

基于熵权-TOPSIS 法的光污染程度分析及防治策略研究

王东旭¹，马龙^{*,2}，焦治霖³，任晓彤³

(¹沈阳建筑大学 土木工程学院 110168;²沈阳建筑大学 理学部 110168;

³沈阳建筑大学 交通与测绘工程学院 110168)

摘要：“照明工程”发展的同时，光污染的问题也随之浮出水面，并且对人类的生存发展造成巨大威胁。在此背景下，我们选取中国 12 个有代表性的地区，基于珞珈一号遥感卫星提供的数据，建立光污染综合评价模型。选取所在区域的 GDP、人口数量、用电量、成年人睡眠时长、亮度等级以及野生动植物的种类作为一类指标，运用熵权-TOPSIS 法进行数学建模，计算得出评价对象与最优方案的距离，以及针对光污染的评价模型。并采用 RSR 法进行分档，将光污染等级划分为五大类，即非常严重，严重，中度，一般，无污染。为平衡科技发展与光污染问题的关系，我们提出了治理策略以缓解光污染的危害。本文为有关部门进行光污染调查分析以及光污染的治理提供了有效的参考。

关键词：光污染；TOPSIS 法；熵权法；RSR 法；治理策略

1 研究背景

近年来光污染已成为国际学术界特别关注的、涉及全球环境的学术问题，其主要包括白亮污染、人工白昼、彩光污染三种。光污染直接或间接地、持续地影响生态环境、动物和人类身心健康以及天文观测^[1]。同时对城市环境、生态系统以及社会生活造成了审美破坏、安全感降低、美丽夜空消失、能源浪费等危害。光污染作为城市夜景照明中的副产品，具有表现形式多、影响范围广和传播速度快等特点。如果城市缺乏良好的规划、设计与监控，“光”将进一步加深对城市夜间环境的污染。已有研究表明，夜空亮度每年的增长速度不会低于 3%。如果按此速度增长，23 年后夜空亮度将还会增加一倍^[2]。如下图 1 我们可以看到，高城市化水平的地区，往往光污染也更为严重（颜色越亮，光污染越高）。因此，为改善此类情况，急需对光污染进行控制。

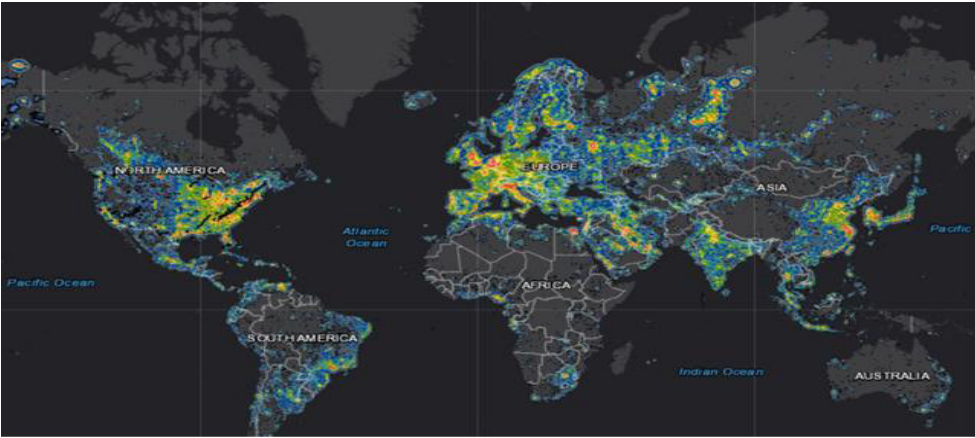


图 1 光污染分布图

（该地图基于科学家 Fabio Falchi 课题组发布的数据）

2 光污染产生影响因素分析与调查

通过查阅大量的资料和文献，我们发现，可以将光污染的主要影响因素归结为该地区的发展水平、人口数、地理气候、生物多样性、空间范围、人造光强度等。根据珞珈一号遥感卫星获取国内各地的灯光图进行数据分析，如图 2 所示。

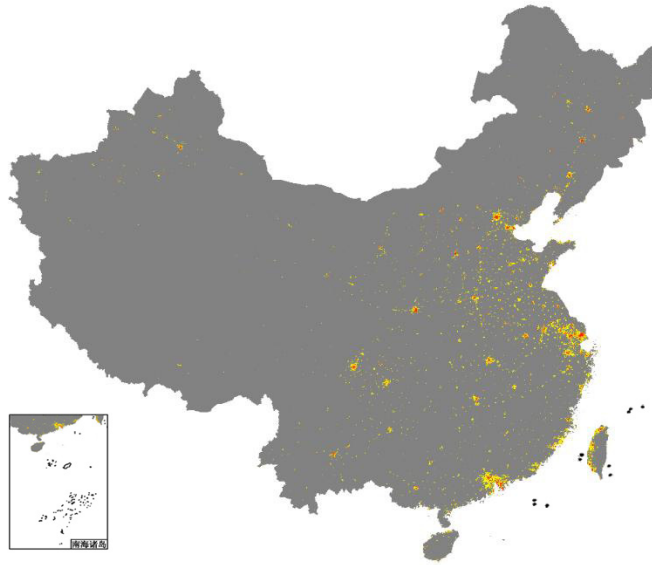


图 2 珞珈一号遥感卫星光遥感图像

我们选取国内 12 个城市为研究对象，分别是：北京市、上海市、石家庄市、沈阳市、成都市、乌鲁木齐市、南京市、拉萨市、呼和浩特市、广州市、西安市、郑州市，并以数据为支撑，对所选城市的各项指标因素进行统计分析。通过数据分析，我们可知，光污染越大的区域内，发展水平普遍越高，常住人口也越多，气候条件通常适宜居住，且交通便利，空间范围相对较小，但由于城市化水平过高，破坏了当地的物种多样性；而光污染越小的地区，区域发展水平越低，常住人口也更少，空间范围反而更大，物种多样性更加丰富。甚至某些无人居住的地区，光污染基本上不存在，且在气候适宜的地区，物种多样性极为丰富。鉴于此，我们最终基于所选城市的 GDP、人口数量、用电量、成年人睡眠时长、亮度等级及野生动植物的种类建立一个综合评价指标来评价某一城市的光污染风险等级。

3 基于熵权-TOPSIS 法的综合评价模型建立

TOPSIS 法是基于将原始数据归一化后的矩阵，将有限方案中的最佳方案与最劣方案形成一个空间，然后将待评价对象看做空间上的一点，分别衡量其与最佳方案及最劣方案的距离，而后比较不同评价对象与最佳方案的距离，得出优劣顺序^[3-6]。基于熵权法，我们能客观的确定各指标的权重，通过确定权重综合得出评价光污染的指标。

3.1 光污染因素系统建立

选取所在区域的 GDP、人口数量、用电量、成年人睡眠时长、亮度等级以及野生动植物的种类作为一级指标，建立综合评价指标来评价某一地区的光污染风险等级。为了便于后续的计算，我们使用集合 I 来描述这些指标，如公式（1）所示。

$$I=\{GD、PZ、PC、ST、BR、WS\} \quad (1)$$

其中，GD、PZ、PC、ST、BR、WS 分别代表 GDP、人口数量、用电量、成年人睡眠时长、亮度等级、野生动植物的种类。

3.2 模型的建立及求解过程

步骤一：根据上述选取的指标，我们确定出 GD、PZ、PC、BR 为正向指标，ST、WS 为负向指标。为了消除量纲的影响，我们将指标进行标准化处理，如公式（2）和（3）所示。

$$z_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij})^2}} \quad (2)$$

正向指标：

$$z_{ij} = \frac{x_{ij}^{-1}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij}^{-1})^2}} \quad (3)$$

负向指标:

式中 Z_{ij} 为标准化后的数值, X_{ij}^{-1} 为观察值 X_{ij} 的倒数。

步骤二: 我们将每个指标的最大值作为最优值, 最小值作为最劣值, 如公式 (4) 和 (5) 所示:

$$T^+ = \left\{ \max(z_{ij}) \right\} = \left\{ \max z_{i1}, \max z_{i2}, \dots, \max z_{im} \right\} \quad (4)$$

$$T^- = \left\{ \min(z_{ij}) \right\} = \left\{ \min z_{i1}, \min z_{i2}, \dots, \min z_{im} \right\} \quad (5)$$

式中, T^+ , T^- 分别是最优值集合和最劣值集合。

步骤三: 采用欧式距离法计算最优距离及最劣距离, 具体公式如下:

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (T_{ij}^+ - z_{ij})^2} \quad (6)$$

最优距离:

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m (T_{ij}^- - z_{ij})^2} \quad (7)$$

最劣距离:

步骤四: 计算评价对象与最优方案的距离, 具体公式如下:

$$C_j = \frac{D_j^-}{D_j^+ + D_j^-} \quad (8)$$

当 D^- 值越大, 说明该研究指标距离最劣解越远, 则研究指标越好; C 值越大, 表明评价对象越优。根据 TOPSIS 法我们计算出各个城市的 C_j 值并进行排序, 结果如表 1 所示:

表 1 各个城市 C_j 值及排序

城市	正理想距离 (D^+)	负理想距离 (D^-)	C_j	排序
上海市	0.0296995	0.9906798	0.97089367	1
北京市	0.22868154	0.8398526	0.78598575	2
石家庄市	0.70103779	0.34501259	0.32982407	9
沈阳市	0.73993282	0.38167056	0.34029013	8
成都市	0.51721401	0.60152116	0.53767967	5
乌鲁木齐市	0.930613	0.10482044	0.10123339	12
南京市	0.50497946	0.67836535	0.57326093	4
拉萨市	0.91052876	0.32322911	0.26198748	10
呼和浩特市	0.89528099	0.25808214	0.22376486	11
广州市	0.26051274	0.79359559	0.75285961	3
西安市	0.54147971	0.5940094	0.52313086	6
郑州市	0.57019893	0.5076609	0.47098972	7

通过结果我们可以发现, 排名越靠前的城市, 其光污染程度越高, 与我们所查找的数据相吻合。

接下来我们利用熵权法计算各个指标的权重^[7-9], 首先我们先将原始数据标准化处理。设定评价指标数为 n , 评价单位数为 m , 其中 $i=1, 2, 3, \dots, n$; $j=1, 2, 3, \dots, m$ 。

$$Z_{ij} = (x_{ij} - x_j^{\min}) / (x_j^{\max} - x_j^{\min}) \quad (9)$$

正向指标采用公式:

负向指标采用公式：

$$Z_{ij} = (x_j^{\max} - x_{ij}) / (x_j^{\max} - x_j^{\min}) \tag{10}$$

计算信息熵与信息有效值。第 j 项指标的信息熵值公式为：

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m \int_{ij} \ln \int_{ij} \tag{11}$$

其中 $\int_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^m$ 为第 i 个评价对象的第 j 项指标占该指标总值的比重 $\ln \int_{ij}$ 为评价对象 i 再第 j 项指标的值。第 j 项指标的信息效应值为：

$$d_j = 1 - e_j \tag{12}$$

最后我们计算指标权重，第 j 项指标的权重为：

$$w_j = d_j / \sum_j d_j \tag{13}$$

各指标的权重计算结果如表 2 所示，各城市数据标准化处理如表 3 所示。

表 2 各因素所占权重比

因素	信息熵值 e	信息效用值 d	权重 (%)
GD	0. 84	0. 16	22
PZ	0. 857	0. 14	20
PC	0. 887	0. 113	14
ST	0. 876	0. 124	17
BR	0. 892	0. 108	16
WS	0. 924	0. 076	11

表 3 各城市数据标准化处理

地区	GDP/亿元	人口/万人	野生动植物 数量/种	用电量/亿千 瓦时	成年人睡眠 时长/h	亮度等级
上海市	1	1	0. 09	1	0	1
北京市	0. 93	0. 86	0. 51	0. 70	0	0. 8
石家庄市	0. 14	0. 36	0. 68	0. 24	0. 7	0. 6
沈阳市	0. 15	0. 20	0. 05	0. 21	0. 8	0. 4
成都市	0. 45	0. 83	1	0. 40	0. 4	0. 8
乌鲁木齐市	0. 07	0. 06	0. 92	0. 23	1	0
南京市	0. 37	0. 28	0. 17	0. 37	0	1
拉萨市	0	0. 01	0. 04	0	0. 8	0
呼和浩特市	0. 06	0	0. 25	0. 06	1	0. 2
广州市	0. 65	0. 71	0. 09	0. 63	0. 1	1
西安市	0. 23	0. 45	0	0. 26	0. 28	0. 8
郑州市	0. 28	0. 43	0. 06	0. 32	0. 36	0. 4

根据熵权法的基本原理，我们可以知道，若某个指标的信息熵值 e 越小，说明表面指标变异程度越大，提供的信息量越多，在综合评价中所能起到的作用也越大，其权重指标 ω_i 也就越大。相反，若某个指标的信息熵值 e 越大，说明表面指标变异程度越小，提供的信息量越少，在综合评价中所能起到的作用也越小，其权重指标 ω_i 也就越小。上表显示权重大小顺序为：GD、PZ、ST、BR、PC、WS。由此得出综合评价指标 V 的计算公式如下所示：

$$V=\sum_{i=1}^6\omega_iI_i \tag{14}$$

$$V=0.22I_1+0.20I_2+0.14I_3-0.17I_4+0.16I_5-0.11I_6 \tag{15}$$

表 4 各城市 V 值

地区	上海市	北京市	南京市	广州市	石家庄市	沈阳市
V 值	0.7299	0.6587	0.3679	0.5601	0.4262	0.3079
地区	成都市	西安市	郑州市	乌鲁木齐市	拉萨市	呼和浩特市
V 值	0.6270	0.3526	0.3408	0.3308	0.1424	0.2511

如表 4 所示，该指标 V 的值越大，代表该地区光污染程度越高。我们利用 RSR 法将所得结果进行分档处理，共分为五档：非常严重，严重，中度，一般，无污染。由 RSR 法我们获得回归方程： $y=-0.87+0.269*\text{Probit}$ ，模型 $R^2=0.945$ ，方程具有统计学意义，并且模型拟合度较好，如表 5 和表 6 所示。

表 5 各地区 RSR 排名及分档等级

地区	RSR 排名	Probit	RSR 拟合值	分档等级
上海市	1	7.036834131701388	1.0203546927356872	5
北京市	2	6.382994127100638	0.8446782346429995	4
成都市	3	5.967421566101701	0.7330204665604549	4
广州市	4	5.674489750196082	0.6543143251208807	4
石家庄市	5	5.430727299295458	0.5888192136427093	3
南京市	6	5.210428394247925	0.5296283854766051	3
西安市	7	5.000000000000000	0.473089607299243	3
郑州市	8	4.789571605752076	0.4165508291218811	3
乌鲁木齐市	9	4.569272700704542	0.3573600009557767	3
沈阳市	10	4.325510249803918	0.32186488947760525	3
呼和浩特市	11	4.032578433898299	0.21315874803803103	2
拉萨市	12	3.617005872899362	0.10150097995548635	2

表 6 各城市污染等级

分类	Probit	RSR 临界值 (拟合值)	
无污染	<3.2	<-0.0105	
一般	3.2~	-0.0105~	呼和浩特、拉萨
中度	4.4~	0.3119~	石家庄、南京、西安、郑州、乌鲁木齐、沈阳
严重	5.6~	0.6343~	北京、成都、广州
非常严重	6.8~	0.9567~	上海

4 结语

随着科技的发展，人造光源的大肆滥用，光污染越来越成为我们不可忽视的环境问题。因此，我们必

须采取必要的干预策略来应对光污染问题。通过分析上文分析,我们提出了以下三条治理策略:

4.1 减少夜晚光照时间

- (1) 规定商业区的灯光照明时间。禁止使用耀眼的灯光来吸引顾客。
- (2) 建议工厂园区改变保护设备部件安全的方式,如安装红外监控,不要过度使用照明设施。
- (3) 在自然保护区等地方建立规章制度,减少该地区游客的夜间活动,从而减少光污染的程度,减轻对野生动物生物多样性的影响。

4.2 提高政府对光污染的管理水平

- (1) 实施环境宣传公共教育,增强公众对光污染的认识,实现全民参与防治的效果。
- (2) 加大对防治光污染研究的资金投入,提高科技水平解决光污染问题,如改变照明的光谱组成。
- (3) 从严审核照明设施的技术标准,规定可审批通过的照明设施各项指标,进而降低人造光源对天空的危害,有效缓解光污染问题。

4.3 合理使用玻璃幕墙

- (1) 在城市规划时,防止玻璃幕墙广泛分布和过于集中^[10]。
- (2) 降低玻璃的反射率以减弱光污染。一种是开发新型的玻璃材料,另一种是对现有的玻璃加以处理,比如玻璃贴膜技术。

参考文献

- [1]汤雪峰,赵志敏,许文菊等.光污染对生物体的影响及危害[C].江苏、山东、河南、江西、黑龙江五省光学(激光)联合学术年会.2005.35-35.
- [2]王亚军.光污染及其防治[J].安全与环境学报,2004,4(1):56-58.
- [3]赵静,王婷,牛东晓.用于评价的改进熵权TOPSIS法[J].华北电力大学学报:自然科学版,2004,31(3):68-70.
- [4]田凤调.秩和比法及其应用[J].中国医师杂志,1993,4(2):115-119.
- [5]孙振球.医学综合评价方法及其应用[M].北京:化学工业出版社,2006.
- [6]胡永宏.对TOPSIS法用于综合评价的改进[J].数学的实践与认识,2002,32(4):572-575.
- [7]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].照明工程报,2012,23(4):22-27.
- [8] Shih H S, Shyur H J, Lee E S. An extension of TOPSIS for group decision making[J]. Mathematical & Computer Modelling, 2007, 45(7):801-813.
- [9]李秀玉.2002~2003年度澳门湿地保护区水体水质调查与分析[D].暨南大学,2006.
- [10]李风,玻璃幕墙与绿色建筑[J].华中建筑,2003,21(3):52-53.