

守护黑夜，控制光明!

摘要：人们通常被城市灯光的“美”所震撼，却没有意识到这也是污染的形象，就像人们欣赏汽油在水中产生的彩虹色之美，却没有意识到这是化学污染。本文构建了一个适用范围广泛的光污染风险评估模型来评估给定地点的风险水平，并提出了一个缓解不同地点光污染影响的干预策略模型。

对于任务 1，我们提出了一个光污染风险评估模型。该模型整合了四个维度的风险：人类、野生动物、植物和光污染造成的能源浪费。综合考虑多个相关指标，采用 EWM-TOPSIS 求解整体风险评分，将风险评分分为脆弱(0-1)、差(1-2)、一般(2-3)、好(3-4)四个等级。

在 Task 2 中，将光污染风险评估模型应用于深圳四个典型区域，分别代表城市、郊区、农村和保护区。在数据准备阶段，我们使用夜间遥感和多光谱遥感数据估算研究区域的归一化植被指数(NDVI)、夜间辐射和人口密度。保护区的风险评分为 0.357992，农村社区的风险评分为 1.859474，郊区社区的风险评分为 2.114942，城市社区的风险评分为 3.19662。这些得分分别对应脆弱、差、普通、好四个等级。

对于任务 3，我们制定了三种干预策略，包括改善光源、降低照明强度和优化区域光布局。然后，我们列出了每种策略的多个具体行动。建立了基于微分方程的干预策略模型，量化了三种策略对风险水平的影响。

对于任务 4，我们选择城市和郊区社区来验证三种干预策略的有效性。在接下来的 50 年里，实施这三种策略后的风险得分分别降低了约 2%、6%和 3%。可以得出结论，第二种策略，即降低照明强度，旨在减少光辐射总量，是城市和郊区最有效的干预策略。

最后，对风险评估模型的敏感性分析表明，单个评估指标-10% -10%的波动对最终风险评分的影响是合理的，如图 16 所示。因此，该模型对单个指标的变化具有鲁棒性。此外，图 17 所示的策略模型的敏感性分析表明，我们的模型对增长率具有鲁棒性。

关键词：光污染;干预策略;EWM-TOPSIS;微分方程

目录

守护黑夜，控制光明!..... 1

1 介绍 3

 1.1 问题背景 3

 1.2 问题重述 3

 1.3 我们的工作 4

2 假设与解释 4

3 记号 5

4 任务 1:区域光污染风险水平度量5

 4.1 问题描述与分析 5

 4.2 指标选择 5

 4.3 基于 EWM-TOPSIS 的光污染风险评价模型 7

 4.3.1 EWM-TOPSIS 7

 4.3.2 模型建立 9

5 任务 2:度量应用和结果解释 9

 5.1 数据准备 9

 5.2 度量应用和结果解释 11

6 任务 3:干预策略和具体行动 12

 6.1 策略一:改善光源 12

 6.2 策略二:降低照明强度 14

 6.3 策略三:优化区域照明布局 14

7 任务 4:战略确定和影响评价 15

 7.1 战略实施和影响评价 15

 7.2 策略确定 17

8 敏感性分析 17

 8.1 评价模型敏感性 17

 8.2 策略模型敏感性 18

9 强项和弱项 18

 9.1 强度 18

 9.2 缺点 18

参考文献 19

1 介绍

1.1 问题背景

看着国际空间站拍摄的夜晚地球的照片，人们通常会被城市灯光的“美”所震撼，仿佛它们是圣诞树上的彩灯，却没有意识到这些也是污染的图像。这就像欣赏汽油在水中产生的彩虹色之美，却没有意识到这是化学污染。

不适当或过度使用人造光，被称为光污染，会对人类、野生动物和气候造成严重的环境后果。光污染的组成部分包括：

- 光侵入:光落在不希望或不需要的地方
- 过度照明:照明强度高于适当的照明强度
- 光簇:光源明亮、混乱、过度分组

光污染的影响可能是深远而多样的，既影响自然系统，也影响人类系统。越来越多的证据表明，光污染对人类健康、野生动物和环境产生了可衡量的负面影响。这些负面影响的一些例子包括：

- 危害人类健康，影响犯罪和安全
- 破坏生态系统和野生动物
- 能源消耗增加
- 影响天文观测

重要的是要了解这些影响，并采取措施减轻它们，以尽量减少对我们的环境、健康和经济的负面影响。还有很多改进的空间——如果我们更小心地照明，我们应该能够减少负面影响，同时仍然照亮地面。

有几种干预策略可以用来解决光污染问题，比如使用屏蔽的、定向的和节能的照明，颁布照明条例和实施照明宵禁等。



(a) Image taken from the International Space Station. (Image credit: NASA)



(b) Light trespass falls where it is not needed. (Image credit: Twitter @St Brian)

图 1:光污染显示

1.2 问题重述

COMAP 的照明控制任务(ICM)要求我们提高人们对光污染影响的认识，并制定干预策略以减轻负面影响。

任务 1:提出一个广泛适用的度量标准，以衡量一个地点的光污染风险水平，包括人类和非人类的问题。

任务 2:在四种不同类型的地点(包括受保护的地理位置、农村社区、郊区社区和城市社区)上应用我们的度量并解释其结果。

任务 3:概述解决光污染的三种可能的干预策略，并讨论实施每种策略可采取的具体行动。考虑这些行动对光污染的整体影响的潜在影响。

任务 4:选择两个地点，并应用先前开发的度量来确定每个地点在解决光污染方面最有效的干预策略。讨论所选择的干预策略如何影响该地点的风险水平。

1.3 我们的工作

为了避免繁杂的描述，直观地反映我们的工作过程，流程图如图 2 所示:

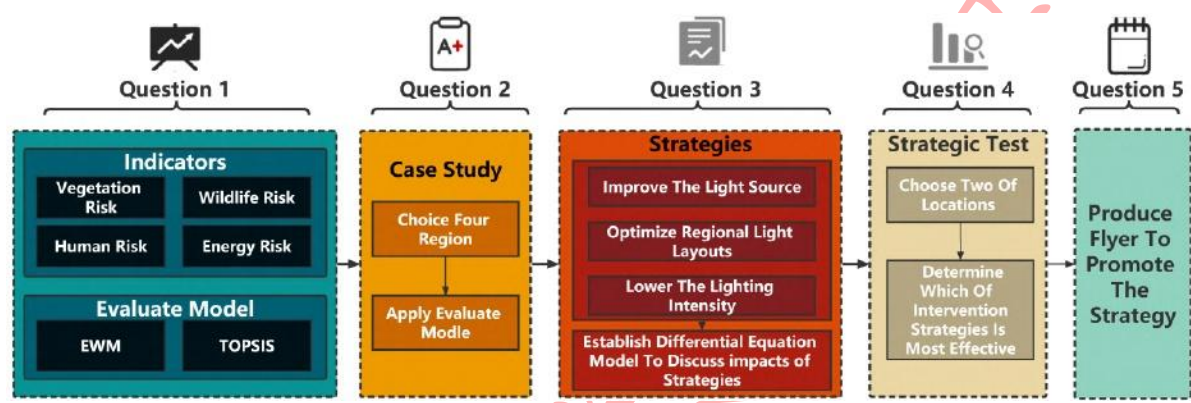


图 2:Flow Chart of Our Work

2 假设与解释

考虑到实际问题总是包含许多复杂的因素，首先我们需要做出合理的假设来简化模型，并且每个假设后面都紧跟着它对应的解释:

假设 1:我们将市场上使用的照明灯具类型分为 LED，荧光灯和其他照明灯具。

说明:LED 灯和荧光灯的光谱和能源效率与市场上其他照明灯具具有显著不同。为了简化模型，我们将照明灯具的主要类型分为 LED 灯、荧光灯和其他照明灯具。

假设 2:我们假设评估模型中没有选择的指标对系统的影响很小。

说明:影响光污染的因素太多，需要考虑，所以这个假设是合理的，有助于在构建模型时避免不必要的麻烦。

假设 3:在策略模型研究期间，不同地区、不同城市的人口密度、物种丰富度、植被覆盖率、各种照明灯具的发光效率等变量保持相对稳定。

说明:这些变量可能会有一些波动，但为了简化模型，我们忽略这些小的变化。

假设 4:我们假设所选择的四个区域具有足够的代表性，因此我们在之前的研究中建立的评价模型的权重系数可以应用于世界上任何地点进行风险评估。说明:我们选择的四个区域具有典型的城市、郊区、农村和保护区特征。为了简化问题并使模型适用于任何区域，可以认为从这四个区域获得的模型指标的权重系数为常数。

3 符号

本文中使用的的一些重要数学符号列于表 1。

表 1:本文使用的符号

Symbol	Description
L	Radiance
PD	Population Density
VC	Vegetation Coverage
Dmn	Menhinick's index for animal diversity
P_F	Utilization rate of fluorescent lamp
P_L	Utilization rate of LED lamp
P_O	Utilization rate of other kinds of lamps
$Angle$	Lamp emission angle
P_M	Utilization rate of high reflective building materials
H	Average height of buildings
BD	Building density
R	Scores of light pollution risk level
R_h	Risk for humans
R_v	Risk for vegetation
R_w	Risk for wildlife
R_e	Risk for energy consumption
η	Energy efficiency

*有一些变量没有在这里列出，将在每一节中详细讨论。

4 任务 1:区域光污染风险水平度量

4.1 问题描述与分析

传统上，人们使用天空质量计(SQMs)和遥感数据来评估给定区域的光污染水平。然而，这两种方法都无法提供光的光谱含量信息，因此在研究光污染对生态系统和野生动物的影响时存在困难，因为不同的物种可能对不同波长的光具有不同的敏感性。

我们提出了一种结合光源光谱和光强的方法来计算特定生物行为对光源光谱的响应，评估植物成熟延迟或加速、野生动物迁移模式受到影响以及人类昼夜节律混乱等影响。

为了捕捉光污染对人类、野生动物、植被、能源消耗的地面影响，我们将辐射(亮度)和光谱都考虑在内，通过以下步骤评估光污染风险:

第一步:调查光污染的来源。

第二步:选择一套丰富、全面的评价指标。

第三步:利用 EWM-TOPSIS 模型评估人类、植被、野生动物和能源消耗的光污染风险。

第四步:计算最终得分，将污染风险分为四个等级。

4.2 指标选择

一些可以用来衡量光污染风险的指标如图 3 所示:

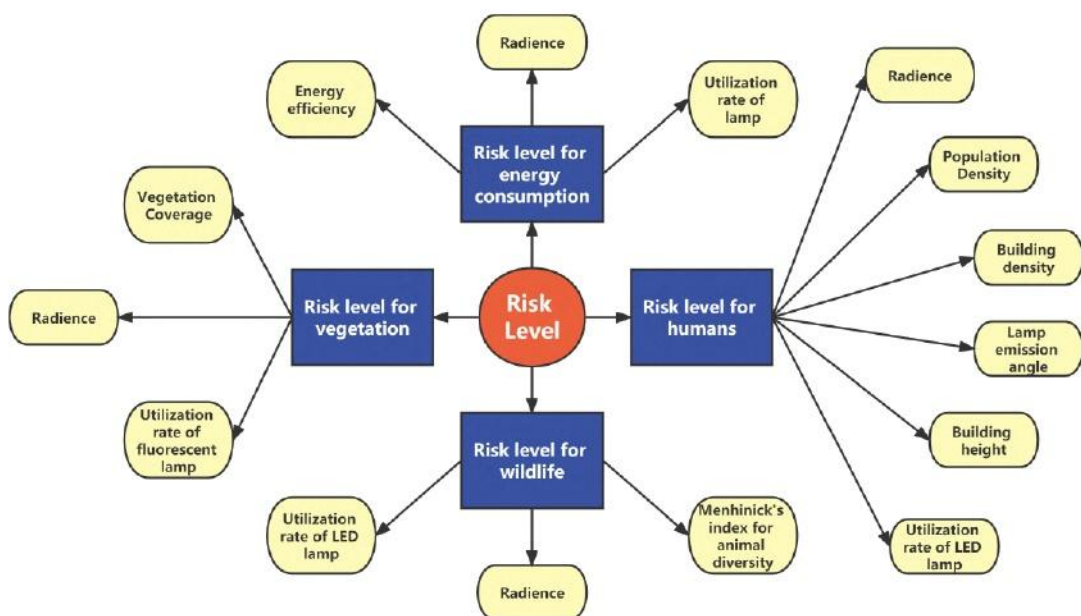


图 3:指标选择

1.光辉

亮度是光源向不同方向发射的光能的度量。它用于光污染研究领域，用来估算夜间天空的亮度，是光污染的重要指标。

利用辐射度估算亮度是光污染研究领域的一种行之有效的方法，并已在众多研究中用于评估不同光源对夜空的影响。

罗家 1-01 遥感卫星配备了高灵敏度夜间成像相机，可以提供 130 米空间分辨率的夜间灯光图像，宽度为 260 公里。罗家 1-01 的空间分辨率显著高于以往光污染研究中使用的 DMSP/OLS 和 NPP/VIIRS，为深入研究城市光污染提供了可能。罗家 1-01 数据可在高分辨率对地观测系统湖北省数据与应用中心(<http://www.hbeos.org.cn>)免费获取。

根据官方校准方程，对罗家 1-01 号图像进行辐射校准，将数字数字(DN)值转换为辐亮度：

$$L = DN^{3/2} \cdot 10^{-10} \tag{1}$$

式中，L 为辐照度 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ，DN 为数字数值。

2.建筑高度、密度和材料

高层建筑需要更多的照明来照亮其更大的表面区域，这可能会增加光污染。此外，高层建筑会遮挡自然光，导致对人工照明的需求增加。

更高的建筑密度会导致更多的人工照明被用于照亮建筑物、街道和公共空间。这可能会导致城市地区的光污染水平增加。

由玻璃等高反射材料制成的建筑物会增加反射到周围环境中的光量，从而导致更多的光污染，反之亦然。

3.不同类型灯具的比例

科学研究表明，蓝光照射可有效抑制褪黑激素分泌，导致昼夜节律发生变化;绿光则抑制植物的生长发育。因此，我们选择了两种广泛使用的灯，并对图 4 所示的光谱进行了研究。

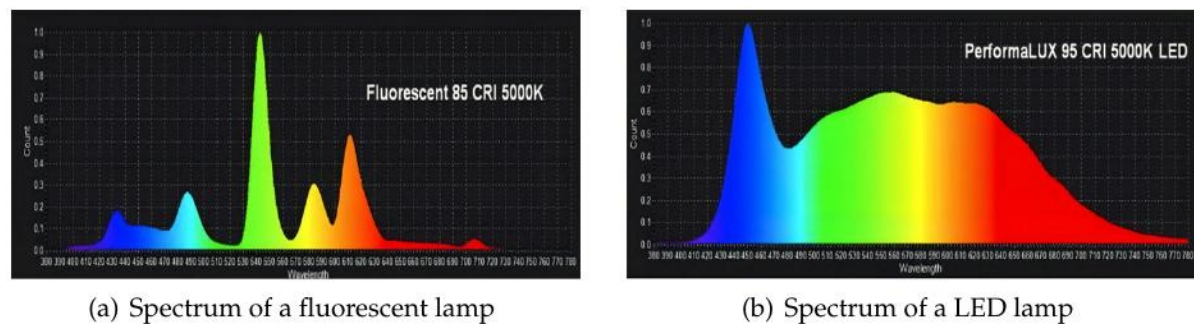


图 4: 荧光灯和 LED 灯的光谱

显然，荧光灯对植被的负面影响更大，LED 灯对人类和野生动物的负面影响更大。在这里，我们用不同类型灯具的比例来量化光谱对人类、植被和野生动物的影响。

光的发射角度也很重要。当室外照明灯具设计或安装不当时，光线可能以高角度发射，导致向上和向外的光污染。

4.人口、动植物密度

当一个地区的人口密度、植被覆盖度和物种多样性指数较大时，受到光污染负面影响的对象范围就会更广。因此，我们选择了以下三个指标:

人口密度是指一定时期内一定单位面积土地上的平均人口数量，用总人口除以总面积计算得出。植被覆盖率通常是指森林面积占总土地面积的比例，一般用百分数表示。特别地，我们选择用 Menhinick 的多样性指数来表示动物的多样性。

$$D_{mn} = D = \frac{S}{\sqrt{N}} \tag{2}$$

式中， D_{mn} 为 Menhinick 多样性指数， N 为样本中个体总数， s 为物种数。

4.3 基于 EWM-TOPSIS 的光污染风险评价模型

4.3.1 EWM-TOPSIS

TOPSIS 的基本原理是，最理想的选择是最接近正理想解和最远离负理想解的。换句话说，正理想解是通过最大化利润标准和最小化成本标准来实现每个备选方案的最优价值解。EWM 和 TOPSIS 的分步工作细节如图 4 所示。

(1)构建决策矩阵 z 。基于光污染风险的指标体系，我们建立了多属性决策矩阵。

$$Z = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{2n} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix}_{m \times n} \tag{3}$$

其中 x_{ij} ($i = 1, 2, \cdots, m; j = 1, 2, \cdots, n$) 为第 i 个方案的第 J 个指标参数值。

(2)决策矩阵的归一化。由于决策矩阵中参数的单位不一致，因此需要对矩阵进行无因次化和标准化处理。常用的归一化方法是平均值法。

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

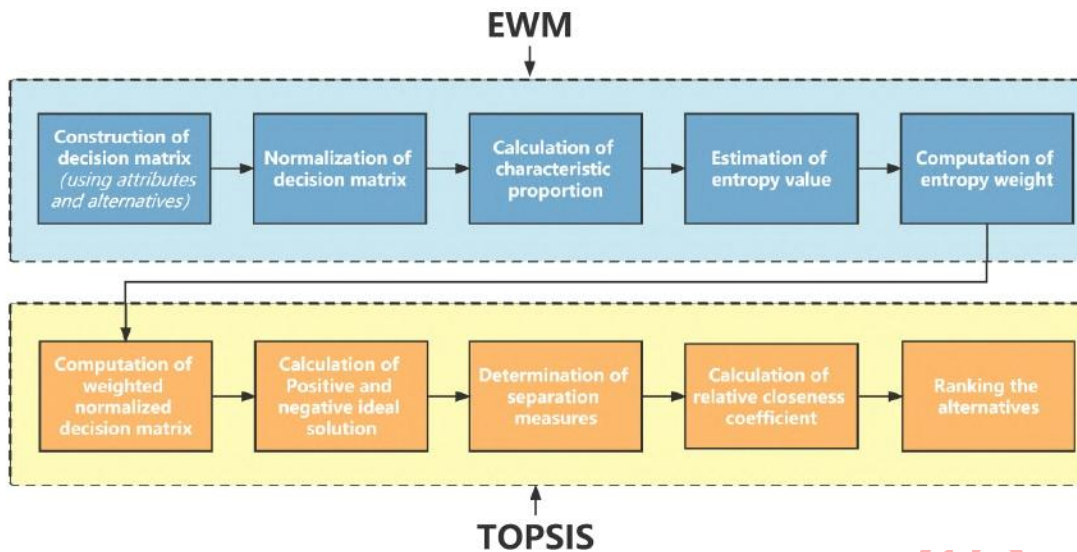


图 5:EWM-TOPSIS 流程图

其中为 d_{ij} 第 i 个方案的第 j 个指标的权重。

(3)基于 EWM 方法确定公制权重。在 multi-indicator。在决策问题中，每个指标用指标权重系数重要程度来表示。

$$H(d_j) = 1 + \frac{\sum_{i=1}^m d_{ij} \ln d_{ij}}{\ln m} \quad (5)$$

其中 $H(d_j)$ 是第 j 个标准的变异系数。

$$W_j = \frac{H(d_j)}{\sum_{j=1}^n H(d_j)} \quad (6)$$

式中， w_j 为第 j 个指标的权重。

(4)构造加权决策矩阵 V 。

$$V = (v_{ij})_{m \times n} = (W_j d_{ij})_{m \times n} \quad (7)$$

(5)根据正、负理想解 C^+ 、 C^- ，计算每个被评价对象与理想解的接近度。将距离正理想解更近的评价对象视为最优评价对象。因此，我们有：

$$\begin{aligned} L_i^+ &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - c_j^+)^2} \\ L_i^- &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - c_j^-)^2} \\ d_i^+ &= \frac{L_i^-}{L_i^+ + L_i^-} \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $Land_i$ 分别 $-i$ 表示每个评估对象与正理想解和负理想解之间的距离; $+i$ 表示每个评估对象与正理想解的相对接近度。相对接近度的值越大, 表示候选对象离理想解越近, 对应的解就是最优解。

4.3.2 模型建立

为了获得更好的评分, 我们使用最小-最大归一化对 R_h, R, R_v, R_{ew} 的原始数据进行线性变换。实现获得(0,1)范围内所有缩放后的数据的公式如下:

$$x_{norm} = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \tag{9}$$

1.对人类的风险

暴露在含有高水平蓝光的照明下会破坏褪黑激素的正常昼夜节律, 通常会导致失眠、压力、各种疾病甚至癌症的风险增加。通过用滤光片阻隔 530nm 以下的波长, 可以阻止蓝光成分到达眼睛, 从而保持人体夜间褪黑激素的产生。这意味着, 光线中的蓝色成分对环境和人体健康的影响最为严重。

$$R_h = (PD \cdot d_i^+)_{norm} \tag{10}$$

2.植物风险

LED 灯发出高水平的蓝光, 这对植物的生长和发育尤其有害。蓝光对许多植物物种来说是一个重要的线索, 因为它参与调节开花时间和其他生长过程。然而, 夜间暴露在高水平的蓝光下会破坏这些过程, 导致植物生长和生产力下降。此外, 蓝光还会干扰调节植物昼夜节律的褪黑激素的产生, 从而进一步破坏植物的生长发育。

$$R_p = (\frac{VC \times P_F}{\ln L})_{norm} \tag{11}$$

3.野生动物的风险

光污染对野生动物最广为人知的影响之一是它对夜行动物行为和健康的影响。许多物种, 如蝙蝠、鸟类和昆虫, 依靠黑暗来导航、狩猎和交配。夜间的人造光会破坏这些行为, 导致繁殖成功率降低, 迁徙模式改变, 死亡率增加。例如, 明亮的灯光会使候鸟迷失方向并吸引它们, 导致它们与建筑物相撞, 或变得疲惫不堪, 容易被捕食。

$$R_w = (Dmn \times P_L \cdot \ln L)_{norm} \tag{12}$$

4.能源消耗风险

$$R_e = (\sum P_i \cdot (1 - \eta_i))_{norm}, \quad i = F, L, O \tag{13}$$

5.计算光污染风险最终得分

最后, 我们将四个归一化风险评分相加, 得到光污染风险评分的最终得分。

$$R = R_h + R_v + R_w + R_e \tag{14}$$

其中 R 为总风险评分, R_h, R, R_v, R_{ew} 为上面计算的四个风险评分。

5 任务 2:度量应用和结果解释

5.1 数据准备

深圳是中国主要的副省级城市和经济特区之一。全市总面积约 4000 公里²。选取深圳城市社区、郊区社区、农村社区和保护区 4 个区域进行光污染风险评价。

1.城市社区:福田区。福田位于深圳的中心地带，自 1980 年建区以来，一直受益于极快的经济增长速度。

2.郊区社区:光明区。由于光明区是深圳农业发达的新区，我们选择它作为郊区研究区域进行研究。

3.农村社区:坪山区。坪山区位于深圳的东北部，是深圳最偏远的地区之一，因此是一个合适的农村地区。

4.保护区:梧桐山保护区。梧桐山保护区总面积 31.82 公里²。植被面积也相当大。



图 6:四种不同类型的地点

为了获得各研究区植被覆盖度，我们引入了归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference vegetation Index)。

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \tag{15}$$

其中 NIR 为近红外区域获得的光谱反射率测量值，R 为红色(可见)区域获得的光谱反射率测量值。

利用 Landsat 遥感影像和 ArcGIS 栅格计算器工具，提取深圳 NDVI 地图如下：

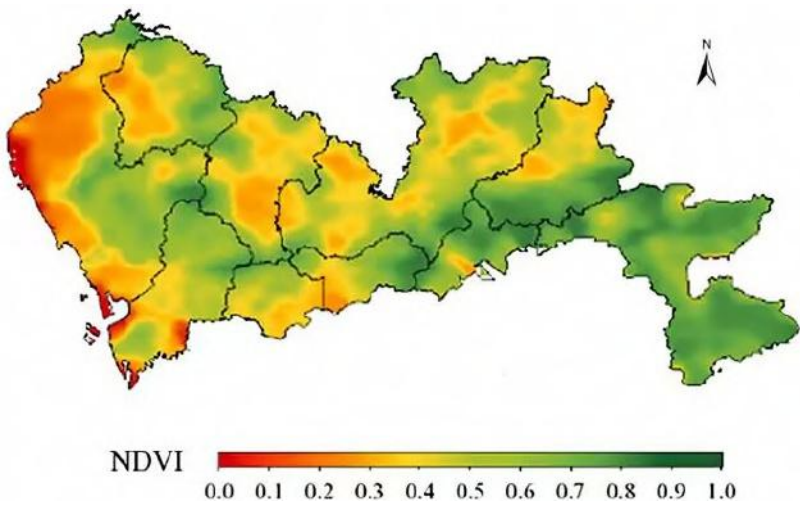


图 7:2020 年深圳 NDVI 空间分布

此外，我们还采集了深圳人口密度分布图和罗家一号卫星夜光遥感影像。将 4 个研究区域的面矢量数据与上述 3 张统计图叠加平均，得到研究区域的 V C、PD 和 L。

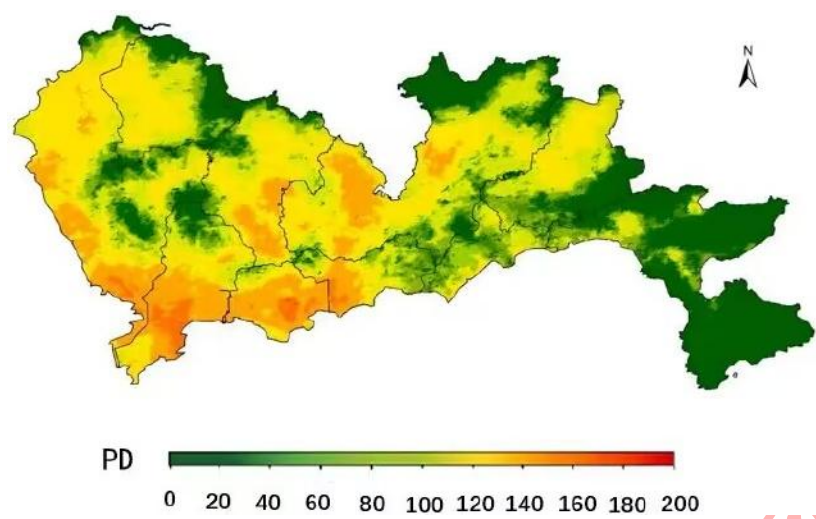


图 8:2020 年深圳人口密度图(单位:人口/0.01 km²)

5.2 度量应用和结果解释

将四个研究领域的指标数据作为风险等级评价模型的输入，可以得到四个领域的植被、野生动物、能源消耗和人类生命四个维度的风险得分。

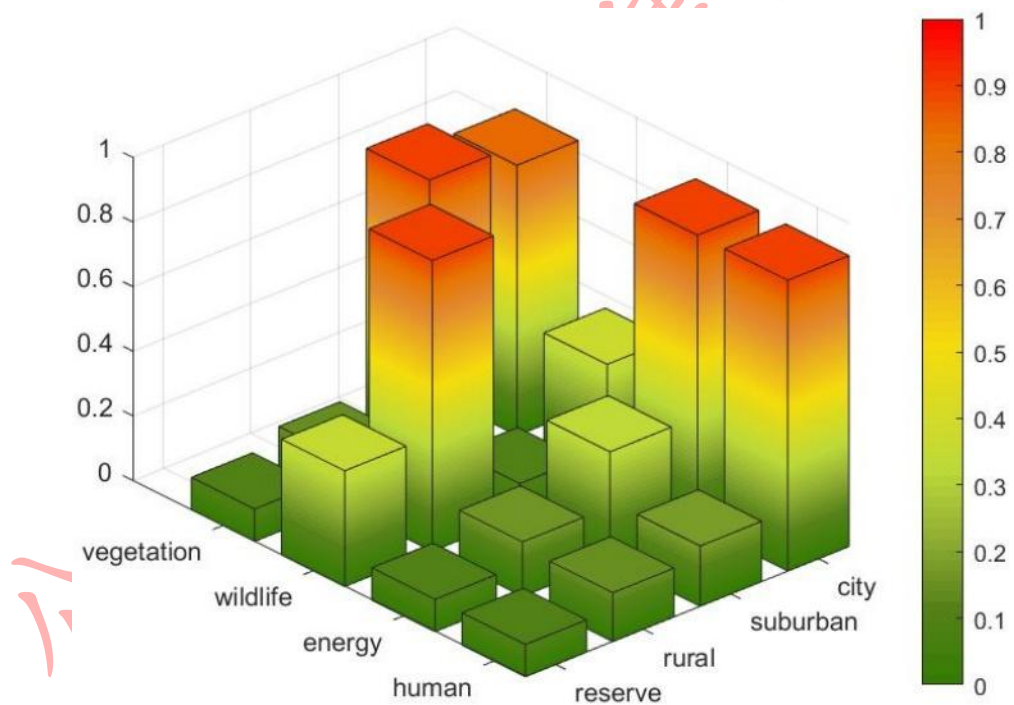


图 9:四个地点在四个维度上的风险评分

分析城市区域得分:除了野生动物维度，城市区域所有维度的风险得分都非常高，因为城市区域的光辐射总量远远大于其他三种类型的区域，但城市区域的野生动物数量非常少。

分析城郊区域得分:城郊植被光污染风险得分最高，可能是因为其植被覆盖率明显高于城市。另外，由于发展水平的差异，郊区的荧光灯使用率也较高。

分析农村和保护区得分:农村和保护区的风险得分普遍较低，因为它们的总光辐射暴露量远低于城市和郊区。然而，由于野生动物丰富，这些地区在野生动物维度上的风险得分较高。

将这四个维度相加，就可以得到这四个地区的总风险得分：

表 2:四个区域的总风险评分

Protected land	Rural community	Suburban community	Urban community
0.357992	1.859474	2.114942	3.19662

根据我们的评分标准，四个研究领域的光污染风险评分分别落入良好、一般、较差和脆弱的风险等级(图 10)。

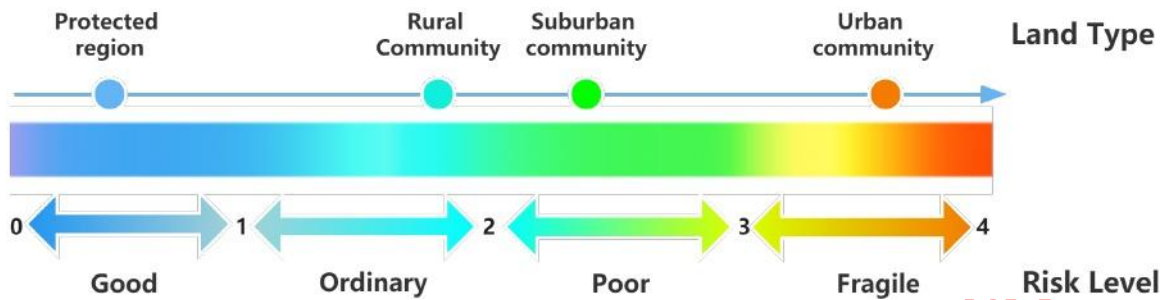


图 10:4 个选定地点的风险等级评价

6 任务 3:干预策略和具体行动

根据我们的上述评价模型，可以看出，迫切需要对光污染实施一定的干预策略。基于我们对光污染机制的研究和理解，我们从三个不同的角度提出了降低光污染程度的三种干预策略。

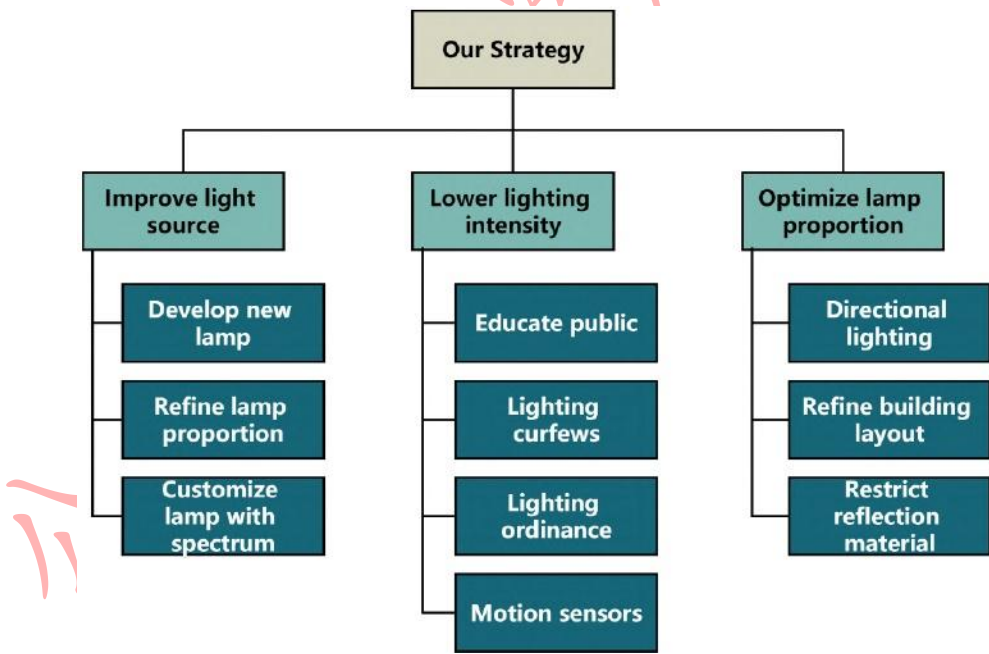


图 11:选定的 4 个地点的风险等级评价

6.1 策略一:改善光源

行动 1:定制具有特定光谱的灯具这涉及开发具有独特光谱的灯具，这些灯具经过优化，可以在特定环境或应用中最大限度地减少光污染。通过定制灯具，可以提高照明效率，减少不必要地分散到环境中的光量。这种方法需要对光源有透彻的了解特定环境的照明需求，以及光污染对当地生态系统的影响。通过设计和定制具有特定光谱的灯具，可以减少光污染的负面影响，同时仍然为预期目的提供充足的照明。

行动 2:完善新的灯具布局

从以上研究中，我们发现荧光灯、led、泛光灯的不当和过度使用加剧了光污染的危害。我们考虑减少这类灯具的使用，以减少光污染。

我们知道，荧光灯会抑制植物生长，增加该地区光污染的风险。对此，我们提出的第一个行动，就是倡导减少荧光灯的过度使用，同时研发生产新的灯具来替代荧光灯，从而降低荧光灯的使用比例。不考虑新灯具的开发，我们假设经过一段时间的教育倡导，该地区的日光灯使用比例下降到最小比例 x_{1min} (一般不精确为 0)，满足类似于 Logistics 的迟滞下降模型：

$$\frac{dP_L}{dt} = r_1 \cdot P_L \left(1 - \frac{P_L}{P_{Lmin}}\right) \tag{16}$$

其中 P_L 为使用荧光灯的比例， P_{Lmin} 为使用理想荧光灯的最小比例 1，表示使用荧光灯的比例下降的速度。

新型灯具开发出来后，将取代荧光灯。使用荧光灯的人群比例与新型灯具之间的关系，可以用一个类似于人口竞争方程的微分方程来描述。

$$\begin{cases} \frac{dP_L}{dt} = r_1 \cdot P_L \left(1 - \frac{P_L}{P_{Lmin}} - \sigma_1 \cdot \frac{P_N}{P_{Nmax}}\right) \\ \frac{dP_N}{dt} = r_2 \cdot P_N \left(1 - \frac{P_N}{P_{Nmax}} - \sigma_2 \cdot \frac{P_L}{P_{Lmin}}\right) \end{cases} \tag{17}$$

式 N 中表示 2 新灯具的使用率， N_{max} 表示新灯具在本地灯具市场的最大使用率，并表示新灯具使用率的增长率。 σ_1 表示 1 新灯替代荧光灯的程度(新灯相对于荧光灯的竞争力，竞争力越大，此值越大)， σ_2 表示荧光灯替代新灯的程度 2 (荧光灯相对于新灯的竞争力，竞争力越大，此值越大)。

动作 3:开发光谱更好的新灯具

许多大城市市中心的 DNB 辐射有所下降，而外围地区则有所增加。这些减少通常可以直接归因于用 led 灯替换旧灯。国际空间站宇航员在 2012 年和 2015 年拍摄的意大利米兰的照片生动地证明了这一点(图 5,A 和 B)，城市的路灯从黄色/橙色(钠蒸气)变为白色(LED)，而周围地区仍然是黄色/橙色。因此，光泽度由于传感器对 400 至 500 nm 范围内的光缺乏灵敏度，DNB 观察到的亮度下降(图 5C)。类似的转变可以在世界各地的许多城市看到(并通过报纸报道进行验证)。

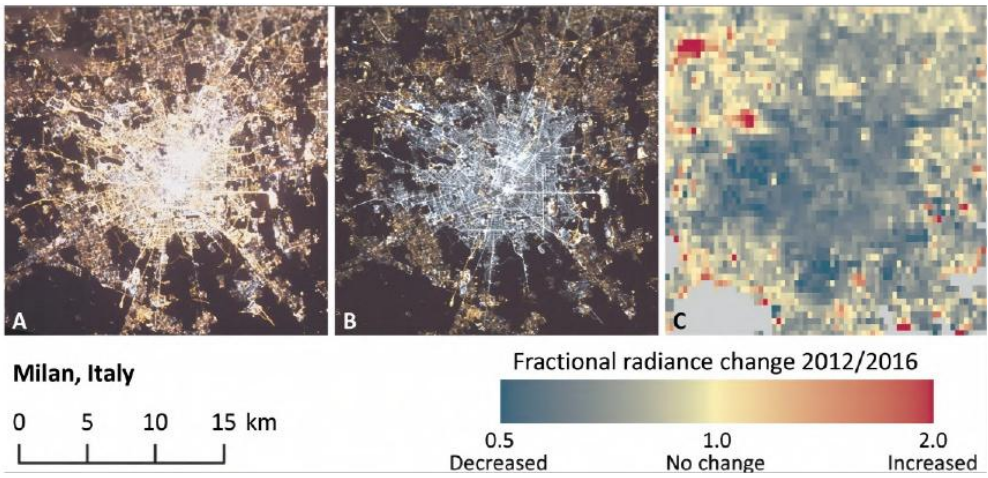


图 12:从太空观察到的意大利米兰照明技术的变化。

潜在影响:改善灯具的光谱分布并调整其使用率,对应于风险评估模型中 Pf、Pl 和 Po 的变化。设计新的灯具需要很高的研发(Research & Design)成本,其中包括检查照明位置和光源光谱的环境影响,以及寻找符合要求的新照明材料,这需要大量的人力和资源。其次,强行改变目前的灯具结构,会造成很多尚未达到使用寿命的灯具的浪费,造成不必要的浪费。

6.2 策略二:降低照明强度

行动一:教育公众我们可以提供有关负责任的户外照明方法的信息,提高人们对保护黑暗天空和自然夜间环境之美的重要性的认识,并鼓励更多的人参与到对抗光污染的斗争中来。

行动二:实施灯火管制

据新闻报道,德国正在采取预防措施,最近在市政工程中实施了能耗控制,以缓解能源危机。全国主要城市的夜灯,如地标、纪念碑、市政厅、博物馆、图书馆等都已关闭。在首都柏林,日落之后,包括胜利柱和柏林大教堂在内的 200 座标志性建筑内的灯光也会同步熄灭。

行动三:颁布照明条例

为防止不必要的光污染,建议避免使用亮度或超过给定任务的最低要求的照度。此外,在可能的情况下,应调暗灯光以降低亮度。

步骤四:使用运动传感器

为了安全起见,不要在夜间开着灯,在灯上安装运动传感器可以证明是有用的。运动传感器只有在检测到运动时才会打开灯,从而降低了电力的总体成本,同时减少了夜间的光污染。调光器和计时器也可以帮助降低平均照明水平,节省更多的能源。

潜在影响:上述所有行动都旨在减少光辐射总量 L,但区域经济发展和社区安全与照明密切相关。低光照水平会导致犯罪率上升,因为它为犯罪活动提供了理想的环境。在光线较暗的地区,可疑行为更难被发现,犯罪分子更有可能不被发现。这增加了他们犯罪的信心,也增加了他们逃脱惩罚的可能性。此外,光线不足会使目击者难以准确描述罪犯或他们的活动,这可能会阻碍执法部门识别和逮捕他们的努力。此外,低照明会在居民中产生恐惧感和不安感,使他们感到脆弱,更容易受到犯罪活动的影响。所有这些因素都导致了低光照地区犯罪率的增加。降低夜间的亮度可能会使人们不愿意外出,这可能会抑制区域经济发展的活动,并对其产生负面影响。

6.3 策略三:优化区域照明布局

行动 1:装备屏蔽和定向照明不允许灯具直接在水平面及水平面以上发出任何光,特别要注意切断低海拔处发出的光(在向下垂直上方的 $\gamma/90-135$ 范围内,即从水平平面 $0-45$)。在实践中,这个范围内的光在大气中传播了很长的距离,并增强了光污染的加性(Cinzano 和 Castro, 2000;Luginbuhl et al., 2009),这种效应使问题更加复杂,尤其是在人口密集的地区。还应强制执行对从灯具向下离开的光的额外限制(从垂直向下的伽马 $80-90$

范围内，即水平平面以下的 $0\text{e}10$)。这是因为沥青在放牧入射时的近镜面反射大大增加了水平以上低角度的光量(尽管这种反射光更容易受到周围植被和建筑物的屏蔽)。这种限制也将通过降低固定装置的直接眩光来改善道路使用者的舒适度和视觉表现。

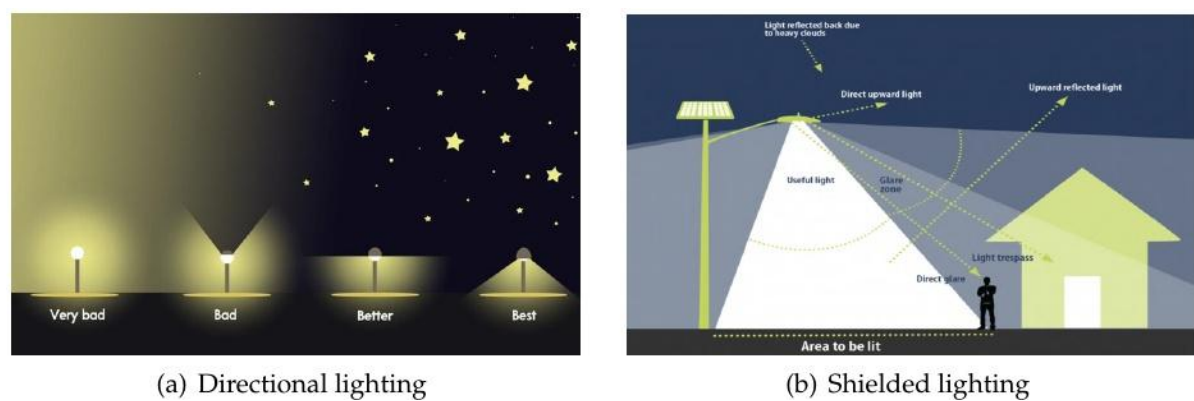


图 13:装备屏蔽和定向照明

行动 2:限制建筑高度和密度

我们可以增加绿色空间:增加城市地区的绿色空间可以帮助降低建筑物的总体密度，从而减少射入夜空的光量。

行动 3:限制反射材料

我们可以选择使用更不透明的材料，如混凝土、砖或木材，这些材料的反射率较低，有助于减少光污染。最后，还可以使用光控制技术，如防光罩或定向照明，以尽量减少建筑物发射和反射的光量。

潜在影响:在该策略中，行动 1 旨在降低风险评估模型中的角度指数。合理限制建筑高度和密度可以降低 H 指数和 BD 指数。管理建筑材料的使用，尽可能使用低反射率系数的建筑材料，可以降低 Rm 指数。但相反，建筑高度和密度的降低，会导致同一区域内的居民数量急剧减少，给住房带来压力。这种影响在城市地区尤为显著。

7 任务 4:战略确定和影响评价

平衡权衡，如安全-节能权衡，发展-环境权衡，健康-便利权衡等，需要仔细考虑特定地点或社区的具体情况和目标。在这里，我们选择城市和郊区作为区域来验证该策略的有效性。

重要的是要考虑照明选择的长期影响，并评估潜在的干预策略，以减少光污染，同时满足社区的其他需求。在这里，我们评估了未来 50 年的影响。

7.1 战略实施和影响评价

各策略的效果如下:

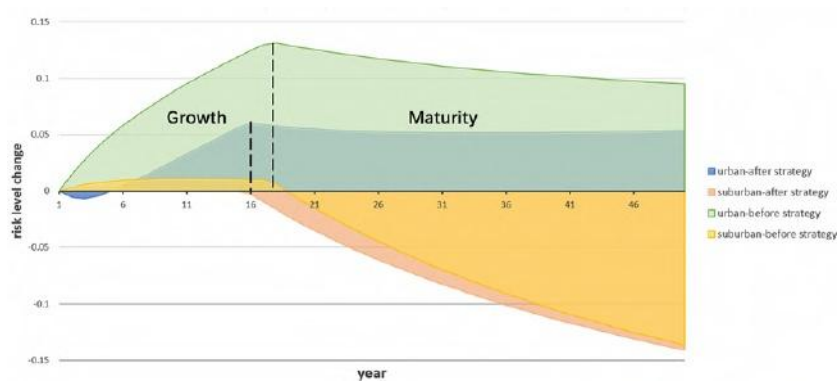


图 14:实施策略后的风险评分变化

通过各种政策改变目前的灯具使用率，PF、PO L and p3 可以在未来 50 年内改变。因此，以这三个指标为变量，就可以得到研究区域未来 50 年的风险评分变化。

从图 14 的结果可以看出，在没有战略干预的情况下，城市风险评分将经历 17 年左右的快速增长，然后开始缓慢下降;在政策干预之后，这种增长的弧度会减小，并提前进入稳定期。如果没有政策干预，郊区的风险评分会逐年下降，但更换更多的光源可以加速这一过程。

总的来说，在这两个研究领域，更换光源的策略可以减缓风险的增加或加速风险的降低。

通过降低光强，可以降低评价模型中的 L。因此，我们可以得到未来 50 年的风险评分下降情况。

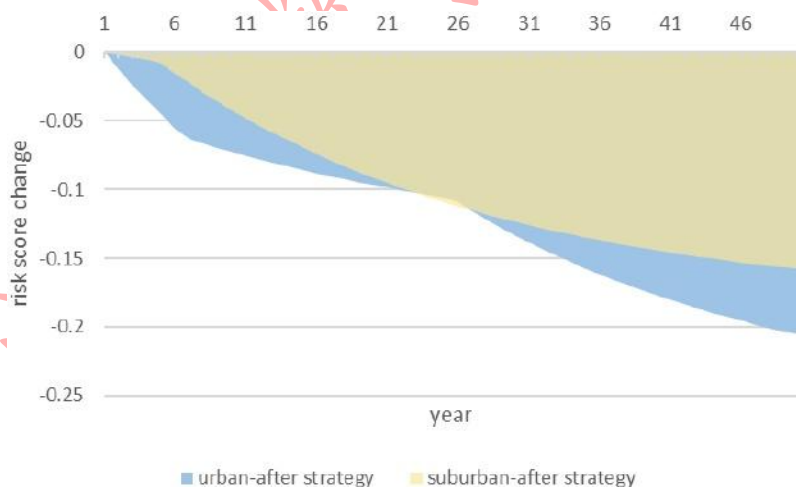


图 15:风险评分下降

由于我们假设在没有政策干预的情况下，光辐射总量 L 保持稳定，因此在这种情况下，对应区域的风险评分也将保持不变，变化为 0。

战略实施后，城市和郊区研究区域的风险评分均有所下降。其中，城市地区的下降幅度更大。我们分析造成这一现象的可能原因是城市人口密度远大于郊区，因此 L 值的下降会导致风险评分的下降更为显著。

根据我们在 Task 3 中确定的角度、H、BD 和 m p 的下降比例，通过表 3 中的评价模型比较策略实施前后的风险得分。

优化布局策略对城市和郊区光污染风险评分影响不大，均在 0.01 - 0.05 的范围内。我们推测这是因为 angle、H、BD 和 Pinm Rcalculationh 的权重较小，对整体风险评估的影响也较小。

表 3:风险评分变化

Region	Urban	Suburban
before strategy	3.19662	1.414942
after strategy	3.183761	1.374156
change	0.012859	0.040786

7.2 策略确定

综合以上三种策略的应用效果，可以得出策略 2 对区域光污染风险评价影响最明显、最稳定的结论。可以得出结论，通过一系列针对公众的宣传教育政策，降低光辐射总量 L 是最有效的干预策略。

8 敏感性分析

8.1 评价模型敏感性

由于我们的评价模型包含了许多不同的指标，因此一个地区某一指标的变化应该不会对该地区的风险评分产生显著影响。为了验证评价模型的稳健性，我们选取了 L、H、BD、angle 四个指标，在当前值的基础上调整 10%，观察最终风险评分的变化。我们将对郊区的数据进行分析。

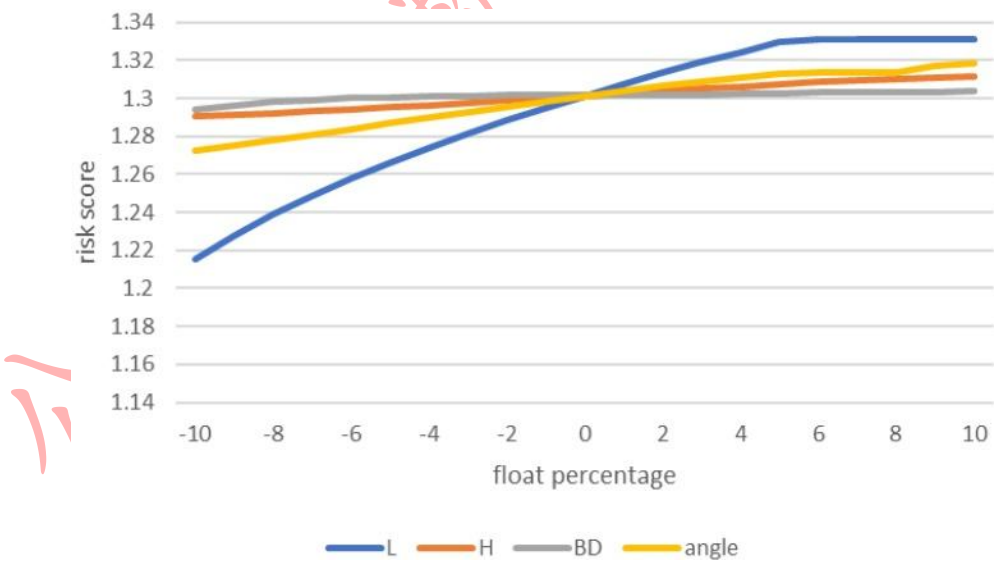


图 16:对 L、H、BD、角度的敏感度

由此可知，H、BD 和角度变化幅度较小，约为 4%，而 L 值波动引起的风险评分较大，约为 10%。总体上反映了个别指标的变化不会导致风险评分的过度变化。

另外，我们也可以从图中确认，L 值的变化对风险评估的影响很大，非常适合作为政府制定战略的重点方向。

8.2 策略模型敏感性

我们改变了政策实施后荧光灯和 LED 灯比例的下降率 r 。我们绘制了城市社区的敏感性分析图，可以看出，荧光灯占比的最终变化幅度很小，整体趋势保持一致。这说明我们的模型是稳健的。

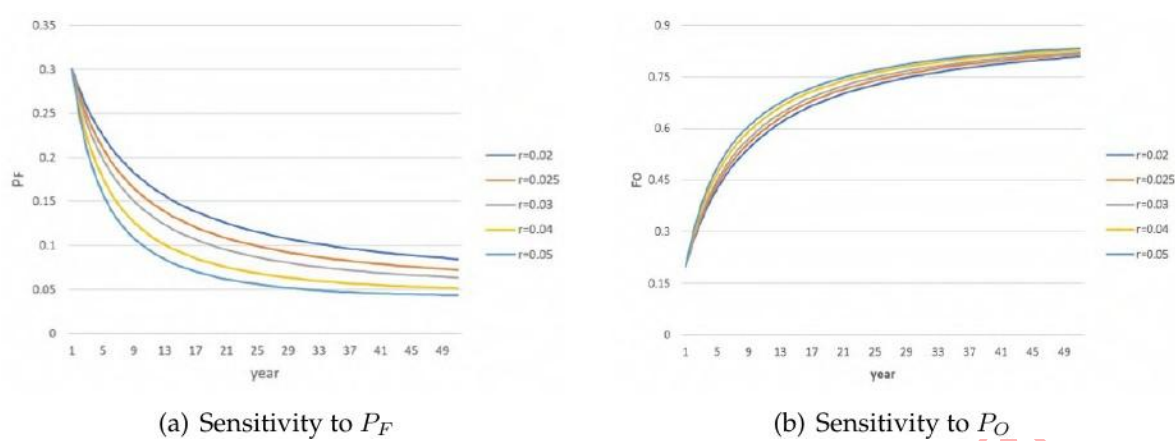


图 17:对 P_F and P_O 的灵敏度

9 强项和弱项

9.1 强度

- 我们使用 RS (Remote Sensing)数据和 GIS (Geographical Information System)分析获得研究区域的辐射亮度、植被覆盖率等指标，这意味着我们的数据来源更加全面和科学。
- 我们的光污染风险评估模型选择了一套丰富而全面的评价指标，不仅考虑了辐射亮度等基础指标，还将与照明相关的光谱信息和反射原理纳入了模型。
- 在我们的战略规划中，我们从照明灯具、建筑、用户三个角度制定了策略，希望能够影响风险评估模型中的指标，从而降低光污染风险。我们参考了不同地区关于光污染的政策和相关研究，并针对每一项策略制定了详细的行动计划。
- 从我们的敏感性分析结果可以看出，我们制定的评价和策略模型是稳定的，可以广泛适用于不同的地区。

9.2 缺点

- 对于光污染干预策略的一些负面影响，我们只进行了文本讨论，没有对这些负面影响进行量化。
- 光污染不仅是一个科学问题，也是一个复杂的社会问题。虽然我们力求考虑尽可能多的因素，但在风险评估模型中，评估指标仍有很大的扩展空间。

10 的结论

城市灯光之美往往具有欺骗性，因为它也是一种污染，会对人类、野生动物、植物产生有害影响，并造成能源浪费。本文提出了一个综合的光污染风险评估模型和干预策略模型来解决这一问题。通过评估给定地点的风险水平，并实施有效的干预策略，如改善光源和降低照明强度，我们可以减轻各个地点的光污染影响。将模型应用于深圳典型区域并进行敏感性分析的结果表明，干预策略可以有效降低风险评分。本研究为可持续照明实践的发展提供了宝贵的贡献，并鼓励进一步的调查和减轻光污染的行动。

参考文献

- [1] Falchi F, Bará S. Light pollution is skyrocketing[J]. *Science*, 2023, 379(6629): 234- 235.
- [2] Kyba C C M, Kuester T, Sánchez de Miguel A, et al. Artificially lit surface of Earth at night increasing in radiance and extent[J]. *Science advances*, 2017, 3(11): e1701528.
- [3] Kim K H, Choi J W, Lee E, et al. A study on the risk perception of light pollution and the process of social amplification of risk in Korea[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22: 7612-7621.
- [4] Huang S, Tang L, Hupy J P, et al. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing[J]. *Journal of Forestry Research*, 2021, 32(1): 1-6.
- [5] Huang W, Shuai B, Sun Y, et al. Using entropy-TOPSIS method to evaluate urban rail transit system operation performance: The China case[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2018, 111: 292-303.
- [6] Chalkias C, Petrakis M, Psiloglou B, et al. Modelling of light pollution in suburban areas using remotely sensed imagery and GIS[J]. *Journal of environmental management*, 2006, 79(1): 57-63.
- [7] Kim K H, Choi J W, Lee E, et al. A study on the risk perception of light pollution and the process of social amplification of risk in Korea[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22: 7612-7621.
- [8] Wise S. Studying the ecological impacts of light pollution on wildlife: amphibians as models[J]. *Starlight: A Common Heritage*; Cipriano, M., Jafar, J., Eds, 2007: 209-218.
- [9] Mizon B. Light pollution: responses and remedies[M]. *Springer Science Business Media*, 2012.
- [10] Longcore T, Rodríguez A, Witherington B, et al. Rapid assessment of lamp spectrum to quantify ecological effects of light at night[J]. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology*, 2018, 329(8-9): 511-521.
- [11] Isobe S I, Hamamura S. Light pollution and its energy loss[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2000, 273: 289-294.
- [12] Sun B, Zhang Y, Zhou Q, et al. Street-scale analysis of population exposure to light pollution based on remote sensing and mobile big data—Shenzhen city as a case[J]. *Sensors*, 2020, 20(9): 2728.