

1979—2019 年大汶河流域湿地时空演变与分异研究

何振芳^{1,2,3}, 牟婷婷⁴, 郭庆春¹, 梁天全¹, 雒新萍⁵, 段艺芳¹

(1. 聊城大学地理与环境学院, 山东 聊城 252000; 2. 聊城大学黄河研究院, 山东 聊城 252000;
3. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 4. 南京师范大学
海洋科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 5. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055)

摘要:选取 1979—2019 年 Landsat 遥感影像数据,提取黄河下游大汶河流域自然湿地与人工湿地,利用标准差椭圆、空间自相关等方法分析了大汶河流域湿地时空演变、分异特征及其驱动因素。结果表明:1979—2019 年大汶河流域湿地面积具有增加的趋势,标准椭圆重心大幅向西北迁移;流域湿地具有显著空间自相关聚集特性,全局平均莫兰指数为 0.67;湖泊、河流等自然湿地局部莫兰指数呈现“高-高”型空间聚集分布特点,在空间上更易聚集,而库塘人工湿地局部莫兰指数呈现“高-低”和“低-高”型空间聚集分布特点,具有空间分散规律,空间异质性较强;大汶河流域湿地在未受到强烈自然或人为因素干扰的状态下,湿地空间分布聚集程度越高,相关性越显著;1989 年大汶河流域干旱事件、2019 年东平湖南水北调工程启动等极端灾害与人类活动均导致流域湿地面积、标准椭圆重心、空间聚集性与异质性发生极大波动;东平湖湖泊湿地生态功能的保护与修复对保障南水北调工程水质起着重要作用,是大汶河流域湿地生态功能保障的关键所在。

关键词:遥感;湿地;空间自相关分析;标准椭圆法;大汶河流域

中图分类号:P901 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2024)02-0134-07

Spatial-temporal evolution and differentiation study of wetlands in the Dawen River Basin from 1979 to 2019//HE Zhenfang^{1,2,3}, MOU Tingting⁴, GUO Qingchun¹, LIANG Tianquan¹, LUO Xinping⁵, DUAN Yifang¹ (1. School of Geography and Environment, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China; 2. Institute of Huanghe Studies, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China; 3. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 4. School of Marine Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 5. Command Center for Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Beijing 100055, China)

Abstract: Landsat remote sensing image data during 1979-2019 were selected to extract natural and constructed wetlands in the Dawen River Basin of the lower Yellow River. The spatial-temporal evolution and differentiation characteristics of wetlands in the Dawen River Basin and their driving factors were analyzed with the standard deviation ellipse method and spatial autocorrelation analysis. The results show that the wetland area in the Dawen River Basin had an increasing trend from 1979 to 2019, and the standard ellipse centroid migrated to the northwest. The watershed wetland had significant spatial autocorrelation aggregation characteristics, and the global mean Moran's *I* was 0.67. According to the local Moran's *I*, natural wetlands such as lakes and rivers showed "high-high" spatial distribution characteristics and were more likely to aggregate in space, while constructed reservoir and pond wetlands showed "high-low" and "low-high" spatial distribution characteristics and had spatial dispersion distributions, with large spatial heterogeneity. The wetland distribution in the Dawen River Basin was more significantly correlated with the aggregation of the spatial locations when there were no strong natural or human interferences. Extreme disasters and human activities, such as the drought event in the Dawen River Basin in 1989 and the start of the South-to-North Water Diversion Project in Dongping Lake in 2019, led to great fluctuations in wetland area, standard elliptical centroid, spatial aggregation, and heterogeneity in the river basin. The protection and restoration of ecological functions of Dongping Lake wetland play an important role in ensuring the water quality of the South-to-North Water Diversion Project, and it is the key to ensuring ecological functions of wetlands in the Dawen River Basin.

Key words: remote sensing; wetland; spatial autocorrelation analysis; standard ellipse method; Dawen River Basin

黄河流域是中国重要的水源地和生态屏障,黄河流域湿地资源在我国经济社会发展和生态安全方面具有重要地位^[1-2]。黄河下游以河道湿地为主,湿地系统在流域地下水补给、洪水滞留、基流贡献、缓解环境污染等方面具有重要功能和价值^[3-6]。众多学者研究表明,湿地是具有较大空间变异性的复杂生态系统^[7],空间变异影响因素较多,区域性差异显著^[8]。Murray 等^[9-10]基于大量数据分析发现,在过去3个世纪里,湿地损失了21%,且湿地损失主要集中在欧洲、美国和中国,并在20世纪中期损失面积迅速扩大。湿地面积、湿地周长面积比、湿地之间距离、湿地同质化等湿地空间组织形式也不断发生变化^[11],1980—2015年黄河流域的湿地总面积不断减少,黄河源区、黄河中上游区、黄河下游区不同类型湿地面积的变化特征存在空间异质性^[12]。

湿地空间格局受人为因素与自然因素的驱动发生改变,直接影响湿地系统生态功能的发挥,对水文、生物地球化学功能等产生负面影响^[13]。黄河下游旱涝灾害频发,下游湿地格局演变与分异性研究有助于统筹水资源、水环境、水生态,提升流域生态系统质量和稳定性^[2]。众多研究着眼于从景观角度探索湿地不同时段时空变化格局及其驱动因素,较少关注流域尺度,特别是黄河流域湿地动态变化空间关联特征。周婷等^[14-15]从国家尺度研究2003—2013年中国湿地变化的空间格局与关联性,研究表明莫兰指数空间统计分析方法能有效识别湿地变化的空间关联性,中国湿地呈现明显动态变化和分区特征,且自然湿地与人工湿地的空间分异程度增大。刘雁等^[16]应用标准椭圆及其重心空间统计方法研究发现,1989—2010年东北地区自然湿地减少,人工湿地增加,其中人口数量增长对粮食需求增加是导致东北地区湿地空间格局变化的直接因素。Van Derhoof 等^[3,17]对长时间序列全球30 m分辨率地表覆盖数据产品(GlobeLand30)的研究表明,人类活动是陆地表层自然生态环境变化最直接的驱动力。总之,同一区域不同时期各类湿地格局演变的主导性驱动因子有所不同,湿地空间格局演变是自然驱动因子和社会驱动因子共同作用的结果^[18]。

流域水文情势与湿地空间格局相互作用,流域人类活动及水文情势的转变极大影响了湿地的时空分布格局及空间关联特征,对河流生态系统健康状况有着重要影响,进而影响湿地功能的发挥^[19]。同时,湿地时空格局的变化影响湿地-湿地和湿地-河流间的连通性、湿地土壤空间变异性等^[20-23]。黄河流域湿地占全国陆域湿地总面积的8%,黄河下游大汶河流域是保障南水北调东线工程顺利实施的关

键区域。大汶河流域湿地生态系统有助于蓄水滞洪、净化水质,防止水土流失,但日益增强的人类活动、水文情势的转变使得湿地生态格局发生改变,进而导致湿地功能出现了不同程度的退化。因此,亟须开展对汶河流域湿地空间关联性、分异性特征及其驱动因素的研究,对该问题的研究有助于保护湿地在流域防洪减灾、水资源调节等方面的重要功能和价值。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

大汶河流域(图1)位于 $116^{\circ}5'22''\text{E} \sim 118^{\circ}0'46''\text{E}$, $35^{\circ}46'26''\text{N} \sim 36^{\circ}40'25''\text{N}$,面积 9069 km^2 ,位于黄河下游山东省中部,是泰安市地表水资源主要来源。河道湿地是大汶河流域湿地的主要类型,其次为湖泊、坑塘等人工湿地。大汶河是黄河下游最大的一条支流,干流河道长 239 km ,自东向西流经济南、新泰、泰安、肥城、东平等市(县),汇注东平湖,出陈山口后入黄河。东平湖是黄河下游滞洪水库,是南水北调东线工程主要调蓄湖泊,也是山东省胶东调水工程的渠首,亦是流域内重要湖泊湿地,东平湖湖泊湿地的生态环境问题直接关系到调水工程受水区水安全问题。由于流域地势东高西低,汶水西流是其特有地形特征,地形为山区、丘陵和平原各占 $1/3$ 。特有的地形特征导致降雨年际和年内分配不均,旱涝灾害仍较严重。流域内湿地对于保障输水工程水资源安全、蓄水滞洪、构建良好生态环境等具有关键性作用。

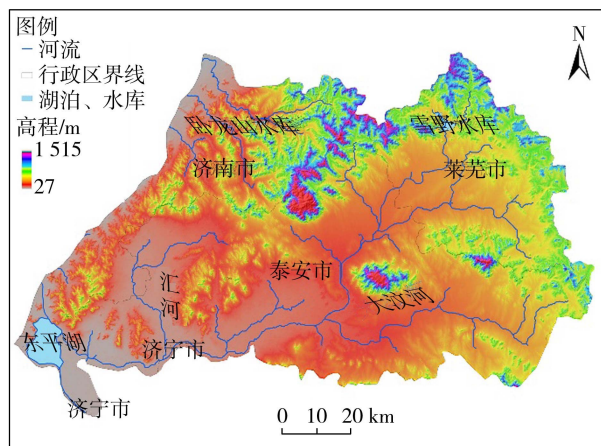


图1 大汶河流域概况

Fig. 1 Overview of the Dawen River Basin

东平湖是汶河水系的客水汇集中心,汶河来水全部进入东平湖老湖,南水北调东线水资源是经柳长河进入东平湖的另一客水资源,调水时间在非汛期。1970年以后,东平湖水位的变化受气候变暖、

降水量增加影响较大,其中1983—1989年是 大汶河流域持续干旱的特枯时段,2013 年南水北调东线工程实施后人为因素的影响进一步加大^[24-28]。因此,东平湖作为大汶河流域湿地的集中区,湿地面积主要受到降水、调水两方面的影响。根据水利部淮河水 利委员会、海河水利委员会《南水北调东线工程 规划(2001 年修订)》,南水北调东线工程在东平湖 开展的进程分为 3 个阶段:第一阶段(2000— 2010 年)南水北调东线山东段开工;第二阶段 (2011—2018 年)为东平湖采砂清淤阶段,2013 年 11 月 15 日试通水;第三个阶段(2019 年)为正式开 闸调水阶段,2019 年 4 月 21 日至 6 月 15 日南水北 调东线开始应急调水^[29-30]。

1.2 数据来源

分类选取大汶河流域湿地 1979 年 6 月、 1989 年 8 月、1999 年 7 月、2009 年 8 月、2019 年 6 月 5 期 Landsat 卫星遥感影像。所选遥感影像获取时 间集中于每年 6—8 月,这一时期流域地表水资源充 足、植被覆盖较好,湿地特征易于识别。遥感影像的 预处理中采用 FLAASH(fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes)模型进行大气校正, 并以 Landsat 8 遥感影像为基准进行几何校正。Landsat 数据来源于美国地质调查局官方网站,所选 遥感影像云覆盖度均小于 5%。

2 研究方法

2.1 基于决策树的湿地信息提取

依据国家林业和草原局 1999 年发布的中国湿 地分类标准,结合大汶河流域土地覆盖类型实际情 况,将流域湿地分为湖泊湿地、河流湿地(永久性河 流,宽度大于 30 m)、库塘湿地(人工景观、人工水

库、养殖塘,面积大于 0.05 km²)3 种类型。 借助野外调研数据与 Google Earth 高分辨率影 像,采用决策树分类方法提取研究区湿地信息。建 立决策树二叉树过程中,对分类条件进行反复试验, 通过最佳判别函数与最佳差别属性阈值确定决策规 则。为了准确提取城镇范围内水体信息,根据改进 的归一化差异水体指数 I_{MNDW} (式(1))提取水体 ($I_{MNDW}>0$)。湖泊、河流、库塘不同水体的空间特征边 界、面积、周长等差异较大,分析发现,根据形状指数 I_s (式(2))可以提取河流($I_s>0.5$),根据面积的分裂 规则(面积 $A>5\text{ km}^2$)可将湖泊与库塘湿地区分开。

$$I_{MNDW} = (B_G - B_M)/(B_G + B_M) \tag{1}$$

$$I_s = A^{1/2}/P \tag{2}$$

式中: B_G 、 B_M 分别为绿光波段和中红外波段; P 为 周长。

根据野外调研数据,利用同时期 Google Earth 高 分辨率影像对大汶河流域湿地分类结果进行验证与 修正。为保证提取结果的准确性,每期分类结果各随 机选取 240 个点,并确保每一类地物至少有 50 个样本 点^[30],5 期 Landsat 卫星遥感影像的总体分类精度分 别为 87.92%、89.17%、88.33%、90.83%、92.08%,湿 地空间分布见图 2。针对河流分类结果出现不连续 现象,对其进行连接和边界圆滑后处理。

2.2 标准差椭圆法与空间自相关分析

标准差椭圆法由 Lefever 于 1923 年提出^[31],可 概括地理要素的中心、离散和方向趋势等空间特征。 本文借助地理信息空间统计分析工具计算大汶河流 域湿地分布的空间变化趋势规律。

空间自相关分析作为一种空间统计方法,其全 局与局部空间自相关能较好地反映地理事物间的关 系,衡量事物空间要素属性间聚合或离散的程

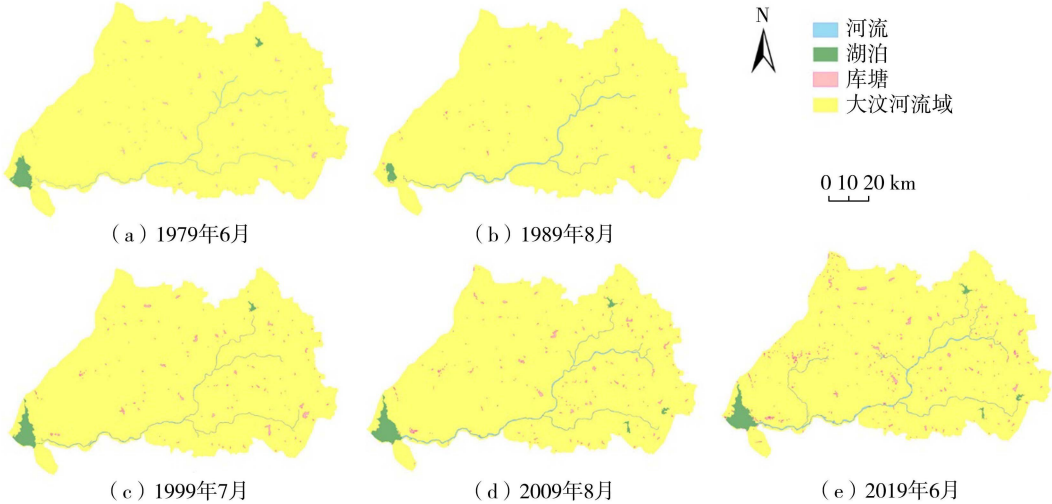


图 2 不同时期大汶河流域湿地分类结果

Fig.2 Classification results of wetlands in the Dawen River Basin in different periods

度^[31]。莫兰指数(Moran's I)是用来度量空间相关性的重要指标,分为全局莫兰指数与局部莫兰指数。全局莫兰指数用于描述湿地分布整体上的关联程度,根据湿地位置和属性值分析其空间自相关,对湿地总体分布情况和趋势进行统计。全局莫兰指数 $I_G > 0$ 表示湿地在空间上呈现正相关,具有空间聚集特性; $I_G < 0$ 表示湿地在空间上呈现负相关,具有空间分散特性; $I_G = 0$ 表示湿地在空间上没有相关性。采用局部莫兰指数探测局部空间自相关,可解决全局莫兰指数忽略局部状态不稳定性问题,分析湿地分布聚集现象的具体空间位置。

3 结果与分析

3.1 大汶河流域湿地面积变化趋势及影响因素分析

从1979—2019年不同时期大汶河流域湿地总面积来看(图2),研究期内大汶河流域湿地面积多年平均值为235.03 km²。其中,1979—1989年大汶河流域的湿地面积呈下降趋势;1989—2019年湿地面积呈增加趋势;1989—1999年和1999—2009年湿地面积增加较多,这与1989年干旱事件导致汛期断流、湿地面积大幅下降相关^[26]。由于极端干旱灾害,1989年出现了40年来湿地面积的最小值132.07 km²,2009—2019年大汶河流域湿地面积的增速则相对较慢,但2019年湿地面积达到了40年来的最大值333.27 km²,这与流域内南水北调工程的实施具有相关性。工程实施后,流域内东平湖蓄水量增加,人工湿地大幅增加,湿地总面积也明显增加。李景璇等^[24-25]研究表明,1989—2013年大汶河流域湿地面积变化,主要受气候变化(降水)的影响,2013年南水北调工程实施后,人类活动(水利工程)对于湖泊湿地面积影响更为显著。

从单一湿地类型的湿地数量变化来看(图3),1999—2019年河流湿地面积呈增加趋势。1989年大汶河流域发生干旱灾害,大汶河戴村坝站连续20月断流,致使东平湖老湖区1989—1990年连续8月干涸^[32],因此1979—1989年湖泊湿地面积大幅度减少,占比仅为25.78%。而1989—2009年湖泊湿地面积大幅度增加,占比最高达到61.26%。南水北调工程将东平湖作为蓄水湖泊,湖泊湿地面积在2019年基本稳定为169.53 km²,面积占比为50.87%。湖泊、河流等自然湿地面积变化受水文情势、人类活动影响较大。1989—2019年库塘人工湿地呈现面积增加趋势,且2019年库塘人工湿地面积占比达到最大值24.22%。库塘人工湿地面积变化主要受人类活动影响。

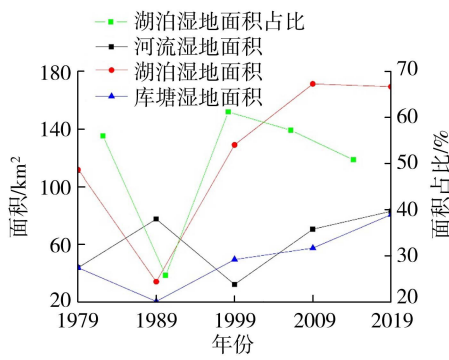


图3 大汶河流域不同类型湿地面积及湖泊湿地面积占比
Fig.3 Areas of different types of wetlands and proportion of lake area in the Dawen River Basin

3.2 湿地时空分布演变及成因分析

3.2.1 湿地时空分布变化趋势

利用标准差椭圆法对大汶河流域1979年、1989年、1999年、2009年、2019年湿地空间分布进行计算,分析流域湿地分布变化趋势和不同时期湿地重心的转移情况。通过分析大汶河流域湿地标准椭圆重心动态变化(图4)可以明显看出,1979—2019年湿地重心总体西移。1979—1989年湿地重心大幅向西北迁移,1989年干旱事件中位于流域东北方向的雪野水库湖泊湿地出现了断水现象,仅西部的东平湖湖泊湿地有小面积蓄水,湖泊湿地面积由111.82 km²减小为34.05 km²;大量库塘湿地干涸,面积由43.87 km²减小为20.37 km²,导致了湿地重心的西移。1989—2009年湿地重心变化不大,小幅度向东北方向移动。2009—2019年湿地重心大幅度向西北转移,这与南水北调东线工程进入第三阶段(2019年)相关^[29],该时段位于大汶河西部的东平湖开始开闸放水,湖泊湿地面积达到169.53 km²,河流与库塘湿地面积达到了历年最大值,分别为83.01 km²和80.73 km²。由湿地重心转移趋势分析可知,东平湖湿地是影响大汶河流域湿地分布至关重要的因素,东平湖的水文情势转变直接影响大汶河流域湿地的总体分布趋势。

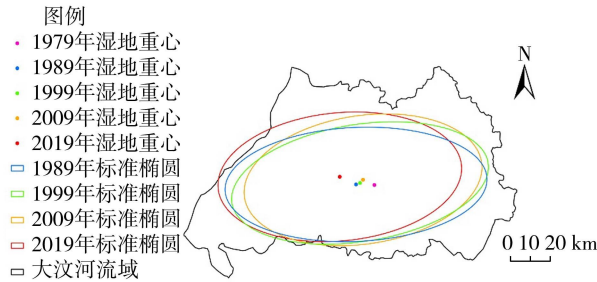


图4 大汶河流域湿地重心和标准椭圆动态变化
Fig.4 Dynamic changes of wetland center of gravity and standard ellipse in the Dawen River Basin

3.2.2 湿地分布空间自相关全局莫兰指数

全局莫兰指数可表征大汶河流域湿地分布是否存在空间聚集或离散现象。大汶河流域湿地空间自相关的动态变化在一定程度上受到湿地面积、湿地斑块数量以及人类活动等众多因素的影响。利用 GeoDa 软件将大汶河流域湿地面积设置为单变量, 计算得到 1979 年 6 月、1989 年 8 月、1999 年 7 月、2009 年 8 月、2019 年 6 月的全局莫兰指数分别为 0.703、0.511、0.727、0.733、0.659, 结果通过 $p < 0.05$ 检验。

由图 5 可以看出, 5 期大汶河流域湿地全局莫兰指数均为正值, 反映出湿地分布随空间位置(距离)的聚集, 即 5 期大汶河流域湿地分布呈全局空间正相关关系, 全局莫兰指数越大, 相关性越显著。1979—1989 年全局莫兰指数由 0.703 减小为 0.511, 1989 年全局莫兰指数最小, 表明 1989 年湿地分布的空间正相关性减弱, 这与 1989 年大汶河流域的极端干旱事件相关, 严重缺水状态下湿地的空间分布更多受水文条件的制约, 且空间聚集现象减弱, 即湿地分布的空间异质性增强。1999 年与 2009 年的全局莫兰指数与 1979 年相差不大, 分别

为 0.72 和 0.73。2019 年全局莫兰指数为 5 期中的次最低值 0.659, 这是由于 2019 年南水北调东线工程开始实施开闸放水, 流域水文情势发生转变, 湿地的空间分布受人类活动干扰增强, 湿地的空间聚集现象减弱, 而空间异质性增强。由以上分析可知, 大汶河流域在未受到强烈自然或人为因素干扰的状态下, 湿地空间分布聚集性较强, 相关性较为显著; 而受到自然或人为因素干扰较强时, 其湿地分布的空间异质性增强。

3.2.3 湿地分布空间自相关局部莫兰指数分析

通过对局部莫兰指数的分析可以得到湿地分布聚集或离散的关键区域, 如图 6 所示。从局部相关角度看, 各时期局部莫兰指数“高-高”型聚集的湿地分布区域较“低-低”、“高-低”、“低-高”型聚集的区域多。湿地面积较大的区域在空间上更易聚集, 空间异质性较小。从图 6 可以看出, “高-高”型聚集区域主要分布在湖泊、河流等自然湿地分布区域, 此外大型水库雪野水库也出现了湿地的“高-高”型聚集现象, 而库塘等面积较小且零星分布的人工湿地主要呈现出“高-低”、“低-高”型聚集的湿地分布, 即在库塘湿地分布的区域, 其周边湿地分布较少, 这符

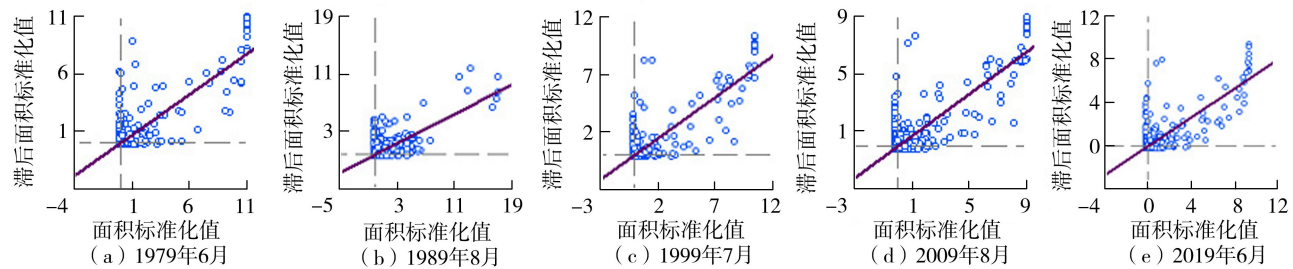


图 5 不同时期大汶河流域湿地全局莫兰指数散点图

Fig.5 Global Moran's I scatter diagrams of wetlands the Dawen River Basin in different periods

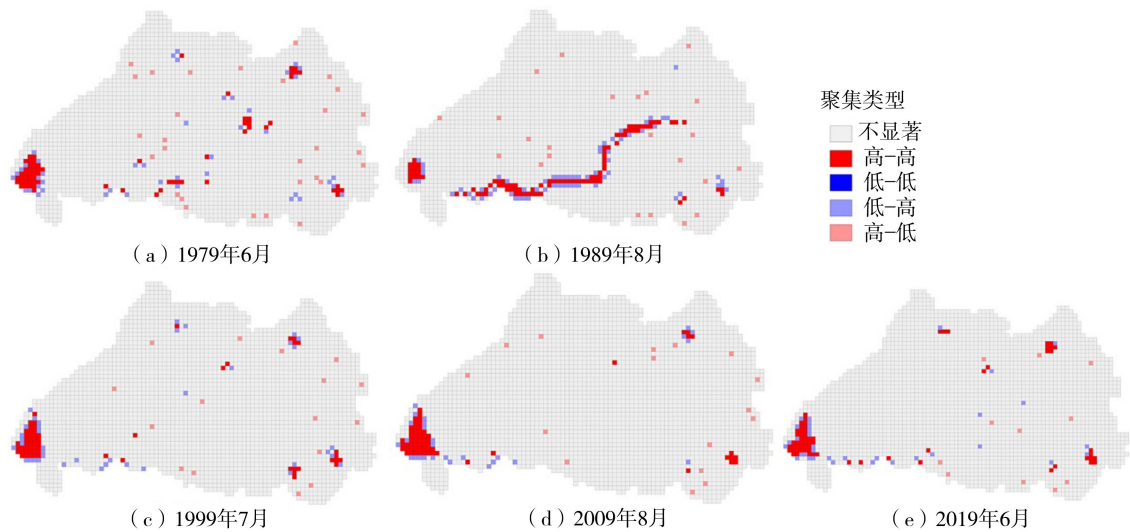


图 6 不同时期大汶河流域湿地局部莫兰指数聚类结果

Fig.6 Clustering results of local Moran's I of wetlands in the Dawen River Basin in different periods

合人工库塘湿地的特点。库塘主要为灌溉、水电、防洪等目的建造的人工蓄水设施,其周边多为耕地、林地等其他用地类型。对比分析 5 个时期湿地局部莫兰指数分布,在极端干旱出现的 1989 年,东平湖与大汶河等湖泊与河流自然湿地成为湿地分布的关键聚集区域,而人工湿地聚集现象减弱,更多呈现出“高-低”“低-高”型聚集的湿地分布状况,这与极端缺水水文情势下大量小面积自然湿地消失相关。

4 结 论

- a. 大汶河流域湿地面积整体呈现增加的趋势,湿地标准椭圆重心整体向西北迁移。
- b. 流域内湿地的空间分布呈现较强的空间聚集现象,在河流、湖泊等自然湿地分布区域,局部莫兰指数呈现较强的“高-高”型空间聚集分布规律,空间异质性较低;在库塘等人工湿地分布区域,局部莫兰指数呈现“高-低”“低-高”型的空间聚集分布规律,空间异质性较强。
- c. 东平湖水文情势的转变是影响大汶河流域湿地面积及其空间关联性规律的关键因素,1989 年东平湖极端干旱事件、2019 年东平湖水北调东线工程实施均导致大汶河流域湿地面积、标准椭圆重心、空间聚集性与异质性等特征发生极大波动。大汶河未来湿地保护管理体系中,东平湖湖泊湿地生态功能的保护与修复不仅是南水北调工程水质的保障,亦是黄河下游大汶河流域湿地生态功能保障的关键。

参考文献:

[1] 彭杨靖,林乐乐,张宇,等. 黄河流域湿地类型国家级自然保护区景观格局变化及发展强度分析[J]. 湿地科学与管理, 2022, 18 (4) : 21-26. (PENG Yangjing, LIN Lele,ZHANG Yu,et al. An analysis of landscape pattern changes and development intensity of national nature reserves of wetlands in the Yellow River Basin [J]. Wetland Science & Management,2022,18(4):21-26. (in Chinese))

[2] YU Shiyong, LI Wenjia, ZHOU Liang, et al. Human disturbances dominated the unprecedentedly high frequency of Yellow River flood over the last millennium [J]. Science Advances,2023,9(8):eadf8576.

[3] VAN DERHOOF M K, ALEXANDER L C, TODD M J. Temporal and spatial patterns of wetland extent influence variability of surface water connectivity in the Prairie Pothole Region, United States [J]. Landscape Ecology, 2016,31(4):805-824.

[4] 闫欣,牛振国. 白洋淀流域湿地连通性研究[J]. 生态学报,2019,39(24):9200-9210. (YAN Xin,NIU Zhenguo. Preliminary study on wetland connectivity in Baiyangdian Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (24) : 9200-

9210. (in Chinese))

[5] 程丽娜,钟才荣,李晓燕,等. Sentinel-2 密集时间序列数据和 Google Earth Engine 的潮间带湿地快速自动分类 [J]. 遥感学报,2022,26 (2) : 348-357. (CHENG Lina, ZHONG Cairong, LI Xiaoyan, et al. Rapid and automatic classification of intertidal wetlands based on intensive time series Sentinel-2 images and Google Earth Engine [J]. Journal of Remote Sensing, 2022, 26 (2) : 348-357. (in Chinese))

[6] HAQUE A, ALI G, BADIOU P. Event-based analysis of wetland hydrologic response in the Prairie Pothole Region [J]. Journal of Hydrology,2022,604:127237.

[7] STOLT M H, GENTHNER M H, DANIELS W L, et al. Division S-10-Wetland soils spatial variability in palustrine wetlands [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992,65(2):665-671.

[8] QI Qing, ZHANG Mingye, TONG Shouzheng, et al. Evolution of potential spatial distribution patterns of *Carex tussock* wetlands under climate change scenarios, Northeast China[J]. Chinese Geographical Science,2022, 32(1):142-154.

[9] MURRAY N J. The extent and drivers of global wetland loss[J]. Nature,2023,614(7947):234-235.

[10] HU Shengjie, NIU Zhenguo, CHEN Yanfen, et al. Global wetlands: potential distribution, wetland loss, and status [J]. Science of the Total Environment,2017,586:319-327.

[11] VAN METER K J, BASU N B. Signatures of human impact: size distributions and spatial organization of wetlands in the Prairie Pothole landscape [J]. Ecological Applications,2015,25(2):451-465.

[12] 彭杨靖,张宇,林乐乐,等. 黄河流域湿地分布格局的变化分析[J]. 湿地科学与管理,2022,18(2):4-9. (PENG Yangjing, ZHANG Yu, LIN Lele, et al. An analysis of changes in wetland distribution patterns in the Yellow river basin[J]. Wetland Science & Management,2022,18(2): 4-9. (in Chinese))

[13] JONES S F, JANOUSEK C N, CASAZZA M L, et al. Seasonal impoundment alters patterns of tidal wetland plant diversity across spatial scales[J]. Ecosphere,2021, 12(2):e03366.

[14] 周婷,马姣娇,徐颂军. 2003—2013 年中国湿地变化的空间格局与关联性[J]. 环境科学,2020,41(5):2496-2504. (ZHOU Ting, MA Jiaojiao, XU Songjun. Spatial patterns and spatial autocorrelations of wetland changes in China during 2003-2013 [J]. Environmental Science, 2020,41(5):2496-2504. (in Chinese))

[15] ZHOU Ting, NIU Anyi, HUANG Zhanpeng, et al. Spatial relationship between natural wetlands changes and associated influencing factors in mainland China[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information,2020,9(3):179.

[16] 刘雁,盛连喜,刘吉平. 1985—2010 年吉林省西部地区湿地空间格局变化及热点地区[J]. 东北林业大学学报

- 报,2014,42(4):78-81. (LIU Yan, SHENG Lianxi, LIU Jiping. Wetland spatial pattern changes and hot spots in western Jilin province from 1985 to 2010[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(4):78-81. (in Chinese))
- [17] HUPP C R, BAZEMORE D E. Temporal and spatial patterns of wetland sedimentation, West Tennessee[J]. Journal of Hydrology, 1993, 141(1/2/3/4):179-196.
- [18] 刘吉平, 邱红, 马长迪. 1985—2015 年松嫩平原西部沼泽湿地变化驱动力定量分析[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2021, 42(1):117-122. (LIU Jiping, QIU Hong, MA Changdi. Quantitative analysis of driving forces of marsh change in western Songnen plain from 1985 to 2015[J]. Jilin Normal University Journal (Natural Science Edition), 2021, 42(1):117-122. (in Chinese))
- [19] FONTANARROSA M S, CHAPARRO G N, O' FARRELL I. Temporal and spatial patterns of macroinvertebrates associated with small and medium-sized free-floating plants[J]. Wetlands, 2013, 33(1):47-63.
- [20] QU Yi, ZHENG Yaomin, GONG Peng, et al. Estimation of wetland biodiversity based on the hydrological patterns and connectivity and its potential application in change detection and monitoring: a case study of the Sanjiang Plain, China[J]. Science of the Total Environment, 2022, 805:150291.
- [21] 仇志强, 毛德华, 相恒星, 等. 5 个时期黄河流域湿地格局及其变化研究[J]. 湿地科学, 2021, 19(4):518-526. (QIU Zhiqiang, MAO Dehua, XIANG Hengxing, et al. Patterns and changes of wetlands in the Yellow River Basin for 5 periods[J]. Wetland Science, 2021, 19(4):518-526. (in Chinese))
- [22] ZHOU Ling, SUN Wenchao, HAN Quan, et al. Assessment of spatial variation in river water quality of the Baiyangdian basin (China) during environmental water release period of upstream reservoirs[J]. Water, 2020, 12(3):688.
- [23] 黄颖, 周云轩, 吴稳, 等. 基于决策树模型的上海城市湿地遥感提取与分类[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(6):1156-1162. (HUANG Ying, ZHOU Yunxuan, WU Wen, et al. Shanghai urban wetland extraction and classification with remote sensed imageries based on a decision tree model[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(6):1156-1162. (in Chinese))
- [24] 李景璇, 陈影影, 韩非, 等. 1990—2016 年东平湖水位变化及其对水质的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(23):94-100. (LI Jingxuan, CHEN Yingying, HAN Fei, et al. Water level change of Dongping Lake and its impact on water quality from 1990 to 2016[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(23):94-100. (in Chinese))
- [25] 韩非, 陈影影, 于世永, 等. 1954—2018 年东平湖水位变化特征及驱动因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(3):102-109. (HAN Fei, CHEN Yingying, YU Shiyong, et al. Characteristics and driving factors of water level variations of Dongping Lake between 1954 and 2018[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(3):102-109. (in Chinese))
- [26] 刘瑞艳, 张建华, 刘凌, 等. 南水北调东线工程调水期洪泽湖水质变化规律分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2):42-49. (LIU Ruiyan, ZHANG Jianhua, LIU Ling, et al. Analysis on the water quality variation of Hongze Lake during the water transfer period of the eastern route of South-to-North water diversion project[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2):42-49. (in Chinese))
- [27] 石朋, 詹慧婕, 瞿思敏, 等. 黄河源区气象干旱与水文干旱关联性分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(3):80-86. (SHI Peng, ZHAN Huijie, QU Simin, et al. Correlation analysis of meteorological and hydrological droughts in Yellow River source region[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3):80-86. (in Chinese))
- [28] 郑丽虹, 刘懿, 任立良, 等. 黄河流域气象干旱与水文干旱时空特征及其传递关系[J]. 水资源保护, 2022, 38(3):87-95. (ZHENG Lihong, LIU Yi, REN Liliang, et al. Spatio-temporal characteristics and propagation relationship of meteorological drought and hydrological drought in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3):87-95. (in Chinese))
- [29] 何振芳, 郭庆春, 邓焕广, 等. 南水北调调蓄湖泊水质参数遥感反演及其影响因素[J]. 水资源保护, 2021, 37(3):87-95. (HE Zhenfang, GUO Qingchun, DENG Huanguang, et al. Remote sensing inversion of water quality parameters and its influencing factors in a storage lake of South-to-North Water Diversion Project[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3):87-95. (in Chinese))
- [30] 徐振田, SHAHZAD A, 张莎, 等. 基于 Landsat 数据的黄河三角洲湿地提取及近 30 年动态研究[J]. 海洋湖沼通报, 2020(3):70-79. (XU Zhentian, SHAHZAD A, ZHANG Sha, et al. Mapping the wetland in Yellow River Delta and its dynamics in recent 30 years based on Landsat data[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(3):70-79. (in Chinese))
- [31] TOBLER W R. A computer movie simulating urban growth in the detroit region[J]. Economic Geography, 1970, 46(Sup1):234-240.
- [32] 张春玲, 王文民, 程慧, 等. 大汶河大汶口(临汶)水文站历年洪水特性分析[J]. 水利科技与经济, 2017, 23(3):50-54. (ZHANG Chunling, WANG Wenmin, CHENG Hui, et al. Flood characteristics analysis of Dawenkou (Linwen) hydrological station in Dawenhe river over the years[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2017, 23(3):50-54. (in Chinese))

(收稿日期:2023-04-15 编辑:施业)