等指标，提出降低区域光污染风险的干预策略，并结合 2023 年美国数学建模竞赛的背景（本组学生荣获本届美国数学建模竞赛 F 奖，即获得大奖提名）。数据来源：<https://www.comap.com/contests/mcm-icm>，从当地发展水平、人口、生物多样性、气候、地理环境等因素选取指标，构建数学模型，确定区域光污染风险等级高低。

## 2 光污染风险等级评价指标体系

### 2.1 构建指标体系

中国是世界上最大的发展中国家，中国大陆各省发展相对不平衡，对中国大陆各省光污染风险等级进行划分，建立光污染综合评价模型具有很高的研究价值。

光污染的影响可能取决于：（1）当地发展水平：一个地区发展水平越高，往往代表该地区城市化程度越高，城市化会带来更多的人口和经济活动，而发展水平较高的地方通常拥有更多的商业、工业和娱乐设施，从而增加人工照明和夜间活动，造成更严重的光污染。（2）当地人口：随着人口的增长，区域人口密度也会增加，城市对人工照明的需求增加。同时，人口稠密的地区通常有更多的建筑物和道路，这些建筑物和路灯在夜间会产生大量的光，进一步加剧光污染。（3）当地生物多样性：光污染会破坏植物的生态，扰乱其正常行为和生理功能；阻碍动物的繁殖和迁徙；扰乱生物体内部的生物钟，对生物体的生命周期、生理过程和生态相互作用产生重大影响。（4）当地地理：当地的地理位置会对光污染程度产生影响。有些地理位置位于自然保护区、暗夜保护区内，光污染可能较少。（5）当地气候：当地降雨可以冲刷大气中的颗粒物，减少光污染的散射和传播；降雨增多可以去除大气中的颗粒物，减少其对光污染的贡献；降雨减少可能导致颗粒物堆积，增加光污染；某些天气条件可能会影响对光污染的观测和感知。

考虑到光污染与其影响因素之间的内生相关性，本文选取中国国家统计局（<http://www.stats.gov.cn/>）中的中国大陆 31 个省区作为研究样本，构建了如表 1 所示的光污染风险水平评价指标体系。

表 1 光污染风险等级评价指标体系

| 目标层 A       | 一级指标 B     | 二级指标 C                         | 单元      |
|-------------|------------|--------------------------------|---------|
| 光污染风险等级 (A) | 发展水平 (B1)  | 消费者物价指数 (C1)                   | /       |
|             |            | 人均地区生产总值 (C2)                  | 亿元人民币   |
|             |            | 人均消费支出 (C3)                    | 元       |
|             | 人口 (B2)    | 出生率 (C4)                       | ‰       |
|             |            | 人口密度 (C5)                      | 每平方公里人口 |
|             | 生物多样性 (B3) | 森林覆盖率 (C6)                     | %       |
|             |            | 农业总产值指数 (C7)                   | /       |
|             | 地理 (B4)    | 生活垃圾无害化处理率 (C8)                | %       |
|             |            | 人均水资源量 (C9)                    | 每人立方米   |
|             | 气候 (B5)    | 单位面积 SO <sub>2</sub> 排放量 (C10) | 吨/平方公里  |
|             |            | 单位面积氮氧化物排放量 (C11)              | 吨/平方公里  |

## 2.2 确定指标权重

(1) 采用层次分析法(AHP)确定指标的主观权重。这是美国运筹学家 Saaty[8]提出的一种定量处理复杂结构、多准则决策下定性问题的常用方法。本文构建一级指标 B 对目标层 A 的判断矩阵如下:

$$\begin{pmatrix} 1 & 4 & 7 & 7 & 7 \\ 1/4 & 1 & 5 & 5 & 4 \\ 1/7 & 1/5 & 1 & 1 & 1/3 \\ 1/7 & 1/4 & 3 & 3 & 1 \\ 1/7 & 1/3 & 2 & 2 & 1/2 \end{pmatrix}$$

同理,构建指标层 C 针对准则层  $B_i (i=1,2,\dots,5)$  的判断矩阵。

按照 AHP 的流程,利用 Python 求解配对比较矩阵的最大特征值  $\lambda_{\max}=5.249$ ,得到归一化的特征向量  $WB=(0.55947, 0.22670, 0.09692, 0.04527, 0.04527)T$ 。其中  $CI=0.0621$ ,  $RI=1.11$ ,  $CR=0.056 < 0.1$ ,该矩阵满足一致性要求。同理,经计算,  $WB_1 \sim WB_5$  也满足一致性要求。最后采用 SPSSPRO 主观权重:

$w_1=(0.048, 0.36, 0.152, 0.038, 0.191, 0.033, 0.011, 0.032, 0.064, 0.018, 0.053)T$ 。

(2) 采用熵权法确定指标的客观权重。这是一种客观赋权方法,其依据的原理是:指标的变异程度越小,反映的信息量越少,相应的权重就越低。按照熵权法求解的步骤进行处理,可得:客观权重  $w_2=(0.06, 0.123, 0.123, 0.032, 0.239, 0.013, 0.012, 0.068, 0.034, 0.081, 0.215)T$ 。

(3) 运用博弈论方法确定组合权重。为了提高指标赋权的可靠性,选取层次分析法(AHP)和熵权法分别计算主客观权重,并基于博弈论[9]原理计算组合权重,以最小化组合权重与主客观权重的偏差。利用 Python 计算求解所得组合权重,可得  $w=(0.051, 0.295, 0.144, 0.036, 0.204, 0.027, 0.011, 0.042, 0.056, 0.035, 0.098)T$ 。

综合以上指标权重结果可知,影响一个地区光污染程度排名前三位的指标分别为该地区人均 GDP、城镇人口密度、全体居民人均消费支出,因此,在控制一个地区的光污染程度时,应综合考虑以上三个方面。

## 3 区域光污染风险等级划分

秩和比法<sup>[10]</sup>是一种有效的多指标评价方法。在一个矩阵中设置评价对象和 B 个评价指标,通过秩

变换得到无量纲统计量(RSR),并根据 RSR 值对评价对象的优劣进行排序,评价对象的 RSR 值越高,则其绩效越好。采用秩和比综合评价法对光污染风险等级进行划分。非整数秩法进行秩的编制,克服了整数秩法容易丢失原始指标定量信息的不足,是秩次与原始指标值之间定量的线性对应关系。

(1) 建立线性回归模型:以 RSR 为因变量,Probit 为自变量,使用 SPSSPRO 对 RSR 与 Probit 进行线性回归分析,回归方程的拟合度  $R^2=0.922 > 0.9$ 。可以看出,所建方程中自变量 Probit 与因变量 RSR 具有很高的线性相关性。

(2) 对回归方程进行 F 检验:  $P=0$ ,线性回归方程具有显著统计学意义,且 VIF 均小于 10,说明模型不存在多重共线性。

(3) RSR 分级对照表:我们将样本分为 4 个等级,1-4 分别代表样本区域光污染风险程度为低风险、中风险、中高风险、高风险。具体结果如下:4 级:天津市、上海市、江苏省;3 级:北京市、浙江省、宁夏回族自治区、陕西省、广东省、山东省、安徽省、河南省、新疆维吾尔自治区、河北省、辽宁省、山西省、内蒙古自治区;2 级:福建省、青海省、甘肃省、云南省、四川省、黑龙江省、海南省、广西壮族自治区、湖南省、湖北省、吉林省、江西省、重庆市;1 级:贵州省、西藏自治区。

从分类结果可以看出:(1)高风险地区有 3 个,中高风险地区有 13 个,中风险地区有 13 个,低风险地区有 2 个。(2)光污染风险等级为高、中、高风险表明该区域光污染严重,过高的光污染会导致天空亮度增加,使得星空观测受到阻碍,同时,长时间暴露在过多的光线下还可能对人们的健康产生不利影响,干扰人们的生物节律。光污染风险等级为中风险,表明该区域存在一定量的光污染,但是程度不高。光污染风险等级为低风险表明该区域不存在光污染,但是缺乏充足的照明可能影响交通道路安全。

## 4 总结与未来展望

随着社会的不断发展以及城镇化和工业化的快速发展,光污染已成为区域治理的重要议题之一。选取合适的指标,建立科学的评估体系,对区域光污染风险等级进行分级,可以提高公众和地方相关部门对区域光污染程度的认识。因此,更好地管理、

检测和控制光污染，减轻光污染对当地居民和生态环境的影响，对区域治理和可持续发展具有重要意义。在未来的研究中，本团队将致力于收集更多城市和区域的相关数据，并通过建立的光污染风险评估模型，对更多区域的光污染程度进行分级，希望为地方政府和相关部门认识和管理光污染提供相关帮助。同时，团队将在收集的数据中继续完善光污染风险等级评估模型。

### 参考文献

- [1] Liu M & Ma J. Effects of light pollution on ecology and countermeasures [J]. Shanghai Environmental Science, 2007, 26(3): 4.
- [2] Green R F, Luginbuhl C B, Wainscoat R J, et al. The growing threat of light pollution to ground-based observatories [J]. The Astronomy and Astrophysics Review, 2022, 30(1): 1.
- [3] Mariton L, Kerbiriou C, Bas Y, et al. Even low light pollution levels affect the spatial distribution and timing of activity of a “light tolerant” bat species [J]. Environmental Pollution, 2022, 305: 119267.
- [4] Khanduri M, Sah R, Ramachandran A, et al. Spatial-temporal expansion and determinants of light pollution in India's riparian habitats [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2023, 98: 106952.
- [5] Czaja M & Kolton A. How light pollution can affect spring development of urban trees and shrubs [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2022, 77: 127753.
- [6] Su X. Comprehensive evaluation of light pollution in residential areas [D]. Tianjin University, 2012.
- [7] Jiang Mengmeng. Light pollution risk level evaluation based on entropy weight method and TOPSIS method [J]. Light Sources and Lighting, 2023, (06): 40-42.
- [8] Deng Xue, Li Jiaming, Zeng Haojian, et al. Analysis and application of weight calculation method of analytic hierarchy process [J]. Mathematics in Practice and Understanding, 2012, 24(7): 8.
- [9] Xu Junliang, Su Luwen, Zhong Xiaolin, et al. Research on weight distribution of river health indicators based on game theory [J]. Jiangsu Water Resources, 2018, (12): 6.
- [10] Fu W, Fu Y, & Li W. Application of rank sum ratio method (RSR method) in environmental pollution health damage [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2012, 40(3): 3.

**版权声明：**©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**OPEN ACCESS**