

珠三角地区涉海自然保护地光污染特征分析

Light Pollution Characteristics in Marine-Related Protected Areas in Pearl River Delta

江本砚 简淑仪 李建军 郭源园

JIANG Benyan, JIAN Shuyi, LI Jianjun, GUO Yuanyuan

摘要: 光污染是第四大污染类型,对海洋生态系统存在极大危害。文章基于卫星遥感影像定量分析了珠三角地区涉海自然保护地光污染的演变特征和空间分布规律。研究发现,2012—2023年珠三角涉海保护地的夜间光环境显著恶化,灯光总值从9 566.2 nW/cm²·sr增加到23 701.3 nW/cm²·sr,均值从0.8 nW/cm²·sr增加到1.9 nW/cm²·sr,其中风景名胜区和湿地公园所受光污染程度最深。从空间分布来看,距离陆地越近的自然保护地受到的光污染程度越高,自然保护地的边缘光污染程度高于内部光污染程度。从不同城市的分布来看,深圳和东莞的涉海保护地光污染程度最高,江门和惠州最低。光污染的空间分布规律显示出自然保护地夜间光环境与沿海开发强度的密切联系。研究结果将为陆海统筹视角下涉海保护地夜光环境的优化提供科学依据。

关键词: 陆海统筹; 珠三角; 涉海保护地; 光污染

【中图分类号】TU984

【文献标志码】A

【文章编号】1005-278X(2024)03-0023-08

作者简介:

江本砚 广州大学建筑与城市规划学院讲师, 104206@gzhu.edu.cn

简淑仪 广州大学建筑与城市规划学院硕士研究生, 2112309051@e.gzhu.edu.cn

李建军 广州大学建筑与城市规划学院院长、教授, 通信作者, Lijianjun@gzhu.edu.cn

郭源园 广州大学建筑与城市规划学院副教授, yuanyuanguo@gzhu.edu.cn

基金项目:

广东省基础与应用基础研究 (2023A1515110905)

广州大学“2+5”学科与科研创新平台建设项目 (PT252022023)

收稿日期: 2024-05-04

Abstract: Light pollution is the fourth major type of pollution and poses significant harm to marine ecosystems. This paper analyzes the evolution characteristics and spatial distribution patterns of light pollution in marine-related natural protected areas in Pearl River Delta using satellite remote sensing imagery. The study reveals that from 2012 to 2023, the nighttime light environment in marine protected areas of Pearl River Delta has significantly deteriorated. The total light value increased from 9 566.2 to 23 701.3 nW/cm²·sr, and the average value increased from 0.8 to 1.9 nW/cm²·sr, with scenic spots and wetland parks experiencing the highest levels of light pollution. In terms of spatial distribution, protected areas closer to land experience higher levels of light pollution, and the edges of these areas are more affected than their interiors. Among the different cities, marine protected areas in Shenzhen and Dongguan suffer the most severe light pollution, while Jiangmen and Huizhou have the lowest levels. The spatial distribution patterns of light pollution demonstrate a close relationship between the nighttime light environment of protected areas and the intensity of coastal development. The study results will provide a scientific basis for optimizing the nighttime light environment of marine protected areas from the perspective of land-sea coordination.

Keywords: land-sea coordination; Pearl River Delta; marine protected areas; light pollution

涉海自然保护地是自然保护体系的重要组成部分,目前我国初步形成了以自然保护区为主、各类保护地并存的沿海生态保护网络^[1]。作为陆地与海洋的重要过渡地带,涉海保护地拥有河口、浅滩、海湾和浅海等丰富的地形地貌,为水鸟、珊瑚、海草等提供了重要的生存空间^[2-3],也为沿海地区的生态安全提供了有力支撑。因此,保护和修复涉海自然保护地是实现滨海地区可持续发展的重要基础,并受到研究者的高度关注^[4-6]。

过去几十年,港口建设、旅游开发、滩涂围垦、水产养殖等高强度建设活动不断侵占和污染涉海自然保护地,造成其结构受损、功能退化、水体富营养化等诸多问题^[7-8]。针对这些问题,研究者构建了生态健康指标体系,评估涉海自然保护地的生态环境质量^[9]、搭建区域一体化保护-修复格局^[7],并研发了多种近海海洋生物技术^[10-12]。与上述问题受到的关注相比,光污染对我国涉海自然保护地的危害尚未得到充分的重视,保护措施也亟待建立。

光污染是继大气污染、水污染、噪声污染之后的第四大污染类型^[13-14]。由于光污染具有超远传播的特征^[15-16],陆地上的夜间人工照明会照亮海域,成为海洋生态系统的主要光污染源^[17]。1992—2012年,世界上有1 687个(14.7%)毗连海洋保护区的平均人造光强度显著增加^[18]。过亮的夜间环境会造成珊瑚礁的生理调节错乱、改变涉水鸟类的觅食模式、降低鱼类繁殖的成功率^[19-23],甚至灯光作为一种环境选择要素会重塑海洋生态系统。由于针对海洋生物过程的研究难度较大,对光污染量级与其造成危害的程度尚未有定论,但很多研究者认为即使很小的光污染也会造成极大的危害^[18,24]。

过去几十年,中国东部沿海城市的灯光水平快速升高,总值和增速均显著高于中西部地区^[25],部分城市群的光污染已达到世界范围内光污染最严重的水平^[13]。这给我国涉海保护地的夜光环境带来了极大的挑战。目前,关于中国涉海保护地光污染的研究尚不多见,为数不多的研究主要分析国土尺度下自然保护地的灯光演变^[24,26-27]。然而,我国不同区域涉海保护地灯光特征存在差异、光污染的主

导要素也多种多样，因此开展区域尺度的具体光污染特征分析，并提出针对性的优化策略十分必要^[28]。本文选取生态资源丰富、人地矛盾突出的珠三角地区作为研究区域，基于卫星遥感影像，定量分析 2012—2023 年珠江口涉海自然保护地的光污染特征及变化规律，并结合周边主导设施和照明特征，探讨保护地的夜光环境优化策略。研究结果有助于理解滨海开发与涉海保护地夜光环境之间的关系，助力提升珠三角地区涉

海保护地夜间生态环境质量。

1 研究区域

珠江口是我国南海重要的河口地区，分布有红树林、滨海盐沼、河口湿地、海岛群岛、珊瑚礁等十余种生态系统类型，同时也是中华白海豚数量最多、分布最密集的区域^[29]。目前，珠三角设立了六种类型的涉海自然保护地，如：自然保护区、森林公园、湿地公园和海洋

等，总数量达 40 处，面积为 2 339.7 km²（见表 1）。其中，湿地公园数量最多（16 个），而自然保护区面积最大（2 026 km²，占涉海自然保护地总面积的 86.6%）；湿地公园的平均面积普遍偏小（1.8 km²），而自然保护区的平均面积则较大（144.7 km²）。这 40 处涉海自然保护地归属于广州、深圳、东莞、珠海、中山、惠州和江门 7 个城市（见图 1），其中以珠海市数量最多（14 个），惠州市的面积最大（约为 1 036 km²）。

表 1 珠三角地区涉海自然保护地类型、数量及面积
Tab.1 Number and area of marine-related protected areas in Pearl River Delta

| 类型 | 数量 | 数量占比/% | 面积/km ² | 面积占比/% | 平均面积/km ² |
|-------|----|--------|--------------------|--------|----------------------|
| 自然保护区 | 14 | 35.0 | 2 026.0 | 86.6 | 144.7 |
| 湿地公园 | 16 | 40.0 | 29.1 | 1.2 | 1.8 |
| 森林公园 | 6 | 15.0 | 34.9 | 1.5 | 5.8 |
| 海洋公园 | 1 | 2.5 | 158.5 | 6.8 | 158.5 |
| 风景名胜区 | 1 | 2.5 | 44.2 | 1.9 | 44.2 |
| 地质公园 | 2 | 5.0 | 47.1 | 2.0 | 23.5 |
| 总计 | 40 | 100.0 | 2 339.7 | 100.0 | 58.5 |

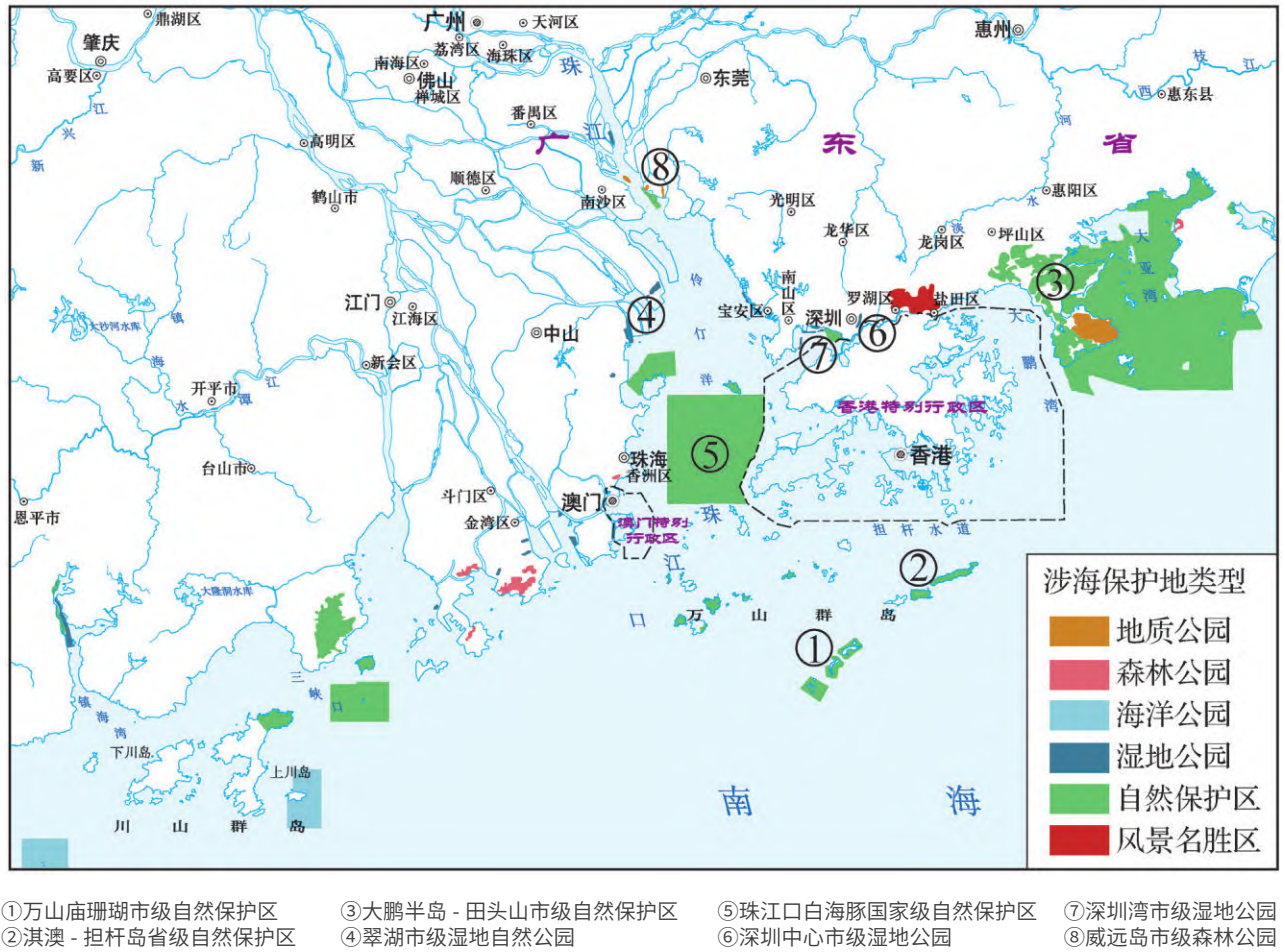


图 1 珠三角地区涉海自然保护地类型及空间分布

Fig.1 Types and spatial distribution of marine-related protected areas in Pearl River Delta

珠三角地区涉海自然保护地的空间分布、面积和数量详见表 1 和图 1。

2 研究方法

2.1 主要数据和来源

本文主要基于卫星遥感影像分析自然保护地的光污染特征，数据产品来自美国索米国家基地轨道伙伴卫星的灯光数据产品（NPP/VIIRS），相关卫星搭载了可见红外成像辐射仪，对极低亮度水平的可见光非常敏感，可以收集地球表面的地光图像数据。该数据产品提供了云层掩膜和杂散光处理，对月光和大气效应也进行了校正处理^[30]，数据精确度较高。由于观测时间长、范围广、精度较高，NPP/VIIRS 的数据产品是灯光数据研究中使用最广泛的产品之一^[31-34]。本文选取的数据时间为 2012 年（最早观测年）和 2023 年（最新数据）。

2.2 评价指标与方法

NPP/VIIRS 数据产品提供月度合成均值和年度合成均值两种数据类型，考虑到雨季对观测数据的影响，本文选取了珠三角地区晴朗天数最多的 11 月份和 12 月份的月度均值数据用于涉海自然保护地内部的夜间灯光水平评估。

遥感数据的空间分辨率，即每个可识别像元的空间尺度，约为 500 m。本文将涉海自然保护地边界内的像元值总和（灯光总值）和其平均值（均值）作为评价其光污染程度的主要指标。灯光总值变化可以反映珠三角地区涉海自然保护地光污染的总体演变特征；均值用于反映自然保护地单体所受到的光污染强度。通过对不同年份、不同城市、不同类型自然保护地的灯光

总值和均值的对比，分析珠三角涉海自然保护地夜间光环境的时空特征。需要指出的是，本文开展的光污染程度分析是基于自然断点法进行分级的，主要反映灯光辐射量的相对大小和变化，而卫星遥感影像的辐射数值（单位为 $\text{nW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ ），与具体的光污染指标（如照度和眩光）尚无法形成直接对应关系，其对海洋生物的生理影响的阈值等也有待进一步研究。

3 研究结果

3.1 珠三角涉海保护地光污染的演变特征

总体来看，珠三角地区各涉海自然保护地的光污染程度均呈增加趋势，灯光总值和均值显著增长，光污染范围和强度均有增大。其中，夜间灯光总值从 $9\,566.2\,\text{nW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ 增大到 $23\,701.3\,\text{nW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ ，夜间灯光均值从 $0.8\,\text{nW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ 增大到 $1.9\,\text{nW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ ，约增长 1.4 倍。这两项指标的增长，表明在过去 12 年里，随着珠三角城市化的推进，涉海自然保护地的夜间光环境不断恶化。

3.2 不同类型自然保护地的光污染演变特征

2012 年和 2023 年不同类型自然保护地的灯光总值、均值和增幅对比见表 2。从灯光总值来看，所有类型的自然保护地的灯光水平都有所升高，其中自然保护区的灯光总值和增幅均最大，这与其面积最大有关。风景名胜区虽然仅有 1 个样本，但其灯光总值仅次于自然保护区，居于第二位，这可能与风景名胜区的旅游开发强度较大相关。海洋公园和地质公园的灯

光总值较低。

考虑到自然保护地的样本数量和面积差异显著，采用灯光均值评估保护地所受光污染程度。对比发现，风景名胜区光污染最严重，2012 年（ $8.3\,\text{nW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ ）和 2023 年（ $11.4\,\text{nW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ ）灯光均值均最高；排名第二的为湿地公园，2012 年和 2023 年灯光均值分别为 $5.6\,\text{nW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ 和 $10.6\,\text{nW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ ，但湿地公园灯光的增加强度和增长幅度均远远高于风景名胜区；森林公园的光污染程度低于湿地公园，但值得注意的是过去 12 年间其灯光强度增长了一倍，增长速度令人担忧；海洋公园、自然保护区和地质公园所受光污染程度最低，几乎处于未受污染的状态。需要指出的是，海洋公园和风景名胜区的样本量均仅有 1 个，难以体现出普遍性规律和区域差异。

3.3 光污染的空间分布特征

2012 年和 2023 年珠三角涉海自然保护地光污染的空间分布情况见图 2。

首先，距离陆地越近的自然保护地受到的光污染程度越高。高污染的涉海自然保护地中的大部分是紧邻海岸线的，而远离海岸线的涉海自然保护地的夜光环境则相对较好，如距离陆地最远的珠海市万山册珊瑚市级自然保护区（2023 年的灯光均值为 $0.4\,\text{nW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ ）和淇澳-担杆岛省级自然保护区（2023 年的灯光均值为 $1.3\,\text{nW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ ）均处于几乎没有光污染的状态。不仅如此，灯光强度显著增长的自然保护地也几乎呈现出相同的规律，即增长显著的区域均位于与陆地相接的自然保护地，如大鹏半岛-田头山市级自然保护区的灯光均值翻倍（ $1.9\,\text{nW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ 到 $3.7\,\text{nW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ ）；中山市翠湖市级

表 2 2012 和 2023 年各类型保护地的灯光总值、均值及其变化

Tab.2 Total and mean values of lights and their changes in 2012 and 2023 for each type of protected area

| 类型 | 总值 / ($\text{nW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$) | | 增加值 / ($\text{nW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$) | 总值增幅 / % | 均值 / ($\text{nW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$) | | 增加值 / ($\text{nW}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr}$) | 均值增幅 / % |
|-------|--|----------|---|----------|--|--------|---|----------|
| | 2012 年 | 2023 年 | | | 2012 年 | 2023 年 | | |
| 自然保护区 | 6 015.7 | 17 459.0 | 11 443.3 | 190.2 | 0.6 | 1.6 | 1.1 | — |
| 湿地公园 | 814.8 | 1 548.9 | 734.2 | 90.1 | 5.6 | 10.6 | 5.0 | 90.1 |
| 森林公园 | 632.0 | 1 266.1 | 634.1 | 100.3 | 3.5 | 7.1 | 3.5 | 100.3 |
| 海洋公园 | 0.7 | 385.8 | 385.1 | — | 0.0 | 0.5 | 0.5 | — |
| 风景名胜区 | 1 927.2 | 2 645.5 | 718.2 | 37.3 | 8.3 | 11.4 | 3.1 | 37.3 |
| 地质公园 | 175.9 | 396.0 | 220.1 | 125.2 | 0.7 | 1.6 | 0.9 | — |
| 总计 | 9 566.2 | 23 701.3 | 14 135.1 | 147.8 | | | | |

注：“—”为起始灯光值接近 0 的保护地类型，未统计增长幅度。

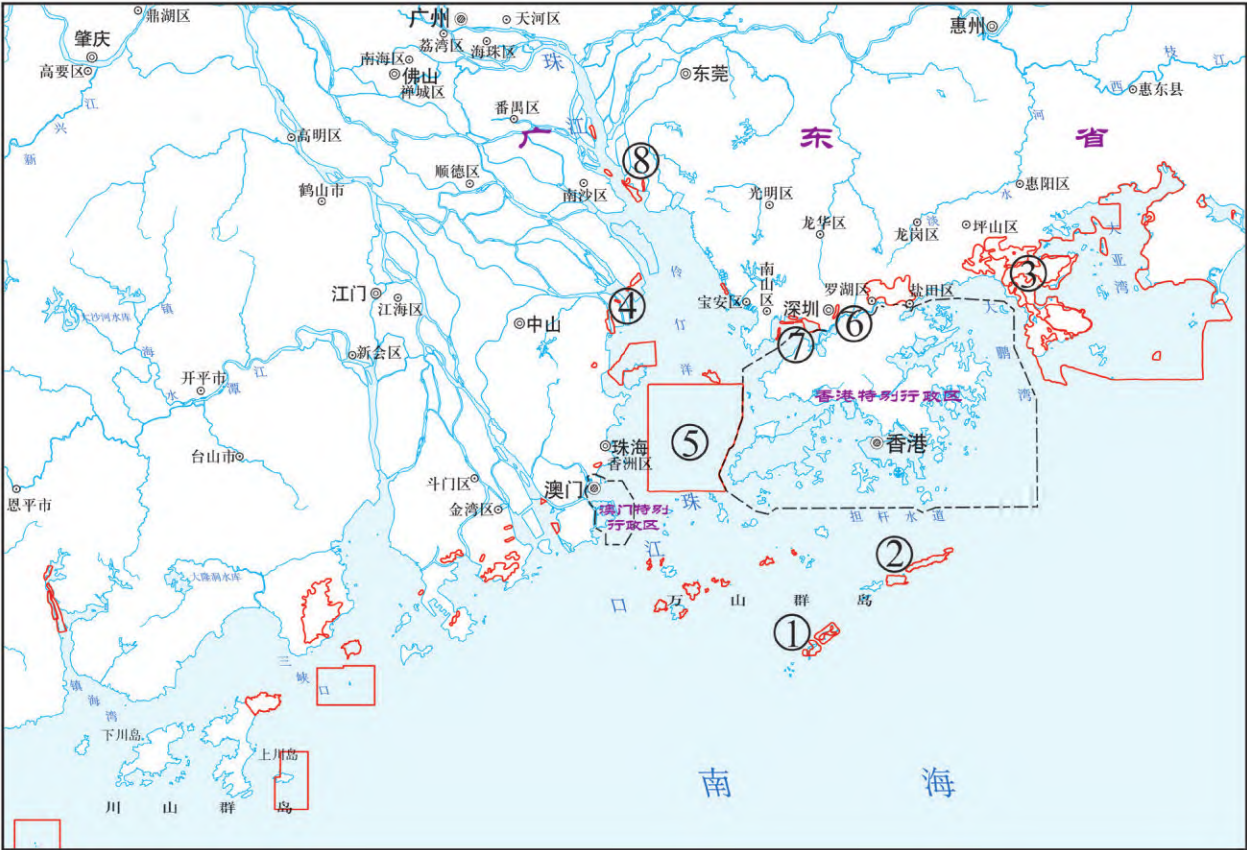
湿地自然公园的灯光均值则由 5.4 nW/cm²·sr 增长到 24.6 nW/cm²·sr。

其次，从自然保护地单体灯光分布来看，大型自然保护地的光污染呈现边缘高中心低的规律，而小尺度的自然保护地灯光分布基本为全域均匀分布的规律。与这条规律形成强烈对比的是珠江口白海豚国家级自然保护区。该保护

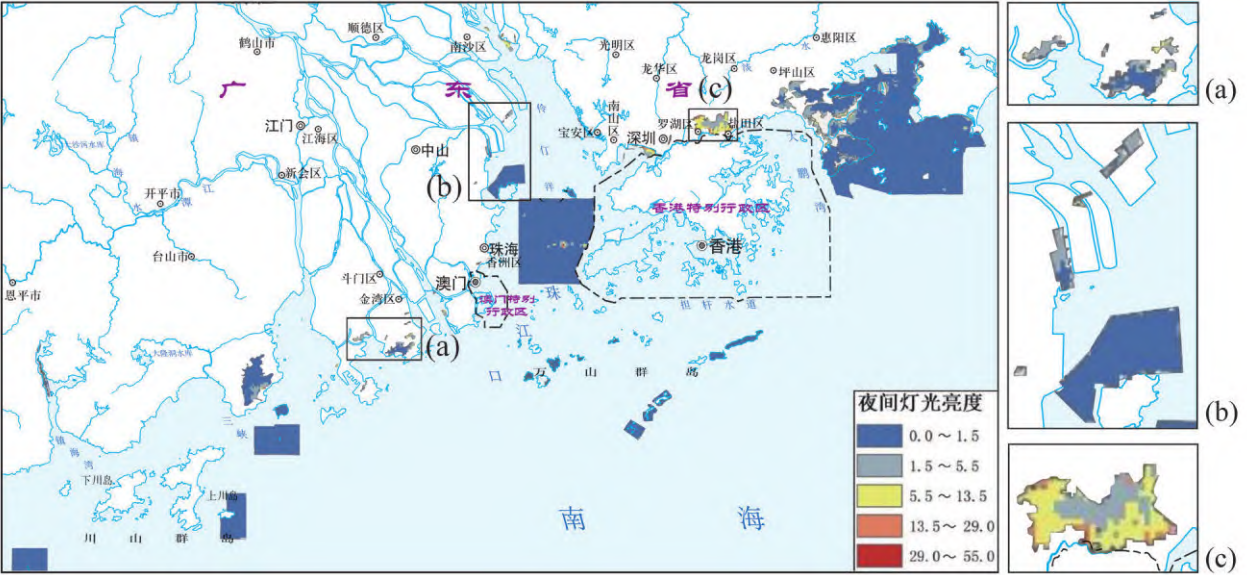
区的灯光亮度呈现中心区域高、边缘低的特征。经核对，港珠澳大桥穿越此处国家级白海豚保护区，其路径与光污染分布规律吻合。2017 年港珠澳大桥通车后保护区灯光显著增长，灯光均值从 2012 年的 0.4 nW/cm²·sr 增长到 2023 年的 1.8 nW/cm²·sr。

最后，从不同城市的灯光分布来

看，深圳、东莞和中山的涉海自然保护地受光污染程度最重，江门和惠州的涉海自然保护地则受光污染程度最轻。虽然东莞和中山的涉海自然保护地的灯光均值高于深圳，但样本量（东莞仅有 2 处，中山 3 处）及面积很小，单个样本的灯光亮度均值均未超过深圳，见表 3。例如，2023 年深圳中心

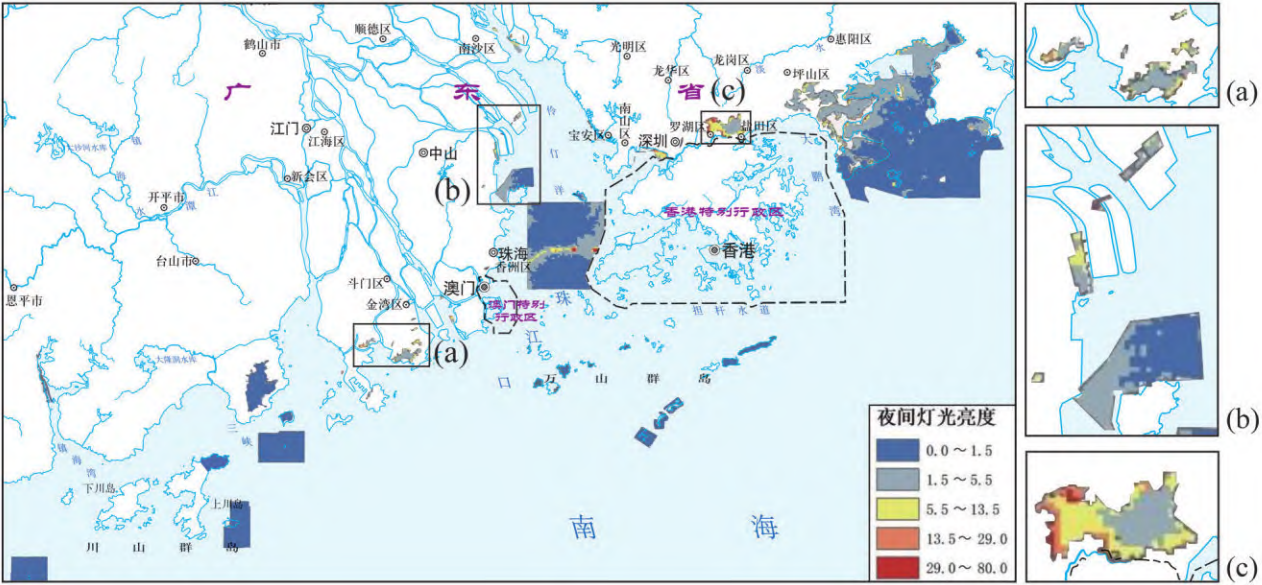


(a) 研究范围示意



(b) 2012 年保护地内部灯光分布

图 2 2012 年和 2023 年保护地内部灯光分布
Fig.2 Distribution lights in protected areas in 2012 and 2023



(c) 2023 年保护地内部灯光分布

图 2 (续)

表 3 2012 和 2023 年各城市涉海自然保护地的灯光总值和均值
Tab.3 Total and mean light values of marine-related protected areas by city in 2012 and 2023

| 城市 | 总值/(nW/cm ² ·sr) | | 增加值/ (nW/cm ² ·sr) | 增幅/% | 均值/(nW/cm ² ·sr) | | 增加值/ (nW/cm ² ·sr) | 增长率/% |
|-----|-----------------------------|----------|----------------------------------|--------|-----------------------------|--------|----------------------------------|--------|
| | 2012 年 | 2023 年 | | | 2012 年 | 2023 年 | | |
| 东莞市 | 303.6 | 269.0 | - 34.6 | - 11.4 | 7.6 | 6.7 | - 0.9 | - 11.4 |
| 中山市 | 91.5 | 309.4 | 217.9 | 238.1 | 2.5 | 8.4 | 5.9 | 238.1 |
| 广州市 | 96.3 | 142.0 | 45.8 | 47.6 | 3.2 | 4.7 | 1.5 | 47.6 |
| 江门市 | 345.2 | 1 164.3 | 819.1 | 237.3 | 0.2 | 0.6 | 0.4 | 237.3 |
| 深圳市 | 4 763.4 | 7 558.6 | 2 795.2 | 58.7 | 3.3 | 5.3 | 1.9 | 58.7 |
| 珠海市 | 1 808.0 | 6 553.1 | 4 745.1 | 262.5 | 0.5 | 2.0 | 1.4 | 262.5 |
| 惠州市 | 2 158.2 | 7 704.9 | 5 546.6 | 257.0 | 0.4 | 1.4 | 1.0 | 257.0 |
| 总计 | 9 566.2 | 23 701.3 | 14 135.1 | 147.8 | | | | |

市级湿地公园和深圳湾市级湿地公园的灯光亮度均值分别高达 60.2 nW/cm²·sr 和 46 nW/cm²·sr，而东莞市最亮的自然保护地（威远岛市级森林公园），亮度仅为 9.8 nW/cm²·sr；而中山市最亮的保护地（翠湖市级湿地自然公园），灯光均值为 24.6 nW/cm²·sr。因此，考虑样本量、面积及灯光强度，珠三角地区深圳市涉海自然保护地所受光污染最为严重。

4 讨论

4.1 光污染对珠三角涉海保护地的潜在危害

光是海洋生态系统的关键结构因

素，其时间模式和空间结构^[35]对海洋生物的繁殖、迁徙和种群动态有诸多影响^[36-37]。夜间人造光会淹没月球和恒星的光亮，改变自然光周期，而许多海洋生物依赖昼夜的光周期调节关键的生命活动。例如，很多海洋生物的昼夜垂直迁徙会随月亮周期变化^[35]，而人造光会扰乱这种周期。从空间结构上看，浅海区最容易受到夜间人造光的侵入，过亮的栖息环境会降低海洋生物的生长速度和存活率，并降低生殖成功率^[38-39]。例如，暴露在人造光中会导致小丑鱼的卵无法孵化^[38]，珊瑚群落在内的许多生物的定居和生存数量会减少^[40]。鱼类因此会迁徙至海洋黑暗区域，导致光亮区域的生物种

群发生变化^[41-44]。此外，强光还会导致海鸟迷失方向，增加其死亡率^[45-47]。

珠三角地区分布着大量的珊瑚保护地，同时也是很多海鸟的重要栖息地和迁徙停歇地。过去十年，涉海保护地灯光数值的成倍增长，无疑给保护地中的生物带来了巨大风险。尤其是靠近陆地的浅海区域光污染强度高，栖息地容易被多光谱和低强度的人造光“穿透”，破坏浅水鱼类和珊瑚的生境，进而导致生态群落发生变化。而远海、深海地区虽然光污染水平低于近海，但由于那里的生物对光更敏感^[48-49]，其生态危害也需要引起注意。目前，人们对强光持续多久才能扰乱生物群落知之

甚少，人造光对深海和暗光栖息地的影响程度未得到充分研究，但滨海城市的人造光带来的生态威胁已达到了前所未有的程度。

4.2 夜间光生态的重要影响因素：
滨海建设、港口及海上大桥

从自然保护地光污染的空间分布规律来看，近海保护地的光污染水平高于远海，保护地边缘的光污染高于中心地区。据此可以推断，滨海地区的城市建设与自然保护地的光污染程度紧密相关。在过去的十几年中，珠三角滨海地区的城市化水平不断上升，土地从森林、耕地等非建设用地大幅转化为人造地表的建设用地类型^[50]，导致涉海自然保护地的夜间光环境不断恶化。尤其是在利益驱动下，沿海城市大量填海建房，如深圳湾沿岸和珠海东海岸的高密度、高强度城市建设，甚至许多海岸线成为了“房岸”线，带来更严重的光污染，尤其是来自沿岸的夜间霓虹光照可以在邻近海面 and 海底广泛传播，对涉海自然保护地的夜间光环境造成极大影响。

在众多的光污染源中，港口和造船厂同样也是涉海自然保护地不可忽视的重要光污染源。在珠三角涉海区域内共存在 13 处港口，其中深圳盐田港是世界第三大集装箱港，广州黄埔港、南沙港也具有极大的货物吞吐量。粤港澳大湾区作为世界级港口群的集聚区域，也是港口业务最为繁忙的地区之一。由于生产和物流的需求，港口往往需要保证每天 24 h 的高强度照明，对周边生态保护区造成较为严重的光污染。因此，港口也通常被认为是光污染最严重的设施之一^[51-52]。无独有偶，珠三角涉海区域内的诸多自然保护地与港口区域存在高度的空间邻近性，涉海自然保护地的夜间光环境保护问题不容乐观。

除此之外，包括港珠澳大桥、虎门大桥、南沙大桥及黄埔大桥在内的四座跨江跨海通道也是重要的夜间光源。以港珠澳大桥为例，大桥两侧装备近万套模块化陶瓷散热 LED 路灯以供夜间行驶照明，LED 灯的灯光比普通白炽灯和荧光灯的灯光具有更多的短波段光分量，可以穿透更深的水域，放大生态系统对人造光的暴露度^[48, 53]。即将开通的连接大湾区东西两岸的深中通道则会进一步加剧该地区的光环境污染。

4.3 珠三角地区夜间光生态的改善策略

第一，提升对浅海区自然保护地的光生态保护。陆海交界的浅海区域物种丰富，但由于水面深度小又靠近滨海城市光源，极易被多光谱人造光“穿透”而导致海洋生物的生境遭受破坏。因此，应结合保护地内物种的光敏感度设立暗夜公园或保护区，严格控制海岸及海上的城市夜间照明。对浅海但保护要求不高的风景名胜区、地质公园等生态保护需求较低的自然保护地，则可以按使用需求进行合理的照明规划，并尽量降低照明设备的光污染程度。

第二，严格控制滨海地区的开发，并进行合理的照明规划。光污染的空间分布特征显示，涉海保护地的光污染水平与滨海建设强度紧密相关。因此，应针对大湾区滨海地区经济发达和城市夜间照明需求较高的特点，结合不同城市滨海地区经济社会发展水平和生态保护定位，制定针对性的夜间照明规划，对照明亮度、功率密度、照明角度和安全防范措施做出严格要求，以统筹保护涉海自然保护地的夜间光环境。

第三，减少灯光中具有较多短波段光分量的照明灯具（如 LED 灯）的使用量，提升沿海基础设施的照明效率。目前，LED 灯被广泛应用在城市照明中。但 LED 灯的灯光中含有较多短波段光分量，容易对海洋更深的区域造成光污染。因此，建议在深海地区和保护要求高的保护地尽量使用长波段光分量的灯光进行照明。此外，照明系统的智能化管理可以优化能源利用，提高效率，减少产生的总体光量。例如，通过安装光感应器，照明系统可以根据外部光线的变化自动调整亮度；安装运动传感器实现对设施所在区域内活动进行监测，根据人员或车辆活动，照明系统自动降低亮度或关闭部分灯光；通过设置时间排程，根据不同时间段的需求来调整照明系统的亮度和工作模式。

5 结论

珠三角地区是我国滨海地区城市化程度最高的地区，高强度的开发对涉海自然保护地的夜间灯光环境形成了很大威胁。在过去 12 年里，珠三角地区涉海自然保护地光污染程度恶化，

夜间灯光总值从 $9\,566.2\text{ nW/cm}^2 \cdot \text{sr}$ 升高到 $23\,701.3\text{ nW/cm}^2 \cdot \text{sr}$ ，灯光均值从 $0.8\text{ nW/cm}^2 \cdot \text{sr}$ 升高到 $1.9\text{ nW/cm}^2 \cdot \text{sr}$ 。在所有类型的自然保护地中，风景名胜区和湿地公园所受光污染程度最大，而后的光污染的扩张趋势远远高于前者，需引起高度重视。

从光污染的空间分布来看，越接近陆地的涉海自然保护地所受光污染程度越高，大尺度的自然保护地的光污染呈现边缘高中间低的分布特征。而港珠澳大桥穿过的中华白海豚自然保护区则呈现中心高、边缘低的相反规律。从不同城市来看，深圳、东莞和中山的涉海自然保护地光污染程度高，而江门和惠州的涉海自然保护地则几乎处于未受污染的状态。

滨海开发、港口建设和海上大桥等是珠三角地区涉海自然保护地的主要光污染源。要改善涉海保护地的夜间灯光环境需考虑建设海上暗夜保护区，在陆海统筹的视角下规划照明分区、提升照明效率等措施减少各类设施对涉海保护地造成的光污染。

参考文献

[1] 林金兰, 刘昕明, 赖廷和, 等. 广西滨海湿地类自然保护区管理成效评估体系构建及应用[J]. 生态学报, 2020, 40(5): 1825-1833.

[2] 钱伟, 冯建祥, 宁存鑫, 等. 近海污染的生态修复技术研究进展[J]. 中国环境科学, 2018, 38(5): 1855-1866.

[3] MA Z, CHOI C Y, GAN X, et al. Achievements, challenges, and recommendations for waterbird conservation in China's coastal wetlands [J]. Avian research, 2023, 14: 10023.

[4] 李娜, 陈丕茂, 乔培培, 等. 滨海红树林湿地海洋生态效应及修复技术研究进展[J]. 广东农业科学, 2013, 40(20): 157-160, 167.

[5] BLACK A N, SNEKSER J L, AL-Shaer L, et al. A review of the Leon springs pupfish (Cyprinodon bovinus) long-term conservation strategy and response to habitat restoration[J]. Aquatic conservation: Marine and freshwater ecosystems, 2016, 26(2): 410-416.

[6] 姜欢欢, 温国义, 周艳荣, 等. 我国海洋生态修复现状、存在的问题及展望[J]. 海洋开发与管理, 2013, 30(1): 35-38, 112.

[7] 智烈慧, 周方文, 李晓文, 等. 基于生态系统服务优化的滨海湿地一体化保护: 修复格局构建[J]. 自然资源学报, 2023, 38(12): 3150-

- 3165.
- [8] BLABER S J M, CYRUS D P, ALBARET J J, Effects of fishing on the structure and functioning of estuarine and nearshore ecosystems [J]. *ICES journal of marine science*, 2000, 57(3): 590-602.
 - [9] 程飞飞, 李洪庆, 宋红艳, 等. 沿海城市陆海生态环境质量综合评价与耦合协调度 [J]. *生态学报*, 2024, 44(9): 3855-3867.
 - [10] SAURET C, BÖTTJER D, TALARMIN A, et al. Top-down control of diesel-degrading prokaryotic communities [J]. *Microbial ecology*, 2015, 70(2): 445-458.
 - [11] 张信芳. 海洋石油污染的微生物降解过程及生态修复技术展望 [J]. *环境科学与管理*, 2012, 37(5): 97-99, 104.
 - [12] RADWAN S S, AL-HASAN R H, SALAMAH S, et al. Bioremediation of oily sea water by bacteria immobilized in biofilms coating macroalgae [J]. *International biodeterioration & biodegradation*, 2002, 50(1): 55-59.
 - [13] FALCHI F, CINZANO P, DURISCOE D, et al. The new world atlas of artificial night sky brightness [J]. *Science advances*, 2016, 2(6): e1600377.
 - [14] GALLAWAY T, OLSEN R N, MITCHELL D M. The economics of global light pollution [J]. *Ecological economics*, 2010, 69(3): 658-665.
 - [15] ZHENG Z, WU Z, CHEN Y, et al. Africa's protected areas are brightening at night: A long-term light pollution monitor based on nighttime light imagery [J]. *Global environmental change: Human and policy dimensions*, 2021, 69: 102318.
 - [16] 江本砚, 张玉莉, 李珊, 等. 珠三角自然保护地夜间光环境的时空动态及敏感距离 [J]. *应用生态学报*, 2023, 34(6): 1601-1609.
 - [17] GES X, BARA S, GARCIA-GIL M, et al. Light pollution offshore: Zenithal sky glow measurements in the mediterranean coastal waters [J]. *Journal of quantitative spectroscopy & radiative transfer*, 2018, 210: 91-100.
 - [18] BENNIE J, DUFFY J P, DAVIES T W, et al. Global trends in exposure to light pollution in natural terrestrial ecosystems [J]. *Remote sensing*, 2015, 7(3): 2715-2730.
 - [19] SANTOS C D, MIRANDA A C, GRANADEIRO J P, et al. Effects of artificial illumination on the nocturnal foraging of waders [J]. *Acta oecologica*, 2010, 36(2): 166-172.
 - [20] THOMAS J R, JAMES J, NEWMAN R C, et al. The impact of streetlights on an aquatic invasive species: Artificial light at night alters signal crayfish behaviour [J]. *Applied animal behaviour science*, 2016, 176: 143-149.
 - [21] HÖLKER F, WOLTER C, PERKIN E K, et al. Light pollution as a biodiversity threat [J]. *Trends in ecology & evolution*, 2010, 25(12): 681-682.
 - [22] HOELKER F, JECHOW A, SCHROER S, et al. Light pollution of freshwater ecosystems: Principles, ecological impacts and remedies [J]. *Philosophical transactions of the royal society B: Biological sciences*, 2023, 378(1892): 20220360.
 - [23] DARIES T W, LEVY O, TIDAU S, et al. Global disruption of coral broadcast spawning associated with artificial light at night [J]. *Nature communications*, 2023, 14(1): 2511.
 - [24] JIANG W, HE G, LENG W, et al. Characterizing light pollution trends across protected areas in China using nighttime light remote sensing data [J]. *ISPRS international journal of geo-information*, 2018, 7(7): 243.
 - [25] 刘鸣, 刘小双, 江威, 等. 我国城市夜间光环境多尺度时空演变特征分析 [J]. *照明工程学报*, 2022(1): 168-174.
 - [26] JI M, XU Y, YAN Y, et al. Evaluation of the light pollution in the nature reserves of China based on NPP/VIIRS nighttime light data [J]. *International journal of digital earth*, 2024, 17(1): 2347442.
 - [27] JIA M, ZENG H, CHEN Z, et al. Nighttime light in China's coastal zone: The type classification approach using SDGSAT-1 Glimmer Imager [J]. *Remote sensing of environment*, 2024, 305: 114104.
 - [28] 钟乐, 杨锐, 赵智聪. 国家公园的一半是暗夜: 暗夜星空研究的美国经验及中国路径 [J]. *风景名胜*, 2019, 26(6): 85-90.
 - [29] 朱新胜, 杨永峰, 张晓云, 等. 珠江口涉海自然保护地管理状况评价 [J]. *自然保护地*, 2022, 2(2): 93-102.
 - [30] 曹汉瑞, 王妍, 李熙, 等. VIIRS 夜光影像中农田火像素识别方法 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2023: 1-19.
 - [31] CHEN Z, YU B, YANG C, et al. An extended time series (2000-2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration [J]. *Earth system science data*, 2021, 13(3): 889-906.
 - [32] LI X, XU H, CHEN X, et al. Potential of NPP-VIIRS nighttime light imagery for modeling the regional economy of China [J]. *Remote sensing*, 2013, 5(6): 3057-3081.
 - [33] SHI K, YU B, HUANG Y, et al. Evaluating the ability of NPP-VIIRS nighttime light data to estimate the gross domestic product and the electric power consumption of China at multiple scales: A comparison with DMSP-OLS data [J]. *Remote sensing*, 2014, 6(2): 1705-1724.
 - [34] 杨汪洋, 尚雨, 赵伟山, 等. 基于 NPP-VIIRS 夜间灯光遥感数据的西安市城市扩张研究 [J]. *测绘标准化*, 2023, 39(4): 15-20.
 - [35] CRUZ S M, HOOTEN M, HUYVAERT K P, et al. At-sea behavior varies with lunar phase in a nocturnal pelagic seabird, the swallow-tailed gull [J]. *Plos one*, 2013, 8(2): e56889.
 - [36] GASTON K J. Nighttime ecology: The "nocturnal problem" revisited [J]. *American naturalist*, 2019, 193(4): 481-502.
 - [37] MILLER C R, RICE A N. A synthesis of the risks of marine light pollution across organismal and ecological scales [J]. *Aquatic conservation-marine and freshwater ecosystems*, 2023, 33(12): 1590-1602.
 - [38] FOBERT E K, DA SILVA K B, SWEARER S E. Artificial light at night causes reproductive failure in clownfish [J]. *Biology letters*, 2019, 15(7): 20190272.
 - [39] OUYANG J Q, DAVIES S, DOMINONI D. Hormonally mediated effects of artificial light at night on behavior and fitness: Linking endocrine mechanisms with function [J]. *Journal of experimental biology*, 2018, 221(6): jeb156893.
 - [40] TAMIR R, EYAL G, COHEN I, et al. Effects of light pollution on the early life stages of the most abundant northern red sea coral [J]. *Microorganisms*, 2020, 8(2): 193.
 - [41] BOLTON D, MAYER-PINTO I M, CLARK G F, et al. Coastal urban lighting has ecological consequences for multiple trophic levels under the sea [J]. *Science of the total environment*, 2017, 576: 1-9.
 - [42] HYLANDER S, HANSSON L A. Vertical distribution and pigmentation of Antarctic zooplankton determined by a blend of UV radiation, predation and food availability [J]. *Aquatic ecology*, 2013, 47(4): 467-480.
 - [43] LUDVIGSEN M, BERGE J, GEOFFROY M, et al. Use of an autonomous surface vehicle reveals small-scale diel vertical migrations of zooplankton and susceptibility to light pollution under low solar irradiance [J]. *Science advances*, 2018, 4(1): eaap9887.

[44] O'CONNOR J J, FOBERT E K, BESSON M, et al. Live fast, die young: Behavioural and physiological impacts of light pollution on a marine fish during larval recruitment[J]. Marine pollution bulletin, 2019, 146: 908-914.

[45] RODRIGUES P, AUBRECHT C, GIL A, et al. Remote sensing to map influence of light pollution on Cory's shearwater in Sao Miguel Island, Azores Archipelago[J]. European journal of wildlife research, 2012, 58(1): 147-155.

[46] RODRIGUEZ A, GARCIA D, RODRIGUEZ B, et al. Artificial lights and seabirds: Is light pollution a threat for the threatened Balearic petrels?[J]. Journal of ornithology, 2015, 156(4): 893-902.

[47] RODRIGUEZ A, MOFFETT J, REVOLTOS A, et al. Light pollution and seabird fledglings: Targeting efforts in rescue programs[J]. Journal of wildlife management, 2017, 81(4): 734-741.

[48] TAMIR R, LERNER A, HASPEL C, et al. The spectral and spatial distribution of light pollution in the waters of the northern Gulf of Aqaba (Eilat) [J]. Scientific reports, 2017, 7: 42329.

[49] WARRANT E J, LOCKET N A. Vision in the deep sea[J]. Biological reviews, 2004, 79(3): 671-712.

[50] 李浩然, 何永宁, 刘子菁, 等. 人类活动干扰对珠三角地区植被的影响 [J]. 广东气象, 2023, 45(6): 84-87.

[51] ELSAHRAGTY M, KIM J L. Assessment and strategies to reduce light pollution using geographic information systems[J]. Procedia engineering, 2015, 118: 479-488.

[52] 冯凯, 代书剑, 郝洛西. 基于 VIIRS 影像的光污染演变特征初探: 以我国 4 座城市为研究对象 [J]. 照明工程学报, 2022, 33(4): 172-185.

[53] DAVIES T W, MCKEE D, FISHWICK J, et al. Biologically important artificial light at night on the seafloor[J]. Scientific reports, 2020, 10(1): 12545.