

基于人类压力指数的粤港澳大湾区湿地资源分布与重要湿地识别

黄晓峻¹, 吴志峰^{1,2,3}, 张棋斐¹, 曹 峰^{1,2,3}, 郑子豪¹, 何江润¹

(1. 广州大学地理科学与遥感学院, 广州 510006; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458; 3. 自然资源部大湾区地理环境监测重点实验室, 深圳 518060)

摘要: 粤港澳大湾区拥有丰富的湿地资源, 但正面临人类活动造成的环境胁迫。基于人类压力指数, 结合空间自相关方法, 探究大湾区湿地分布与人类压力的空间关系, 以此识别出具有重要意义的重要湿地。结果表明: (1) 大湾区湿地较多分布在珠江西岸, 而城市内部的湿地较稀缺; 人类压力在城际、城内各有差异, 珠江东岸较西岸高; 湿地分布、人类压力在空间上均具相关性。(2) 筛选后的空间聚类类型对应着不同类型的湿地: 重要湿地、潜在的重要湿地、非重要湿地。(3) 重要湿地, 人类压力较高, 主要分布在城市建成区及其周边地区, 需同时发挥生态和景观效益; 潜在的重要湿地, 人类压力较低, 多分布在珠江入海口及珠江西岸; 非重要湿地, 零散分布在各地, 容易消失。研究结论为探究人类压力影响下的湿地演变奠定基础, 为保护利用湿地提供应用参考。

关键词: 重要湿地; 人类压力; 空间自相关; 粤港澳大湾区

湿地是水陆相互作用形成的自然综合体, 具有水文功能、生物地球化学功能、生态功能, 在全球环境变化研究中具有重要意义^[1]。然而, 全球湿地面积正在下降, 湿地流失速度高于其他任何生态系统^[2,3]。湿地生态环境正在恶化, 主要原因是人类活动^[4]。以城市扩张为代表的人类活动和气候变化共同造成的压力, 是湿地正面临的双重胁迫, 而且胁迫日益增大^[5-7]。维持湿地稳定性的基本问题是空间问题, 并且要综合考虑自然、经济、社会等因素^[8]。因此, 研究湿地分布与人类压力的关系, 有助于认识湿地面临的环境胁迫和识别重要湿地, 为湿地资源监测、保护、利用等工作提供支撑。

研究湿地分布与人类压力的关系, 关键是分析人类活动对湿地资源的影响, 可以分为定性分析、定量分析两个方面。定性分析基于因果框架, 常使用驱动力—压力—状态—影响—响应(DPSIR)模型, 例如用于评估湿地生态系统服务的脆弱性^[9]。根据研究区域, 通过回归分析^[10]、层次分析^[11]等方法筛选指标, 但面临着指标定量、关系定性、结果普适性等问题。定量分析能进一步反映湿地如何随着人类压力变化而变化, 按照结果应用方向可分为两类。第一类, 找出影响湿地变化的驱动因素。可使用Tobit模型^[12]、主成分分析^[13]、地理加权回归^[14]、空间自相关^[15]等方法, 将湿地景观指数与各人类压力因素进行分析, 研究人类压力因素对湿地的影响机制。但是, 已知某些驱动因素对湿地起着

收稿日期: 2021-07-05; 修订日期: 2021-08-12

基金项目: 国家自然科学基金委—广东联合基金重点项目(U1901219); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0301)

作者简介: 黄晓峻(1998-), 男, 广东广州人, 硕士, 研究方向为城市生态与人居环境。E-mail: alfredhxj@qq.com

通讯作者: 吴志峰(1969-), 男, 湖南湘潭人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为城市生态与人居环境。

E-mail: zfwu@gzhu.edu.cn

正面或负面影响,并未能对湿地保护工作起到直接作用。第二类,找出不同人类压力影响下的湿地。彭凯锋等^[16]以功能湿地、水田、非湿地之间的相互转换,识别不同受损程度的湿地。赵雪等^[17]使用He等^[18]提出的湿地空间压力方法,模拟城市扩张过程下湿地压力的演变。然而,影响湿地变化的人类压力是综合的,在表征人类压力时需要结合更多因素来考虑。

合理表征人类活动所造成的环境压力,有助于准确分析湿地分布与人类压力的关系。湿地面临的人类压力可分为直接影响的因素、间接影响的因素^[19]。直接因素涉及湿地物理机制、资源取用、物质引入、结构改变等方面,较难进行大范围度量。间接因素包括人口、GDP、土地利用、气温、降雨、蒸散发等^[20,21],易获取与分析。但这些因素单独地和湿地分布进行相关性研究,难以概括人类压力。Sanderson等^[22]在2002年首次提出全球尺度上的人类足迹,利用1990年代初的数据,对建成环境、农田、人口密度、夜间灯光、道路、铁路、航道等人类压力加权组成全球陆地人类足迹地图。基于此,Venter等^[23]对比2009年和1990年代初的人类压力指数,分析其时空演变模式及对生物多样性的影响。在无处不在的人类压力影响下,实现社会经济成长而不造成环境普遍退化成为人类巨大挑战,可见人类压力指数具有潜质来度量湿地面临的环境胁迫。Zhou等^[15]使用空间自相关方法探讨省级湿地分布及其影响因素,有效关联起湿地分布与各影响因素的空间关系,显示出空间自相关方法具备进一步研究格网尺度下两者关系的潜力。采用人类压力指数,合理使用空间自相关方法,能够有效评估分析湿地资源受到的胁迫。人类压力比较大的区域若仍有湿地分布,说明该湿地在演变中有着重要作用,本文将其视为重要湿地。

本文旨在探究粤港澳大湾区湿地分布与人类压力的空间关系,以此识别出具有重要意义的重要湿地资源。首先分析大湾区湿地的空间分布特征,并通过空间自相关方法分析其空间相关性;然后引入并优化人类压力指数,分析2020年大湾区人类压力空间分布特征及其空间相关性;最后综合分析湿地分布与人类压力的双变量局部空间自相关结果、两者单变量局部空间自相关的叠加结果,探究大湾区湿地分布与人类压力的空间关系,并以此为依据识别出重要湿地。面临着人类压力大的湿地分布区,在湿地演变中具有重要作用。本文可为粤港澳大湾区湿地资源的保护和可持续发展提供数据支撑和科学依据。

1 研究方法与数据来源

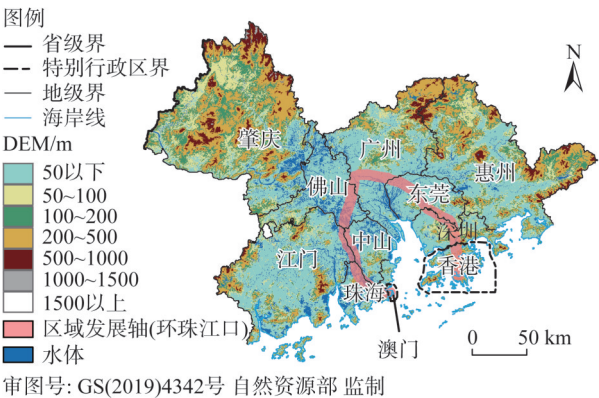
1.1 研究区概况与数据来源

粤港澳大湾区是我国开放程度最高、经济活力最强的区域之一,包括广东省的广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门、肇庆等九市及中国香港、澳门两个特别行政区,总面积达5.6万km²,2020年常住人口约8617万人。大湾区水热丰沛、河网密布,孕育出丰富的湿地资源;然而在近几十年来气候变化及人类压力的胁迫下,湿地面积衰减、质量退化趋势明显^[5]。以粤港澳大湾区(图1)为研究区域探讨湿地分布与人类压力的空间关系具有一定的代表性和现实意义。

本文使用的湿地分布数据通过土地利用或城市规划数据计算得到(表1)。珠三角九个城市的湿地提取自第三次全国国土调查数据,香港的湿地提取自香港规划署2019年末的土地利用数据,澳门的湿地提取自澳门城市总体规划(2020—2040年)草案中的生态

保护区。由于三地湿地数据的组成不一，本文对湿地类型不作细分。通过生成格网并计算格网内湿地面积占比(%)，得出2020年粤港澳大湾区湿地分布数据。

基于全球陆地人类足迹计算方法^[22,23]，本文从人类压力数据来源的合理性、权威性、分辨率等三方面优化人类压力的计算，并根据新数据源适当调整人类压力赋值方法。人类压力指数(Human Pressure Index, HPI)的组成包括：土地利用(建成环境及耕地)、人口密度、夜间灯光、道路、铁路、航道，不包括原方法计算在内的牧场。人类压力指数值的范围为0~50分，对应着所在格网的人类压力从小至大。



注：本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作，底图无修改，下同。

图1 粤港澳大湾区示意图
Fig. 1 Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

表1 粤港澳大湾区湿地数据

Table 1 Wetland data of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

地区	格式	空间分辨率/m	数据来源	湿地组成
珠三角	栅格	30	第三次全国国土调查数据	水田、基塘、水库、河渠、湖泊、内陆滩涂、沿海滩涂、红树林
香港	栅格	10	香港土地用途2019年 (https://www.pland.gov.hk/pland_tc/info_serv/open_data/landu/index.html)	鱼塘及基围、红树林及沼泽、水库、河流及水道
澳门	矢量	—	澳门特别行政区城市总体规划(2020—2040年)草案(https://www.dssopt.gov.mo/zh_HANT/home/information/id/259)	湿地生态保护区、水体生态保护区(经过参考现状数据而认定)

具体数据及计算方法如下：(1) 不同于原方法使用夜间灯光间接得出建成环境，本文土地利用数据来自全球地表覆盖数据(GlobeLand 30)，分辨率约为30 m^[24]。若为建成环境赋10分，为耕地赋7分，其余则赋0分，建成环境与耕地的分布是互斥的。(2) 人口密度采用全球人口项目组(WorldPop)和哥伦比亚大学国际地球科学信息网络中心联合制作的经联合国数据调整后的人口格网数据，分辨率约为100 m^[25]。若人口密度大于1000人/km²，赋10分；其余的经过对数变换，赋0~10分。(3) 夜间灯光数据来自跨传感器校正的全球“类NPP-VIIRS”夜间灯光数据集(NPP-VIIRS-like NTL Data)，其分辨率约为500 m^[26]。夜间灯光值以十分位数界定，赋0~10分(10个级别)。(4) 道路和铁路来自公开地图(Open Street Map)的矢量数据。道路在500 m缓冲区范围内，根据道路等级赋4~8分(5个级别，道路级别高，赋分也高)；在500~1000 m缓冲区范围中，赋分以对数函数方式向外衰减至0分；在1000 m以外，赋0分。(5) 铁路在500 m范围内，赋8分；在500 m以外，赋0分。(6) 航道数据来自广东省航道发展规划(2020—2035年)的主要

内河航道现状格局，包括西江干流及珠三角“三纵三横三线”高等级航道网，其认定方式比原方法更权威。在航道的15 km缓冲区内，赋分从4分向外以对数函数形式衰减至0分。参照原方法，以上六项要素的赋分，求和后得到人类压力指数值（表2）。

表2 人类压力指数赋分方法
Table 2 Score method of Human Pressure Index

组成要素	赋分依据	赋分/分	赋分方式	组成要素的满分值
(1) 土地利用	建成环境	10	直接赋分	10
	耕地	7	直接赋分	
	其他土地利用类型	0	直接赋分	
(2) 人口密度	>1000 人/km ²	10	直接赋分	10
	≤1000 人/km ²	0~10	人口密度经对数变换赋分	
(3) 夜间灯光	灯光值	0~10	以灯光值的十分位数赋分	10
(4) 道路	500 m 缓冲区内	4~8	根据道路级别高低赋分	8
	500~1000 m 缓冲区中	0~4	由近及远地以对数函数方式衰减至0分	
	1000 m 缓冲区外	0	直接赋分	
(5) 铁路	500 m 缓冲区内	8	直接赋分	8
	500 m 缓冲区外	0	直接赋分	
(6) 航道	15 km 缓冲区内	0~4	由近及远地以对数函数方式衰减至0分	4
	15 km 缓冲区外	0	直接赋分	
人类压力指数满分值				50

本文计算出粤港澳大湾区2020年的人类压力数据，并作为格网的属性之一与湿地进行分析。为有效分析湿地分布与人类压力之间的关系，结合研究区面积、现有数据源的空间分辨率、计算结果的精度等因素，采用500 m×500 m的格网。

1.2 研究方法

地理学第一定律指出地理现象在空间上存在相关性。空间自相关反映空间单元上某种属性值与相邻单元上同一属性值的相关程度，包括全局空间自相关与局部空间自相关，可分别用Moran's *I*指数[式（1）]、Local Moran's *I*指数[式（2）]表示^[27]，公式如下：

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}}$$

(1)

$$I_i = \frac{(n-1) \times (x_i - \bar{x}) \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{j=1, j \neq i}^n (x_j - \bar{x})^2}$$

(2)

式中：*n*是空间单元数量（个）；*x_i*和*x_j*分别为单元*i*和单元*j*的属性值；*w_{ij}*是空间权重矩阵。不同权重矩阵得出不同的计算结果^[28]，本文使用格网数据作为空间单元，应采用二阶Queen邻接方式。

为进一步探讨多变量之间的空间自相关，Anselin等^[29]提出双变量空间自相关方法，

有助于研究两个时间先后的同一变量；但同时指出在研究同一时间节点两种不同变量的关系时需要谨慎解释计算结果。该方法 [式 (3)] 已被应用于揭示不同要素空间分布的相关性^[30,31]，公式如下：

$$I_{ab}^i = \frac{x_a^i - \bar{x}_a}{\sigma_a} \times \sum_{j=1}^n w_{ij} \frac{x_b^j - \bar{x}_b}{\sigma_b} \quad (3)$$

式中： x_a^i 是单元 i 的 a 属性值； x_b^j 是单元 j 的 b 属性值； σ_a 和 σ_b 分别为属性 a 和 b 的方差。

谨慎解释结果包括两方面：(1) 空间自相关分析所得到的结果需要满足统计学的显著性检验才可确认。(2) 空间聚类结果的内涵差异。单变量的局部空间自相关计算得到四种聚类类型（高一高、高一低、低—低、低—高）。以高一高类型为例，描述的是某高属性值的空间单元被周围高属性值的空间单元围绕。然而，在双变量局部空间自相关中，高一高类型代表某一高属性值的空间单元被周围拥有另一种高属性值的空间单元围绕，而非表示同一空间单元内两种属性值均高的情况。为避免因单变量、双变量聚类类型内涵的差异而影响研究的准确性，本文计算湿地分布与人类压力的双变量局部空间自相关结果，同时叠加湿地分布、人类压力的单变量局部空间自相关结果；通过各类不同空间范围的代表性湿地来比较两种结果的差异，从而选择合适的空间聚类类型来识别具有重要意义的重要湿地资源。

2 结果分析

2.1 湿地的空间分布特征

掌握湿地空间分布特征是探究湿地分布与人类压力关系的基础条件。2020年粤港澳大湾区各类湿地面积约为 9876 km²，约占全区面积的 17.6%，主要包括水田、基塘、水库、湖泊、滩涂、河流及水道等。分析格网内湿地面积占比的空间分布（图 2a）可见，大湾区湿地较多分布在珠江西岸地区（广州、佛山、肇庆、珠海、中山、江门、澳门），与西岸水网密布密切相关；珠江东岸地区（东莞、深圳、惠州、香港）湿地则主要沿东江分布，其余则零星分布在各市；大湾区各城市中心区湿地较稀缺，与城市用地不断扩

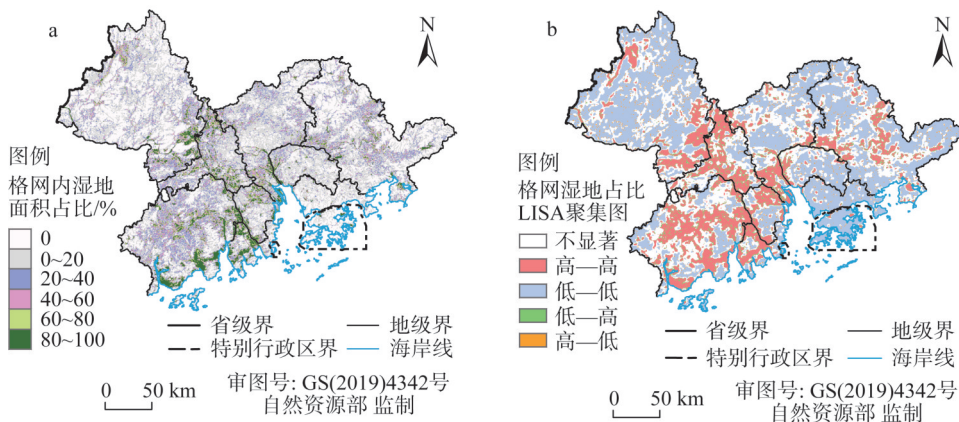


图2 粤港澳大湾区湿地的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of wetlands in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

张有关。

在珠江西岸地区,广州南部、佛山中南部、中山北部、肇庆东部等地是坑塘、河涌分布的主要区域。其中,以基塘为代表,佛山顺德是珠三角基塘核心分布区,区内广泛分布着未经整治的原始不规则形态基塘、整治后呈规则形态的基塘;后者为养殖塘,是集约农业的重要组成部分。塘的长期存在,离不开西岸地区地势低洼、水系密布的自然原因,促成西岸地区湿地分布密集的现状。在珠江东岸地区,惠州、东莞、深圳、香港自北向南湿地呈现明显递减趋势,东江流经惠州、东莞从而构成大片湿地,深圳、香港湿地则较多由水库构成,例如香港东部的万宜水库。另外,位处深港交界的香港米埔—后海湾湿地被《拉姆萨尔公约》(Ramsar Convention)列为国际重要湿地,为迁徙过境的候鸟提供食物和栖息地,具有重大生态价值。在大湾区各市的中心区域,湿地主要由流经市区的水系或湖泊组成。受空间单元统一(500 m格网)的影响,城市内部分散分布且面积较小的湖泊或坑塘难以纳入分析当中,但在面积、数量上不会影响湿地整体格局上的分析。

在格网内湿地面积占比结果的基础上,进行全局空间自相关计算, Moran's I 值为 0.6246 (z 值通过显著性检验), 显示以 500 m 格网为空间单元的格网湿地在空间上存在正相关关系。通过局部空间自相关得到其 LISA 聚集图(图 2b), 四种类型包括: 高一高, 即该空间单元湿地面积占比较大, 且周边空间单元湿地面积占比也较大, 可理解为湿地分布密集区; 低—低, 即湿地占比较低, 且周边的占比也较低, 可视为非湿地区; 低—高, 即湿地占比较低, 且周边的占比较高, 可忽略不计; 高一低, 即湿地占比较高, 但周边的占比比较低, 可视为湿地分布破碎区或湿地分布密集区的边缘区域。湿地 LISA 聚集图的结果, 从空间聚类的角度上表达湿地分布, 符合格网湿地面积占比分布(图 2a)的基本特征, 为下文与人类压力的空间分布进行关联分析、识别价值湿地奠定基础。

2.2 人类压力的空间分布特征

人类压力是湿地面临的双重胁迫之一, 本文计算 2020 年粤港澳大湾区人类压力指数值 (HPI) (图 3a), 并以此计算人类压力指数的局部空间自相关的聚类类型(图 3b)。当前, 大湾区全区 HPI 平均值为 16.26, 除肇庆、江门、惠州等三市的 HPI 低于湾区整体水平外, 其余城市均高于湾区整体水平。大湾区核心区域 HPI 高于边缘区域, 其中, 东莞、深圳较高, HPI 均大于 25; 澳门、中山、佛山次之, HPI 在 22~25 之间; 广州、香港、珠海高于湾区平均水平, HPI 在 18~21 之间。各市 HPI 平均值次序与城市发展程度有差异, 与城市面积、城市内部未开发用地或绿地面积有着明显关系。例如, 广州北部从化区是生态发展区, 香港保留了大量生态用地(如郊野公园), 两市 HPI 仅处于湾区的中间水平。

结合大湾区发展轴(图 1 红条带)分析人类压力(图 3c)。大湾区核心区域中, 东岸 HPI 整体较高, 而西岸 HPI 差异较大, 广州、佛山较高, 珠海、中山、江门较低。可见, 人类压力较为真实地反映大湾区的生态环境现状, 体现城际、城内的发展差异和自然环境差异。对人类压力指数结果进行全局空间自相关计算, Moran's I 值为 0.7712 (z 值通过显著性检验), 显示人类压力在空间分布上存在正相关的关系。通过局部空间自相关得到其 LISA 聚集图(图 3b), 四种类型包括: 高一高, 即该空间单元的 HPI 较高且周边

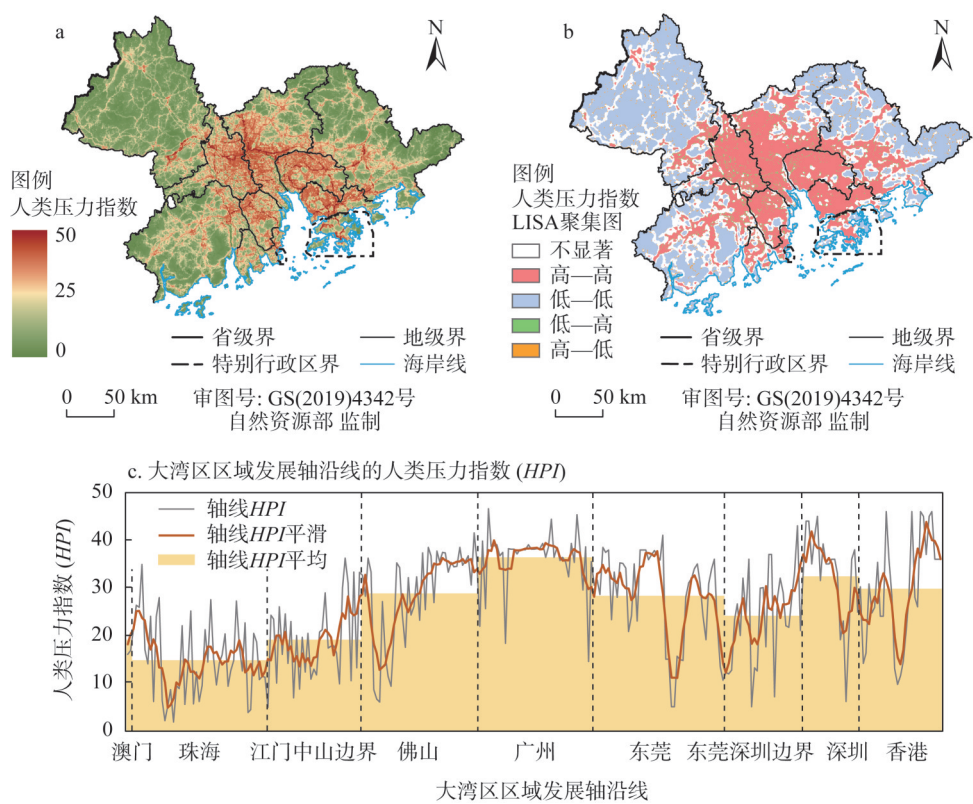


图3 粤港澳大湾区人类压力的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of human pressure in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

也较高，此类广泛分布于大湾区的核心区域；低—低，即该空间单元的HPI较低且周边也较低，此类多分布在湾区核心区域的外围；低—高，即该空间单元的HPI较低而周边较高，此类多为城市中的生态用地，分散分布在湾区中，没有明显的集聚趋势；高—低，即该空间单元的HPI较高而周边较低，此类区域较少。人类压力指数LISA 聚集图，勾勒出大湾区HPI高值集聚（高一高）、低值集聚（低—低）等区域，与湿地分布数据共同进行后续分析。

2.3 湿地分布与人类压力的关系分析

综合比较湿地分布与人类压力的双变量局部空间自相关结果、湿地分布和人类压力局部空间自相关的叠加结果，根据空间聚类类型分析湿地所面临的胁迫从而识别出重要湿地。比较空间聚类含义后，可发现两个单变量局部空间自相关结果叠加和双变量局部空间自相关结果之间存在联系，其内在联系、结果叠加后的组成和占比，以及各种类型所对照的空间聚类如表3所示。

格网湿地占比、人类压力指数的单变量局部空间自相关分别有五种类型的结果（不显著、高一高、低—低、低—高、高—低），叠加后产生25种结果（表3中的序号1~25）。其中，湿地在空间上不集聚的结果不纳入研究范围中，包括：格网湿地占比在空间相关性上不显著的（序号1、6、11、16、21），格网湿地占比聚类类型为低—低（序号3、8、13、18、23）或低—高的（序号4、9、14、19、24）。剩下的10种叠加结果，除

表3 两个单变量局部空间自相关结果叠加与双变量局部空间自相关的聚类对照

Table 3 Clusters comparison between overlay analysis of two univariate local spatial autocorrelation and bivariate local spatial autocorrelation

		格网湿地占比					
		不显著	高一高	低一低	低一高	高一低	小计/%
人类 压力 指数	不显著	1	2	3	4	5	22.07
		8.39%	7.33%	4.64%	1.38%	0.33%	
		/	II类	/	/	II类	
	高一高	6	7	8	9	10	30.64
		9.77%	7.94%	10.22%	2.26%	0.45%	
		/	V类 “高一高”	“低一高”	“低一高”	V类 “高一高”	
	低一低	11	12	13	14	15	42.96
		8.69%	2.58%	30.16%	0.62%	0.91%	
		/	I类 “高一低”	“低一低”	“低一低”	I类 “高一低”	
	低一高	16	17	18	19	20	2.56
		0.64%	1.43%	0.36%	0.08%	0.05%	
		/	III类 “高一高”	“低一高”	“低一高”	III类 “高一高”	
	高一低	21	22	23	24	25	1.77
		0.65%	0.31%	0.52%	0.06%	0.23%	
		/	IV类 “高一低”	“低一低”	“低一低”	IV类 “高一低”	
小计/%		28.14	19.59	45.90	4.40	1.97	100.00

注：表中第一行序号（1~25），表示叠加后一共有25种类型；第二行表示该结果叠加类型的面积占比；第三行表示部分叠加后的类型划分为五大类（I~V类）；格网湿地占比与人类压力指数的双变量局部空间自相关聚类结果使用双引号表示。

序号2、5外，将与双变量局部空间自相关（LISA）的聚类结果（图4a）作联系；10种叠加结果将简化为五种结果，并以I~V类的形式表示（图4b），具体意义将在下文阐述。以双变量空间自相关结果“高一低”为例，意即该空间单元湿地占比高且周边人类压力指数低，无法得知该空间单元人类压力及周边湿地占比的情况。而在单变量叠加结果中，可包括格网湿地占比高一高、高一低且人类压力指数低一低、高一低的类型（序号12、15、17、20）；叠加结果可将其进一步分类，序号12、15为I类湿地，序号22、25为IV类湿地。

为更全面比较两种空间聚类结果之间的差异，选择大湾区内有代表性的五类湿地进行比较（图4c）。这些湿地的类型不同，空间范围不同，所处地域位置及面临的人类压力不同，能全面比较结果。海珠湿地位处广州中心城区，具有城市湖泊及河流湿地的特色，选取2.5 km×2.5 km区域为样例。佛山顺德杏坛的基塘连片分布，河流穿梭其中，选取5 km×5 km区域为样例。香港米埔一后海湾作为沿海滩涂的代表，是国际重要湿地，选取5 km×5 km区域为样例。流溪河水库是广州唯一的大型水库，具有重要生态意义，选取7.5 km×7.5 km区域为样例。崖门水道是位处西岸的珠江八大口门之一，地域较辽阔，选取15 km×15 km区域为样例。

以不同聚类方法对湿地的识别效果来进行分析，双变量LISA聚类（图4的a类型）、单变量LISA聚类叠加（图4的b类型）两种结果总体上相似，但在不同的空间范围中各有优势。在小尺度的海珠湿地中，a类型可以识别出集聚的湿地周边面临着高人类压力的

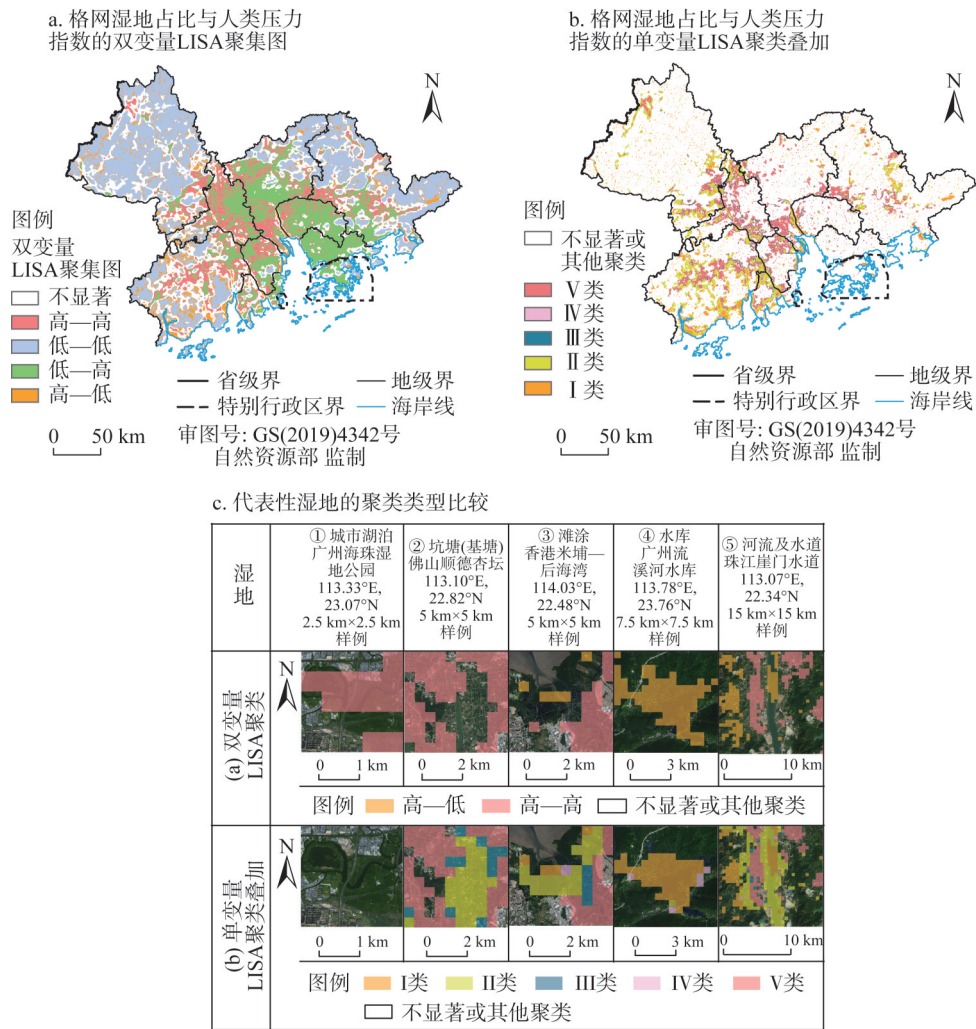


图4 湿地分布与人类压力的关系分析

Fig. 4 Relationship analysis between wetland distribution and human pressure

高一高类型，而b类型无法识别其空间聚类。在中尺度的杏坛基塘、米埔湿地中，a类型的聚类类型、湿地面积均比b类型少，b类型能较为完整地识别出该地湿地分布及其与人类压力间的关系。在较大尺度的流溪河水库、崖门水道中，a、b类型识别的湿地范围相近，聚类类型差异不大。可见，在小尺度上，a类型即双变量LISA聚类识别效果较优，在中、大尺度上，b类型即单变量LISA聚类的叠加识别效果优且聚类类型更加丰富。由于本文着重分析区域上的湿地，b类型叠加所形成的五种空间聚类（I~V类）更具优势，可用于识别湿地面临的人类压力并对其分类（表4）。同时，分析大湾区区域发展轴上聚类类型的占比（表5）有助于深入认识这些类型的湿地在各市的情况。湿地的聚类叠加人类压力的聚类形成的湿地分类，可以反映湿地在资源保护方面的紧急程度。

（1）III、V类是人类压力较高的湿地，即重要湿地。III类区域主要分布在坑塘密集的地方，自身人类压力较低而周边人类压力较高，应积极考虑发挥其在高人类压力地区

表4 依据空间聚类类型识别重要湿地

Table 4 Classifications of important wetlands based on types of spatial clusters

空间聚类	占比/%	分布位置	湿地分布与人类压力的关系	湿地资源保护的意义
I类	16.19	主要分布在珠江入海口处及江门、肇庆、惠州等市，多沿水系分布	聚集分布、人类压力较低的湿地，且其周边位置的人类压力也较低	受人类干扰较小，生态价值最高，需要严格保护；是潜在的重要湿地
II类	35.53	同I类，在I类的基础上扩张	聚集分布的湿地，其自身及周边位置的人类压力无显著高于或低于周边的趋势	人类压力不如I类的低值水平，与I类共同形成湿地保护连片区域，需要严格保护；是潜在的重要湿地
III类	6.87	主要分布在广州南部、中山北部、江门东部、佛山全境、肇庆东部，多为坑塘	聚集分布的湿地、人类压力较低的湿地，且其周边位置的人类压力较高	位于高人类压力的区域中，需要综合发挥环境生态景观效益；是重要湿地
IV类	2.50	零散分布在各地	聚集分布、人类压力较高的湿地，且其周边位置的人类压力较低	分散分布且人类压力高，保护效益较低且易在未来消失；为非重要湿地
V类	38.91	主要分布在各市城区的外围，多与III类交错分布	聚集分布、人类压力较高的湿地，且其周边位置的人类压力较高	湿地所在地人类压力比III类高，与III类共同形成城市区域中的湿地连片区域，需要综合发挥环境生态景观效益；是重要湿地

表5 粤港澳大湾区区域发展轴各分段的空间聚类类型

Table 5 Spatial clusters in each section of regional development axis of the Greater Bay Area (%)

空间聚类	澳门	珠海	江门中山边界	佛山	广州	东莞	东莞深圳边界	深圳	香港
I类	0.93	9.16	2.57	0.88	0.30	0.17	0	0	0
II类	1.98	37.64	27.58	10.18	1.93	2.04	1.56	0.70	0.21
III类	0	3.88	8.58	7.58	2.16	2.05	0.62	1.40	0.17
IV类	0	2.10	0.81	0.35	0.12	0	0	0	0
V类	2.65	12.30	20.85	25.45	6.37	6.94	2.80	2.42	1.26
小计	5.56	65.08	60.39	44.44	10.88	11.20	4.98	4.52	1.64

注：表格中的占比为区域发展轴上各分段的各聚类结果占分段内面积的占比。

中的生态价值。V类区域广泛分布在各市城区的外围，包围分散分布的III类区域，代表着自身及周边人类压力均较高的湿地。例如，顺德杏坛基塘、香港米埔湿地均属于V类中存在着III类的情况，这种III、V类混合分布的情况，在大湾区各市城区或城郊的湿地密集处十分常见。III、V类区域在湾区发展轴各城市分段中占比与I、II类接近，但是在湾区发展轴的佛山、广州、东莞分段中，III、V类区域所指示出的重要湿地是这些地区湿地的主要组成部分。III、V类聚类区域，合计占五类区域的45.78%，具有同时发挥环境生态效益及景观效益的潜力。而且，重要湿地并不如I、II类那样受到关注，如果不加以保护，易在未来湿地演变中变得破碎或消失。

(2) I、II类是人类压力较低的湿地，潜在的重要湿地。I类聚类区域主要分布在珠江入海口处，多沿水系分布，代表着聚集分布且周边人类压力较低的湿地。例如，流溪河水库作为广州市重要的备用水源，水库周边为国家森林公园，受到生态保护，因而人类

压力比较低。I类区域在湾区发展轴中占比不高,例如,发展轴珠海段的I类聚类是占比最高者,占段内面积仅9.16%。II类区域在I类区域基础上在空间上扩张,周边的人类压力并无显著更高或更低的特征。例如,珠江崖门水道虽并不位处高度密集的城市建成区中,但其作为珠三角高等级航道网之一,人类压力并不如I类区域的低,所以其人类压力的高低没有显著性。II类区域在湾区西部发展轴的面积占比普遍高于10%,包括珠海、江门中山边界、佛山等地,而在东部则普遍低于3%。I、II类聚类区域,合计占五类区域的51.72%,共同构成人类压力较低的湿地连片区域,较多已受到保护。但随着城市化的进行,湿地未来人类压力可能提高,是当前的潜在重要湿地。

(3) IV类是非重要湿地。因为IV类区域仅占2.50%,零散分布在各地;而自身人类压力较高且周边人类压力较低,容易在湿地演变中消失,难以进行有效保护,是湿地生态价值发挥潜力较低的对象。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文以粤港澳大湾区为研究区域,分析湿地和人类压力的空间分布特征,并通过湿地分布与人类压力的关系,探讨双变量局部空间自相关、两个单变量局部空间自相关叠加等两种空间聚类结果的差异,以此识别重要湿地。主要结论如下:(1) 2020年大湾区湿地约占全区面积的17.6%,较多分布在珠江西岸,而城市内部的湿地较稀缺,与城市用地不断扩张、人类压力较大有关;大湾区人类压力在城际、城内各有差异,沿发展轴的大湾区核心区域人类压力较边缘地区高,珠江东岸较西岸高;湿地分布、人类压力均具有空间自相关性。(2) 结果筛选后的空间聚类类型对应不同类型的湿地:重要湿地、潜在的重要湿地、非重要湿地,反映着湿地在人类压力影响下需要保护的紧急程度。(3) 重要湿地,人类压力较高,多为坑塘,主要分布在城市建成区及其周边地区,需同时发挥生态和景观效益;潜在的重要湿地,人类压力较低,多分布在珠江入海口及珠江西岸;非重要湿地,零散分布在各地,易在未来演变中消失。

3.2 讨论

在湿地保护措施方面,广东省在“十四五”规划、国土空间规划(2020—2035年)中以建设海洋强省、美丽广东为目标,指出要推进湿地保护修复工程。大湾区各市普遍重视包括湿地保护在内的生态文明建设,并以实际情况提出湿地在水安全、污染治理、景观旅游、农业发展、生态价值机制探索等方面的发展措施。规划中的湿地实际指河流、湖泊、鱼塘、红树林等各类湿地。本文从人类压力的角度识别出重要湿地、潜在的重要湿地,当中包含各类不同的湿地。重要湿地多位于城市内部及周边地区,是海绵城市建设的组成部分,需要关注其在水安全方面的功能。重要湿地中的湖泊和坑塘、河流水系,分别从微观、宏观的角度连成河湖体系,一定程度上提高城市雨洪调蓄能力。重要湿地中的鱼塘,由于位处人类压力较高的地区,消失风险较大。以佛山市为例,通过落实耕地保护制度、推进渔业高质量发展、推广桑基鱼塘特色渔业模式,发挥鱼塘湿地在农业、旅游方面的功能,有助于在保护湿地的同时发挥经济效益。可见,使重要湿地在城市内部发挥水安全的功能、产生生态经济效益是保护和利用湿地取得相对平衡的可

行措施。

在进一步研究湿地在人类压力胁迫下的演变方面,可从数据、方法、分析等方面提升。长时序的湿地数据、人类压力计算方法的优化,有助于客观了解湿地在人类压力胁迫下的时空演变模式。探究将空间聚类区域与各个湿地斑块联系起来的方法,能更清楚地描述各湿地斑块所面临的人类压力。讨论重要湿地时除了考虑人类压力外,将生物多样性栖息地等蕴含重要生态意义的信息纳入分析当中,有助于对重要湿地进一步细分。综合考虑湿地空间分布、湿地面临的人类压力、湿地自身的生态意义等三方面识别出的重要湿地,将更全面地为保护修复湿地以发挥生态价值、合理利用湿地以发挥景观价值提供应用参考。

参考文献(References):

- [1] 陈宜瑜, 吕宪国. 湿地功能与湿地科学的研究方向. 湿地科学, 2003, 1(1): 7-11. [CHEN Y Y, LYU X G. The wetland function and research tendency of wetland science. Wetland Science, 2003, 1(1): 7-11.]
- [2] Ramsar Convention Secretariat. The fourth Ramsar strategic plan 2016-2024. Gland, Switzerland: Ramsar Convention Secretariat, 2016: 12-14.
- [3] DAVIDSON N C. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. Marine and Freshwater Research, 2014, 65(10): 934-941.
- [4] HU S J, NIU Z G, CHEN Y F, et al. Global wetlands: Potential distribution, wetland loss, and status. Science of the Total Environment, 2017, 586: 319-327.
- [5] 吴志峰, 曹峥, 宋松, 等. 粤港澳大湾区湿地遥感监测与评估: 现状、挑战及展望. 生态学报, 2020, 40(23): 8440-8450. [WU Z F, CAO Z, SONG S, et al. Wetland remote sensing monitoring and assessment in Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area: Current status, challenges and future perspectives. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8440-8450.]
- [6] SAHA T K, PAL S. Emerging conflict between agriculture extension and physical existence of wetland in post-dam period in Atrayee River Basin of Indo-Bangladesh. Environment Development and Sustainability, 2019, 21(3): 1485-1505.
- [7] HE C Y, LIU Z F, TIAN J, et al. Urban expansion dynamics and natural habitat loss in China: A multiscale landscape perspective. Global Change Biology, 2014, 20(9): 2886-2902.
- [8] KIRWAN M L, MEGONIGAL J P. Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise. Nature, 2013, 504(7478): 53-60.
- [9] MALEKMOHAMMADI B, JAHANISHAKIB F. Vulnerability assessment of wetland landscape ecosystem services using driver-pressure-state-impact-response (DPSIR) model. Ecological Indicators, 2017, 82: 293-303.
- [10] LU X F, HAO X H, WANG T L, et al. The ecological fragility evaluation in Shuangtai Estuary Wetland. Applied Mechanics and Materials, 2013, 295-298: 833-838.
- [11] SUN T T, LIN W P, CHEN G S, et al. Wetland ecosystem health assessment through integrating remote sensing and inventory data with an assessment model for the Hangzhou Bay, China. Science of the Total Environment, 2016, 566-567: 627-640.
- [12] 魏强, 杨丽花, 刘永, 等. 三江平原湿地面积减少的驱动因素分析. 湿地科学, 2014, 12(6): 766-771. [WEI Q, YANG L H, LIU Y, et al. Driving factors of shrinkage of wetlands in the Sanjing Plain. Wetland Science, 2014, 12(6): 766-771.]
- [13] 杜际增, 王根绪, 杨燕, 等. 长江黄河源区湿地分布的时空变化及成因. 生态学报, 2015, 35(18): 6173-6182. [DU J Z, WANG G X, YANG Y, et al. Temporal and spatial variation of the distributive patterns and driving force analysis in the Yangtze River and Yellow River Source Regions Wetland. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(18): 6173-6182.]
- [14] 宫宁, 牛振国, 齐伟, 等. 中国湿地变化的驱动力分析. 遥感学报, 2016, 20(2): 172-183. [GONG N, NIU Z G, QI W, et al. Driving forces of wetland change in China. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(2): 172-183.]

- [15] ZHOU T, NIU A Y, HUANG Z P, et al. Spatial relationship between natural wetlands changes and associated influencing factors in China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(3): 179.
- [16] 彭凯锋, 蒋卫国, 邓越. 武汉城市圈湿地受损程度识别及驱动因素分析. *自然资源学报*, 2019, 34(8): 1694-1707. [PENG K F, JIANG W G, DENG Y. Identification of wetland damage degree and analysis of its driving forces in Wuhan Urban Agglomeration. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(8): 1694-1707.]
- [17] 赵雪, 黄庆旭, 何春阳. 城市扩展过程对湿地影响的情景模拟研究: 以河北怀来为例. *自然资源学报*, 2017, 32(9): 1469-1481. [ZHAO X, HUANG Q X, HE C Y. Scenarios simulation of the spatial stress on wetlands by urban expansion: A case study of Huailai county. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(9): 1469-1481.]
- [18] HE C Y, TIAN J, SHI P J, et al. Simulation of the spatial stress due to urban expansion on the wetlands in Beijing, China using a GIS-based assessment model. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 101(3): 269-277.
- [19] Ramsar Convention on Wetlands. *Global Wetland Outlook: State of the World's Wetlands and Their Services to People*. Gland, Switzerland: Ramsar Convention Secretariat, 2018: 44-55.
- [20] MAO D H, LUO L, WANG Z M, et al. Conversions between natural wetlands and farmland in China: A multiscale geo-spatial analysis. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 550-560.
- [21] 吕金霞, 蒋卫国, 王文杰, 等. 近30年来京津冀地区湿地景观变化及其驱动因素. *生态学报*, 2018, 38(12): 4492-4503. [LYU J X, JIANG W G, WANG W J, et al. Wetland landscape pattern change and its driving forces in Beijing-Tianjin-Hebei region in recent 30 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4492-4503.]
- [22] SANDERSON E W, JAITEH M, LEVY M A, et al. The human footprint and the last of the wild. *BioScience*, 2002, 52(10): 891-904.
- [23] VENTER O, SANDERSON E W, MAGRACH A, et al. Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 12558, Doi: 10.1038/ncomms12558.
- [24] CHEN J, BAN Y F, LI S N. Open access to Earth land-cover map. *Nature*, 2014, 514(7523): 434, Doi: 10.1038/514434c.
- [25] TATEM A J. WorldPop, open data for spatial demography. *Scientific Data*, 2017, 4(1): 170004, Doi: 10.1038/sdata.2017.4.
- [26] CHEN Z Q, YU B L, YANG C S, et al. An extended time series (2000-2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration. *Earth System Science Data*, 2021, 13(3): 889-906.
- [27] ANSELIN L. The local indicators of spatial association: LISA. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93-115.
- [28] 杨振山, 蔡建明, 高晓路. 利用探索式空间数据解析北京城市空间经济发展模式. *地理学报*, 2009, 64(8): 945-955. [YANG Z S, CAI J M, GAO X L. Identification of spatial economic structure in Beijing by applying exploratory spatial data statistics. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(8): 945-955.]
- [29] ANSELIN L, SYABRI I, SMIRNOV O. Visualizing multivariate spatial correlation with dynamically linked windows. In: ANSELIN L, REY S. *New tools for spatial data analysis: Proceedings of the specialist meeting*. Santa Barbara: University of California, 2002: 1-20.
- [30] GUTIÉRREZ J, GARCÍA-PALOMARES J C, ROMANILLOS G, et al. The eruption of Airbnb in tourist cities: Comparing spatial patterns of hotels and peer-to-peer accommodation in Barcelona. *Tourism Management*, 2017, 62: 278-291.
- [31] 姚小微, 曾杰, 李旺君. 武汉城市圈城镇化与土地生态系统服务价值空间相关特征. *农业工程学报*, 2015, 31(9): 249-256. [YAO X W, ZENG J, LI W J. Spatial correlation characteristics of urbanization and land ecosystem service value in Wuhan Urban Agglomeration. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(9): 249-256.]

Wetland resources distribution and important wetland recognition of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on human pressure index

HUANG Xiao-jun¹, WU Zhi-feng^{1,2,3}, ZHANG Qi-fei¹, CAO Zheng^{1,2,3},
ZHENG Zi-hao¹, HE Jiang-run¹

(1. School of Geography and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China;

3. MNR Key Laboratory for Geo-Environmental Monitoring of Great Bay Area, Shenzhen 518060, Guangdong, China)

Abstract: Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area has abundant wetlands, but it is facing environmental stress caused by human activities. Based on Human Pressure Index (HPI) and spatial autocorrelation method, this paper explores the spatial relationship between the distribution of wetlands and human pressure in the Greater Bay Area, so as to identify wetlands of great significance. The results are as follows: (1) Wetlands in the Greater Bay Area are mostly distributed on the west bank of the Pearl River, while wetlands within cities are scarce. Human pressure varies between cities and within cities. Human pressure on the east bank of the Pearl River is higher than that of the west bank. The distribution of wetlands and human pressure is spatially correlated. (2) After screening and comparison of different ways of using spatial autocorrelation method, the spatial cluster types correspond to three types of wetlands: important wetlands, potentially important wetlands, and non-important wetlands. (3) Important wetlands, with high human pressure, which are mostly ponds and mainly distributed in urban built-up areas and surrounding areas, need to act the function of water security and ecological economic benefit in cities in order to achieve relative balance between protection and utilization of wetlands. Potentially important wetlands, with low human pressure, are mostly distributed at the Pearl River Estuary and the west bank of the Pearl River. With the progress of urbanization and the increase of human pressure, potentially important wetlands may become important wetlands. Non- important wetlands, fragmented in various places, tend to disappear in the future. This study lays a foundation for exploring the evolution of wetlands under the influence of human pressure and provides application reference for the protection and utilization of wetlands.

Keywords: important wetlands; human pressure; spatial autocorrelation; Guangdong- Hong Kong-Macao Greater Bay Area