

基于 EWM-TOPSIS 的光污染评价与优化

摘要：为了缓解日益严重的光污染现象，本文将通过建立数学模型，对光污染风险等级评价和光污染治理的相关问题进行分析。

针对问题 1，本文首先建立了影响区域光污染风险等级的 7 个因素的分层互动评价指标体系；在此基础上，建立了光污染风险等级评价模型。将熵权法与 TOPSIS 相结合，对选定的特定地点进行评价，旨在制定光污染风险等级的指标。

对于问题 2，为了直观地反映四类地点的光污染风险水平，本文以中国陕西省为研究区域，利用 ArcGIS 地理信息软件计算样地的几何形状中心，提取各指标的数据。在此基础上，应用构建的光污染风险等级模型对四类地点的光污染等级进行测度，绘制出 2022 年陕西省光污染风险分布图。结果表明，以陕西省西安市为代表的城市社区光污染风险等级最高，为 0.407；保护地、农村和城郊社区的光污染风险评分分别为城市社区的 1.1%、6.8%和 68.6%。

针对问题 3，本文提出了三种光污染治理策略，并定量分析了三种光污染治理策略对各光污染风险等级评价指标的影响。从而构建光污染治理优化模型，对影响光污染风险等级的评价指标进行优化。最后，结合优化后的光污染风险值，分析光污染治理的潜在影响。

对于问题 4，在 4 种类型的站点中选择自然保护区和城市社区进行评价，并应用光污染治理优化模型对这两个站点的 3 种光污染治理策略的有效性进行分析。为了确定评价点短期(0-10 年)、中期(11-35 年)和长期(36-50 年)的最优改善策略，本文采用 Logistic 方程对人口数据进行预测，并结合其他因素的预测值，采用阿丽玛时间序列法进行优化光污染评分计算。对比优化前后的风险水平，结果表明：城市社区短期、中期和长期的最优改善策略分别为提高居民光污染治理意识策略、规范市场标准策略和建立健全社会监测机制策略；而未来 50 年，由于保护地本身光污染风险水平较低，不易受外部因素影响，三种最优策略对保护地治理的效果并不明显。对于城市社区而言，在光污染治理后的区域，犯罪率平均上升了 2.140%，交通事故率平均下降了 2.135%。

最后，基于上述数学模型的求解结果，我们制作传单，在以中国西安为代表的城市社区宣传光污染治理措施。

关键词：光污染风险等级；EWM-TOPSIS 评价；阿丽玛；光污染治理

目录

基于 EWM-TOPSIS 的光污染评价与优化 1

1 介绍4

 1.1 背景4

 1.1.1 光污染4

 1.1.2 遮阳伞4

 1.2 问题重述5

2 我们的方法5

3 模型准备6

 3.1 假设6

 3.2 符号6

 3.3 研究区域和数据收集7

4 模型建立与结果分析 7

 4.1 模型一:光污染风险评价模型7

 4.1.1 建立互动评价指标体系7

 4.1.2 评价指标的预处理8

 4.1.3EWM-TOPSIS 评价模型的构建9

 4.2 模型二:光污染风险测量应用模型 11

 4.2.1 区域土地类型分类11

 4.2.2 评价场地的选择 12

 4.2.3 数据提取与处理 13

 4.2.4 模型二的解 14

 4.3 模型 III:光污染治理优化模型 15

 4.3.1 制订光污染处理策略16

 4.3.2 评价指标预测 16

 4.3.3 治疗策略影响的量化17

 4.3.4 判断治理策略的优劣势 19

 4.3.5 光污染处理的潜在影响 19

 4.4 模型四:光污染治理应用模型20

 4.4.1 研究地点的选择 20

 4.4.2 评价指标原始数据的预测20

 4.4.3 判断治疗策略的优缺点21

 4.4.4 光污染治理的潜在影响分析 23

5 模型的检验 24

6 模型的评价与改进 24

 6.1 模型的优势 24

 6.2 模型的弱点 24

参考文献 25

1 介绍

为了能够合理建模，本节将介绍光污染现象和论文中涉及的专有名词。它还将整理和评估该主题需要解决的问题。

1.1 背景

1.1.1 光污染

根据文献[1]，光污染又称光损害，是人类进入工业社会后过度使用人造光而造成的一种生态破坏现象。光污染是工业发展的副产品，主要来自家庭照明、工业照明、娱乐活动、运动场地照明等。其常见形式包括光侵入、过度照明(如图 1)和光杂波(如图 2)。



图 1 The City of
Lights(<https://baike.sogou.com>)



图 2 多彩城市灯光(<https://baike.sogou.com>)

光侵入是指人造光覆盖自然状态下的黑暗区域的现象，而过度照明是指使用高于要求水平的光强度，从而对周围区域产生光干扰的现象。这两种现象在一定程度上是相互关联的，也就是说，过度照明会在同一时刻造成光侵入。光杂波是一种光污染现象，它是由光波长过多和颜色混合造成的。受光污染影响严重的主要国家是日本、美国等发达国家，以及中国等发展中国家的发达地区。光污染可能造成人类睡眠剥夺、压力、植物和动物生长节律紊乱等危害，可以通过采取措施改善照明系统、法律和监管体系来缓解。

1.1.2 遮阳伞

遮阳是一种建筑设计，通过改变光线的路径，降低阳光和光污染的危险。它经常被用在由

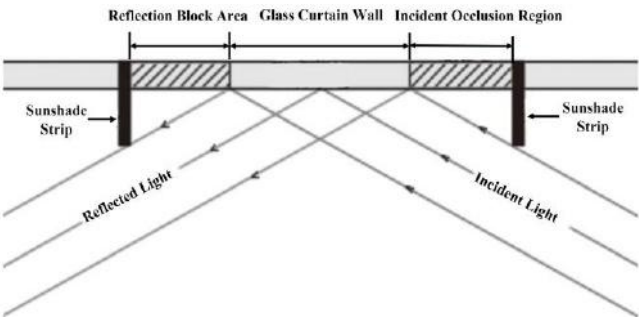


图 3 垂直遮阳的工作原理示意图(平面视图)

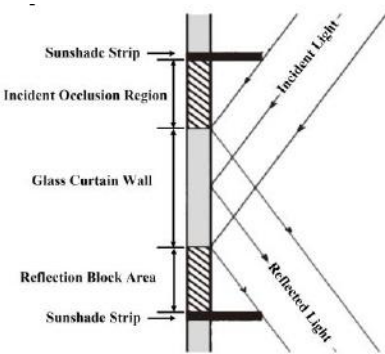


图 4 水平遮阳工作原理图(纵剖面)

市区玻璃窗帘材料[2]。遮阳篷可分为两类:垂直遮阳篷和水平遮阳篷。上面的图 3 和图 4 说明了每一类对应的工作原理。

由遮阳在玻璃幕墙上产生入射遮阳区和反射遮阳区，明显降低了玻璃幕墙的反射面积，从上述图的原理可以看出[2]。通过垂直遮阳和水平遮阳的同时使用，还可以将光线反射到地面或吸光材料上，有效减少人造光二次反射带来的光污染。

1.2 问题重述

光污染会对人们的日常生活和生态系统产生负面影响。本文整合了各种因素来评估光污染在不同地点的影响，并提出了一些可以减轻光污染影响的步骤，以提高人们对光污染影响的认识。以下是需要解决的具体问题:

- 1.建立一个评估模型，可以通过考虑该地区的人口、生物多样性、地理条件、气候条件和发展程度来评估任何地点的光污染风险水平。
- 2.应用光污染风险等级评价模型对问题涉及的四类地点的光污染风险等级进行评价，并对评价结果产生的原因进行分析。
- 3.针对光污染问题提出策略，并分析各优化策略的措施对光污染的影响，以及光污染改善对社会的潜在影响。
- 4.从四种类型的站点中选择了两个站点，以确定每个站点的最佳光污染管理策略。此外，对每种策略对光污染现象的影响进行了量化，并分析了各种影响的原因。
- 5.制作传单，在当地分发，宣传特定地点的光污染措施。

2 我们的方法

结合问题要求和相关背景资料，通过数据收集、处理和分析，本文的方法如下。

(三)光污染风险的测量

1.建立光污染风险评价模型

针对问题 1 所述规范，将建立基于光污染现象分类的分层互动评价指标体系，作为进一步评分的基础。然后循环使用熵权法以分层方式计算评价指标体系中的因素，并根据已收集的数据样本确定其权重。在对各种类型的数据进行标准化和规范化后，结合熵权法确定的权重，使用 TOPSIS 评价模型对指定的位置进行评分。然后可以使用评分结果和建立的光污染评级标准来计算指定地点的光污染风险。

2.建立光污染风险测度应用模型

为了解决问题 2，本文首先将研究区域的土地划分为问题指定的四种土地类型，并以中国陕西省为例。随后，ArcGIS 软件将使用 WGS1984 投影坐标系计算划分的地块的几何形状中心。分别使用提取值工具进行提取将指数的栅格数据分类到其关联的形状中心点，据此使用光污染风险评估模型确定形状中心光污染风险评分。最后，利用同一类型站点几何中心得分的平均值计算该类型站点的光污染风险值，消除了个体差异，提高了测量精度。

(四)光污染问题优化

3.建立光污染治理优化模型

对于问题 3，本文将光污染的原因及其影响的对象纳入其中，以便从主观和客观两个方面制定三种优化策略，每一种优化策略都包含强制性和软性要求的混合。然后将影响量化到基于预定措施的模型 1 建立的评价指标体系中，然后使用熵权法- topsis 评价模型对优化后的因子值再次打分，以确定改善措施实施后的光污染水平。为了比较三种策略的利弊，确定改善光污染对社会的潜在影响，对改善前后的光污染风险评级进行比较。

4.建立光污染治理应用模型

根据问题 4 的要求，为了考察各政策在极端情况下的适用性，合理确定三种政策下光污染风险中心位置的优化效果，我们将在陕西省划分样地的形式中心中选择 2022 年光污染得分差异最大的两个形式中心。为了研究不同策略在短期(未来 0-10 年)、中期(未来 11-35 年)和长期(未来 36-50 年)的适用性，我们将收集前几年对两个选定点的部分评价指标的数据，并在确定优化站点后，使用 Logistic 方程和 Arima 时间序列预测其未来 50 年的数值。最后，为了确定两个站点随时间的最优策略以及减少光污染的潜在效果，将预测的三个政策的原始值和优化值逐年添加到模型 1 中进行评价和比较。

在解决所有问题后，本文将根据模型结果和分析，选择特定地点的最优光污染改善策略，并撰写传单进行传播。

3 模型准备

3.1 假设

为了能够有效地解决问题，本文制定了以下合理的假设。

1.在接下来的 50 年里，研究区域的土地利用分区不会有实质性的变化。

说明:本研究根据标题中列出的四种立地类型，对研究区域的立地特征进行了大致的分类。新建、搬迁等带来的场址特征的小规模变化，对地块的整体特征影响不大。

2.在未来很长一段时间内，研究区域内场地的高程变化可以忽略不计。

解释:海拔是自然发生的特征，当地壳运动不剧烈时，即使是微小的变化与当前的基础相比也是微不足道的。

3.未考虑重大自然灾害或冲突造成的研究区域生态崩溃。

3.2 符号

本文使用的重要符号列于表 1。

Table 1 Notations		
Symbol	Definition	Unit
W_j	Index weight	/
D_i	Relative proximity	/
E_A	Illumination intensity	Lx
C_i	Crime rate	/
T_i	Traffic accident rate	/

3.3 研究区域和数据收集

中国的地理中心是陕西省，它位于中国的内陆，有许多大小城镇、郊区和农村地区。此外，陕西省还拥有 12 个自然保护区，其中秦岭自然保护区是中国最大的自然保护区之一，1996 年被全球环境基金评为亚洲示范保护区之一，其生物多样性显著且具有代表性。综上所述，本文选择陕西省作为研究地点，是因为该地区有四种不同类型的研究地点，具有较高的参考价值。

在本文中，在建模过程中使用了各种各样的经济统计和地理信息数据。这些数据主要包括夜间灯光分布数据、降水分布数据、DEM 数字高程图、GDP 分布数据、人口分布数据、生物多样性数据、建筑密度数据，以及中国陕西省在很长一段时间内抓获的犯罪嫌疑人数量和发生的交通事故数量。下面的表 2 列出了这些数据的来源。

表 2 数据来源汇总

Website	Data format
https://www.resdc.cn/Default.aspx	.tif
http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/	.tif
https://bio-one.org.cn	.xlsx
http://www.dsac.cn/	.xlsx
http://www.stats.gov.cn/	.xlsx

4 模型建立与结果分析

4.1 模型一:光污染风险评价模型

光污染的影响取决于多种因素。作为本节的研究对象，将利用评估光污染影响的 4 个要素和 7 个截然不同的评价指标，构建层次化互动光污染风险等级评价指标体系。并利用这些信息，利用 TOPSIS 法和熵权法相结合的完整评价方法，构建光污染风险等级评价模型。

4.1.1 建立互动评价指标体系

结合实际情况，综合考虑照明因素、社会因素、环境因素和政策因素，构建光污染风险等级评价指标体系。指标选取的原则如下：

➤照明因素

人造光是引发光污染现象的必要因素。夜间闪烁的霓虹灯和各种照明系统，在光强足够高的情况下，会造成城市出现人造日光现象，造成巨大的光污染。因此，本文以夜间光强为指标来衡量不同地区的照明因素，一个地区夜间光强越高，该地区的光污染风险水平越高。

➤社会因素

一个地区所需的照明系统数量和光污染的潜在风险都会随着一个地区的发展水平和人口规模而增加。为了衡量各地区的社会要素，本文采用国内生产总值(GDP)和人口规模作为指标

➤环境因素

一个地区的光污染风险程度还将取决于当地的环境情况，因为光污染除了对人类日常生活产生负面影响外，还会对生态环境产生重大负面影响。通常情况下，在海拔较高、人口较少的地区，光污染的风险较低，所需的照明系统数量也较少。各地的降水量也是一个需要考虑的重要方

面，因为光污染的一个重要原因是光通过空气中的水蒸气颗粒散射而产生光晕。而且，光污染会使植物和动物更加夜行，这对物种的多样性有影响。一个地区的光污染危险程度越高，该地区的物种多样性就越低。

➤建筑因素

一个地区的光污染风险程度通常与该地区的建设规划有关，例如建设用地规划。规划的建筑密度越高，该地区的建筑数量就越多。建筑数量的增加会导致照明系统数量的增加，同时各种建筑的玻璃幕墙、抛光大理石、油漆等各种装饰也会反射光线，产生眩光等光污染，所以不同区域的建筑密度也是我们需要考虑的一个因素。

综上所述，将分层次的光污染现象构建如下图 5 所示。

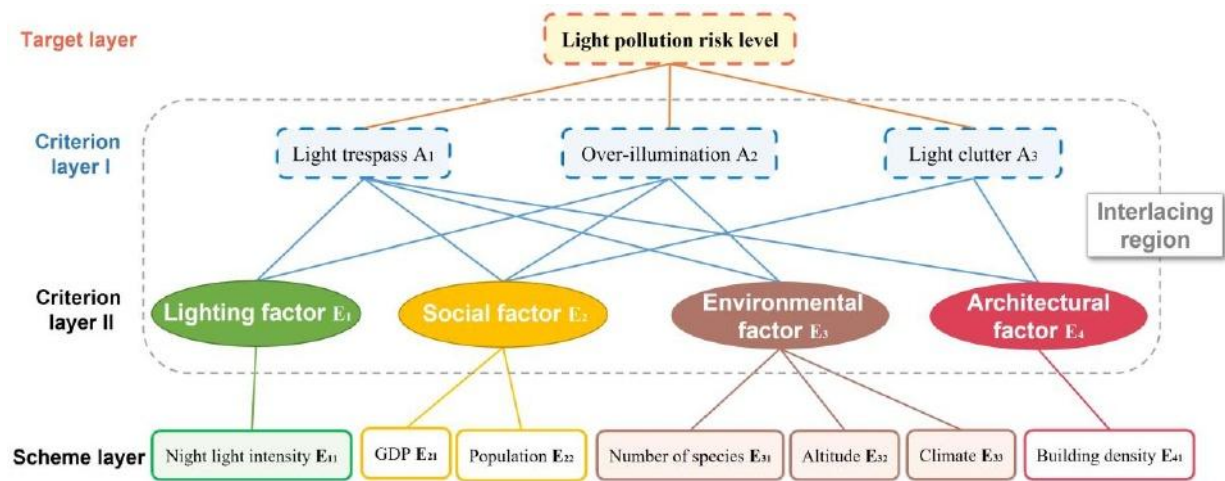


图 5 分层互动评价指标体系

从上图可以看出，过照度和光杂波等。很明显，不同形式的光污染现象取决于不同的因素指标。

根据我们对不同因素指标的分析和定义，过照度的风险水平主要由照明因素、社会因素和环境因素决定，光杂波的风险水平多由社会因素驱动，光越界的风险水平则取决于以上四种因素的影响。如上图所示，各组成部分之间和之间的各种光污染现象会相互影响和制约，这与实际情况是一致的。

4.1.2 评价指标的预处理

不同类型的指标按其特点可分为最大型指标、最小型指标、中等型指标和区间型指标;本文只讨论最大指标和最小指标。评价对象的评分随着最大指标值的增大和最小指标值的减小而增大。由于不同因素的评价指标性质不同，在构建模型之前往往需要对各类评价指标进行预处理，这往往会导致数值上的巨大差异，最终影响模型的评价效果。预处理的方法如下。

步骤 1.无量纲处理

使用向量规格化方法，原始矩阵的每个元素被规范化到[0,1]内，将每个指标转换为可在指标之间进行比较的无量纲值。原理如下。

$$x'_{i0} = \frac{x_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}} \quad (1)$$

其中， x_i 为索引的原始值， x'_{i0} 为索引的无量纲值。

步骤 2. 指标标准化过程

对最大值指示器不需要进行任何处理。对于最小值指示器，需要一个转发过程来将其转换为最大值指示器，如下所示。

$$x'_i = M - x'_{i0} \quad (2)$$

其中 M 为指数的允许上限，为无量纲，取值为 1。 x'_i 为最小指数归一化的结果。

4.1.3 EWM-TOPSIS 评价模型的构建

一般将两种评价方法相结合，达到优势互补、短板互补的目的，以解决单一评价方法的不足。本文使用 TOPSIS 方法，在使用熵权法确定各指标的权重后，对待评价对象进行评价。具体步骤如下。

step1. 基于指标的评价矩阵的构建

$$R = \begin{matrix} & \begin{matrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{matrix} \\ \begin{matrix} R \\ \\ \\ \end{matrix} & \end{matrix} = (r_{ij})_{m \times n} \quad (3)$$

其中， m 为预选的评价人员数； n 为评价指标数， r_{ij} 为预处理后的指标值。

step2. 计算熵值，确定权重[3]

首先，计算第 j 个指标下第 i 个对象的权重，即贡献：

$$P_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}} \quad (4)$$

由此我们可以计算出第 j 个指标的熵值 E_j ：

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (5)$$

由此得出各指标的权重 W_j 为:

$$W_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{i=1}^m (1 - E_j)} \quad (6)$$

本文采用熵权法的原理，逐层计算底层对顶层的相对权重，最后由评价指标体系内各要素相互作用现象的相对权重计算出方案层和指南层对目标层的绝对权重。计算原理如下图 6 所示。

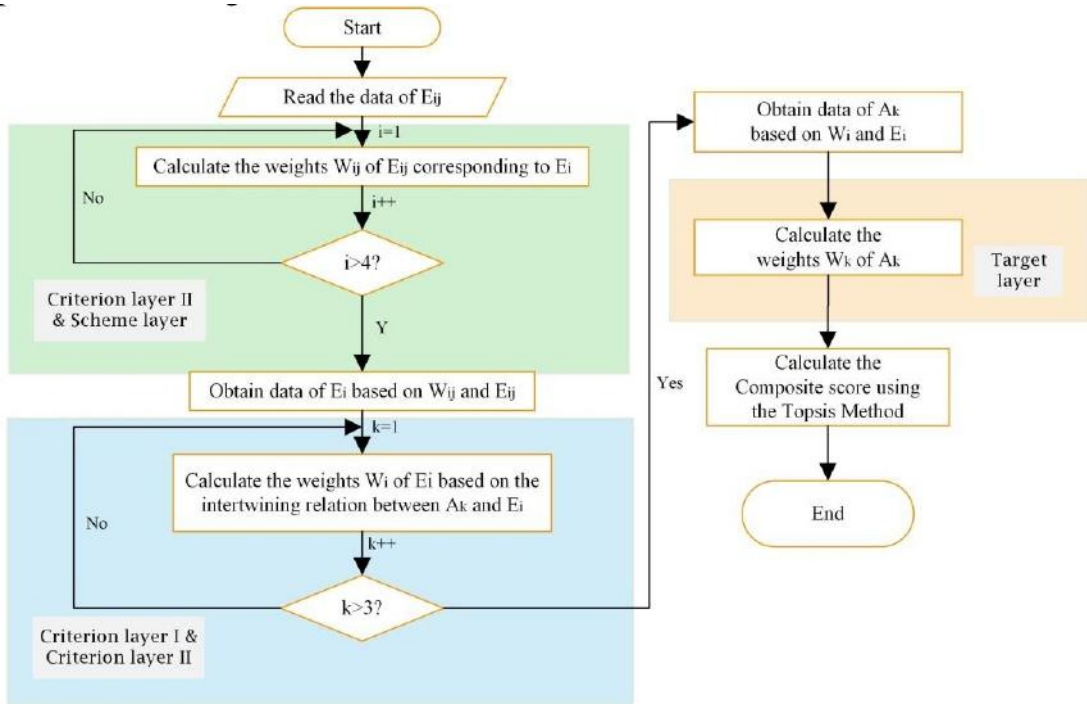


图 6 熵权法计算过程

step3.构造加权归一化决策矩阵[4]

$$V = W_j r'_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r'_{11} & w_2 r'_{12} & \cdots & w_n r'_{1n} \\ w_1 r'_{21} & w_2 r'_{22} & \cdots & w_n r'_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_1 r'_{m1} & w_2 r'_{m2} & \cdots & w_n r'_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (7)$$

step4.计算预选点 D_i 的相对接近度[4]

在加权归一化决策矩阵中，取每列中最大元素组成的向量为正理想点 u^+ :

$$\begin{cases} u^+ = (u_1^+, u_2^+, \dots, u_n^+) \\ u_j^+ = \max\{u_{ij}\} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (8)$$

同样，以每列中最小元素组成的向量作为负理想点 u^- :

$$\begin{cases} u^- = (u_1^-, u_2^-, \dots, u_n^-) \\ u_j^- = \min \{u_{ij}\} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (9)$$

由此，可以计算出评价点的相对接近度 D_i :

$$D_i = \frac{\langle \Delta u_i, \Delta u \rangle}{\|\Delta u\|^2}, i = 1, 2, \dots m \quad (10)$$

where, $\Delta u = u^+ - u^-$; $\Delta u_i = u_i - u^-$; $\|\Delta u\|$ is the Euclidean norm of Δu :

$$\|\Delta u\| = \left\{ \sum_{j=1}^m (u_j^+ - u_j^-)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

式中， D_i 取值范围为[0,1]， D_i 越大，评价场地光污染风险等级越高。

step5.确定光污染的风险水平

本文采用统计学中的五分位数作为划分依据[5]，对评价模型的评分区间进行划分，如下表 3 所示。

表 3 光污染风险等级评价表

Risk level	Low risk	Medium-low risk	Medium risk	Medium-high risk	High risk
D_i	[0, 0.2]	(0.2, 0.4]	(0.4, 0.6]	(0.6, 0.8]	(0.8, 1]

由此，构建了光污染评价模型的理论框架，可用于后续具体场址光污染风险等级评价。

4.2 模型二:光污染风险测量应用模型

本节利用 ArcGIS 地理信息软件对陕西四种不同的土地利用类型进行划分，提取各地点的地理信息数据，然后利用模型 I 计算陕西各地点的光污染风险等级。这样可以更直观地反映出四种不同土地利用类型的光污染风险等级。

4.2.1 区域土地类型分类

本文将根据课题的要求，对四种不同类型场地的光污染风险进行评估。为了避免地理差异，更直观地显示各类站点的光污染危险程度，有必要一次选择一个有 4 个不同类型站点的研究区域。

在数据分析的基础上，本文选择中国陕西省作为研究区域。基于陕西省的地理信息特征，利用 ArcGIS 地理信息软件对陕西省的保护地、农村社区、城郊社区、城市社区进行划分，划分结果如图 7 所示。

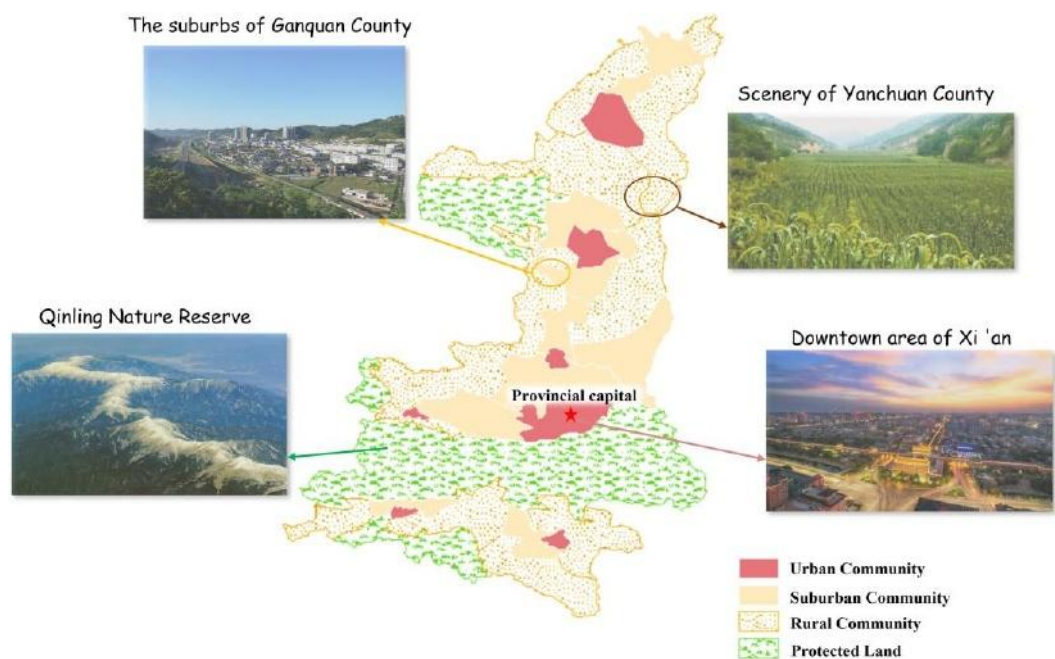


图 7 陕西省土地类型划分示意图

(景区图片来自 <https://www.baidu.com/>)

4.2.2 评价场地的选择

为了计算四种不同类型区域的光污染风险水平，我们基于前面划分的陕西省四种类型地理区域，计算了各区域板块的几何形状中心[6]。计算得到的质心如下图 8 所示。

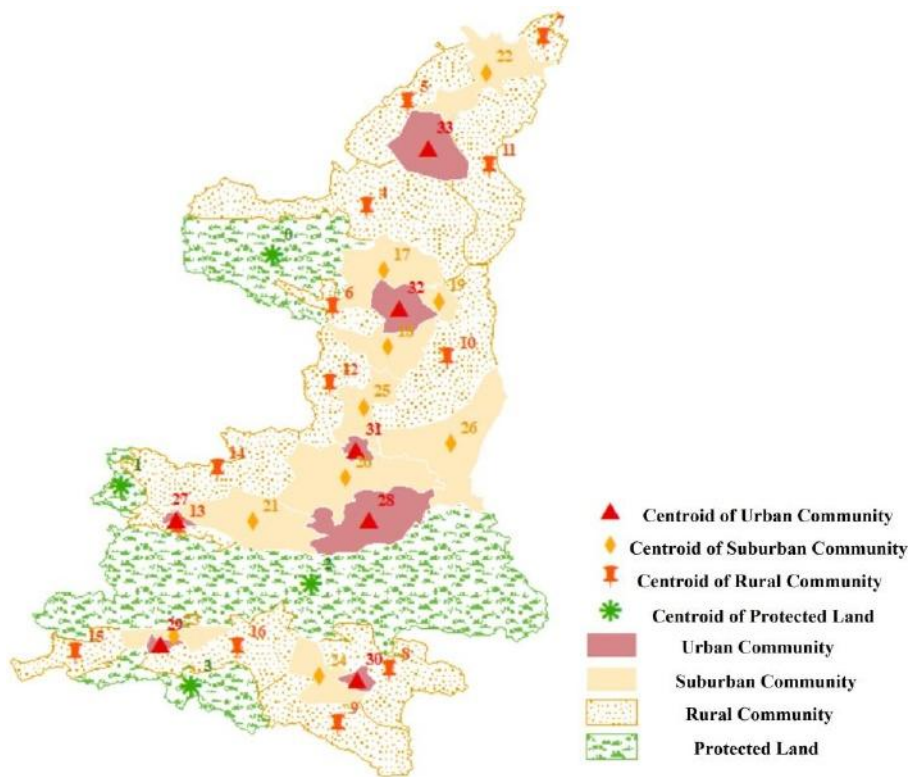


图 8 不同土地类型的评价点分布

按不同土地类型划分的几何质心计算如下表 4 所示。

表 4 不同类型土地评价点的分类

Location types	Protected land location	Rural community	Suburban community	Urban community
Number	0-3	4-16	17-26	27-33

最后对各区域中心位置进行评价，各区域中心位置的光污染风险等级代表各区域整体光污染风险等级。

4.2.3 数据提取与处理

根据模型一构建的光污染风险等级评价体系，我们需要确定每个评价站点的各个指标的数据。

a .地理信息数据

采用地理可视化信息数据图片提取的方法，收集各评价站点的必要指标数据，以便精确计算各评价站点的光污染风险等级。官方观测点的位置数据及其采集的数据构成了可视地理信息数据图。为了生成整个地图区域内每个单独坐标点的评价指标数据，我们使用 Kriging 插值将可见地理信息数据图中提供的数据进行组合，该插值基于以下概念[7]。

$$Z^*(x_0)=\sum_{i=1}^N\lambda_iZ(x_i)$$

(12)

其中 $Z(x_i)$ 为目标点评价指标数据， λ_i 为满足的偏移系数，满足 $\sum_{i=1}^N\lambda_i=1$ ($N=120$) ；
 $Z^*(x_0)$ 为指标估计值。因此，本文获得的陕西省 2022 年光强、GDP、人口、海拔和降水的分布数据如下图 9 所示。

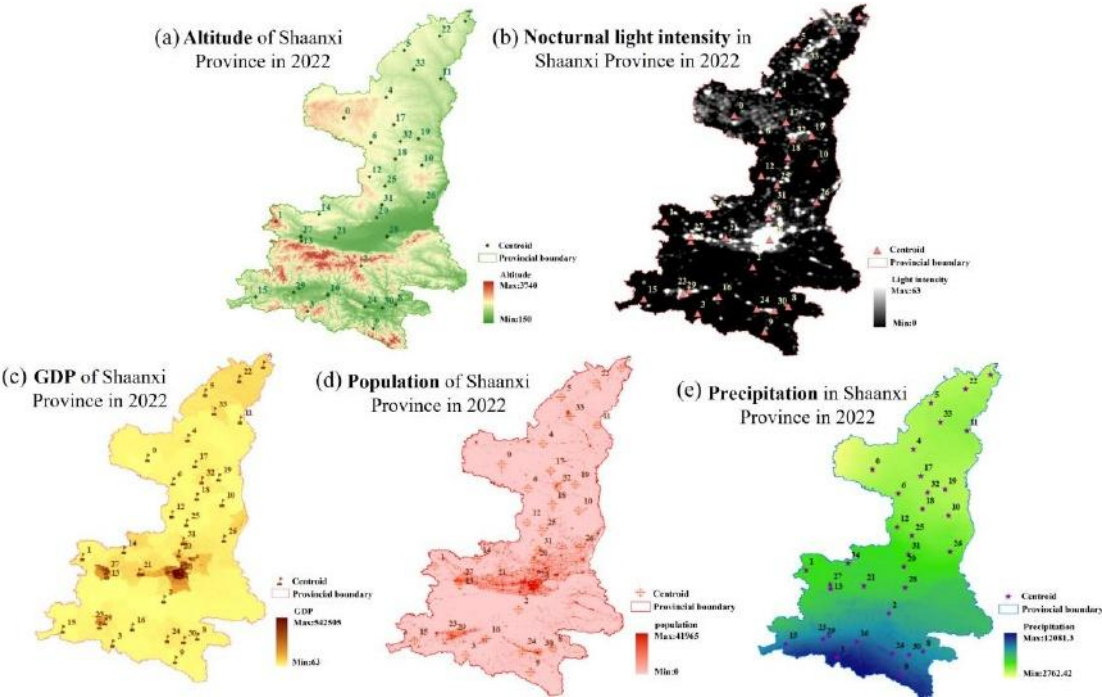


图 9 2022 年陕西省各评价点地理数据

B.Textual 数据

对于该地区的生物多样性和建筑密度等数据，我们通过查找问题中给出的四种站点的相关官方文件来收集和汇编。

对于生物多样性，我们参考 BioONE 生物多样性大数据平台中的生物多样性数据，确定四种不同类型站点的生物多样性数据，如下表 5 所示。

表 5 不同类型站点的生物多样性参考

Location types	Protected land location	Rural community	Suburban community	Urban community
plants	3646-4892	2896-3112	1592-2706	1204-1537
birds	449-508	340-358	197-316	160-169
beasts	71-89	37-61	17-33	6-14
amphibians	53-73	40-46	16-25	9-12
reptiles	81-95	43-54	27-37	14-24
Number of species	4300-5657	3356-3631	1849-3117	1393-1756

结合具体评价点的地理信息数据，可以确定不同评价点的生物多样性。

我们收集并汇总了陕西省四种不同类型站点建筑密度的建设用地地理分布信息，如下表 6 所示。我们可以利用特定评价点的地理信息数据，计算出各个评价点的建筑密度。

表 6 不同类型站点的建筑密度参考

Location types	Protected land location	Rural community	Suburban community	Urban community
Building density	0-1%	3%-5%	6%-9%	26%-30%

4.2.4 模型二的解

根据所构建的光污染风险等级评价体系，采用熵权法推导出各级间各评价指标的权重。具体如图 10 所示。

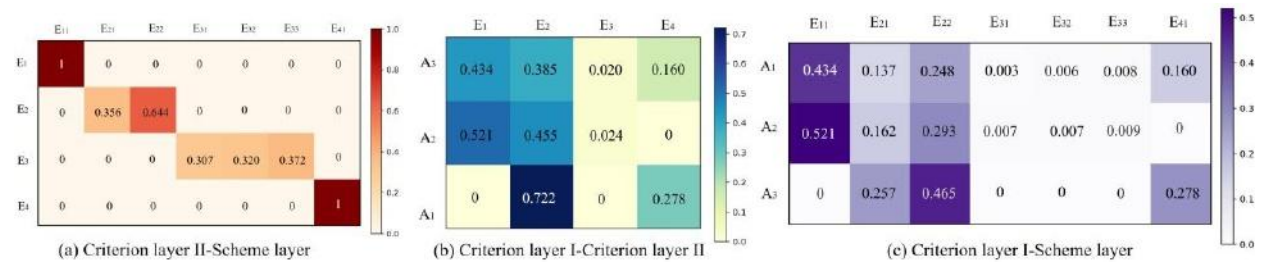


图 10 评价体系各层次的权重

由于夜间光照强度和建筑密度在方案层中分别对光照因子和建筑因子产生影响，因此这两个指标在准则层中的权重为 1。0 权重之所以存在，是因为其中一些指标是不相关的，彼此之间没有影响。在指标中，夜间光强对光侵入和过照度的权重较高，而人口因素对光杂波的权重较高，说明人口和夜间光强是影响该地区光污染危险程度的主要因素。这一结果是有道理的，因为人是光的直接使用者，而夜间光强对光污染的影响最为直接。

根据权重分别计算 34 个选定几何中心的光污染风险水平，并确定陕西省 4 种站点类型的平均风险水平。信息如下表 7 所示。

表 7 陕西省四类土地光污染风险等级

Location types	Protected land	Rural community	Suburban community	Urban community
Light pollution risk score	0.00456	0.02792	0.27889	0.40678
Risk level	Low risk	Low risk	Medium-low risk	Medium risk

在四种不同类型的区位中，城市社区因人口密集、光利用率高，光污染风险水平最高。郊区和农村社区的光污染风险水平相对较低，保护区的光污染风险水平最低，因为它们的人口稀少，光利用率低。

为了使我们的模型更适用，更符合实际应用的要求，我们利用 Kriging 插值法，根据选取的 34 个评价点的光污染数据，得到陕西省整个地区的光污染风险等级图，如下图 11 所示

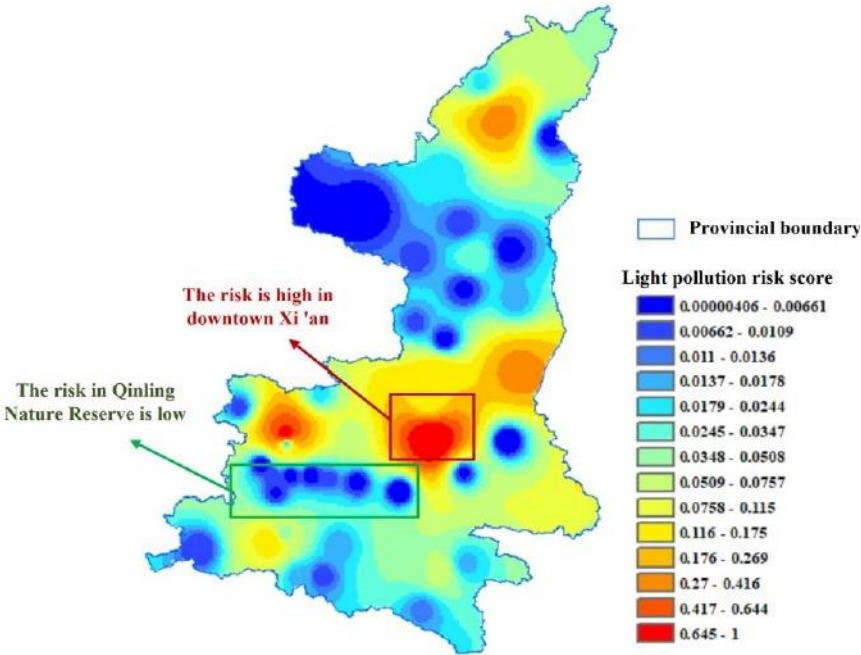


图 11 2022 年陕西省光污染风险等级分布图

由此，我们可以确定四种不同类型区域的风险等级，以及地图上每个位置的光污染风险等级。

光污染风险等级图显示，作为陕西省最大的城市，西安人口最多，光使用量最大，是光污染风险最高的地区。相比之下，秦岭自然保护区的光污染风险较低，因为它是受保护的陆地，人口和光使用量都非常少。

4.3 模型 III:光污染治理优化模型

为了有效地管理光污染，这一部分提出了三种光污染管理策略，并解释了将每种计划付诸实施所涉及的确切步骤。本文预测了未来 50 年各种评价指标的变化，以便分析不同光污染管理策略的整体效果。它还研究不同策略对光污染短期、中期和长期风险水平的影响，并简要研究光污染改善的潜在影响。

4.3.1 制订光污染处理策略

鉴于光污染的影响取决于多种因素，其中一些因素可能随着时间的推移而改变，治理策略可能包括长期和短期计划。而且，光污染治理策略可以根据优化对象分为对源头的直接保护和对其他要素的间接保护[8]。这就产生了下表 8 所建议的三种光污染治理策略。

表 8 光污染治理策略详情

Treatment Strategy	Specific measures	Description
Raising awareness of residents to combat light pollution	Choose environmentally friendly light source	In the case of meeting normal living needs, residents are recommended to use energy-saving lamps and other environmentally friendly light sources with low light intensity to help reduce the impact of light pollution.
	Selection of environmentally friendly building design	Building materials with high reflectivity such as highly reflective glass tend to reflect light, so when residents actively choose low-reflective building materials, they can reduce the occurrence of light pollution phenomena such as glare. At the same time, the use of structural designs to control light pollution on buildings (such as sunshades, etc.) can effectively reduce the direct reflection of light pollution.
Setting standards and norms	Regulating the lighting market	Formulate relevant standards to regulate the market for lamps and lanterns, and limit the production scale of high light intensity lamps and lanterns.
	Establishing "environmental red lines"	When the relevant environmental indicators are lower than the "environmental red line", appropriate mandatory strategies such as shutting down part of the lighting system to avoid light pollution to cause great damage to the ecological environment.
Establishment of a sound social regulatory mechanism	Regulatory light intensity	Formulate the maximum light intensity of lights allowed in each region and regulate them.
	Regulatory social expansion	Maintain the orderly development of the society and avoid the increase of light pollution due to the rapid development of the society
	Regulatory environment Indicators	The environmental indicators of the area are regulated to control the environmental impact of light pollution.
	Regulatory building density	Regulate the construction industry, such as real estate, to prevent building density from expanding too fast and exacerbating light pollution.

4.3.2 评价指标预测

上述三种光污染减排策略及其具体活动，将根据本研究构建的光污染危险程度评价体系，对多项评价指标产生影响。由于一些指标会随着时间的推移而发生变化，因此本文预测了未来 50 年若干评估指标的变化，以评估治理策略的及时性。此外，三种处理策略对光污染的影响将在三个时间跨度内进行研究:短期(未来十年)、中期(未来 35 年)和长期(未来 50 年)。评价指标的预测过程如下。

➤人口预测

我们使用单独的 logistic 模型[9]，该模型适合人口预测，数据拟合度高，对人口指标的预测精度高，因为我们的评估体系中人口指标的权重相对较大，人口规模的变化会显著影响结果。

(四)其他指标预测

我们利用 ARIMA 模型[10]对光照强度、GDP、生物多样性、降水和建筑密度等数据进行了预测。在 Kriging 插值应用的基础上，最初通过加入高斯扰动对数据进行了扩展[7]。在回顾当前数据模式并完成预测模型的测试后，对所选评估点的指标进行了未来 50 年的预测。

4.3.3 治疗策略影响的量化

为了获得三种策略对光污染的改善效果，需要分析不同策略中每个具体措施对每个评价指标的影响。具体量化过程如下。

策略 1。提高居民防治光污染的意识

选择环保光源

一个地区各类光源的光强可以直接影响该地区的光污染风险程度。本文收集整理了 2020 年中国常用灯具的照明功率[11]和各类灯具的使用率[12]，如下表 9 所示。

表 9 常用灯具照明功率及市场占有率

Lamp types	LED lamp	Incandescent lamp	Halogen tungsten lamp	Fluorescent lamp	Energy-saving lamp
Lighting power	100W	200W	250W	32W	11W
Usage ratio	78%	5.32%	0.58%	3.1%	13%

根据照度规律[13]，我们可以得到：

$$E_A = \frac{I}{r^2}$$

(13)

其中是 E_A 光的强度； I 是发光强度，光源的发光强度与灯的功率成正比； r 是指向光源距离的点。

考虑到 LED 灯具有发光稳定、亮度高、照明效果好等优点，并且在中国照明市场占有绝对份额，对倡导人们使用环保光源将产生威慑作用，因此我们定义了人们放弃 LED 和其他光源，选择节能光源的比例 α ，然后 α 随着时间的推移会逐渐减少。

$$\alpha(t) = \alpha_0 - k \cdot t \quad t \in [0, 50]$$

(14)

其中 α_0 为初始转移率，本文取节能灯与 LED 灯的市场份额之差为 65%; k 为该函数的滞后系数， $k = \frac{\alpha(t)}{\alpha_0}$ ，取值范围为[0,1]，由此得到

$$\alpha(t) = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{t}{\alpha_0}}$$

(15)

实施该策略并对光强指标进行修正后，优化措施对光污染评价体系的影响可得：

$$E'_{11} = [1 - \alpha(t)] E_{11}$$

(16)

选择环保型建筑设计

城市建设中大规模使用高反射镜，容易反射和折射人造光，造成二次光污染。优化建筑设计或使用低反射率建筑材料可以显著减轻光污染的影响。新型蛭石钢结构材料的漫反射光能力使其

能够将光污染降低 3.8%至 6.7%[14]。此外，在玻璃幕墙顶部安装遮阳篷可以反射光，减少光污染。这种方法在减轻光污染方面的有效率为 4.5%[2]。

无论是通过新材料的使用还是建筑设计的优化，环保建筑设计的推广本质上在一定程度上降低了产生光污染的建筑密度，而且环保建筑越多，存在光污染风险的建筑密度越低。因此, 这一策略的实施将对建筑密度指数产生以下影响。

$$E'_{41}=E_{41}(1-\varphi_1)(1-\varphi_2)$$

(17)

其中 φ_1 是使用环保材料对光污染处理的影响； φ_2 是优化建筑设计对光污染处理的影响。

策略 2。制定标准和规范

(四)规范照明市场

控制灯具市场，扩大智能照明系统市场，可以降低光强指标，有助于降低光污染风险水平。使用声控灯、定时灯等智能照明工具，对治理光污染至关重要。

对于智能照明市场的增长，我们采用了一个滞后模型来拟合智能照明市场的平均增长率 $v(t)$ ，并考虑到滞后效应，因为市场很可能会持续饱和。

$$v(t)=v_0-m\cdot t\quad t\in[0,50]$$

(18)

其中 m 为迟滞系数， $m=\frac{v(t)}{v_0}$ ，取[0,1]范围内的值，由此得到：

$$v(t)=\frac{v_0}{1+\frac{t}{v_0}}$$

(19)

在实施此策略后，对光强指数进行校正，得到通过此措施优化的光强指数：

$$E''_{11}=[1-v(t)]E_{11}$$

(20)

建立“环境红线”

光污染对生态环境，特别是生物多样性的影响是不可估量的。因此，政府和相关部委必须采取行动，减轻光污染对生态环境的影响。基于此，本文将“环境红线”定义为区域生物多样性数据区间中位数的 50%;各区域的精确值如下表 10 所示。

表 10“生态红线”对应的四类土地

Location types	Protected land	Rural	Suburban	Urban
	location	community	community	community
Species median	4978.5	3493.5	2483	1574.5
Ecological red line	2489.25	1746.75	1241.5	787.25

当区域生物多样性数据低于“环境红线”时，为了防止生态系统每年崩溃，政府必须采取强制性措施，在一年后将区域生物多样性统计数据提高到“环境红线”以上的 3%。为了便于以后计算处理策略的优化效果，将“环境红线”的优化指标记录为 E'_{33} 。

策略 3。建立健全社会调节机制

可以根据我们建议建立完善的社会监管机制的具体行动，对光照因素、社会因素、环境因素、建筑因素进行策略优化，但监管机制存在相当大的不确定性，监管式的管理策略可能会产生

反弹效应[15]。因此，对于预测未来 50 年的指标（除了 DEM），我们在该优化技术下建立了一个扰动项 β ，并将其范围设置为[-5%,5%]。通过将优化后的指标加入评价体系进行评价，可以衡量该策略造成的光污染的减少程度。将优化后的指标加入到评估体系中进行评价，就可以衡量出该策略对光污染的减少程度。

4.3.4 判断治理策略的优劣势

为了获得三种不同的治理策略在短期、中期和长期的最优效果，我们使用模型 i 计算了每个评价点未来 50 年的光污染风险水平，具体步骤如下。

步骤 1 原始解决方案和改进策略的计分计算

模型 I 用于计算评价点未来 50 年光污染风险等级 D_0 ，然后将优化后的三种治理策略指标代入模型 I，对三种策略优化后的未来 50 年区域光污染风险等级 D_i 进行评价。

步骤 2 处理效果计算

计算在短期(0-10 年)、中期(11-35 年)和长期(36- 50 年)三种不同时间间隔内对抗光污染的三种策略的有效性 $\overline{\Delta D_i}$

$$\overline{\Delta D_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_0 - D_i) \tag{21}$$

其中 n 为不同时期的年数； $\overline{\Delta D_i}$ 表示不同处理策略对光污染的影响， $\overline{\Delta D_i} > 0$ 表示处理策略对光污染处理的积极影响，反之亦然，表示处理策略对光污染的负面影响。

步骤 3 择最优改进策略

根据三种策略在评价地点不同时期的治疗效果大小 $\overline{\Delta D_i}$ ，确定评价地点短期、中、长期的最佳治疗策略。

4.3.5 光污染处理的潜在影响

在光污染治理过程中，其风险水平的降低可以是人工光辐射面积和强度减少的副反应。这将不可避免地导致进一步的社会现象，如当地犯罪率上升和交通事故频率下降。本文以陕西省的犯罪率和交通事故率为指标，考察光污染治理的潜在效果。

(四)区域犯罪率

处理光污染的过程最终降低了该地区的光强度，从而提高了该地区的犯罪率。我们在区域犯罪率与各种治理策略的效果之间建立了以下功能联系:区域犯罪率增加越大，光污染治理效果越好。

$$C_i = C_0 (1 + \overline{\Delta D_i}) \tag{22}$$

其中 C_0 为该地区的原犯罪率； C_i 为光污染控制策略实施后，该地区的犯罪率

(四)交通事故率

在光污染治理战略实施期间，随着光杂波等光污染现象的减少，由光污染引起的交通事故也会减少。因此，我们构建了区域交通事故率与光污染治理效果之间的函数关系。

$$T_i = T_0(1 - \overline{\Delta D_i}) \tag{23}$$

式中， T_0 为该区域的原始交通事故率; T_i 表示该区域光污染处理后的交通事故率。

4.4 模型四:光污染治理应用模型

本节从四种不同类型的站点中选择两个站点，并预测其每个主要指标的数据，以显示模型 III 的有效性。预测的数据用于确定这两个地点的最佳短期、中期和长期光污染管理策略，并分析和讨论管理策略如何影响两个地点的光污染风险水平。

4.4.1 研究地点的选择

为了验证不同光污染风险等级区域不同治理策略的优化效果，我们在模型 II 中选取陕西省 34 个评价点中光污染风险等级最高的 28 点和光污染风险等级最低的 2 点进行治理优化，两点的地理信息如下图 12 所示。

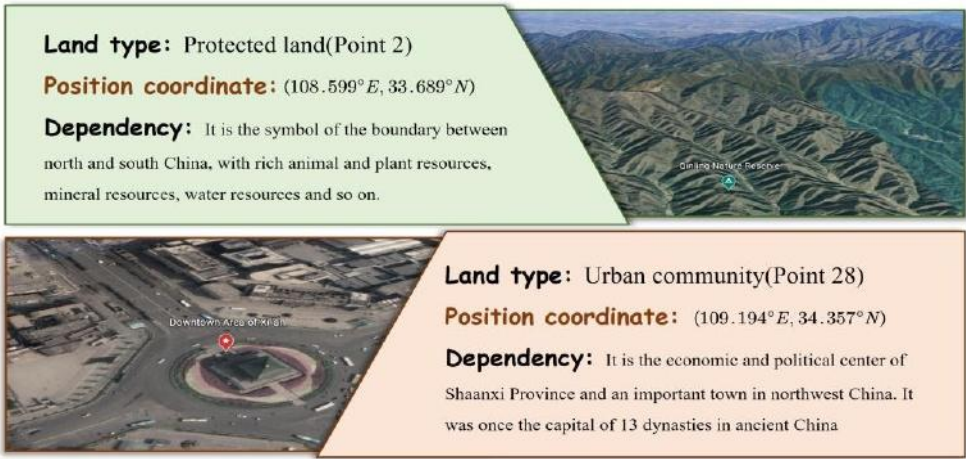


图 12 优化后的位置信息汇总

为了检验不同策略的环境适应性，我们选择了 2022 年两个评级最极端的地点。因此，这可以作为评分介于两者之间的其他评价点选择方法的指南。

4.4.2 评价指标原始数据的预测

为了便于后续分析不同处理策略对两个评价点的短期、中期和长期优化效果，我们对未来 50 年两个评价点的光强、人口、GDP 和生物多样性数据进行了预测。其中，种群数据采用 Logistic 模型进行预测，结果如下图 13 所示。

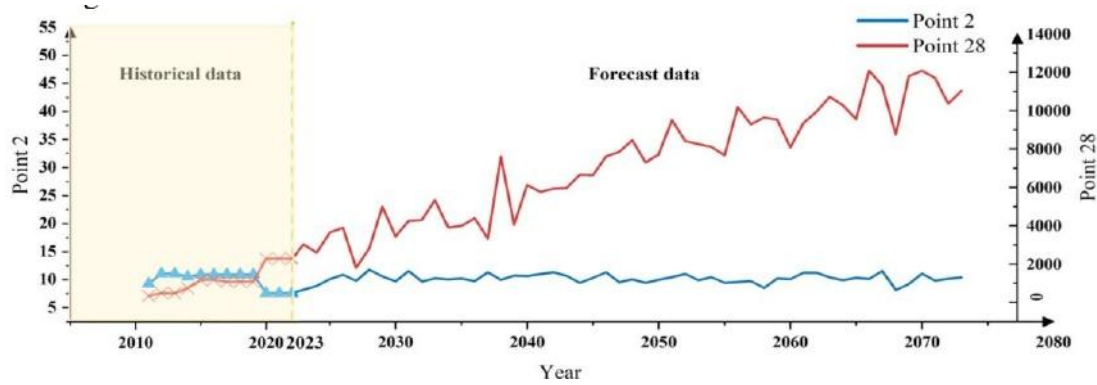


图 13 评价点未来 50 年的人口预测

其他数据使用 Arima 模型进行预测，评价点的生物多样性预测结果如图 14 所示。

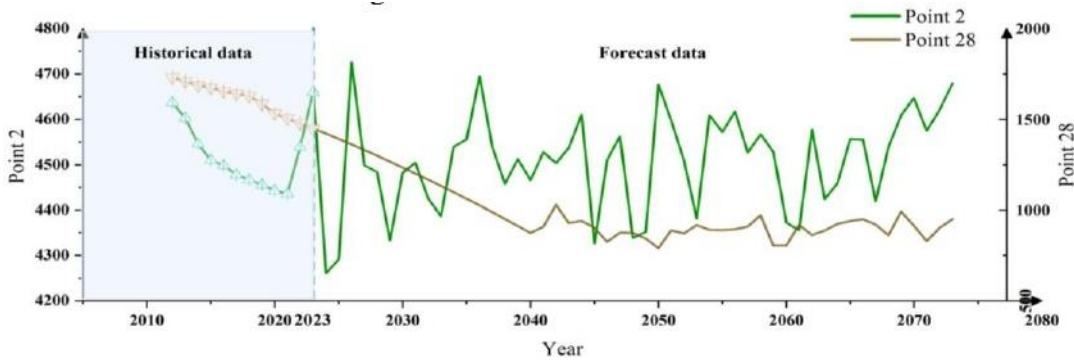


图 14 评价点未来 50 年生物多样性预测图

评价点未来 50 年夜间灯光使用数据的预测结果如下图 15 所示。

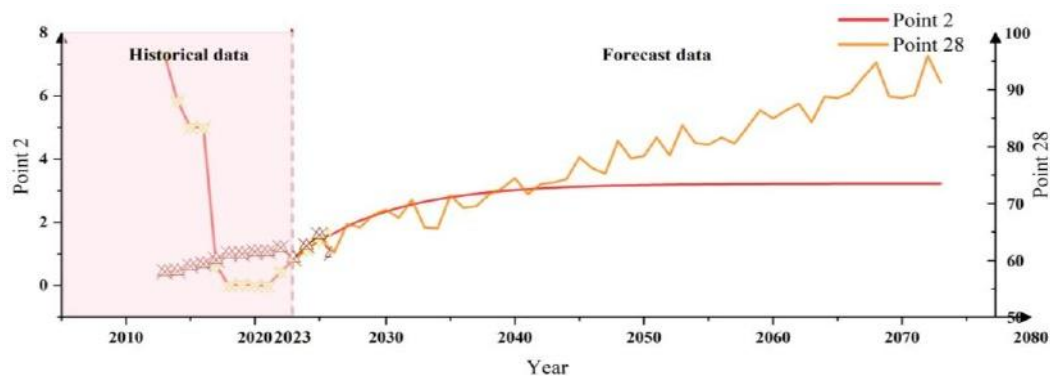


图 15 评估站点未来 50 年夜间光强预测图

重要数据如上图所示，以及年的降水量、建筑密度和 GDP 未来 50 年也使用 Arima 时间序列进行预测，由于空间原因，这里没有显示。

4.4.3 判断治疗策略的优缺点

结合未来 50 年两个站点各指标的预测数据，利用前一节建立的光污染风险评价模型，分析三种治理策略对两个评价站点的影响。

策略 1 高居民对抗光污染的意识

对于选定的站点 2 和 28，在没有政策干预和使用策略 1 进行优化的情况下，通过式(16)和式(17)预测未来 50 年的光污染风险水平，分别如图 16 和图 17 所示。

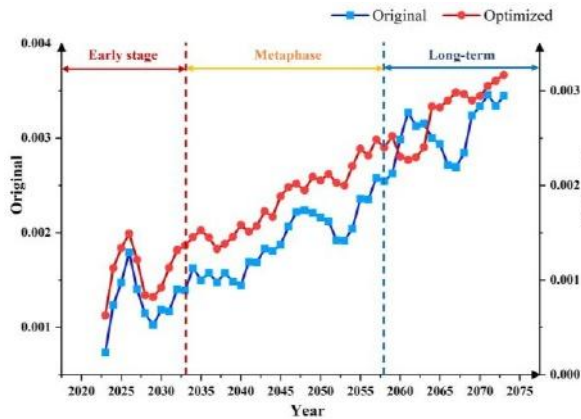


图 16 策略 1 中第 2 个站点优化前后对比

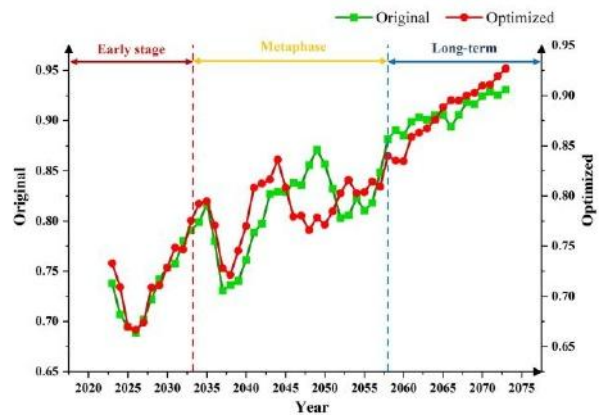


图 17 策略 1 中第 28 个站点优化前后对比

通过图可知，处理策略 1 对 2 号站点在短、中、长期都有较好的优化效果，而对 28 号点仅在短期内有正向优化效果。

策略 2 定标准和规范

对于选中的站点 2 和 28，在没有策略干预和使用策略 2 优化的情况下，其未来 50 年的光污染风险水平分别如下图 18 和图 19 所示。

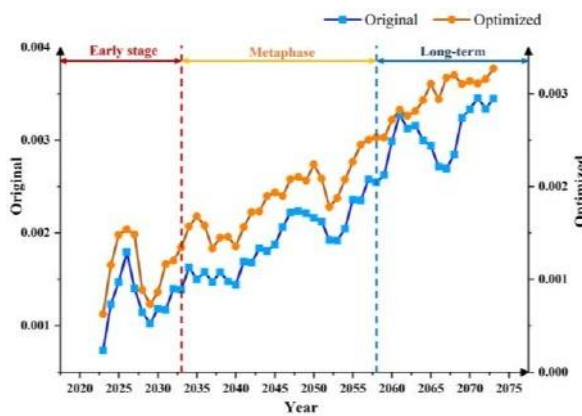


图 18 策略 2 中第 2 个站点优化前后对比

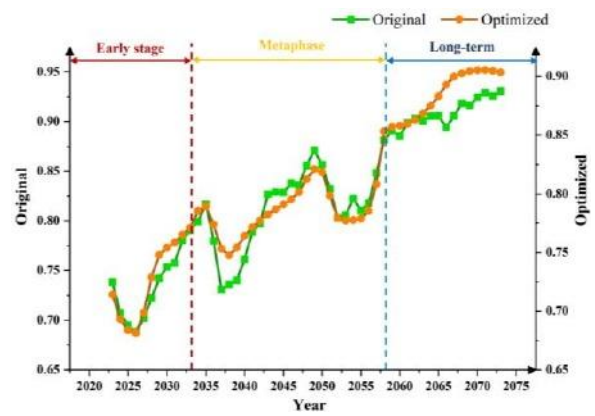


图 19 策略 2 中第 28 个站点优化前后对比

从图中可以得知，治疗策略 2 对站点 2 短期、中期和长期都有比较好的优化效果，而对站点 28 只有中期才有正向的优化效果。

策略 3 建立健全社会调节机制

对于选中的站点 2 和 28，在没有政策干预和使用策略 2 优化的情况下，其未来 50 年的光污染风险水平分别如下图 20 和图 21 所示。

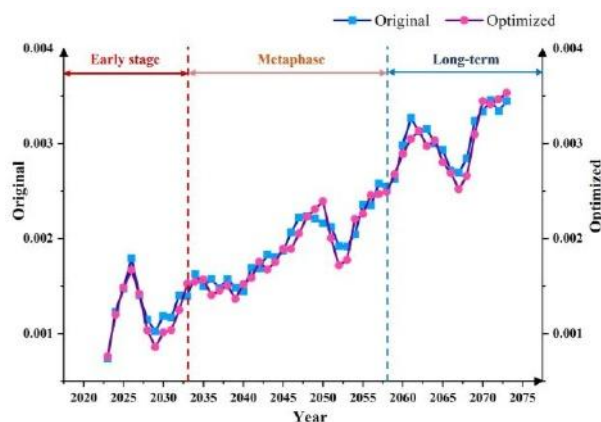


图 20 策略 3 中第 28 个站点的第 2 个站点优化前后对比

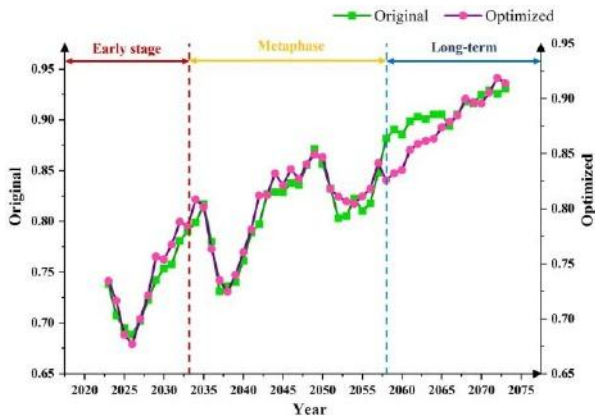


图 21 策略 3 中第 28 个站点优化前后对比

通过对数据的分析可知，处理策略 3 对 site 2 不显著，但从长期来看，策略 3 对 site 28 有积极的处理效果。

上述三种策略的目标分析揭示了它们对站点 2 和站点 28 的短期、中期和长期的优化效果。每种策略的优化效果（即每种策略的值 $\overline{\Delta D_i}$ ）总结如下表 11 所示。

表 11 各策略优化效果评价点

Site	Short-term			medium-term			long-term		
	Strategy 1	Strategy 2	Strategy 3	Strategy 1	Strategy 2	Strategy 3	Strategy 1	Strategy 2	Strategy 3
2	1.73×10^{-4}	1.439×10^{-4}	8.461×10^{-5}	6.508×10^{-5}	4.45×10^{-5}	3.352×10^{-5}	3.035×10^{-4}	8.913×10^{-5}	5.189×10^{-5}
28	0.019	0.006	-0.001	0.021	0.025	0.006	0.025	0.024	0.032

综上所述，结合 2 点、28 点治理策略优化效果曲线图和优化效果表，我们给出以下结论。

- 1.对于 2 号站点，策略 1 在短期、中期和长期均有较好的治理效果，建议在 2 号站点采用策略 1 进行光污染治理。其中，3 个处理策略在不同时期对 2 号站点的优化效果不是特别明显，因为 2 号站点属于自然保护区，本身光污染风险水平较低，不易受到外界因素干扰。
- 2.对于站点 28，策略 1、策略 2、策略 3 分别在短期、中期、长期治理效果最好，因此我们建议短期实施策略 1，中期实施策略 2，长期实施策略 3，以确保未来不同时期能有效治理光污染。

4.4.4 光污染治理的潜在影响分析

另外，由于 2 号站点位于自然保护区，没有发生大规模犯罪和交通事故，所以我们选择 28 号站点的数据来解决模型 3 中光污染治理的潜在影响。结果如表 12 所示：

表 12 光污染治理的潜在影响

Potential impact	Original data	Strategy 1	Strategy 2	Strategy 3	Improvement effect
Number of crimes	22997.1	23501.7	23476.5	23286.9	2.140%
Number of accidents	5555.4	5433.5	5440.1	5484.8	2.135%

因此，对于城市社区来说，光污染治理策略的实施将导致犯罪率上升 2.140%，交通事故率下降 2.135%。

5 模型的检验

为了验证模型的敏感性和稳定性，我们在模型 III 中的策略 3 优化措施下，对评价点 2 和评价点 28 的因子夜间光强值进行了敏感性分析。 β 被修改为 $[-5, 5\%]$ ，并在原始的夜间光强数据中加入了一个高斯扰动。结果如下图 22 和图 23 所示。结果如下图 22 和 23 所示。

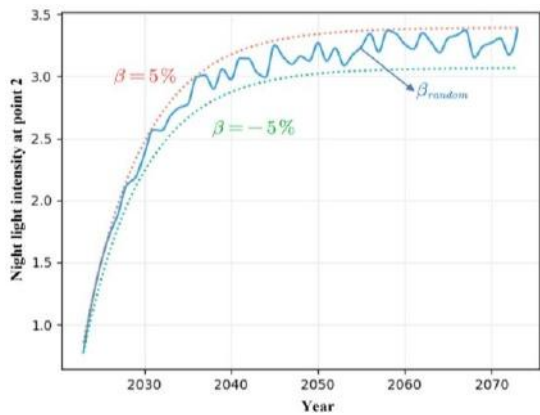


图 22 2 号站点夜间光强测试分析

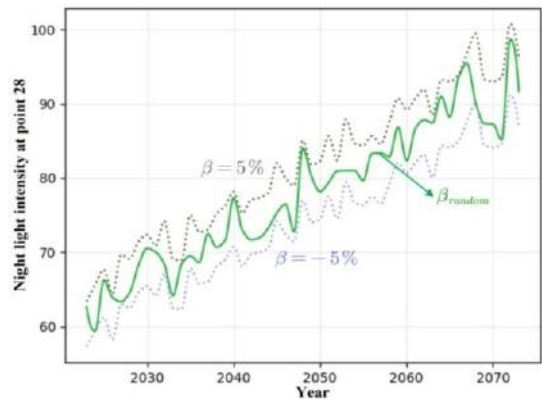


图 23 28 号站点夜间光强测试分析

由图可知，对于政策 3，改善措施在改善夜间光强方面潜力较大。同时，模型结果对于这些变化都在一定的合理范围内，说明所建立的具有合理的灵敏度和稳定性。

6 模型的评价与改进

6.1 模型的优势

在完成光污染影响的评价分析和光污染治理的分析讨论后，本文构建的模型的三大优势可以总结如下。

优势 1:光污染风险等级评价模型整合了环境、政策等多种因素，创新构建了层次互动的评价指标体系，评价效果较好。

优势 2:本文利用 ArcGIS 地理信息软件对栅格数据进行提取和可视化。本文还制作了陕西省光污染风险分布图，使得数据显示更加直观，模型更加实用。

优势 3:模型从短期、中期和长期三个时间维度对三种不同光污染治理策略的治理效果进行了分析和优化，使模型具有更好的适用性。

6.2 模型的弱点

但在本文模型的构建和求解中存在以下问题，并附上相应的改进措施。

弱点 1:本文对光污染治理的潜在影响分析为未与光污染治理策略的具体措施挂钩，且未全面考虑光污染治理的潜在影响。

改进 1:可以构建光污染治理潜在影响与受光污染治理措施影响的指标之间的相关函数分析每项具体措施对光污染治理的潜在影响。

弱点 2:本文在不考虑同一治理策略本身在不同时间阶段的相互作用的情况下，分析了三种光污染治理策略的短期、中期和长期影响。

改进之二:可以将三种不同的光污染治理策略进行排列组合使用,进而分析各种光污染治理策略的短、中、长期效果,进一步分析同一治理策略本身在不同时间阶段的相互作用。

参考文献

- [1]Anonymous, Light pollution, <https://zh.wikipedia.org>, 2023, 2,17.
- [2]Zheng Gengtao. Study on the Application of Sunshade in Light Pollution Control of Glass Curtain Wall[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(07): 53-56.
- [3]Chen Hongfang, Gao Yi, Liu Lixia. Comprehensive evaluation method of graduation requirement achievement degree based on entropy weight method and TOPSIS method [J]. HEILONGJIANG EDUCATION (Theory & Practice), 2023, No. 1416(02): 58-60.
- [4]Arezoo Azimifard, Seyed Hamed Moosavirad, Shahram Ariafar. Selection sustainable supplier countries for Iran's steel industry at three levels by using AHP and TOPSIS methods [J]. Resource Policy, 2018, 57: 30, 44.
- [5]Jia Junping, He Xiaoqun, Jin Yongjin. Statistics (7th edition), China Renmin University Press, 2018.
- [6]Zhang Peng. Study on geometric properties of plane figures[J]. Journal of Yangzhou Vocational University, 1997(02): 51-57.
- [7]Zhang Qi, Ma Yanning, Wang Xiaojun, et al. Modeling of main discontinuities of rock tunnel based on optimized Kriging interpolation method[J]. CHINA CIVIL ENGINEERING JOURNAL, 2022, 55(S2): 74- 82.
- [8]Ma Juntao, Yang Chunyu, Liang Shuying, et al. Classification and Evaluation of Urban Light Pollution and Related Measures[J]. Lamp and illumination, 2014, 38(02): 10-14.
- [9]Zhang Xiaole, Huang Jingxia. Analysis and prediction of the population based on Logistic regression model[J]. JOURNAL OF CHUXIONG NORMAL UNIVERSITY, 2013, 28(09): 9-13.
- [10]Zhang Lijuan, Yang Yuan, Mei Cheng, et al. Comparison of asphalt pavement performance prediction based on ARIMA and SVM models [J]. Sino-foreign highway, 2022, 42(02): 52-56.
- [11]Anonymous, Common wattage and specification of various luminaries and light sources, <https://zhuanlan.zhihu.com/p/138450630>, 2023.2.21.
- [12]Anonymous, Panorama of China's LED lighting industry in 2022, <https://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/211118-6e06017a.html>,2023.2.19.
- [13]Li Siqi. Calculation and selection of bulb power in chicken illumination[J]. Chinese poultry, 1997(09): 21- 22.
- [14]Liu Xijun, Tang Lina, Liang Guicai, et al. Construction Technique of Steel tile Roof with New Light and Environmental Vermiculite Type[J]. World of building materials, 2011, 32(02): 72-75.
- [15]Xu Ronghui. Research and Application of the Logistic Equation[J]. Journal of Xinzhou Teachers University, 2011, 27(05): 28-30.
- [16]Kong Li, Hu Guangwen, Mu Xianzhong. Energy rebound effects associated with consumption distribution of residents in Beijing[J]. Resource Science, 2022, 44(10): 2022-2037.

★ **Fight light pollution: For the stars overhead** ★



Use Energy
Saving Lamps



Strictly comply with
environmental
protection
requirements



Choose
environmentally
friendly
building design

SPEAK for the
Stars

By Team 2312411

What you also could do:

- 1.If you are a business person in the relevant industry, under the protection of market norms to show your skills!
- 2.If you are in charge of the supervision department, please keep your eyes open and don't let go of those who destroy homes!

One small step for you will be one giant leap for mankind.