



应用生态学报

Chinese Journal of Applied Ecology

ISSN 1001-9332, CN 21-1253/Q

《应用生态学报》网络首发论文

题目: 宁夏沿黄城市带湿地景观格局演变特征及驱动力
作者: 高祖桥, 白永平, 周亮, 乔富伟, 宋龙军, 陈小宁
DOI: 10.13287/j.1001-9332.202010.013
收稿日期: 2020-06-10
网络首发日期: 2020-07-30
引用格式: 高祖桥, 白永平, 周亮, 乔富伟, 宋龙军, 陈小宁. 宁夏沿黄城市带湿地景观格局演变特征及驱动力. 应用生态学报.
<https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202010.013>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

宁夏沿黄城市带湿地景观格局演变特征及驱动力

高祖桥¹ 白永平¹✉ 周亮^{2,3} 乔富伟¹ 宋龙军¹ 陈小宁¹

(¹西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; ²兰州交通大学测绘与地理信息学院, 兰州 730070; ³中国科学院地理科学与资源研究所/资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

✉通信作者 E-mail: baiyp@nwnu.edu.cn

摘要 湿地作为全球生产力最高的生态系统之一, 具有水净化、气候调节、碳汇等多种功能, 但由于人类社会发展的胁迫和自然条件的改变, 湿地流失尤为严重。为探究沿黄湿地景观格局演变规律, 了解湿地资源的现状和动态变化, 本研究以 2000、2009、2018 年 3 个时期 Landsat 卫星影像为数据源, 选用景观指数、地理探测器等方法定量分析 2000—2018 年间宁夏沿黄城市带湿地景观格局演变特征及驱动力。结果表明: 2000—2018 年, 宁夏沿黄城市带湿地面积呈先增后减的趋势, 湿地面积在研究前期增加了 52.2 km², 增长率为 8.2%, 后期减少了 26.8 km², 减少率为 3.9%。湿地主要转出为建设用地和未利用地, 转出面积分别为 166.7、158.4 km²; 新增湿地主要由未利用地和林草地转入, 转入面积为 543.1 km²。城市带湿地景观的破碎化程度呈上升趋势, 但各类湿地均衡分布的态势逐渐增强, 景观多样性也不断增加, 景观优势种类逐渐弱化。自然要素和社会经济要素共同影响城市带湿地景观格局演变, 其中, 社会经济要素中的人口因素影响最显著, 自然要素中的降水量、气温驱动作用明显, 其他驱动力因子相对较弱但也不容忽视。

关键词 湿地; 景观格局; 流域高质量发展; 干旱区; 城市带

DOI: 10.13287/j.1001-9332.202010.013

Characteristics and driving forces of wetland landscape pattern evolution of the city belt along the Yellow River in Ningxia, China

GAO Zu-qiao¹, BAI Yong-ping¹✉, ZHOU Liang^{2,3}, QIAO Fu-wei¹, SONG Long-jun¹, CHEN Xiao-ning¹

(¹ College of Geographic and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; ² Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; ³ State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographical Science and Natural Resource Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract Wetlands are one of the most productive ecosystems in the world, wetland has functions including water purification, climate regulation and carbon sinks, yet due to the stress caused by human social development and changes of natural conditions, wetlands have been seriously damaged. To explore the evolutionary law of landscape pattern of wetland along the Yellow River, acquaint the current situation of wetland resources and dynamic change. Based on satellite images of year 2000, 2009 and 2018 from Landsat, this paper used the method of landscape indices, geographic detectors to quantitatively analysis the characteristics and driving forces of wetland landscape pattern evolution of the city belt along the Yellow River in Ningxia from 2000 to 2018. The results showed that the wetland area of the city belt along the Yellow River in Ningxia enlarged first and then became smaller from 2000 to 2018. The wetland area increased by 52.2 km² in the early stage of the study with an increasing rate of 8.2%, and decreased by 26.8 km² with a reduction rate of 3.9% in the later stage. The wetland was mainly transferred out for construction land and unused land, the transfer out area was 166.7 and

收稿日期: 2020-06-10

基金项目: 本文由国家自然科学基金项目(41701173, 40771054, 41961027)、甘肃省重点研发项目(18YF1TA052)、教育部人文社会科学研究青年基金项目(17YJCZH268)、甘肃省“一带一路”研究一般项目(LDBR2018-017)和甘肃省人民政府决策咨询委员会 2019 年度重点课题资助

作者简介: 高祖桥, 男, 1995 年生, 硕士研究生。主要从事区域发展与区域管理研究。E-mail: geogzq@126.com

Fund: This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41701173, 40771054, 41961027), the Key Research and Development Project of Gansu Province (18YF1TA052), the Ministry of Education Humanities and Social Sciences Research Youth Foundation (17YJCZH268), the General Project of the “Belt and Road” Research in Gansu Province (LDBR2018-017) and the Key Project of the Gansu Provincial Government Decision Advisory Committee in 2019.

网络首发时间: 2020-07-30 11:04:36 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1253.Q.20200730.0959.001.html>

158.4 km² respectively. Increased wetland was mainly transferred from unused land, forest and grassland, with an area of 543.1 km². The fragmentation degree of wetland landscape in city belt was on the rise, but the balanced distribution of all kinds of wetlands was gradually strengthened, the landscape diversity was also increasing, and the dominant landscape types were gradually weakening. Natural factors and socio-economic factors jointly affected the evolution of wetland landscape pattern in city belt. Among them, population was the most significant factor in socio-economic factors. Precipitation and temperature played an important role in natural factors. Other driving factors were relatively weak, but they could not be ignored.

Key words wetland; landscape pattern evolution; high quality development in the basin; arid areas; city belt.

湿地是水陆相互作用而形成的自然综合体,是大自然生物多样性最丰富的生态系统和人类不可或缺的生存空间之一,在维护生态平衡、生物多样性、生态环境安全等方面发挥着无可替代的作用。由于全球气候变化极具复杂性和不确定性^[1],人地关系矛盾日益突出,湿地生态系统受到自然环境和人类干预的影响不断加深。20 世纪全球近一半湿地退化或消失^[2],目前湿地仍处于持续退化的状态^[3]。随着湿地生态系统功能和服务的不断弱化,湿地保护受到前所未有的关注,全球政府间保护公约《拉姆萨尔湿地公约》^[4]的签署和湿地国际(Wetlands International)等组织的建立共同致力于湿地保护和可持续管理,中国也颁布实施了《中国湿地保护行动计划》^[5],旨在遏制湿地退化、建立湿地生物多样性保护网络。实时掌握湿地资源的现状,深刻剖析湿地时空演化过程及驱动机制,有利于掌握湿地生态演变规律和制定湿地保护政策,促进人类可持续发展目标的实现^[6]。

湿地景观格局与时空演变过程的关系一直是湿地研究的热点之一,其研究方法主要包括景观格局定量分析法、景观生态图叠置法、定性描述法^[7]。目前,景观格局数量分析法与 GIS 结合是最普遍的方法,能更好地反映各景观要素的相互关系和特征。以往的相关研究多集中在受海陆共同作用的东部滨海地区^[8-10]、典型的湖泊湿地聚集地——长江流域^[11-12]、深受土地利用方式影响的东北的三江平原^[13-14]和由气候、放牧制约的青藏高原若尔盖地区^[15-17]。但是,对河流沿岸湿地,特别是黄河中上游沿河湿地研究较少,且缺乏对区域水资源支撑能力和影响因素的分析^[18],也未能从河流生态系统层面对湿地进行统筹考虑,亟需建立完善的沿河湿地保护框架体系。因此,本研究选择宁夏沿黄城市带作为研究区,探究其湿地景观格局演变特征及驱动力。

湿地是否能够发挥功能以及功能发挥的程度,主要由该湿地及其周围的环境与水域特征决定。与中东部平原湿地、青藏高原湿地相比,地处西北干旱区的宁夏沿黄城市带湿地独具特征,它作为江河源区重要的水源涵养地,兼有气候调节、水资源蓄积、为动物提供栖息地等多种功能^[19],同时与荒漠基质有紧密的生态关联,是沙漠中物种最丰富的区域,但其处于沙漠及干旱地带的包围之中,自然环境压力大且生态系统敏感脆弱,一旦破坏难以恢复^[20]。2009 年实施的《宁夏沿黄城市带(群)总体规划》^[21],使得社会经济发展越发依赖湿地资源,湿地生态系统的空间格局以及演变特征受到人类活动的极大影响。宁夏沿黄城市带湿地的研究对打造“沿黄生态经济带”、黄河流域生态系统的保护和高质量发展、维护地区乃至国家生态安全具有举足轻重的作用,同时,对研究该地区的人地关系、湿地生态系统的演变过程、湿地生态的保护等都有重要意义。鉴于此,本研究利用遥感和 GIS 技术,详细分析了宁夏沿黄城市带湿地景观格局演变特征,并探讨了 2000—2018 年间驱动研究区湿地景观格局变化的影响因素,以期能够实时掌握该地区湿地的分布状况和演变特征,为湿地的开发和保护提供重要的参考依据,为黄河流域高质量发展和生态保护战略的实施提供支撑和保障。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

宁夏沿黄城市带(36°58′—39°22′ N、104°16′—106°58′ E)位于黄河上游,三面环绕沙漠,是黄河流域生态保护的重点区域、典型的干旱区绿洲型城市带和国家三大农业灌溉区之一,素有“塞上江南”、“鱼米之乡”的美誉。该区域集中了宁夏 90% 以上的水资源,地形南高北低,属于温带大陆性干旱、半干旱气候。年均降水量 167.2~618.3 mm,年均蒸发量 1312.0~2204.0 mm,地表水、地下水、大气降水十分匮乏。宁夏沿黄城市带地形平坦,黄河流经该地水流不畅形成沉降型湖泊,后因黄河改道

形成牛轭湖并因引黄灌溉开发出众多的次生湖,境内主要有河流、湖泊、水库、坑塘、水稻田、滩地等湿地类型,湿地分布广泛,呈带状分布格局^[22]。城市带湿地资源丰富,是西北地区重要的鸟类栖息地,国家级湿地公园和首批“国际湿地城市”——银川市均分布于此。2017年,城市带总人口达到558.96万,占全自治区总人口的82%,城镇人口达到350.74万,占全区城镇人口的88.7%,城镇化率达到62.8%,GDP占宁夏全区比重高达93.2%,是自治区的人口中心、经济重心。

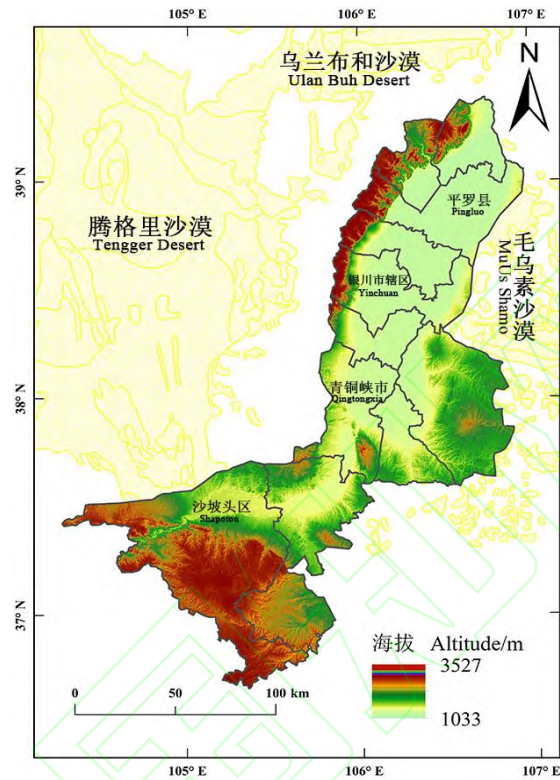


图1 宁夏沿黄城市带概况图

Fig. 1 General map of the city belt along the Yellow River in Ningxia.

1.2 数据来源

本研究采用 Landsat 卫星 2000、2009 年 TM、ETM+数据及 2018 年 OLI 数据,数据来源于美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)。3 期遥感影像获取时间集中在 7—8 月,数据均经过去云、去条带、辐射校正和几何精校正处理,并进行影像镶嵌、裁剪、融合等预处理。社会经济数据来自 2000、2009、2018 年《宁夏统计年鉴》^[23-25],主要包括各市县区的人口数量、GDP、第一产业产值、第二产业产值、降水量、气温、日照时长、渔业产量等数据。

1.3 研究方法

1.3.1 基于规则的面向对象分类方法

本研究应用面向对象分类方法构建遥感影像分类体系,按照分类标准对影像进行分割,提取出 2000、2009、2018 年 3 期宁夏沿黄城市带土地覆盖信息。根据研究目的,在借鉴《拉姆萨尔湿地公约》^[4]和国内湿地景观分类研究的基础上^[26],结合宁夏沿黄城市带水文特征,将湿地分为沟渠、河流、湖泊、水库坑塘和滩地沼泽。考虑到湿地监测的特殊性和复杂性,选取归一化植被指数(NDVI)、地表水分指数(LSWI)、归一化建筑指数(NDBI)等指数,并对相关指数进行组合,结合湿地形状、纹理、结构、位置等特征^[27-28],设置合理阈值,构建遥感影像分类体系。由此选择遥感影像中 Landsat TM 波段 5(Mir)、波段 4(Nir)、波段 3(Red)和 Landsat OLI 波段 6(Swir1)、波段 5(Nir)、波段 4(Red)进行波段组合。具体计算公式如下:

$$NDVI = \frac{\rho_{Nir} - \rho_{Red}}{\rho_{Nir} + \rho_{Red}} \quad (1)$$

$$LSWI = \frac{\rho_{Nir} - \rho_{Swir}}{\rho_{Nir} + \rho_{Swir}} \quad (2)$$

$$NDBI = \frac{\rho_{Mir} - \rho_{Nir}}{\rho_{Mir} + \rho_{Nir}} \quad (3)$$

式中： ρ_{Red} 、 ρ_{Nir} 、 ρ_{Swir}/ρ_{Mir} 分别是 TM 传感器的 3、4、5 波段和 OLI 传感器的 4、5、6 波段。解译过程主要通过目视解译与机器解译相结合，并对分类结果进行手动修正，以提高分类精度。在 Google Earth 和土地分类图上选取各类型 100 个对应的验证点，采用混淆矩阵评价分类效果，获得各年份的总分类精度和 Kappa 系数，分类精度均大于 87%，满足研究要求。

1.3.2 景观格局指数

景观格局指景观构成单元类别、数量和空间分布和配置^[29]，是景观异质性的明确表达和自然、生物、社会经济因素驱动的各类生态过程在不同粒度上影响的结果。景观格局指数主要分为斑块级别、斑块类型级别和景观级别。本研究通过斑块水平指数和景观水平指数对宁夏沿黄城市带湿地的景观格局进行衡量和刻画，在借鉴前人经验和成果的基础上^[30-31]，在斑块类型水平上选择斑块数量 (NP)、蔓延度指数 (CONTAG)、斑块占景观面积的比例 (PLAND)、最大斑块指数 (LPI)、聚集度指数 (AI)；景观水平上，选择斑块数量 (NP)、湿地景观面积 (TA)、斑块平均大小 (MPS)、Shannon 多样性指数 (SHDI)、Shannon 均匀度指数 (SHEI)、面积加权的平均形状指数 (AWMSI)，表 1 为重要主要的景观指数计算公式及含义。

表1 主要景观指数计算公式及含义
Table 1 Calculation formula and meaning of main landscape index

指数 Index	计算公式 Calculation formula	意义 Meaning
最大斑块指数 LPI	$LPI = \max(a_1, a_2, \dots, a_n) / A$	指景观的基质或优势类型，其变化反映了人类活动的方向和强度。式中： a_i 指斑块 i 的面积， A 是斑块总面积。
Shannon 多样性指数 SHDI	$SHDI = -\sum_{k=1}^n P_k \log_2 P_k$	反映景观的异质性。式中： P_k 为景观类型 k 的斑块占景观所有斑块的比例
Shannon 均匀度指数 SHEI	$SHEI = -\sum_{i=1}^m (P_i \ln P_i) / \ln m$	反映景观受到一种或少数几种优势斑块类型支配。式中： P_i 为景观类型 i 的斑块占景观内斑块的比例； m 为斑块数量
聚集度指数 AI	$AI = \left[\sum_{i=1}^m (g_{ii} / \max_{i=1,2,\dots,m} g_{ii}) \right] \times 100$	反映景观类型在空间上的聚集程度，值越大，表示同类型斑块相距越近，分布集聚。式中： g_{ii} 是基于单倍法的斑块类型 i 的像元之间的结点数； $\max g_{ii}$ 为 g_{ii} 最大可能值； P_i 为景观类型 i 的斑块占景观内斑块的比例
斑块占景观面积的比例 PLAND	$PLAND = \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} / A \right) \times 100$	反映景观中某类斑块所占比例，是度量某类斑块在景观中丰度比的指标。式中： a_{ij} 为第 i 类第 j 个斑块的面积； A 为景观总面积
蔓延度指数 CONTAG	$CONTAG = 1 - \left\{ -\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m P_{ij} \ln(P_{ij}) \right\} / (2 \ln m)$	表明景观多种要素的密集格局。式中： m 是景观中斑块总数； P_{ij} 是斑块类型 i 与 j 相邻的概率

1.3.3 地理探测器

经济社会或自然因素深刻改变了地理事物的空间分布^[32]。地理探测器基于空间分异理论对因子变量和结果变量间的相关性进行测度，在生态环境、社会经济等方面的研究中普遍应用^[33]。模型由生态探测、因子探测、交互探测和风险探测四部分组成，可突破传统统计分析方法的限制，无需过多假设条件。因此，本文选取地理探测器中的因子探测模块，探测不同因素对宁夏沿黄城市带湿地景观格局的驱动作用，以表明影响因子对现象因子空间分异影响的程度^[34]。其模型如下：

$$q = 1 - \frac{1}{N \sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (4)$$

式中： q 是湿地景观格局影响因素探测力指标，区间为 $[0,1]$ ， q 值越大，表明社会经济或自然要素对湿地景观格局的影响越大，数值为 0 则表明该要素与湿地景观格局的影响无关； N 和 σ^2 分别是样本数和方差， N_h 、 σ_h^2 是次级样本量和方差， $h=1、\cdots、L$ ，为变量 Y 或因子 X 的分层。

2 结果与分析

2.1 宁夏沿黄城市带湿地时空演变特征

2.1.1 湿地转换的时间过程特征

2000—2018 年，宁夏沿黄城市带湿地总面积呈先增后减的趋势，除河流以外的各类湿地面积相对稳定。湿地面积由 632.7 km² 增加到 684.9 km²，再减少到 658.1 km²，湿地面积在研究前期增加了 52.2 km²，增长率为 8.2%，后期减少了 26.8 km²，减少率为 3.9%（图 2）。由于采取休渔还湖、退耕还湿等举措，湖泊面积增加 121 km²，水库坑塘面积减少 99 km²，河流面积先增后减少，沟渠和滩地沼泽面积变幅较小，湿地总面积呈增加趋势。截至 2018 年，宁夏沿黄城市带湿地总面积为 658.1 km²，占城市带总面积的 3.2%。人工湿地面积 485.3 km²，其中，水库坑塘类湿地面积约为 220 km²，占人工湿地面积的 44.9%；自然湿地面积 172.8 km²，以河流湿地为主。

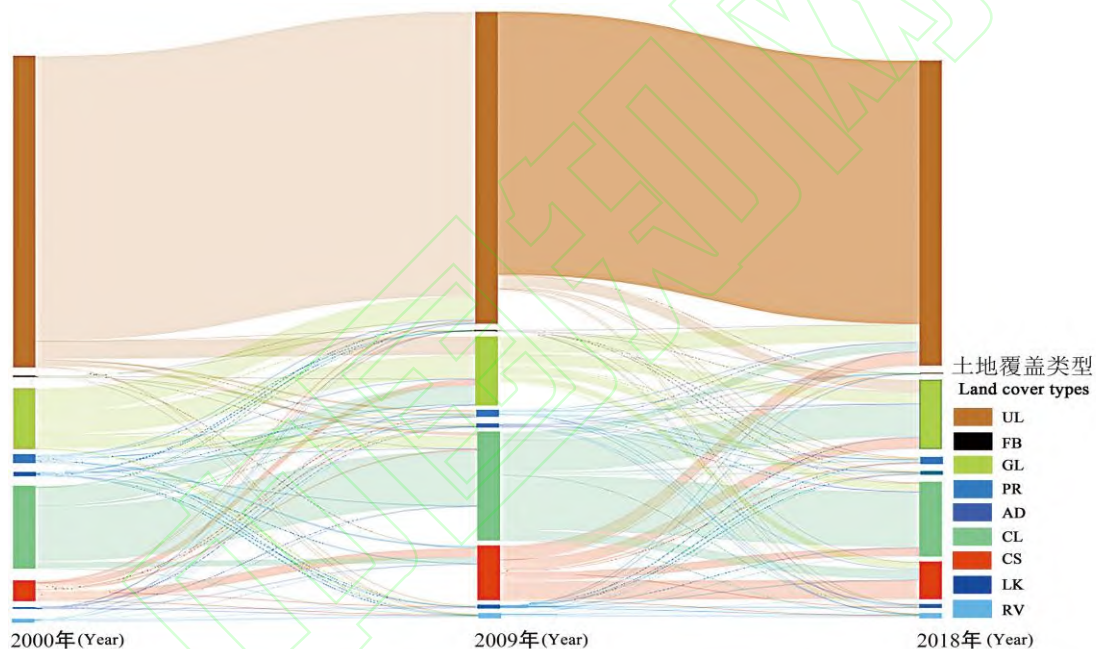


图 2 宁夏沿黄城市带土地覆盖类型动态转换图

Fig. 2 Dynamic conversion map of land cover types of the city belt along the Yellow River in Ningxia.

UL: 未利用地 Unused lands; FB: 滩地沼泽 Beach and marsh; GL: 林草地 Forest and grassland; PR: 水库坑塘 Ponds and reservoirs; AD: 沟渠 Canals and ditches; CL: 农田 Croplands; CS: 建设用地 Construction lands; LK: 湖泊 Lake; RV: 河流 River. 下同 The same below.

2000—2018 年，随着经济社会的发展，土地覆盖类型转换速度加快，湿地类型转化特征显著。2000—2009 年，由于城市化进程加快，沟渠、水库坑塘等湿地转化为建设用地，面积分别为 20.57、83.49 km²，水库坑塘向未利用地和林草地转化的面积为 109.91 km²；其他类型湿地向非湿地转化的面积较小；同时，为响应退耕还湿和大力发展水产养殖政策，其他土地利用类型向湿地转化也较为显著，如农田向水库坑塘、湖泊、沟渠等湿地类型转化面积分别为 45.52、18.69、14.65 km²，未利用地转化为水库坑塘、沟渠、湖泊面积分别为 100.25、34.60、38.79 km²；林草地向湖泊和水库坑塘湿地分别转化 21.80、30.96 km²。2009—2018 年，沟渠类湿地主要转化为未利用地 and 建设用地，面积为 18.71 和 19.87 km²；受到退渔还湖政策的影响，27.18 km² 的水库坑塘湿地转化为湖泊，但仍有 37.78

km² 湖泊湿地退化为未利用地；其他土地利用类型也向湿地进行转化，其中，62.74 km² 农田转化为水库坑塘，80.91 km² 的未利用地被开发为沟渠类湿地和水库坑塘。

2.1.2 湿地的空间演变特征

整体看，平罗县、银川市辖区、沙坡头区湿地数量多，平罗县、沙坡头区、中宁县、灵武市、银川市辖区湿地面积大，占宁夏沿黄城市带湿地面积的 78.8%。湖泊湿地主要分布在平罗县、银川市辖区、青铜峡市等地，滩地沼泽主要沿黄河一线分布，水库坑塘多位于沿黄城市带北部地区的平罗县、贺兰县、银川市辖区。

2000—2018 年，研究区湿地面积稳定，但不同发展阶段各地区湿地变化具有差异性（图 3，图 4）。2000—2009 年，各地区湖泊湿地面积均有增加；大部分地区河流面积呈增加趋势；各地水库坑塘、滩地沼泽面积均减少；仅灵武县、利通区、青铜峡市沟渠面积有增长，其他区域均减少。2009—2018 年，沙坡头区、中宁县、青铜峡市湖泊面积显著增长，平罗县减少面积较大；平罗县和惠农区的水库坑塘面积增加较多，其他地区均减少，其中，青铜峡市减少最多；沟渠类湿地总面积增加，仅滩地沼泽和河流总体减小。沟渠类湿地在 2000 年主要分布在平罗县、青铜峡市、永宁县，2009 年主要分布在平罗县和青铜峡市，2018 年主要分布在平罗县；研究期间，湖泊类湿地主要分布在平罗县，其他地区分布较少；水库坑塘类湿地在 2000 年主要分布在平罗县、贺兰县和银川市辖区，2009 年集中在平罗县和青铜峡市，2018 年主要分布在平罗县；滩地沼泽类湿地在 2000 年主要分布在平罗县，2009 年主要在大武口区分布，2018 年主要分布于惠农区和平罗县。

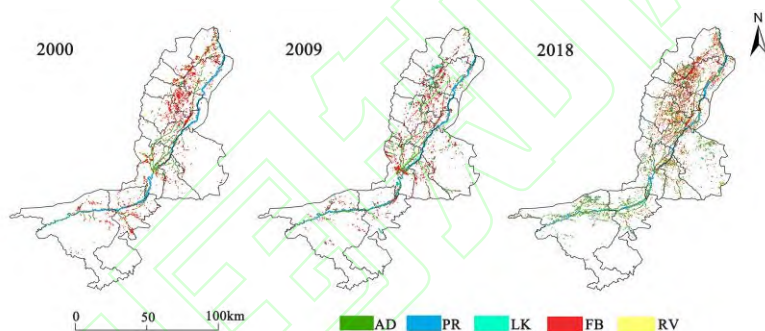


图 3 宁夏沿黄城市带湿地的时空分布

Fig. 3 Spatial and temporal distribution of wetlands of the city belt along the Yellow River in Ningxia..



图 4 2000—2018 年宁夏沿黄城市带各湿地类型面积的变化

Fig.4 Changes in the area of each wetland type of the city belt along the Yellow River in Ningxia from 2000 to 2018.

HN: 惠农区 Huinong; PL: 平罗县 Pingluo; DWK: 大武口区 Dawukou; QTX: 青铜峡市 Qingtongxia; LT: 利通区 Litong; HL: 贺兰县 Helan; LW: 灵武市 Lingwu; YC: 银川市辖区 Yinchuan; YN: 永宁县 Yongning; ZN: 中宁县 Zhongning; SPT: 沙坡头区 Shapotou

2.2 景观格局变化特征

2.2.1 斑块水平上景观格局变化特征

黄河是沿黄城市带湿地的优势景观，湿地沿黄河一线分布是该地区最显著的特征，各类湿地对黄河的依赖程度相对较高。由表 2 可以看出，2000—2018 年，河流湿地的 LPI 值在各类湿地中均最大，湖泊湿地 LPI 值次之，表明自然湿地为主要景观类型，河流是城市带的优势景观。研究期间，水库坑塘 NP 值总体减小，说明其破碎化程度相对较低，其他湿地类型随 NP 增加，其破碎化程度增强。CONTIG-MN 值普遍较低，斑块连接性较差，湿地的破碎化程度较高，反映出研究区缺乏地表径流、湿地连通性差、人类活动干扰较大的特点。PLAND 表明湖泊湿地逐渐成为主要湿地类型之一，河流、沟渠面积占湿地面积比例相对稳定，而水库坑塘湿地则呈退化趋势。AI 反映出湖泊和水库坑塘类型湿地的聚集度不断降低，滩地沼泽和沟渠则呈现先聚集后分散的态势。

表2 2000—2018年宁夏沿黄城市带景观要素斑块特征指数
Table 2 Landscape element patch characteristic index of the city belt along the Yellow River in Ningxia from 2000 to 2018

湿地类型 Wetland type	年份 Year	最大斑块指数 LPI	斑块数目 NP	蔓延度指标 CONTIG-MN	斑块类型面积比 PLAND (%)	聚集度指数 AI
滩地沼泽 Beach and marsh	2000	0.4292	251	0.0254	6.0	8.2474
	2009	0.2407	22	0.0333	0.7	14.2857
	2018	0.5291	767	0.0359	5.0	12.6984
河流 River	2000	19.3254	16	0.0968	20.2	17.2414
	2009	25.6053	92	0.1087	24.3	21.8667
	2018	21.0043	46	0.0894	22.2	22.9032
水库坑塘 Ponds and reservoirs	2000	2.0386	1797	0.0576	50.4	16.6295
	2009	1.2034	1913	0.0434	36.6	12.7424
	2018	1.0582	1267	0.0289	34.1	8.0745
沟渠 Canals and ditches	2000	0.4292	746	0.0191	20.3	4.5714
	2009	0.6017	840	0.0223	17.4	6.4151
	2018	0.3968	822	0.0206	17.6	4.1322
湖泊 Lake	2000	1.2876	143	0.0486	3.1	31.9149
	2009	2.8881	597	0.0599	20.9	25.8567
	2018	2.2487	834	0.0395	21.0	15.0685

2.2.2 景观水平上景观格局变化特征

由表 3 可以看出，2000—2018 年，研究区湿地景观面积由 632.7 km²增加到 684.9 km²后又减小至 658.1 km²，且 NP 值不断增加，但 MPS 值不断减小，表明城市带湿地景观的破碎程度正在逐年升高。由 AWMSI 值可知，2000—2009 年间宁夏沿黄城市带湿地景观形状趋于复杂且不规则，2009—2018 年间湿地景观形状逐渐规则，但整体变化不大。SHDI 随时间逐渐上升，各类型斑块在景观中呈均匀化分布态势，SHEI 不断增加，表明宁夏沿黄城市带湿地景观日益多样，各湿地景观斑块类型发展趋于均衡，景观优势种类在减少。宁夏沿黄城市群快速城镇化以及产业布局的调整，导致很多湿地被侵占和分割，湿地的破碎程度增大，平均斑块面积减小，同时湿地的斑块数量也增加，人类活动的干扰使各湿地类型分布在一定程度上突破了自然条件的限制，分布也更为广泛。

表3 2000—2018年宁夏沿黄城市带景观特征指数
Table 3 Landscape characteristics index of the city belt along the Yellow River in Ningxia from 2000 to 2018

年份 Year	湿地景观面积 TA (hm ²)	斑块平均大小 MPS (hm ²)	斑块数目 NP	形状指标 AWMSI	Shannon 多样性指数 SHDI	Shannon 均匀度指数 SHEI
2000	63268.29	21.54	2937	1.2123	1.2687	0.7883
2009	68491.83	20.31	3372	1.2452	1.3793	0.8573
2018	65808.98	17.83	3690	1.1828	1.4851	0.9227

2.3 湿地景观格局演变的驱动因素

宁夏沿黄城市带湿地景观时空格局受到多种因素的综合影响，本研究以 2018 年各县区湿地面积作为结果变量，以反映该地区自然要素、经济社会和农业发展水平等方面的人口、GDP、一二产业、降水量、气温、日照时长、渔业产量 8 个要素作为因子变量，通过地理探测器的因子探测模块探究相关因子对湿地景观格局演变的驱动作用。

表4 社会经济和自然要素的因子解释力 (q值)
Table 4 Explanatory power of social economy and natural factors (q value)

年份 Year	人口数量 Population	GDP	第一产业 Primary industry	第二产业 Secondary industry	降水量 Precipitation	气温 Air temperature	渔业产量 Fishery production	日照时长 Duration of sunshine
2018	0.9017	0.4401	0.5565	0.4969	0.8554	0.8541	0.4253	0.2343
2009	0.8766	0.4548	0.4482	0.4349	0.8240	0.8766	0.4482	0.2591
2000	0.8569	0.4045	0.5563	0.4265	0.8770	0.8569	0.3811	0.2375

2.3.1 湿地景观格局演变的社会经济因素

由表 4 可以看出，研究区湿地景观格局与区域的社会经济发展密切相关。人口对湿地景观格局演变的影响最显著，其解释力 (q 值) 在 2000、2009、2018 年分别是 0.8569、0.8766、0.9017。随着经济社会的发展，虽然政府和社会力量加大了对湿地的保护力度，同时兴建人工湿地，但短期内对景观格局影响有限。然而，人口激增扩大了对土地和粮食的需求，“与水争地”、“向湖要粮”的问题仍旧严重，土地利用变更速度加快、湿地的利用类型和转换愈加频繁，湿地的破碎化程度升高。以银川市为例，2000—2018 年，银川市建成区面积急剧扩张，2018 年建成区面积较 2000 年扩大 4.3 倍，导致众多湿地被侵占或分割，除河流外其他湿地面积整体缩减。

第一产业的 q 值在 2000、2009、2018 年分别为 0.5565、0.4482、0.5563，呈倒 U 型变化特征，第一产业对湿地景观格局演变的驱动作用十分突出。第二产业的 q 值分别是 0.4969、0.4349、0.4265，呈逐渐下降趋势，但其对湿地景观格局的演变仍然具有十分重要的影响。宁夏沿黄城市带得益于第一、二产业的发展获得了大量的经济效益，但湿地也被大量排放的废气、废水、废渣以及化肥农药、生活垃圾严重污染，农业生产过程中围垦湿地、从湿地取水灌溉以及修建水利设施，直接影响了黄河对湿地的供水，导致湿地退化和消失；工业生产从湿地中无节制地取水，使得部分湿地成为工业废水的承泄区，造成湿地生态环境破坏。以域内典型工业城市石嘴山市为例，每年产生超 4000 万 t 生活污水和工农业废水，部分湖泊成为工业废水的纳污湖，湖泊和滩地污染日益加重，沿河湿地生态系统功能严重失调，湿地的流失和退化情况严重。渔业产量因子在 2000、2009、2018 年的 q 值分别为 0.4253、0.4482、0.3811，尽管水产养殖大多采用高密度养殖，但渔业发展仍对渔业基础设施有很大需求，进而影响湿地景观格局，渔业产量高一定程度上反映出渔业养殖基础设施处于扩张状态，反之，渔业养殖设施萎缩。GDP 反映了一个地区的经济发展水平，但以粗放式的发展来促进 GDP 的增长往往以牺牲环境为代价，湿地受到的影响不容忽视。

2.3.2 湿地景观格局演变的自然因素

地形地貌、气候、植被、水文、土壤是决定湿地分布的重要因素，但通过查阅相关资料和数据分析，研究期内宁夏沿黄城市带地形地貌、土壤条件、植被等因素并未发生重大变化，主要的水文环境——黄河河道也未发生显著变化，故驱动湿地景观格局演变的主要自然因素归结于气候变化。2000、2009、2018 年，降水量的探测 q 值分别为 0.8770、0.8240、0.8554，气温的探测 q 值分别为 0.8569、0.8766、0.8541，降水量和气温显著影响地处西北干旱区的宁夏沿黄城市带湿地的景观格局。湿地能够快速响应因区域气候变化产生的水文现象，如：降水减少，导致干旱发生的频次增加，干旱持续时间延长，人类用水对湿地压力增大，若水源不能及时供给，湿地水位下降，生态功能退化，进而影响到湿地的固碳作用，造成温室气体释放增多、局部小气候变暖，进一步造成湿地的流失和退化。研究区内常年缺乏地表径流，湿地的空间分布受限，降水尤为关键。降水量高，地表水蓄积量大，湿地水位升高、面积增大，也使各相邻碎片化的湿地连通，反之湿地萎缩退化，面积减小甚至消失，这与实际相符。由于研究区内蒸发量远大于降水量，降水仅在一定程度弥补了因高蒸发量损失的部分水量，

对湿地的维持起到了重要作用,但降水无法产生过多新增湿地,例如,在降水增量较高而气温变幅较小的大武口区、永宁县等地,湿地面积变化较小,总体较为稳定,而在青铜峡市、中宁县、平罗县等地,降水增量较小,其湿地面积均有不同程度的减小。气温决定湿地的蒸散发量^[35-36]:气温高,水分蒸散发速度快、蒸发量大,在没有足够水源补给的情况下,导致湿地干涸甚至消失,相反,气温低在一定程度上有助于降低湿地缩减的风险。在其他因素相近的情况下,研究期间沙坡头区气温上升1.2℃,除因新建大量人工湖泊增加了湖泊面积外,其他湿地总面积呈减小趋势。日照时长对湿地的景观格局有一定影响,但影响较弱。

3 讨 论

宁夏沿黄城市带的湿地景观格局与城市化进程密切相关,以域内核心地区银川市辖区为例,2000—2018年,银川市辖区湿地面积呈下降趋势,降幅达10.4%,建设用地面积则较原来面积扩张了279.3%,2000、2009、2018年,市辖区内湿地与同期建设用地的面积比分别为53%、20.2%、17.2%,湿地面积占市辖区面积的比例分别为4.5%、4.2%、4.0%,湿地面积占建成区面积的比例分别为3.9%、9.5%、7.5%。在2000年的建成区范围中,到2009年时湿地面积与2000年相比下降了27.4%,建设用地则在原有建设用地的基础上增加了22.6%,2000—2009年湿地在该范围内的占比从3.9%下降到2.8%,而建设用地面积占比则从2000年的74%上升到2009年的91.3%;在2009年建成区范围中,到2018年时湿地面积较2009年增加1.3 km²,增幅为8.4%,湿地面积占比略有上升。

研究期间,市辖区湿地面积减小,但3个时期建成区内部湿地占比总体上升且均有新增湿地,新增湿地主要由农田和林草地转化而来,同时湿地与建设用地面积比均呈下降趋势,表明在城市化进程中建设用地的扩张强度远高于湿地,部分农田和林草地向湿地转化,城市湿地景观不断丰富。研究前期,城市化程度较低、城市扩张速度快,后期城市发展相对饱和,受到交通布局等因素的影响,银川市城市化方向主要向贺兰县和永宁县拓展,银川市辖区城市化进程放缓,随着后期城市建设优化,国家园林城市的创建及湿地、湿地公园扩整和建设力度的加大,建成区内部湿地面积不断增大,湿地数量增多,分布更加广泛,城市的湿地景观格局发生了显著变化。

4 结 论

本研究基于规则的面向对象分类方法,从2000、2009、2018年3期遥感影像中提取出宁夏沿黄城市带湿地,分析湿地景观格局变化特征及驱动因素,结论如下:

1) 2000—2018年,宁夏沿黄城市带湿地面积整体增加,但不同阶段变化趋势各异。2000—2009年间湿地面积增加,2009—2018年湿地面积略减。沟渠、水库坑塘为主的人工湿地占比约74%,自然湿地占比26%。在土地覆盖类型转化方面,湿地主要与建设用地、未利用地和林草地之间发生转化,2000—2009年,湿地主要转化为建设用地、未利用地和林草地,同时,未利用地、农田和林草地转化为湿地;2009—2018年,湿地主要转换为建设用地和未利用地,新增湿地主要来自于未利用地、林草地。

2) 景观指数分析表明:黄河是研究区的优势景观,水库坑塘破碎化程度降低,其他类型湿地破碎度均不断升高,分布更加分散。湿地总体的破碎化程度呈上升趋势,但各类湿地的分布逐渐呈现均匀分布的态势,景观多样性也不断增加,景观优势种类在减小。

3) 宁夏沿黄城市群湿地景观的时空格局主要受到人口、降水量、气温、第一产业、第二产业等因素的影响,其中,社会经济要素中的人口因素影响最显著,自然要素中的降水量、气温对湿地景观格局变化影响作用明显,此外,第一产业、第二产业、渔业产量、GDP、日照时长等因子的影响相对较弱但也不容忽视。

责任编辑 杨 弘

参考文献

- [1] Grimm NB, Faeth SH, Golubiewski NE, et al. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, 319: 756-760
- [2] Lienert J, Diemer M, Schmid B. Effects of habitat fragmentation on population structure and fitness components of the wetland specialist

- Swertia perennis* L. (entianaceae). *Basic and Applied Ecology*, 2002, 3: 101-114
- [3] Zedler JB, Kercher SM. Wetland resources: Status, trends, ecosystem services, and restorability. *Annual Review of Environment and Resources*, 2005, 30: 39-74
- [4] Ramsar. Convention on Wetlands of International Importance Especially as Waterfowl Habitat [EB/OL]. (1972-02-02) [2020-06-10]. <https://www.ramsar.org/document/present-text-of-the-convention-on-wetlands>
- [5] 国家林业局. 中国湿地保护行动计划. 北京: 中国林业出版社, 2000 [State Forestry Administration. China Wetland Protection Action Plan. Beijing: China Forestry Press, 2000]
- [6] 郭笃发. 黄河三角洲滨海湿地土地覆被和景观格局的变化. 生态学杂志, 2005, 24(8): 907-912 [Guo D-F. Changes in land cover and landscape pattern of coastal wetlands in the Yellow River Delta. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(8): 907-912]
- [7] 白军红, 欧阳华, 崔保山, 等. 近40年来若尔盖高原高寒湿地景观格局变化. 生态学报, 2008, 28(5): 2245-2252 [Bai J-H, Ouyang H, Cui B-S, et al. Changes of alpine wetland landscape pattern in The Ruorgai Plateau in recent 40 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2245-2252]
- [8] 李建国, 濮励杰, 徐彩瑶, 等. 1977—2014年江苏中部滨海湿地演化与围垦空间演变趋势. 地理学报, 2015, 70(1): 17-28 [Li J-G, Pu L-J, Xu C-Y, et al. Evolution trend of coastal wetlands and reclamation space in central Jiangsu from 1977 to 2014. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 70(1): 17-28]
- [9] 周昊昊, 杜嘉, 南颖, 等. 1980年以来5个时期珠江三角洲滨海湿地景观格局及其变化特征. 湿地科学, 2019, 17(5): 559-566 [Zhou H-H, Du J, Nan Y, et al. Landscape pattern and changing characteristics of coastal wetlands in the Pearl River Delta in 5 periods since 1980. *Wetland Science*, 2019, 17(5): 559-566]
- [10] 褚琳, 黄翀, 刘庆生, 等. 2000—2010年辽宁省海岸带景观格局与生境质量变化研究. 资源科学, 2015, 37(10): 1962-1972 [Chu L, Huang C, Liu Q-S, et al. Study on landscape pattern and habitat quality change in coastal zone of Liaoning Province from 2000 to 2010. *Resources Science*, 2015, 37(10): 1962-1972]
- [11] 李莹莹, 尤罗利, 陈永生, 等. 环巢湖地区多水塘景观时空格局演变特征及其驱动因素. 生态学报, 2018, 38(17): 6280-6291 [Li Y-Y, You L-L, Chen Y-S, et al. Evolution characteristics and driving factors of multi-reservoir landscape in Chaohu Region. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 38(17): 6280-6291]
- [12] 易凤佳, 李仁东, 常变蓉, 等. 2000—2010年汉江流域湿地动态变化及其空间趋向性. 长江流域资源与环境, 2016, 25(9): 1412-1420 [Yi F-J, Li R-D, Chang B-R, et al. Dynamic change and spatial trend of wetland in the Hanjiang river basin from 2000 to 2010. *Resources and environment of the Yangtze river basin*, 2016, 25(9): 1412-1420]
- [13] Yan F, Zhang S, Liu X, et al. Monitoring spatiotemporal changes of marshes in the Sanjiang Plain, China. *Ecological Engineering*, 2017, 104: 184-194
- [14] 刘吉平, 董春月, 盛连喜, 等. 1955—2010年小三江平原沼泽湿地景观格局变化及其对人为干扰的响应. 地理科学, 2016, 36(6): 879-887 [Liu J-P, Dong C-Y, Sheng L-X, et al. Changes of wetland landscape pattern and its response to human disturbance in Xiaosanjiang Plain from 1955 to 2010. *Geographical Science*, 2016, 36(6): 879-887]
- [15] 马骅, 王义飞, 宁宇, 等. 若尔盖县高原湿地景观格局动态分析研究. 林业资源管理, 2019, 48(1): 109-115 [Ma H, Wang Y-F, Ning Y, et al. Dynamic analysis of landscape pattern of plateau wetland in Ruorgai County. *Forestry Resources Management*, 2019, 48(1): 109-115]
- [16] 甄硕, 董李勤, 郑茹敏, 等. 2007年和2016年若尔盖高原沼泽湿地景观格局及变化. 湿地科学, 2017, 15(4): 522-525 [Zhen S, Dong L-Q, Zheng R-M, et al. Landscape pattern and changes of wetlands on the Ruorgai Plateau in 2007 and 2016. *Wetland Science*, 2017, 15(4): 522-525]
- [17] 郭斌, 王珊, 王明田. 1999—2015年若尔盖草原湿地净初级生产力时空变化. 应用生态学报, 2020, 31(2): 424-432 [Guo B, Wang S, Wang M-T. Spatial and temporal changes of net primary productivity in Ruorgai grassland wetland from 1999 to 2015. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(2): 424-432]
- [18] 黄翀, 刘高焕, 王新功, 等. 黄河流域湿地格局特征、控制因素与保护. 地理研究, 2012, 31(10): 1764-1774 [Huang C, Liu G-H, Wang X-G, et al. Pattern characteristics, control factors and protection of wetland in the Yellow River basin. *Geography Research*, 2012, 31(10): 1764-1774]
- [19] Mitsch WJ. Wetland creation, restoration, and conservation: A wetland invitational at the Olentangy River Wetland Research Park. *Ecological Engineering*, 2005, 24: 243-251
- [20] Zhao R, Chen Y, Zhou H, et al. Assessment of wetland fragmentation in the Tarim River Basin, Western China. *Environmental Earth Sciences*, 2009, 57: 455-464
- [21] 中国城市规划设计研究院. 宁夏沿黄城市带发展规划 [EB/OL]. (2009-04-09) [2020-06-10]. <http://www.docin.com/p-543128596.html> [China Academy of Urban Planning and Design. Development Plan of Ningxia City Belt along the Yellow River [EB/OL]. (2009-04-09) [2020-06-10]. <http://www.docin.com/p-543128596.html>]
- [22] 张荣群, 乔月霞, 刘欢. 湿地景观演变与土地利用强度变化的响应关系——以银川平原为例. 测绘科学, 2015, 40(10): 54-59 [Zhang R-Q, Qiao Y-X, Liu H. Response relationship between wetland landscape evolution and land use intensity change: A case study of Yinchuan Plain. *Science of Surveying and Mapping*, 2015, 40(10): 54-59]
- [23] 宁夏统计局. 2000宁夏统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2000 [Ningxia Bureau of Statistics. 2000 Ningxia Statistical Yearbook. Beijing: China Statistical Press, 2000]
- [24] 宁夏统计局. 2009宁夏统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2009 [Ningxia Bureau of Statistics. 2009 Ningxia Statistical Yearbook. Beijing: China Statistical Press, 2009]
- [25] 宁夏统计局. 2018宁夏统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2018 [Ningxia Bureau of Statistics. 2018 Ningxia Statistical Yearbook. Beijing: China Statistical Press, 2018]
- [26] 唐小平, 黄桂林. 中国湿地分类系统的研究. 林业科学研究, 2003, 16(5): 531-539 [Tang X-P, Huang G-L. Research on wetland classification system in China. *Journal of Forestry Science*, 2003, 16(5): 531-539]
- [27] Lu C, Ren C, Wang Z, et al. Monitoring and assessment of wetland loss and fragmentation in the Cross-boundary Protected Area: A case

- study of Wusuli River Basin. *Remote Sensing*, 2019, 11: 2581
- [28] 张敏, 宫兆宁, 赵文吉, 等. 近 30 年来白洋淀湿地景观格局变化及其驱动机制. 生态学报, 2016, 36 (15): 4780-4791 [Zhang M, Gong Z-N, Zhao W-J, et al. Changes of Baiyangdian wetland landscape pattern and its driving mechanism in recent 30 years. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (15): 4780-4791]
- [29] 傅伯杰, 徐延达, 吕一河. 景观格局与水土流失的尺度特征与耦合方法. 地球科学进展, 2010, 25 (7): 673-681 [Fu B-J, Xu Y-D, Lyu Y-H. Scale characteristics and coupling method of landscape pattern and soil erosion. *Progress in Earth Science*, 2010, 25 (7): 673-681]
- [30] 陈芝聪, 谢小平, 白毛伟. 南四湖湿地景观空间格局动态演变. 应用生态学报, 2016, 27 (10): 3316-3324 [Chen Z-C, Xie X-P, Bai M-W. Dynamic evolution of wetland landscape spatial pattern in Nansihu Lake. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27 (10): 3316-3324]
- [31] 张路, 李炳章, 郭克疾, 等. 西藏唐北地区湖泊动态及空间格局预测. 应用生态学报, 2019, 30 (8): 2793-2802 [Zhang L, Li B-Z, Guo K-J, et al. Prediction of lake dynamics and spatial pattern in the northern tang region of Xizang. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30 (8): 2793-2802]
- [32] 谢帅, 刘士彬, 段建波, 等. OSDS 注册用户空间分布特征及影响因素分析. 地球信息科学学报, 2016, 18 (10): 1332-1340 [Xie S, Liu S-B, Duan J-B, et al. Analysis of spatial distribution characteristics and influencing factors of OSDS registered users. *Journal of Earth Information Science*, 2016, 18 (10): 1332-1340]
- [33] 周亮, 周成虎, 杨帆, 等. 2000—2011 年中国 PM_{2.5} 时空演化特征及驱动因素解析. 地理学报, 2017, 72 (11): 2079-2092 [Zhou L, Zhou C-H, Yang F, et al. Spatial and temporal evolution characteristics and driving factors of PM_{2.5} in China from 2000 to 2011. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72 (11): 2079-2092]
- [34] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72 (1): 116-134 [Wang J-F, Xu C-D. Geographical detectors: Principles and prospects. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72 (1): 116-134]
- [35] 周伟, 牟凤云, 刚成诚, 等. 1982—2010 年中国草地净初级生产力时空动态及其与气候因子的关系. 生态学报, 2017, 37 (13): 4335-4345 [Zhou W, Mou F-Y, Gang C-C, et al. Spatio-temporal dynamics of net primary productivity of grassland in China from 1982 to 2010 and its relationship with climatic factors. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 (13): 4335-4345]
- [36] 马伟, 张阳武, 周天元, 等. 基于空间抽样调查的宁夏全区和吴忠市湿地面积估测. 湿地科学, 2019, 17 (4): 384-390 [Ma W, Zhang Y-W, Zhou T-Y, et al. Estimation of wetland area in Ningxia Autonomous Region and Wuzhong City based on spatial sampling survey. *Wetland Science*, 2019, 17 (4): 384-390]