

# 1980—2018年粤港澳大湾区人为干扰度的时空特征

王小军<sup>1</sup>, 张楚然<sup>1</sup>, 廖倚凌<sup>1</sup>, 刘光旭<sup>2</sup>, 王炳香<sup>1</sup>, 余剑<sup>1</sup>

(1.华南师范大学地理科学学院, 广东广州 510631; 2.赣南师范大学地理与环境工程学院, 江西赣州 341000)

**摘要:** [目的] 研究大湾区人为干扰因素的时空特征, 为解决区域经济迅速发展衍生的一系列人地关系问题及可持续发展提供参考。[方法] 基于土地利用数据分析 1980—2018 年人为干扰时空特征, 利用地理探测器分析人为干扰度空间分异的自然与社会驱动因素。[结果] ① 湾区用地类型以林地、耕地为主, 但城镇用地和其他建设用地在近 40 a 增长了 4.25 倍。② 近 40 a 湾区以中度人为干扰为主, 但向重度和完全干扰发展; 人为干扰总强度在较发达城市高, 欠发达城市低; 人为干扰平稳度以高度平稳为主, 但不平稳区域在 2010—2018 年迅速扩张。③ 人为干扰总强度空间分布主要受夜间灯光指数、交通密度、年均温、高程和坡度影响; 因子交互作用主要表现为双因子增强和非线性增强; 湾区内部城市的人为干扰总强度主要受社会经济因素驱动, 外围城市主要受自然环境因素驱动。[结论] 大湾区人为干扰呈扩张与升高趋势, 在地形地貌限制下, 人为活动强弱驱动干扰度以城市为中心和次中心向外扩展。

**关键词:** 人为干扰; LUCC 动态变化; 空间分异; 地理探测器; 粤港澳大湾区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)03-0333-09

中图分类号: P967, TP79, X87

**文献参数:** 王小军, 张楚然, 廖倚凌, 等. 1980—2018 年粤港澳大湾区人为干扰度的时空特征[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 333-341. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.043; Wang Xiaojun, Zhang Churan, Liao Yiling, et al. Spatial and temporal characteristics of hemeroby degree in Guangdong-Hongkong-Macao Greater Bay Area during 1980—2018 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 333-341.

## Spatial and Temporal Characteristics of Hemeroby Degree in Guangdong-Hongkong-Macao Greater Bay Area During 1980—2018

Wang Xiaojun<sup>1</sup>, Zhang Churan<sup>1</sup>, Liao Yiling<sup>1</sup>, Liu Guangxu<sup>2</sup>, Wang Bingxiang<sup>1</sup>, Yu Jian<sup>1</sup>

(1.School of Geographical Sciences, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510631, China;

2.School of Geography and Environmental Engineering, Gannan Normal University, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

**Abstract:** [Objective] The spatial and temporal characteristics of human disturbance in the Guangdong-Hongkong-Macao Greater Bay Area (GHMGBA) was determined in order to provide reference data for solving a series of human-land relationship problems and sustainable development caused by rapid regional economic development. [Methods] The temporal and spatial characteristics of hemeroby from 1980 to 2018 were analyzed, and the spatial heterogeneity of hemeroby from natural and social driving factors was analyzed by using GeoDetector. [Results] ① Land use in the GHMGBA was classified mainly as forest land and cultivated land, but urban land and other construction land had increased by 4.25 times in the past 40 years. ② During the past 40 years, the GHMGBA was dominated by moderate hemeroby, but had developed towards severe and complete. The total intensity of hemeroby was higher in more developed cities and lower in under developed cities. The stability of hemeroby was generally highly stable, but the unstable area expanded rapidly during 2010—2018. ③ The spatial distribution of the total intensity of hemeroby was mainly affected by night light index, traffic density, annual average temperature, elevation, and slope. The factor interaction was mainly manifested as two-factor enhancement and nonlinear enhancement. The total

收稿日期: 2020-12-23

修回日期: 2021-01-26

资助项目: 江西省社会科学规划项目“生态红线划定区景观格局变化及其优化机制”(19GL30); 江西省教育厅项目(JXJG-18-14-5); 广东省科技创新战略专项资金攀登计划项目(pdjh2020b0169); 华南师范大学挑战杯金种子培育项目(20DKKA01)

第一作者: 王小军(1994—), 男(汉族), 江西省赣州市人, 硕士研究生, 研究方向为环境演变与资源生态等。Email: gwangxj@163.com。

通讯作者: 刘光旭(1977—), 男(汉族), 河南省南阳市人, 博士, 副教授, 主要从事自然灾害与生态环境等研究。Email: lg760411@126.com。

intensity of hemeroby in core cities in the GHMGBA was mainly driven by socio-economic factors, and the total intensity of hemeroby in peripheral cities was mainly driven by natural environmental factors. [Conclusion] The hemeroby of the GHMGBA is expanding and increasing. Under the constraints of topography and geomorphology, the intensity of human activities drives the degree of hemeroby to expand with the city as the center and the sub-center.

**Keywords:** hemeroby; LUCC dynamic change; spatial heterogeneity; GeoDetector; Guangdong-Hongkong-Macao Greater Bay Area (GHMGBA)

人为干扰(hemeroby)最初是芬兰植物学家 Jalas 在研究森林生态系统受人类活动影响程度时引入的一个监测指标,后被用于通过土地利用类型评价人为活动在地球表层上的影响程度<sup>[1-3]</sup>。近年来,国外学者用人为干扰来评价城市绿地自然条件<sup>[4]</sup>与城市生态系统服务差异<sup>[5]</sup>,以及自然景观的自然程度,以获得土地利用变化对环境状况的累积影响<sup>[6]</sup>。在国内,研究人员利用专家经验知识,制定了生态干扰度景观类型分类表,并依此揭示双台河口湿地景观及生态干扰度的时空变化规律<sup>[7]</sup>。基于此干扰度分类思路,对北京密云水库上游流域、广西巴马县的人为干扰程度及干扰强度动态变化定量分析也相应展开<sup>[8,9]</sup>。人为干扰度评估和运用上出现了多种方向,如利用景观开发强度指数 LDI 来评估人为干扰强度<sup>[10]</sup>;通过选定人为干扰源,计算压力、状态、响应指标,构建 PSR 模型及人为干扰度指数分析人为干扰空间分布<sup>[11]</sup>;将人为干扰度与景观脆弱度结合,构建生态安全度等<sup>[12]</sup>。上述研究丰富了人为干扰量化、空间化思路,而空间分异驱动机制研究有待进一步深化。

粤港澳大湾区(21°33′—24°24′N,111°21′—115°25′E)位于华南沿海,亚热带季风气候,水热资源丰富,自然条件优越<sup>[13]</sup>。近几十年来该区域经济发展迅速,城市地域不断扩张。对该区土地利用变化的研究多集中于探讨土地利用效率<sup>[14]</sup>、不透水面分布<sup>[15]</sup>、城市扩张与景观格局梯度<sup>[16]</sup>、生态系统格局的变化及预测<sup>[17]</sup>、景观格局与生态系统服务价值<sup>[18-19]</sup>,土地利用模拟与生态风险等<sup>[20]</sup>方面。2019 年《粤港澳大湾区发展规划纲要》中 8 次提到环保,35 次提及生态,国家对粤港澳大湾区人为干扰后的生态环保重视程度可见一斑。本文基于粤港澳大湾区 1980,2000,2010,2018 年 4 期土地利用数据,借助 GIS 空间分析功能从土地利用变化、人为干扰度分布与动态变化,揭示该区近 40 a 建设过程中土地利用特征及其反映的人为活动变化,并利用地理探测器分析人为干扰空间分布的多方面驱动力,以期为进一步进行生态环保建设,建成绿色文明、宜居宜游的粤港澳美丽大湾区提供决策参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 数据与处理

①土地利用数据(1980,2000,2010,2018 年),包含 6 个一级类共 22 个二级类,人口与 GDP 密度(2015 年),来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。②夜间灯光指数(2017 年),来源于中国工程科技知识中心地理资源与生态专业知识服务系统(<http://geo.ckcest.cn/>)。③高程数据(DEM),来源于 SRTM(<http://srtm.csi.cgiar.org/>)。④气候数据(1980—2015 年),包括年均气温、年降水量,来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。⑤水系和交通网(2019 年)资料,来源于 Open Street Map(<https://www.openstreetmap.org/>)。

### 1.2 土地利用变化特征

本研究从土地利用结构和单一土地利用类型动态分析大湾区土地利用的演变特征。土地利用结构能够反映某区域的用地组合关系<sup>[21-22]</sup>。单一土地利用类型动态度  $K$  是表征土地利用类型在一定时间内变化率的指标,计算公式参考王秀兰等<sup>[23]</sup>的方法。

### 1.3 人为干扰度赋值与动态变化

不同的土地利用类型体现了人为活动对土地的干扰差异,以此对不同地类赋值可以尝试量化该地区人为活动强度。本研究综合刘晓娜等<sup>[8]</sup>、郭少壮等<sup>[24]</sup>、肖翠等<sup>[25]</sup>、徐媛银等<sup>[26]</sup>和周建国<sup>[27]</sup>的湿地和山地人为干扰度赋值,用均值计算出 6 个一级用地类型下的 22 个二级地类的人为干扰指数(hemeroby index, HI)(表 1)。根据研究区域中人为干扰度的实际间隔差异把人为干扰分成 4 类,  $0 \leq HI < 0.25$  为轻度干扰,  $0.25 \leq HI < 0.5$  为中度干扰,  $0.5 \leq HI < 0.75$  为重度干扰,  $0.75 \leq HI \leq 1$  为完全干扰。

组合多年数据的人为干扰总强度能够反映研究时段内的综合分布情况,刘晓娜等和曾兰等采用相加取平均值的方法确定人为干扰总强度<sup>[8,9]</sup>,若某区域多年的值差异较大,均值法可能会掩盖后期非匀速变化,因此本研究结合权重计算其人为干扰总强度。计算方法为:

$$THI = \sum_{i=1}^n H_i \cdot W_i \tag{1}$$

$$W_i = (H_{ij} \cdot A_{ij}) / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^s (H_{ij} \cdot A_{ij})$$

式中:THI 为人为干扰总强度;  $H_i$  为第  $i$  年的土地利用人为干扰度;  $n$  为研究时间期数,在本研究中为 4 a,  $W_i$  为第  $i$  年的权重,由第  $i$  年人为干扰度占研究时段内人为干扰度的比重确定;  $H_{ij}$  为第  $i$  年的第  $j$  个地类的人为干扰度赋值;  $s$  为地类数量,在本研究中为 22 类;  $A_{ij}$  为第  $i$  年的第  $j$  个地类占某区域面积百分比。

干扰平稳度指数(hemeroby stable index, HSI)表征了两个研究时段过渡期间的人为干扰变化,由相邻两个时间的人为干扰度相减后取绝对值获得,该值越大表明过渡期间人为干扰越强烈,土地利用类型变化大,人为干扰度过渡不平稳,反之则高度平稳<sup>[8]</sup>。根据已有研究和湾区人为干扰变化特征,比较自然间断法和等间距法后,本研究把平稳度划分为 4 类,  $0 \leq HSI < 0.1$  为高度平稳,  $0.1 \leq HSI < 0.3$  为中度平稳,  $0.3 \leq HSI < 0.5$  为低度平稳,  $0.5 \leq HSI < 1$  为不平稳。

表 1 基于 LUCC 的粤港澳大湾区人为干扰度赋值

| 一级 | 二级     | HI   | 一级   | 二级     | HI    | 一级   | 二级  | HI   |
|----|--------|------|------|--------|-------|------|-----|------|
| 耕地 | 水田     | 0.75 | 水域   | 河渠     | 0.5   | 未用地  | 沙地  | 0.43 |
|    | 旱地     | 0.77 |      | 湖泊     | 0.29  |      | 裸土地 | 0.43 |
|    | 有林地    | 0.28 |      | 滩地     | 0.23  |      | 沼泽地 | 0.15 |
| 林地 | 灌木林    | 0.46 | 海洋   | 0.1    | 其他未用地 | 0.14 | 滩地  | 0.23 |
|    | 疏林地    | 0.53 | 城乡、  | 城镇用地   | 0.99  | 海洋   | 0.1 |      |
|    | 其他林地   | 0.63 | 工矿、  | 农村居民点  | 0.9   |      |     |      |
| 草地 | 高覆盖度草地 | 0.42 | 居民用地 | 其他建设用地 | 0.99  |      |     |      |
|    | 中覆盖度草地 | 0.57 |      |        |       |      |     |      |
|    | 低覆盖度草地 | 0.71 |      |        |       |      |     |      |

### 1.4 地理探测器

地理探测器可用于分析要素的空间分异性及驱动力评价<sup>[28]</sup>。因子探测器可检验自变量  $X$  在多大程度上解释了因变量  $Y$  的异质性。用  $q$  表示,取值为  $[0, 1]$ ,当  $q=0$  时,说明因变量  $Y$  与自变量  $X$  之间没有耦合;而  $q=1$  则是因变量  $Y$  完全由自变量  $X$  决定。交互探测器揭示了影响因子两两之间是否增加或减弱对变量  $Y$  的解释。结果有 5 类,分别为:①非线性减弱  $\{q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]\}$ ;②单因子非线性减弱  $\{\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]\}$ ;③双因子增强  $\{q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]\}$ ;④独立  $\{q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)\}$ ;⑤非线性增强  $\{q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)\}$ <sup>[28]</sup>。

本研究以人为干扰总强度为因变量  $Y$ ,采用地理探测器中的因子探测器和交互探测器,分析影响因素  $X$  的对大湾区总体与城市市区<sup>[29]</sup>的贡献。指标选取考虑代表性,社会经济指标有:  $X_{11}$  夜间灯光指数,  $X_{12}$  GDP 密度(万元/km<sup>2</sup>),  $X_{13}$  人口密度(人/km<sup>2</sup>)和  $X_{14}$  交通密度(km/km<sup>2</sup>);自然环境指标有:  $X_{21}$  年降水量(mm),  $X_{22}$  年均温(°C),  $X_{23}$  高程(m),  $X_{24}$  坡度(°)和  $X_{25}$  水系密度(km/km<sup>2</sup>)。

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用变化特征

粤港澳大湾区土地利用与土地覆被呈现林地一耕

地景观格局,林地、耕地总面积在近 40 a 达 76.12%~85.01%,是粤港澳大湾区最主要的用地类型(图 1)。其中水田面积占比 16.11%~21.12%,主要沿河流、湖泊水库坑塘分布在河网密布的珠江三角洲平原。有林地面积占比在 43.99%以上,主要分布在西北、西南、东北部的低山丘陵区。滩涂滩地、未利用土地面积占比最少。

1980—2018 年湾区内水田、旱地、疏林地面积持续减少,分别为 2 964.41, 1 094.9, 518.32 km<sup>2</sup>(表 2)。湖泊水库坑塘自 1980—2018 年总体增加 337.45 km<sup>2</sup>,但分布明显破碎化。海洋变化动态度较大,面积从 1980 年的 206.96 km<sup>2</sup> 减少到 2018 年的 1.01 km<sup>2</sup>。农村居民点、未利用土地面积均呈现先增加,后减小的趋势。城镇用地、其他建设用地在 1980—2018 年面积持续增加,2018 年的面积分别为 1980 年的 4.99 倍和 5.99 倍。

### 2.2 人为干扰动态变化

2.2.1 人为干扰时空特征 由于 1980—2018 年大湾区人为干扰空间分布总体一致,本文仅显示人为干扰总强度(图 2)。从图 2 可知该区人为干扰呈现以发达城市为中心向外递减的特征,在中部发达城市较高(如广佛及交界地带、东莞),东北部和西北部欠发达地区(如肇庆、惠州东部)及沿海地带较低。具体而言,轻度人为干扰主要分布在东南部沿海地带,内陆

极少;而中度人为干扰主要分布在湾区四周,肇庆、江门、惠州、深圳、香港、珠海、广州市北部以及佛山市西南部;重度人为干扰分布区域较为散乱,在肇庆、江门、惠州、东莞、深圳市及香港特别行政区等地都有;完全人为干扰则主要以珠江湾区北岸和东岸(广州、

佛山、东莞和深圳)集中,其外围次集中的状态。人为干扰的高低分布特征受地形与地貌的限制,表现出以中心及亚中心城市为中心,以同心圆形态向外发展,城市之间为点轴式变化和演变,并且较近的城市群出现交汇状态。

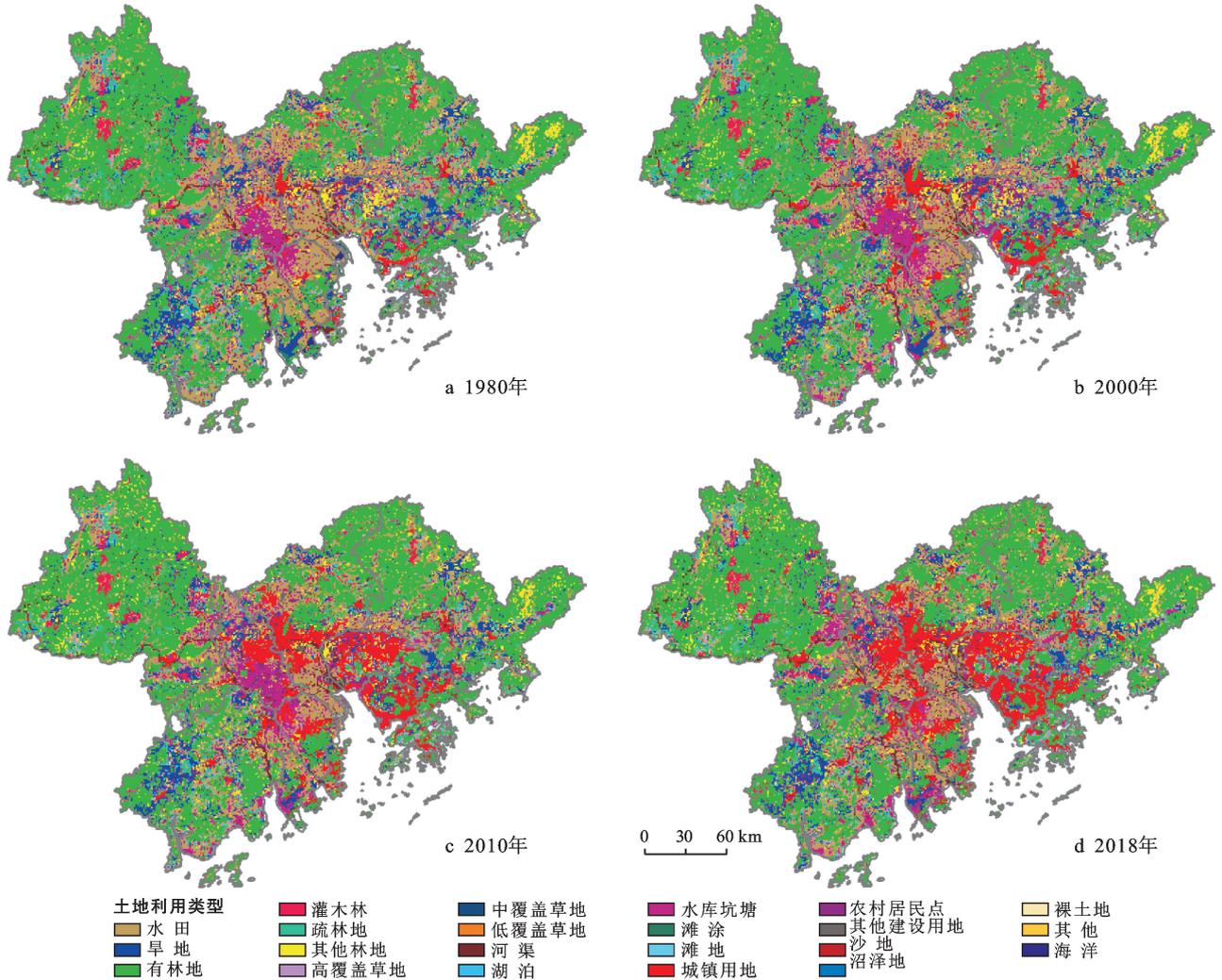


图 1 1980—2018 年粤港澳大湾区土地利用特征

1980—2018 年大湾区人为干扰度以中度为主,4 类干扰度面积都呈现波动变化状态(表 3)。轻度人为干扰面积总体降低,面积比例减少了 68.60%,2000 年后变化不大。中度人为干扰面积在 1980—2000 年为增加,2000 年则减少。重度人为干扰面积呈缓慢减小的趋势,变化较小。完全人为干扰面积总体呈增加趋势,在近 40 a 间增加了 1 499 km<sup>2</sup>。这些时空特征显示了 1980—2000 年粤港澳大湾区人为干扰度轻度和中度加重较为明显,推测是改革开放后珠江三角洲地区迅速推进工业化、城市化进程,导致湾区人为干扰度加重。经过 2000—2010 年经济、环保政策调整,区域发展走向更高密度阶段,因此表现为 2000—2018 年完全干扰面积增加趋势。

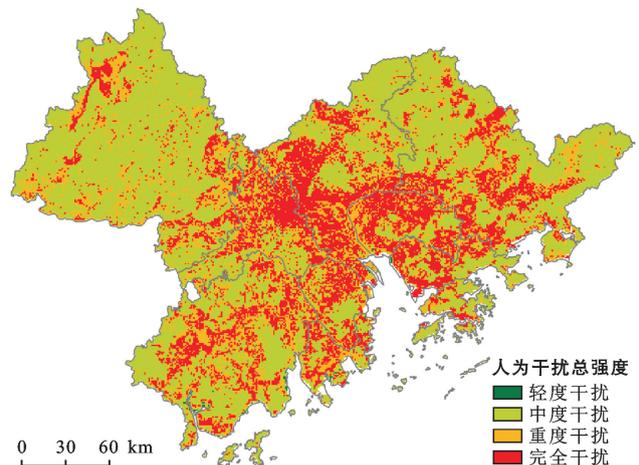


图 2 1980—2018 年粤港澳大湾区人为干扰总强度

表 2 1980—2018 年粤港澳大湾区土地利用面积、比例与动态度

| 土地类型   | 1980 年                 |          | 2000 年                 |          | 2010 年                 |          | 2018 年                 |          | 动态度/%           |                 |                 |
|--------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
|        | 面积/<br>km <sup>2</sup> | 比例/<br>% | 1980—<br>2000 年 | 2000—<br>2010 年 | 2010—<br>2018 年 |
| 水田     | 12 549                 | 21.12    | 10 985                 | 18.49    | 9 699                  | 16.30    | 9 585                  | 16.11    | -0.62           | -1.17           | -0.15           |
| 旱地     | 4 938                  | 8.31     | 4 676                  | 7.87     | 4 055                  | 6.82     | 3 844                  | 6.46     | -0.27           | -1.33           | -0.65           |
| 有林地    | 2 6821                 | 45.13    | 26 998                 | 45.44    | 26 467                 | 44.49    | 26 170                 | 43.99    | 0.03            | 0.00            | -0.14           |
| 灌木林    | 1 126                  | 1.9      | 999                    | 1.68     | 948                    | 1.59     | 960                    | 1.61     | -0.56           | -0.51           | 0.16            |
| 疏林地    | 3 260                  | 5.49     | 3 082                  | 5.19     | 2 845                  | 4.78     | 2 742                  | 4.61     | -0.27           | -0.77           | -0.45           |
| 其他林地   | 1 826                  | 3.07     | 1 858                  | 3.13     | 2 125                  | 3.57     | 1 985                  | 3.34     | 0.09            | 1.44            | -0.83           |
| 高覆盖度草地 | 1 385                  | 2.33     | 1 196                  | 2.01     | 1 088                  | 1.83     | 1 114                  | 1.87     | -0.68           | 0.00            | 0.30            |
| 中覆盖度草地 | 133                    | 0.22     | 141                    | 0.24     | 139                    | 0.23     | 136                    | 0.23     | 0.30            | -0.15           | -0.33           |
| 低覆盖度草地 | 10                     | 0.02     | 9                      | 0.02     | 9                      | 0.02     | 9                      | 0.02     | -0.49           | 0.00            | 0.13            |
| 河渠     | 1 305                  | 2.2      | 1 287                  | 2.17     | 1251                   | 2.10     | 1 375                  | 2.31     | -0.07           | -0.28           | 1.23            |
| 湖泊     | 2                      | 0        | 2                      | 0.00     | 2                      | 0.00     | 1                      | 0.00     | 0.00            | 0.00            | -6.34           |
| 水库坑塘   | 2 255                  | 3.79     | 3 174                  | 5.34     | 2 983                  | 5.02     | 2 593                  | 4.36     | 2.04            | -0.60           | -1.64           |
| 滩涂     | 170                    | 0.29     | 55                     | 0.09     | 48                     | 0.08     | 32                     | 0.05     | -3.38           | -1.26           | -4.23           |
| 滩地     | 126                    | 0.21     | 94                     | 0.16     | 114                    | 0.19     | 95                     | 0.16     | -1.27           | 2.11            | -2.12           |
| 城镇用地   | 1 025                  | 1.73     | 2 041                  | 3.44     | 4 266                  | 7.17     | 5 117                  | 8.60     | 4.95            | 10.9            | 2.49            |
| 农村居民点  | 1 904                  | 3.2      | 2 302                  | 3.88     | 2 211                  | 3.72     | 1 596                  | 2.68     | 1.05            | 0.00            | -3.48           |
| 其他建设用地 | 355                    | 0.6      | 477                    | 0.80     | 1 205                  | 2.03     | 2 129                  | 3.58     | 1.72            | 15.25           | 9.59            |
| 沙地     | 5                      | 0.01     | 5                      | 0.01     | 5                      | 0.01     | 3                      | 0.00     | 0.00            | 0.00            | -5.19           |
| 沼泽地    | 2                      | 0        | 2                      | 0.00     | 2                      | 0.00     | 3                      | 0.01     | 0.00            | 0.00            | 7.01            |
| 裸土地    | 13                     | 0.02     | 15                     | 0.03     | 13                     | 0.02     | 1                      | 0.00     | 0.77            | -1.33           | -11.53          |
| 其他未利用地 | 8                      | 0.01     | 8                      | 0.01     | 5                      | 0.01     | 2                      | 0.00     | 0.00            | -3.72           | -7.40           |
| 海洋     | 206                    | 0.35     | 2                      | 0.00     | 4                      | 0.01     | 1                      | 0.00     | -4.95           | 10.00           | -9.28           |

表 3 1980—2018 年粤港澳大湾区人为干扰度面积与比例

| 干扰度  | 1980 年             |       | 2000 年             |       | 2010 年             |       | 2018 年             |       | 1980—2018 年总强度     |       |
|------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|
|      | 面积/km <sup>2</sup> | 比例/%  |
| 轻度干扰 | 512                | 0.86  | 161                | 0.27  | 173                | 0.29  | 133                | 0.22  | 92                 | 0.16  |
| 中度干扰 | 31 607             | 53.19 | 32 389             | 54.52 | 31 506             | 52.96 | 30 843             | 51.84 | 31 608             | 53.81 |
| 重度干扰 | 6 534              | 11.00 | 6 377              | 10.73 | 6 370              | 10.71 | 6 245              | 10.50 | 12 182             | 20.74 |
| 完全干扰 | 20 772             | 34.95 | 20 482             | 34.48 | 21 437             | 36.04 | 22 271             | 37.44 | 14 861             | 25.3  |

2.2.2 人为干扰度动态分析 近 40 a 的人为干扰平稳度变化(图 3,表 4)显示出,高度平稳比例最大,但趋向不平稳状态,低度平稳和不平稳集中于干扰度较高处附近。1980—2000 年和 2000—2010 年主要为高度平稳,且变化不大(93.79%,92.32%)。其中,1980—2000 年人为干扰度加重而平稳度呈高度平稳,是由于这期间人为干扰度变化的是面积比例为 0.86%的轻度人为干扰,即其影响的区域仅占 0.86%,而大部分区域的人为干扰度不变或有细微变化。1980—2000 年人为干扰呈中度平稳和低度平稳的区域主要出现在粤港澳大湾区中部,面积比例为

5.45%,不平稳的区域在沿海地带,面积比例 0.76%,说明沿海地区土地利用类型变化较大。2000—2010 年不平稳区域出现在中部,面积比例增加至 1.4%,是 1980—2000 年的 1.84 倍。2010—2018 年湾区全域人为干扰平稳度变化均较明显,高度平稳面积比例比 2000—2010 年减少 29.97%,中度、低度平稳和不平稳则分别增加 13.88%,13.46%和 2.64%。1980—2018 年整体而言,不平稳集中于佛山、深圳与沿海地区,高度平稳以外的其他类分布主要在湾区中心与次中心城市,这与城市与建设用地分布扩张动态一致。

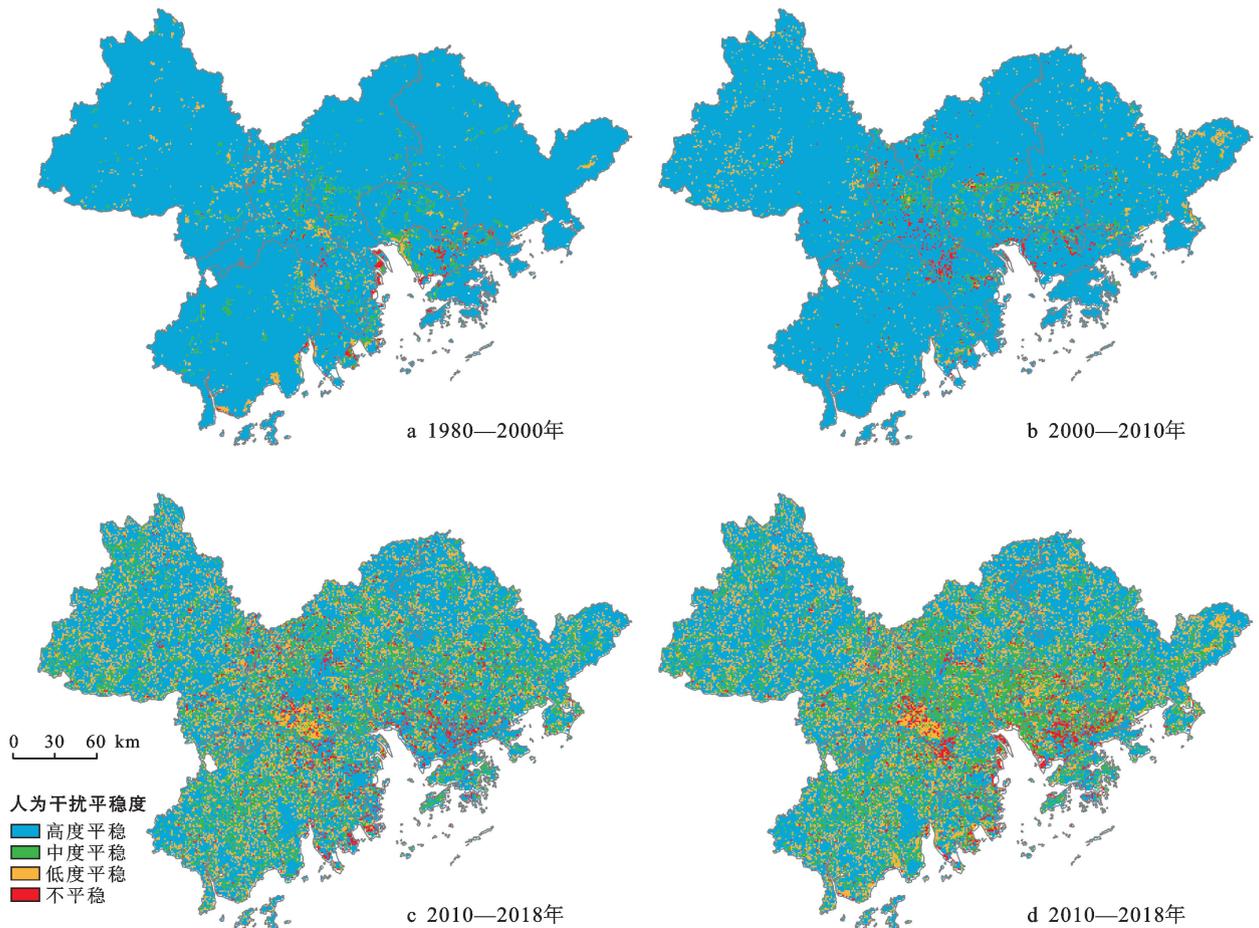


图 3 1980—2018 年粤港澳大湾区人为干扰平稳度变化特征

2010 年后人口急剧增长、经济迅猛发展、农业内部结构发生重大调整。据统计,大湾区常住人口在 2009—2017 年增长了  $7.89 \times 10^6$  人,达  $6.15 \times 10^7$  人; GDP 在 2010—2017 年增长了 97.28%,约达  $7.57 \times 10^{12}$  元。另一方面,由土地利用变化特征可知,这期间土地利用类型变化最剧烈,景观变化明显。这些因素导致了 2010 年后的剧烈变化。大湾区四周原本人

为干扰度较高的地区人为干扰度降低,可能是因为经济更发达区域吸纳人口迁移,以及政策上对湾区四周提倡保护生态,优先发展生态,欲将其打造成粤港澳大湾区绿色可持续发展的后花园;而湾区中部则发展经济,原本人为干扰度低的地区在 2010—2018 年人为干扰度也升高。因此整个区域都有出现中低度平稳乃至不平稳现象。

表 4 1980—2018 年粤港澳大湾区人为干扰平稳度面积与比例

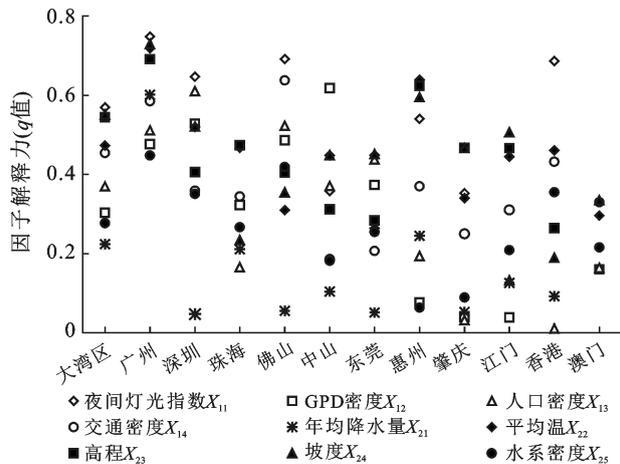
| 平稳度  | 1980—2000 年        |       | 2000—2010 年        |       | 2010—2018 年        |       | 1980—2018 年        |       |
|------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|
|      | 面积/km <sup>2</sup> | 比例/%  |
| 高度平稳 | 55 721             | 93.79 | 54 849             | 92.32 | 36 664             | 62.35 | 34 119             | 58.07 |
| 中度平稳 | 1 781              | 3     | 1 849              | 3.11  | 9 991              | 16.99 | 12 063             | 20.53 |
| 低度平稳 | 1 454              | 2.45  | 1 879              | 3.16  | 9 775              | 16.62 | 10 149             | 17.27 |
| 不平稳  | 453                | 0.76  | 832                | 1.4   | 2 375              | 4.04  | 2 424              | 4.13  |

## 2.3 人为干扰空间分异归因

2.3.1 人为干扰总强度单因子归因 如图 4 所示,整个粤港澳大湾区,夜间灯光指数(56.97%)、高程(54.46%)和坡度(54.65%)对人为干扰空间分异解释

能力( $q$  值)较高。社会经济因子的解释能力(均值 42.32%,变幅 30.31%~56.97%)比自然环境因子(均值 41.3%,变幅 22.4%~54.65%)更高且更稳定。解释能力 50% 以上的 3 个因子中有 2 个是自然环境类,

40%以上的 5 个因子中有 3 个是自然环境类。这些因子的解释能力表明,大湾区人为干扰空间分异是自然环境要素(尤其是地形地貌)分布影响下的人类活动差异的体现。该结果与丘陵区土地利用空间分异驱动特征一致<sup>[30]</sup>。



注:澳门特别行政区面积较小,在本研究的分辨率下,夜间灯光指数、年降水量和高程的空间分异不明显,已剔除。

图 4 粤港澳大湾区及各市人为干扰总强度空间分异因子探测结果

对不同城市的人为干扰空间分异进行地理探测(图 4)显示,总体上各影响因子对广州市的解释力更强,贡献率达 44.77%~74.85%,对澳门特别行政区则较弱,最强才 32.99%(交通密度、坡度),而在香港特别行政区不同因子解释力差异最大(0.58%~68.59%)。夜间灯光指数在广州(74.85%)、深圳(64.71%)、佛山(69.15%)、东莞市(44.86%)和香港特别行政区(68.62%)的解释力最强,他们都是经济比较发达的区域,这一指标对本区域整体的解释力也较强。GDP 密度在中山市解释力最强(61.81%),在广州、深圳、佛山市也较强,而在惠州、肇庆、江门市和香港及澳门特别行政区解释力较弱。人口密度与 GDP 密度有类似特征,在广州(50.72%)、深圳(60.65%)、佛山(51.87%)和东莞市(43.38%)的解释力较强。交通密度也是在广州(58.51%)、佛山市(63.76%)和香港特别行政区(43.23%)的解释力相对较高。社会经济因子对各城市人为干扰空间分异的解释力明显体现了经济状况的空间异质性,湾区核心城市(广州、深圳、佛山市和香港特别行政区等)对社会经济因子响应明显,而肇庆、江门等城市响应较弱。珠江入海口两岸的城市中,各影响因子对珠海和东莞的人为干扰解释力相对较弱,一定程度上也反映出相比于其他类似区位的城市,它们的经济社会发展潜力开发不足。

自然环境因子对不同城市人为干扰空间分异的解释力特征不同于社会经济因子。年降水量只对广州市人为干扰的空间分异解释力较强(60.13%),但相比于其他因子也不明显,在其他城市的解释力较弱,尤其是深圳、佛山、东莞、肇庆市和香港特别行政区,是所有因子中最弱。年均温、高程和坡度都在广州、惠州市解释力较强,且接近。其中年均温对广州市的解释力最强(71.83%),在惠州市的则是所有因子中最强(63.9%),高程对多数珠江入海口两岸的城市解释力较弱,在肇庆市(46.73%)是所有因子中最强;坡度在江门市和澳门特别行政区的解释力是所有因子中最强(50.17%,32.99%)。水系密度在东北(惠州 6.4%)、西北部(肇庆 8.9%)的解释力较弱,且整体解释力都偏弱。自然环境因子的解释力总体中等偏弱,但各因子之间的解释力差异比社会经济因子低,表明大湾区自然环境的空间分异相对较弱,而不同于地表环境复杂地区如横断山地等区域分异明显<sup>[31]</sup>。

不同地区人为干扰的驱动因子存在差异。湾区内部城市的人为干扰总强度主要受夜间灯光指数、GDP、人口密度和交通密度驱动,湾区四周城市的人为干扰总强度主要受坡度、高程驱动。湾区内部城市地形较四周城市平坦,经济发展活跃,社会经济因素对其人为干扰总强度高低的分布情况影响较大;而湾区四周城市注重生态保护,被誉为湾区发展的后花园,其群山环绕、地形起伏较湾区内部城市大,自然环境因素对其人为干扰总强度高低的分布情况影响较大。

2.3.2 人为干扰总强度影响因子交互作用 在粤港澳大湾区和各市内,不同因子两两交互作用对人为干扰空间分异的影响基本高于其中一个因子,主要表现为双因子增强,也有较多为非线性增强(表 5)。

对于整个大湾区,夜间灯光指数与其他因子交互作用的解释力在 59.64%以上,坡度与其他因子的交互作用的解释在 60.53%以上,其中夜间灯光指数与坡度的交互作用解释力(73.17%)为大湾区所有因子交互作用结果中最高,其次是夜间灯光指数与高程(69.7%)、交通密度与坡度(68.85%)及夜间灯光指数与年均温(68.14%)。总体上社会经济因子与自然环境因子(年均温、高程、坡度)交互作用,以及自然环境因子(年均温、高程、坡度)之间交互作用,对人为干扰空间分异具有更高的解释能力。这些交互作用说明夜间灯光指数高且地形平坦地方、交通密集且地形平坦地方的人为干扰度高,地形平坦易开发的地方更容易受人为干扰的影响,开发之后建造交通设施使当地入流量上升,进而夜间灯光指数上升,导致该地人为干扰度上升。

表 5 粤港澳大湾区与各市人为干扰总强度影响交互探测结果

| 城市  | 主要交互作用  |
|-----|---|
| 大湾区 | 夜间灯光指数 $\cap$ 坡度=0.731 7,夜间灯光指数 $\cap$ 高程=0.697 0,交通密度 $\cap$ 坡度=0.688 5,夜间灯光指数 $\cap$ 年均温=0.681 4,人口密度 $\cap$ 高程=0.668 9,人口密度 $\cap$ 坡度=0.662 3,交通密度 $\cap$ 高程=0.652 8   |
| 广州  | 夜间灯光指数 $\cap$ 坡度=0.864 1,交通密度 $\cap$ 坡度=0.846 4,交通密度 $\cap$ 年均温=0.825 8,夜间灯光指数 $\cap$ 高程=0.823 8,人口密度 $\cap$ 坡度=0.819 0,夜间灯光指数 $\cap$ 年均温=0.817 4,人口密度 $\cap$ 年均温=0.814 6 |
| 深圳  | 夜间灯光指数 $\cap$ 人口密度=0.813 9  |
| 珠海  | 夜间灯光指数 $\cap$ 年均温=0.654 8,交通密度 $\cap$ 坡度=0.619 9,夜间灯光指数 $\cap$ 坡度=0.619 3,年均温 $\cap$ 高程=0.616 1,夜间灯光指数 $\cap$ 交通密度=0.609 3  |
| 佛山  | 夜间灯光指数 $\cap$ 水系密度=0.774 5,交通密度 $\cap$ 水系密度=0.753 3,夜间灯光指数 $\cap$ 年均降水=0.737 0,夜间灯光指数 $\cap$ 高程=0.736 9,夜间灯光指数 $\cap$ 坡度=0.736 2,夜间灯光指数 $\cap$ 年均温=0.735 4                |
| 中山  | GDP 密度 $\cap$ 水系密度=0.760 7,夜间灯光指数 $\cap$ 水系密度=0.734 0,夜间灯光指数 $\cap$ GDP 密度=0.721 0  |
| 东莞  | 夜间灯光指数 $\cap$ 夜间灯光密度=0.682 5,人口密度 $\cap$ 坡度=0.662 2,夜间灯光指数 $\cap$ 人口密度=0.652 4,GDP 密度 $\cap$ 坡度=0.626 3,夜间灯光指数 $\cap$ 坡度=0.622 0,夜间灯光指数 $\cap$ 水系密度=0.612 4               |
| 惠州  | 夜间灯光指数 $\cap$ 坡度=0.758 1 坡度 $\cap$ 年均温=0.743 7,坡度 $\cap$ 高程=0.725 1,夜间灯光指数 $\cap$ 高程=0.710 1,夜间灯光指数 $\cap$ 年均温=0.707 8  |
| 肇庆  | 高程 $\cap$ 坡度=0.604 1  |
| 江门  | 夜间灯光指数 $\cap$ 高程=0.636 0,夜间灯光指数 $\cap$ 年均温度=0.633 4,夜间灯光指数 $\cap$ 坡度=0.632 9,高程 $\cap$ 坡度=0.605 6   |
| 香港  | 夜间灯光指数 $\cap$ 坡度=0.871 9,夜间灯光指数 $\cap$ 水系密度=0.858 8,交通密度 $\cap$ 坡度=0.834 0,夜间灯光指数 $\cap$ 交通密度=0.809 4,夜间灯光指数 $\cap$ 高程=0.802 1  |
| 澳门  | GDP 密度 $\cap$ 交通密度=1,GDP 密度 $\cap$ 坡度=1,人口密度 $\cap$ 交通密度=1,人口密度 $\cap$ 坡度=1,GDP 密度 $\cap$ 水系密度=0.914 3,人口密度 $\cap$ 水系密度=0.914 3   |

在各城市中,两两因子交互后影响力基本为双因子增强与非线性增强,仅澳门特别行政区有一个交互结果为非线性减弱。其中因子交互值达 0.8 或以上的城市为广州、深圳、香港和澳门,因子交互作用最大值中最低为肇庆市(表 5)。广州、深圳、珠海、佛山、中山、东莞市、香港和澳门特别行政区 8 个城市,其交互因子影响力较高的均有夜间灯光指数和 GDP 密度,大多数有人口密度或交通密度,因此这 8 个城市的人为干扰总强度由夜间灯光指数和 GDP 密度与其他因子组合作用影响明显;除中山市以外,其余的 7 个城市对人为干扰总强度影响力较大的因子还有人口密度或交通密度。而惠州、肇庆、江门 3 市,其交互因子影响力较高的均有坡度和高程因子,因此地势与其他因子交互作用对 3 市内人为干扰总强度的影响较大。

### 3 讨论与结论

粤港澳大湾区 1980—2018 年土地利用与土地覆被逐渐呈现林地—耕地—城镇景观格局。城镇用地、其他建设用地面积持续上升,在 1980—2018 年增长了 4.25 倍;2000 年以后土地利用类型面积变化、类型变化均明显。可见近 40 a 湾区城镇用地扩张,城市边缘不断扩大,城镇化发展快速。近 40 a 粤港澳大湾区人为干扰度皆以中度人为干扰为主。1980—

2000 年轻度人为干扰面积下降快速,完全人为干扰面积略有上升。较发达城市人为干扰总强度高,欠发达城市人为干扰总强度低,总强度呈现以城市为中心与次中心的同心圆分布。1980—2010 年湾区内人为干扰平稳度主要呈高度平稳,2010—2018 年干扰度变化较大,中低度平稳面积占比升高至 33.61%,不平稳地区面积增多至 1980—2000 年的 5.32 倍,变化剧烈。因此,近 40 a 粤港澳大湾区的人为干扰面积和程度都在不断加剧,近 10 a 人为干扰变化不稳定,景观变化剧烈。地理探测器分析结果表明,粤港澳大湾区整体的人为干扰总强度分布受夜间灯光指数、交通密度、年均温、高程以及坡度影响,且夜间灯光指数、坡度和高程对湾区人为干扰总强度具有较强的分层异质性解释力度;在因子交互作用中,各影响因子之间基本为双因子增强与非线性增强,即所选因子任意叠加都会使地区的人为干扰度增强。而从各个城市上看,湾区内部城市的人为干扰总强度主要受社会经济因素(夜间灯光指数、GDP、人口密度和交通密度)驱动,湾区四周城市的人为干扰总强度主要受自然环境因素(坡度、高程)驱动。

本研究基于较长时间尺度的土地利用数据分析人为干扰,并利用地理探测器定量分析人为干扰的空间分异的影响因素,虽然驱动因素考虑了自然环境与社会经济不同角度的指标,但未能考虑难以量化却又

影响较大的政策作用,也未定量分析不同土地利用类型转移对人为干扰的影响。因此后续研究可以朝这些方面继续深入。

### [参 考 文 献]

- [1] Jalas J. Hemerobe und hemerochore pflanzenarten. Ein terminologischer reformversuch [J]. Acta Societatis Pro Fau-Na Et Flora Fennica, 1955,72(11):1-15.
- [2] Sukopp H. Der Einfluss des Menschen auf die Vegetation [J]. Plant Ecology,1969,17:360-371.
- [3] 刘世梁,刘芦萌,武雪,等.区域生态效应研究中人类活动强度量化评价[J].生态学报,2018,38(19):6797-6809.
- [4] Kiedrzyński M, Kiedrzyńska E, Witoslawski P, et al. Historical land use, actual vegetation, and the hemeroby levels in ecological evaluation of an urban river valley in perspective of its rehabilitation plan [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2014,23(1):109-117.
- [5] Arnold J, Kleemann J, Fürst C. A differentiated spatial assessment of urban ecosystem services based on land use data in Halle, Germany [J]. Land, 2018,7(3):101.
- [6] Walz U, Stein C. Indicators of hemeroby for the monitoring of landscapes in Germany [J]. Journal for Nature Conservation, 2014,22(3):279-289.
- [7] 陈爱莲,朱博勤,陈利顶,等.双台河口湿地景观及生态干扰度的动态变化[J].应用生态学报,2010,21(5):1120-1128.
- [8] 刘晓娜,张微微,李红.基于 LUCC 的密云水库上游流域人为干扰动态变化[J].生态与农村环境学报,2016,32(6):951-957.
- [9] 曾兰,吴良林.基于 LUCC 的生态环境人为干扰度分析:以广西巴马瑶族自治县为例[J].江西农业学报,2019,31(2):103-108,114.
- [10] 李鸿伟,赵锐锋,王福红.人类土地利用干扰对黑河中游湿地时空变化的影响[J].干旱区地理,2018,41(2):375-383.
- [11] 侯伟,翟亮,田莉,等.基于 PSR 模型的景观人为干扰度综合分析:以北京市为例[J].地理与地理信息科学,2019,35(6):90-96.
- [12] 宋文杰,张清,刘莎莎,等.基于 LUCC 的干旱区人为干扰与生态安全分析:以天山北坡经济带绿洲为例[J].干旱区研究,2018,35(1):235-242.
- [13] 王小军,刘光旭,肖彤.气候变化情景下油茶生长的适宜性特征[J].热带地理,2020,40(5):868-880.
- [14] 朱孟珏,傅晓婷.粤港澳大湾区土地利用效率的时空特征及其影响机制[J].热带地理,2017,37(6):814-823.
- [15] 冯珊珊,樊风雷.基于不透水面的粤港澳大湾区景观格局时空变化[J].应用生态学报,2018,29(9):2907-2914.
- [16] Dai Erfu, Wu Zhou, Du Xiaodan. A gradient analysis on urban sprawl and urban landscape pattern between 1985 and 2000 in the Pearl River Delta, China [J]. Frontiers of Earth Science, 2018,12(4):791-807.
- [17] 王文静,韩宝龙,郑华,等.粤港澳大湾区生态系统格局变化与模拟[J].生态学报,2020,40(10):3364-3374.
- [18] 曹君,张正栋,陈宋佳,等.1996—2015年粤港澳大湾区生态系统服务对景观格局变化的响应[J].华南师范大学学报(自然科学版),2020,52(5):93-105.
- [19] 肖红克,李洪忠,王莉,等.粤港澳大湾区土地利用及生态系统服务价值的变化:以广佛肇为例[J].水土保持研究,2020,27(1):290-297.
- [20] 李玮麒,兰泽英,陈德权,等.广州市土地利用多情景模拟及其生态风险时空响应[J].水土保持通报,2020,40(4):204-210,227,2.
- [21] 周炳中,陈浮,包浩生,等.长江三角洲土地利用分类研究[J].资源科学,2002,24(2):88-92.
- [22] 刘光旭,毛梦瑶,相爱存.基于景观格局的赣江上游区生态风险变化研究[J].赣南师范学院学报,2016,37(3):72-76.
- [23] 王秀兰,包玉海.土地利用动态变化研究方法探讨[J].地理科学进展,1999,18(1):81-87.
- [24] 郭少壮,白红英,孟清,等.1980—2015年秦岭地区景观格局变化及其对人为干扰的响应[J].应用生态学报,2018,29(12):4080-4088.
- [25] 肖翠,解雪峰,吴涛,等.浙江西门岛湿地景观格局与人为干扰度动态变化[J].应用生态学报,2014,25(11):3255-3262.
- [26] 徐媛银,孙思琦,薛达元,等.基于地形梯度的赣南地区生态系统服务价值对人为干扰的空间响应[J].生态学报,2019,39(1):97-107.
- [27] 周建国.耦合环境异质性与人为干扰的云南西部地区保护优先区研究[D].云南昆明:云南大学,2019.
- [28] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [29] 戴尔阜,王亚慧.横断山区产水服务空间异质性及归因分析[J].地理学报,2020,75(3):607-619.
- [30] 刘光旭,王小军,相爱存,等.赣江中上游地区土地利用变化空间分异与驱动因素[J].应用生态学报,2021,32(7):2545-2554.
- [31] 戴尔阜,王亚慧,马良,等.中国典型山地土地利用变化与资源生态效应[J].自然杂志,2018,40(1):33-40.