



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

1990—2020年于桥水库流域景观格局时空演变及驱动力

刘凯, 杨琰瑛, 师荣光, 李青, 吴, 郑宏艳, 米长虹

引用本文:

刘凯, 杨琰瑛, 师荣光, 李青, 吴, 郑宏艳, 米长虹. 1990—2020年于桥水库流域景观格局时空演变及驱动力[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 154–164.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0760>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于移动窗口法的半干旱生态脆弱区景观破碎化及驱动力分析

胡荣明, 杜嵩, 李朋飞, 姚燕子, 王睿哲, 滕坤阳

农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 502–511 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0490>

京津冀潮白河区域土地利用变化对生态系统服务的影响

耿冰瑾, 曹银贵, 苏锐清, 刘施含, 冯喆

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 583–593 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0595>

基于CA-Markov模型和MCE约束的白洋淀流域景观动态研究

张晨星, 徐晶晶, 温静, 杨新兵, 王佳欢, 赵波

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 655–664 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0415>

京津冀潮白河区域2001—2017年耕地利用变化时空特征分析

苏锐清, 曹银贵, 王文旭, 邱敏, 宋蕾

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 574–582 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0266>

基于MCE-CA耦合模型的嘉兴市土地利用预测情景下生态敏感性评价

荣月静, 张慧, 赵显富

农业资源与环境学报. 2015(4): 343–353 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0359>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘凯, 杨琰瑛, 师荣光, 等. 1990—2020年于桥水库流域景观格局时空演变及驱动力[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 154–164.

LIU K, YANG Y Y, SHI R G, et al. Spatiotemporal changes and driving forces of landscape patterns in the Yuqiao Reservoir watershed during 1990—2020[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(1): 154–164.



开放科学 OSID

1990—2020年于桥水库流域景观格局时空演变及驱动力

刘凯^{1,2}, 杨琰瑛^{1,3*}, 师荣光^{1,3}, 李青⁴, 吴犇⁵, 郑宏艳^{1,3}, 米长虹^{1,3*}

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081; 3. 农业农村部农产品质量安全环境因子控制重点实验室, 天津 300191; 4. 天津市于桥水库管理中心, 天津 300074; 5. 天津市生态环境科学研究院, 天津 300191)

摘要: 景观格局时空演变是土地利用变化最直观的表现形式, 剖析流域景观格局变化及其驱动力, 对流域土地利用管理及水质保护具有重要意义。以于桥水库流域 1990、2000、2010 年和 2020 年 4 期土地利用数据为基础, 采用半变异函数法和移动窗口法分析土地利用时空变化及其景观破碎度、斑块形状和多样性变化, 并使用灰色关联法分析变化的驱动因素。结果表明, 1990—2020 年, 于桥水库流域内城镇建设用地、农村居民点和林地的面积分别增加了 588.89%、24.19% 和 0.83%, 耕地、草地和水域面积分别减少了 15.14%、5.96% 和 3.13%。1990—2010 年, 城镇建设用地大幅增长, 耕地、草地等大幅减少。2010—2020 年, 城镇建设用地的增长速率放缓, 林地开始增加。30 年间, 整体景观水平上, 流域景观破碎度和多样性增加, 景观斑块形状趋于复杂化。类别水平上, 耕地及草地破碎化, 景观斑块形状更加复杂。城镇建设用地斑块密度指数(PD)和最大斑块指数(LPI)增加, 平均斑块面积指数(MPS)大幅下降。于桥水库周边和遵化市城区是流域景观格局变化的两个中心。流域内景观格局变化与人口密度、农村人口数、规模以上工业企业数及年降雨量等社会和自然因素密切相关。城镇化和于桥水库水质保护工程是驱动流域土地利用与景观格局变化的主要原因。

关键词: 于桥水库流域; 景观格局; 移动窗口分析; 灰色关联分析; 驱动力

中图分类号: P901

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2023)01-0154-11

doi: 10.13254/j.jare.2021.0760

Spatiotemporal changes and driving forces of landscape patterns in the Yuqiao Reservoir watershed during 1990—2020

LIU Kai^{1,2}, YANG Yanying^{1,3*}, SHI Rongguang^{1,3}, LI Qing⁴, WU Ben⁵, ZHENG Hongyan^{1,3}, MI Changhong^{1,3*}

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Key Laboratory for Environmental Factors Control of Agro-Product Quality Safety, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 4. Tianjin Yuqiao Reservoir Management Center, Tianjin 300074, China; 5. Tianjin Academy of Eco-Environmental Sciences, Tianjin 300191, China)

Abstract: The spatiotemporal evolution of landscape patterns is the most intuitive manifestation of land-use change. Analyzing changes in watershed landscape patterns and their driving forces is of great significance for land-use management and water quality protection there. Changes in land-use, landscape fragmentation, patch shape, and diversity were analyzed using the semi-variogram and moving window methods based on the land-use data for the Yuqiao Reservoir watershed in 1990, 2000, 2010, and 2020. The driving forces of change were analyzed using Gray Correlation analysis. The results showed that urban construction land, rural settlements, and woodland increased by 588.89%, 24.19%, and 0.83%, respectively, in the Yuqiao Reservoir Watershed during the period 1990—2020 while the areas of cultivated land, grassland, and water bodies decreased by 15.14%, 5.96%, and 3.13%, respectively. Construction land increased

收稿日期: 2021-11-04 录用日期: 2021-12-30

作者简介: 刘凯(1996—), 男, 四川叙永人, 硕士研究生, 从事农业生态与面源污染治理研究。E-mail: kyle7247@163.com

*通信作者: 杨琰瑛 E-mail: yangyanying@caas.cn; 米长虹 E-mail: mch68@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42001264)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(42001264)

significantly, whereas cultivated land and grassland decreased significantly from 1990 to 2010. The growth rate of construction land has slowed while that of forest land increased from 2010 to 2020. At the landscape level, the fragmentation and diversity of landscapes increased, and the landscape patch shape has become more complicated in the last 30 years. Cultivated land and grasslands were more fragmented at the class level. The patch density index (PD) and largest patch index (LPI) of urban construction land increased, while the mean patch size index (MPS) decreased acutely. The changing center of the landscape pattern surrounds the Yuqiao Reservoir and urban Zunhua. Changes in landscape patterns were closely related to social, and natural factors, such as population density, rural population, industrial enterprises, and precipitation. Urbanization and water quality protection projects at the Yuqiao Reservoir were the main forces driving changes in land-use and landscape pattern change.

Keywords: Yuqiao Reservoir watershed; landscape pattern; moving window analysis; Gray Relational analysis; driving force

土地利用/覆被变化反映不同时空尺度下土地利用方式受人类活动影响的程度,表现了人类活动与环境相互作用关系^[1]。景观格局是大小不一和形状各异的景观要素斑块在空间上的排列^[2],是各种自然和社会因素在复杂时空尺度上作用的最终结果^[3]。景观格局时空演变是土地利用变化最直观的表现形式,基于土地利用变化的景观格局演变分析是景观生态学研究的重要内容^[4]。景观指数对景观格局的高度概括性使其成为景观格局分析的重要手段^[2,5],随着遥感技术和地理信息系统的日益发展,基于多期土地利用遥感影像,采用景观指数法进行景观格局变化的研究数量近年来持续增加,包括土地利用动态变化分析、景观格局空间特征刻画、景观生态风险区识别以及未来景观发展预测等。研究区域以大尺度快速城市化地区、湿地和生态脆弱区为主^[6-8]。Li等^[9]在上海城市化时空格局的研究中发现,城市化增加了景观多样性、景观碎片化和景观结构的复杂性。洪湖湿地保护区内土地利用强度增加使景观趋于破碎、斑块间连接度和景观聚集度下降,景观异质性增加^[7]。目前研究对中小尺度流域整体景观格局变化关注不足。

景观格局驱动机制解析十分重要,可以帮助找出景观格局变化成因^[10]。Kefalas等^[11]的研究表明,地中海岛屿土地利用覆被变化主要发生在自然植被区和农业种植区,自然植被区变化主要受地形、气候和自然灾害的影响,农业区变化则与社会经济发展情况密切相关。Ma等^[12]研究发现,1987—2015年疏勒河流域景观格局变化具有明显阶段性特征,人类活动对景观形态、破碎度和连通性产生影响。由于受主观和客观因素影响,景观格局的驱动因子难以完整收集。以往针对驱动机制的解析多以定性分析、相关性分析和回归分析为主,定性分析主观性较强^[13],相关性分析所用数据较少,统计意义有效性不足^[14-15],回归分析数据需求量大,中小尺度适用性较差^[16]。而灰色关联分析具有数据需求小、可量化分析未知因子

间关系的优点^[17],能较好地适用于此类分析的需求。

于桥水库流域横跨河北省和天津市,毗邻北京市,是京津冀地区重要的生态屏障。流域下游于桥水库是引滦入津调蓄水库,作为国家级水源地,被喻为天津市“大水缸”,是天津市城区生活和工业用水的主要来源之一,其水质变化会对天津市生产生活用水产生重大影响。流域内景观格局变化直接影响其水质的变化。当前针对于桥水库流域的研究主要有城区景观格局变化研究^[18]、基于“源-汇”景观的流域景观格局变化与氮磷负荷关系探讨^[19-21],立足于全流域的景观格局变化及其驱动力定量化的探究较少。

本研究基于1990、2000、2010、2020年4期土地利用数据,分析于桥水库流域30年的土地利用变化,利用半变异函数确定了最佳移动窗口大小,借助Fragstats 4.2.1软件,采用No Sampling和移动窗口法分析于桥水库流域景观格局破碎度、斑块形状和多样性变化及变化程度,阐明各个景观组分间的特征差异,评价流域景观格局变化程度,并通过灰色关联法分析景观格局变化的主要驱动因子,研究结果有助于掌握流域景观格局动态,对流域景观的规划与管理、资源的有效利用具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 区域概况

于桥水库流域(39°56′~40°23′N, 117°26′~118°12′E)位于天津市北部与河北省交界处,流域总面积约2 060 km²,主要河流包括滦河、沙河和黎河(图1)。78%的流域面积位于河北省,涉及唐山市遵化市、玉田县和迁西县,承德市兴隆县和天津市蓟州区。流域地形由西北向东南倾斜,西北和北部为山地地区,中部为平原区,南部和东南部地区为低山丘陵区。流域内土地利用类型以耕地、林地为主,农业是主要的支柱产业,经济发展水平较低,是典型的农业流域。流域内气候类型为温带大陆性季风半湿润气候,年平均

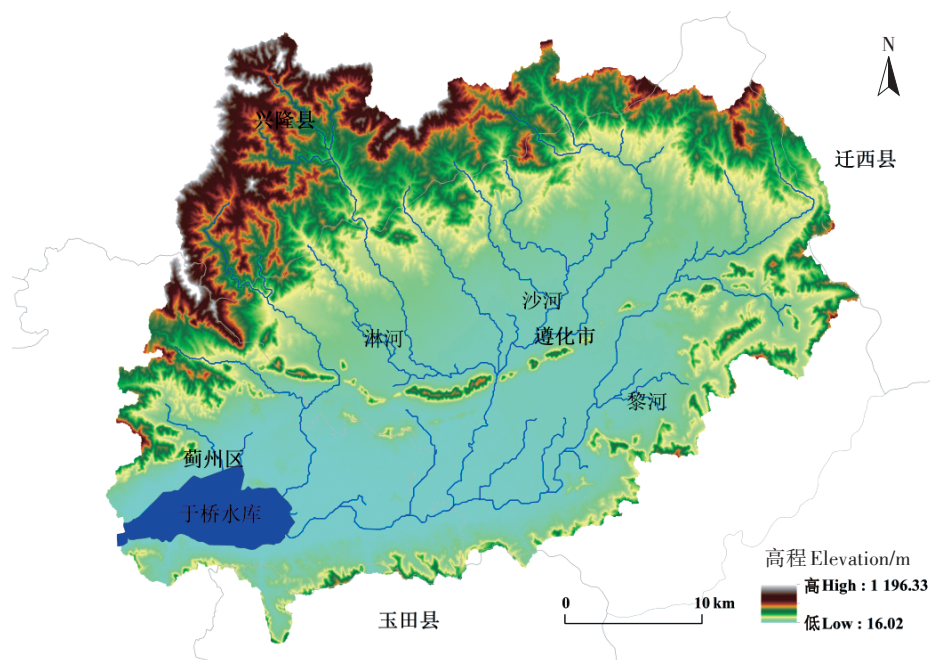


图1 研究区地理位置

Figure 1 Geographical location of the study area

气温 10~13 ℃, 年平均降雨量 748.5 mm^[22]。

1.2 数据来源与处理

本研究所采用的 1990、2000、2010、2020 年土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>) 的中国土地利用遥感监测数据库, 精度为 30 m×30 m。利用于桥水库流域边界矢量图, 采用 ArcGIS 10.5 掩膜提取功能提取出研究区土地利用图, 根据流域内土地利用实际情况, 参照资源环境科学与数据中心的土地利用分类系统, 将土地利用分类划分为耕地、林地、草地、城镇建设用地、农村居民点、水域和裸地七类。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用转移分析

通过转移矩阵对不同类型土地利用的转移方向及转移数量进行分析, 土地利用转移矩阵通用形式参考相关研究^[23]。

1.3.2 景观指数

从景观破碎度、斑块形状和景观多样性三方面筛选分析于桥水库流域景观格局变化的景观指数^[24]。从类别水平上选择最大斑块指数 (LPI)、斑块密度 (PD)、平均斑块面积 (MPS)、边缘密度 (ED) 和景观形状指数 (LSI); 从景观水平上选择最大斑块指数 (LPI)、斑块密度 (PD)、边缘密度 (ED)、平均斑块面积 (MPS)、景观形状指数 (LSI)、聚集度指数 (AI)、香农

均匀度指数 (SHEI)。利用 Fragstats 4.2.1 软件从景观破碎度 (LPI、PD 和 MPS)、景观斑块形状 (ED 和 LSI) 及景观多样性 (AI 和 SHEI) 三方面进行景观格局变化分析。

1.3.3 移动窗口分析

为避免移动窗口大小设置不合理而增加景观格局空间异质性, 通过设置不同的移动窗口边长, 生成对应窗口下的景观指数 (LPI、LSI、AI 和 SHEI) 变化图, 利用 ArcGIS 10.5 的 Create Random Points 和 Extract Multi Values to Points 功能^[25], 提取出空间随机分布点的景观指数数值, 采用 GS+ 软件进行不同移动窗口半径下景观指数半变异函数模拟, 并计算块基比, 分析确定适宜研究区的移动窗口大小。

采用 30 m 的奇数倍作为试验移动窗口大小, 在 330~1 590 m 区间内共设置 14 个移动窗口尺寸 (图 2), 当移动窗口边长位于 990~1 230 m 区间时, 波动幅度开始减小, 确定 1 110 m 作为移动窗口分析的窗口边长。移动窗口从研究区左上方开始移动, 对整个研究区进行分析, 生成的景观指数图采用 Raster Calculator 进行计算, 得到 1990—2000、2000—2010 年及 2010—2020 年景观指数空间变化图。

1.3.4 景观驱动因素选取

社会、经济和气候因素对流域景观格局影响很大, 且人类活动是影响景观格局的重要因素。于桥水库

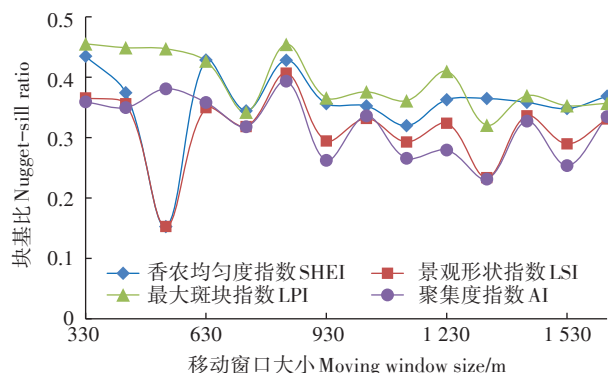


图2 不同移动窗口大小景观指数块基比变化

Figure 2 Changes of landscape index Nugget-sill ratio with different moving window sizes

流域是一个典型的农业流域,故选取了人口密度、农村人口数、规模以上工业企业数、农业机械总动力作为社会指标。同时,水库的生态保护措施是流域景观格局变化的重要因素,该流域内大量植树造林设置缓冲带,人工造林是重要的生态保护措施。前期调研发现流域内铁矿资源和旅游资源丰富,因此选取了地区生产总值、农林牧渔总产值、工业企业总产值和第三产业增加值作为经济指标。气候因素一般从整体上对景观格局变化产生影响,是一个不可忽略的驱动因素,30年间,流域内年降雨量出现大幅下降,势必会对流域景观格局产生影响,因此选择年降雨量作为气候驱动因子。

遵化市77%的行政区划位于于桥水库流域内,是流域内景观格局变化的主要区域,其他四个县(区)的主体地区未处于流域内,因此社会经济因素仅收集遵化市历年数据。社会经济数据来源于1991、2001、2011、2020年统计年鉴,主要包括《唐山统计年鉴》《河北经济年鉴》《河北农村统计年鉴》《中国县(市)社会经济统计年鉴》。人工造林数据来自《中国林业统计年鉴》和《中国林业和草原统计年鉴》。采用《中国统计年鉴》中提供的全国零售物价指数将2019年以前的经济指标(地区生产总值、农林牧渔总产值、工业企业总产值、第三产业增加值)换算成2019年的标准值,以便精准反映经济指标的变化。当某一年份数据缺失时,用其前后相邻年份求取的平均值代替或用其相邻年份代替。气候数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心的中国气象数据。

1.3.5 灰色关联分析(GRA)

在流域景观水平上进行景观指数与驱动因子间关联度计算。采用灰色关联法计算社会、经济和气候因素与景观指数间的关联度。用均值法对驱动因子

进行无量纲化,各驱动因子关联度越高,比较序列对参考序列的影响越大,关联度越低,比较序列对参考序列的影响越小^[26]。分析步骤如下:

$$\textcircled{1} \text{均值化归一: } X_i'(k) = \frac{nX_i(k)}{\sum_{k=1}^n X_i(k)} \quad (1)$$

$$\textcircled{2} \text{计算关联系数: } \mu_i(k) = \frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|} \quad (2)$$

$$\textcircled{3} \text{计算关联度: } r_i(k) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \mu_i(k) \quad (3)$$

式中: ρ 为分辨系数,取值为0.5; $|X_0(k) - X_i(k)|$ 为同一时刻比较列和参考列的差值的绝对值; $\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)|$ 和 $\max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|$ 分别为同一时刻比较列和参考列差值绝对值的最小值和最大值。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化

1990年于桥水库流域内土地利用主要为耕地(39.60%)和林地(34.85%),草地、农村居民点、水域和城镇建设用地各占流域面积的12.32%、6.33%、6.09%和0.81%,是一个以农业为主、城镇化水平较低的流域。2020年,流域内土地利用发生了巨大变化,城镇建设用地较1990年增加了588.89%,农村居民点增加了24.19%,林地增加了0.83%,而耕地、草地和水域分别减少了15.14%、5.96%和3.13%。30年来,流域整体上呈现城镇建设用地和农村居民点明显增加,耕地、草地和水域减少的趋势(图3和表1)。

1990—2000年,流域城镇建设用地(城镇)和农村居民点(农居)快速扩张,侵占周边耕地,遵化市城区和水库北岸变化最为明显(图4),同时,总计888.75 hm²的林地、草地和水域转化为耕地。2000—2010年是流域内土地利用变化最剧烈的十年,其中耕地和草地转出面积最多,分别减少6 013.35 hm²和1 144.08 hm²,同时城镇建设用地和农村居民点分别增长263.30%和13.77%。空间上,耕地和草地向城镇建设用地转化主要发生在遵化市城区及郊区,呈发散状向流域北部及东北部山区延伸。其他用地的转化主要发生在水库周边平原地区,强度低但分散度高。2010—2020年,流域的城镇化趋势放缓,城镇建设用地面积增加34.94%,主要增长区域在遵化市城区,呈

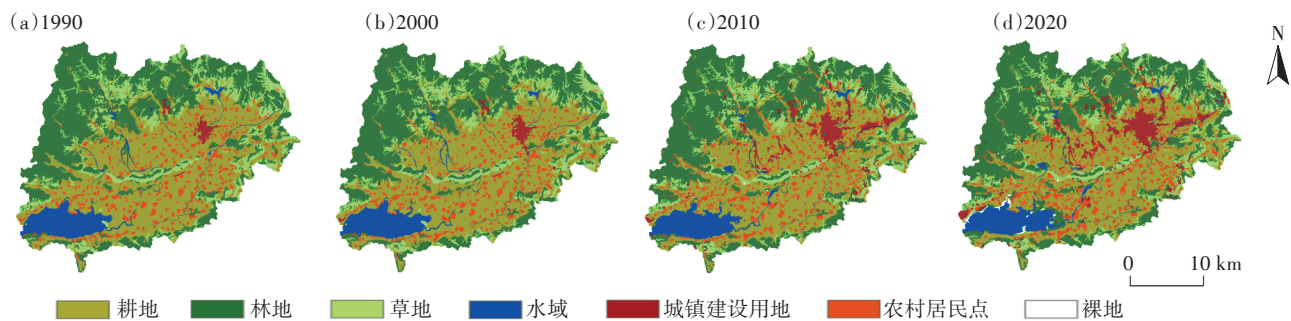


图3 1990—2020年于桥水库流域土地利用变化

Figure 3 Land use change of Yuqiao Reservoir watershed from 1990 to 2020

表1 1990—2020年于桥水库流域土地利用结构变化

Table 1 Change of land use structure in Yuqiao Reservoir watershed from 1990 to 2020

年份 Year	指标 Index	耕地 Crop land	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Water body	农村居民点 Rural settlement	城镇建设用地 Urban construction land	裸地 Bare land
1990	面积/hm ²	81 109.26	71 381.70	25 231.14	12 471.48	12 964.14	1 646.28	0
	占比/%	39.60	34.85	12.32	6.09	6.33	0.81	0
2000	面积/hm ²	80 947.08	71 116.02	24 895.89	12 183.66	13 348.26	2 313.45	0
	占比/%	39.52	34.72	12.16	5.95	6.52	1.13	0
2010	面积/hm ²	74 933.73	70 361.01	23 751.81	12 101.49	15 185.61	8 404.65	32.04
	占比/%	36.59	34.36	11.60	5.91	7.42	4.10	0.02
2020	面积/hm ²	68 829.03	71 977.23	23 726.43	12 080.79	16 099.83	11 340.99	714.96
	占比/%	33.61	35.15	11.59	5.90	7.86	5.54	0.35
1990—2000	变化面积/hm ²	-162.18	-265.68	-335.25	-287.82	384.12	667.17	0
	变化率/%	-0.20	-0.37	-1.33	-2.31	2.96	40.53	—
2000—2010	变化面积/hm ²	-6 013.35	-755.01	-1 144.08	-82.17	1 837.35	6 091.20	32.04
	变化率/%	-7.43	-1.06	-4.60	-0.67	13.76	263.30	—
2010—2020	变化面积/hm ²	-6 104.70	1 616.22	-25.38	-20.70	914.22	2 936.34	682.92
	变化率/%	-8.15	2.30	-0.11	-0.17	6.02	34.94	2 131.46
1990—2020	变化面积/hm ²	-12 280.23	595.53	-1 504.71	-390.69	3 135.69	9 694.71	714.96
	变化率/%	-15.14	0.83	-5.96	-3.13	24.19	588.89	—

注:—表示无法计算数值。

Note:— indicates that the numeric value cannot be calculated.

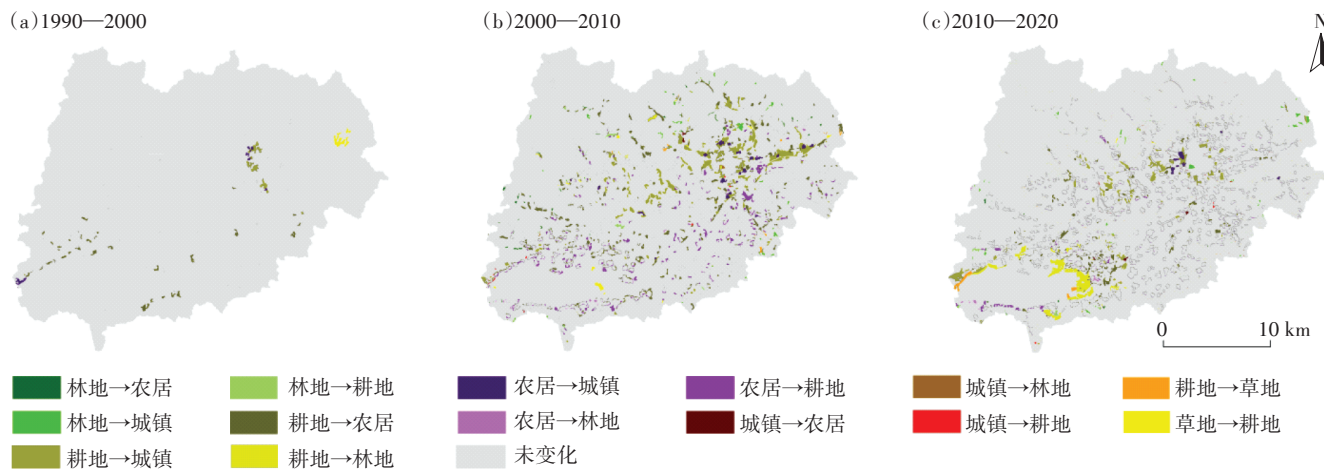


图4 1990—2020年于桥水库流域土地利用变化空间分布

Figure 4 Spatial distribution of land use change in Yuqiao Reservoir watershed from 1990 to 2020

现向郊区扩张趋势。此外,林地增加了2.30%,主要分布在于桥水库河流入库口,由大量耕地转化而来。

2.2 景观格局变化

2.2.1 景观破碎度

从图5可以看出,1990—2020年,景观水平上(景观)最大斑块指数(LPI)下降54.17%,斑块密度(PD)上升了50.71%,平均斑块面积(MPS)下降了36.54%,表明整个流域内景观破碎度增加。土地利用类型水平上,流域内LPI变化以城镇建设用地(城镇)和农村居民点(农居)上升、耕地及草地下降为主。城镇建设用地的LPI增幅最大,从0.60增加到1.98,增加了230.0%,农村居民点增加87.41%。耕地LPI降幅最大,由33.46下降到13.05,降幅为61.00%,草地LPI下

降了23.29%。所有土地利用类型的PD在30年间均呈现上升趋势,其中城镇建设用地的变化最为剧烈,上升了1 486.77%,其次是水域(71.83%)、耕地(53.26%)和农村居民点(42.66%)。除裸地外,各土地利用类型的MPS均不同程度下降,其中城镇建设用地、耕地和水域降幅最大,分别下降56.36%、46.55%和43.81%。30年间,城镇建设用地和农村居民点的PD和LPI均正向增长,城镇建设用地PD增幅大于LPI增幅,且MPS大幅下降,表明城镇建设用地以远离城区扩张为主。农村居民点LPI增幅大于PD,同时MPS降幅较小,说明农村居民点表现出逐渐聚集化趋势。水域的PD出现较大上升趋势,MPS降幅较大,LPI保持平稳,表明流域内水体面积有减小的趋势,但变化面积

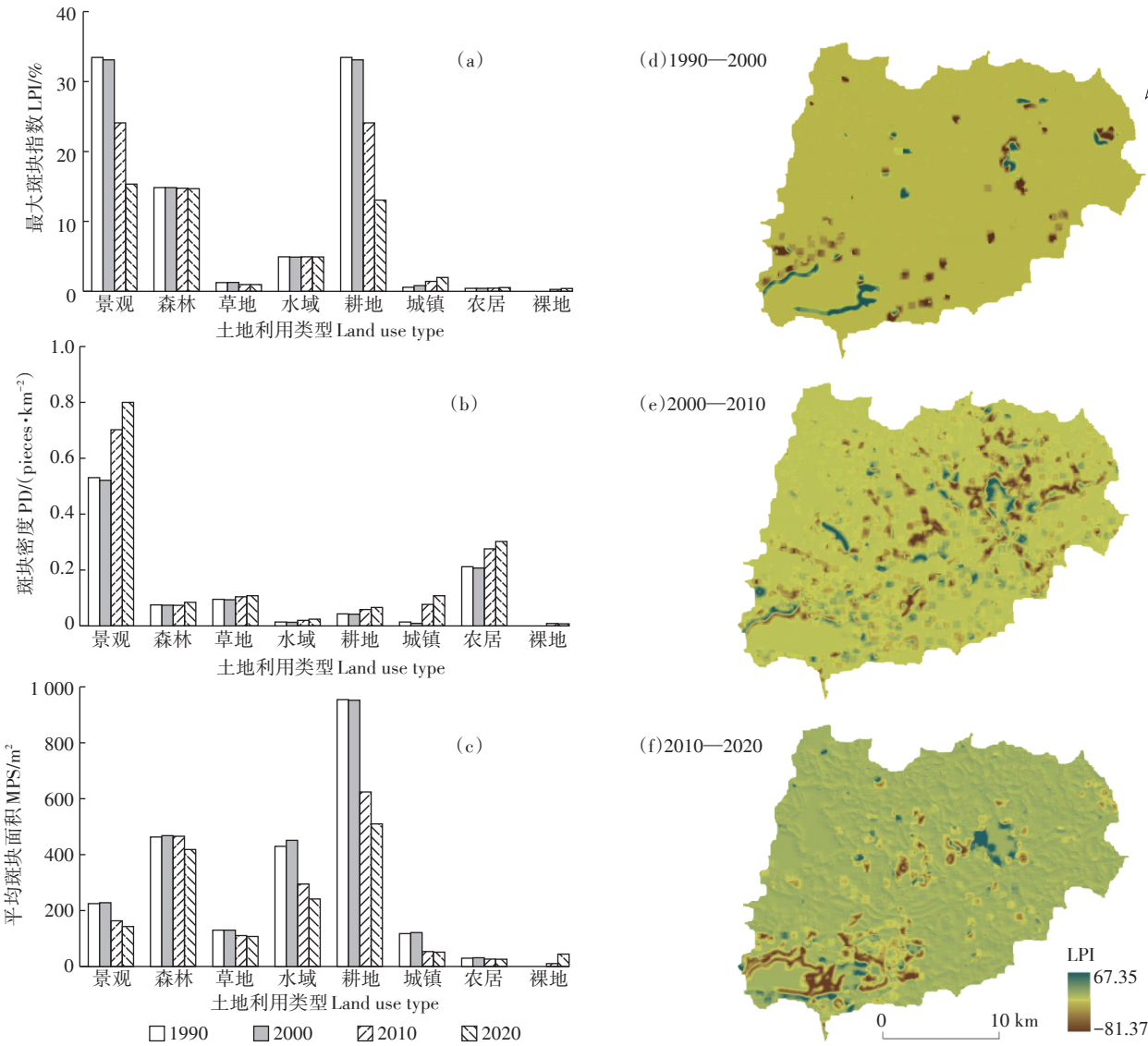


图5 1990—2020年于桥水库流域景观破碎度变化

Figure 5 Changes of landscape fragmentation degree of Yuqiao Reservoir watershed from 1990 to 2020

小而分散。

1990—2000年,LPI变化在水库周边较集中,在其他地区呈点状变化。2000—2010年,流域内LPI在流域中部、遵化市城区和流域西北部变化剧烈,流域南部变化较弱。2010—2020年,遵化市城区LPI升高,城区西部和于桥水库周边LPI降低。30年间,流域内整体上景观破碎度增加,变化集中于桥水库库区周边和遵化市城区,人为干扰少的西北、东南和北部山区景观破碎度变化小(图5)。

2.2.2 景观斑块形状

30年间,在景观水平上,景观形状指数(LSI)和边缘密度(ED)均呈现不断增长的趋势(图6),增长率为17.80%和18.94%,表明流域内景观斑块形状日趋复杂化。各土地利用类型LSI均表现出不同程度增长,其中城镇建设用地(城镇)增长了218.44%,农村居民点(农居)和耕地分别增长25.46%和24.83%。城镇建设用地的ED增长728.71%,农村居民点和耕地的ED分别增长39.52%和14.72%。由此可见,流域内景观斑块形状变化主要受城镇建设用地、农村居民点和耕地变化的影响。

LSI变化区域集中于桥水库周边和遵化市中心城区及郊区(图6),是流域内景观斑块形状变化的主

要区域。水库周边地区和遵化市郊区LSI整体呈上升趋势,表明于桥水库周边和遵化市郊区景观斑块形状趋于复杂化。遵化市城区LSI下降,表明遵化市城区呈现景观斑块形状单一化趋势。

2.2.3 景观多样性

1990—2020年,流域内景观多样性上升,聚集度指数(AI)降低了7.06%,香农均匀度指数(SHEI)上升了0.78%,但变化强度低于景观破碎度和景观斑块形状变化(图7)。30年间,流域内大部分地区景观多样

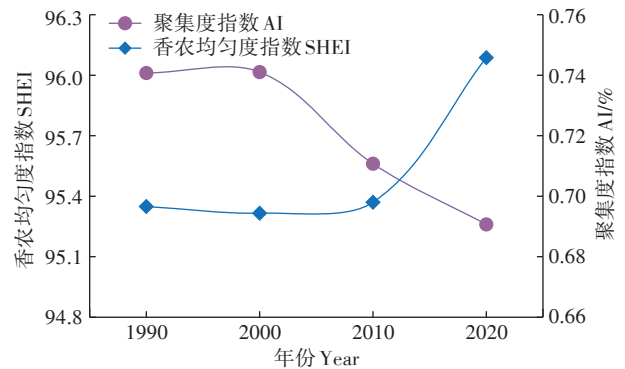


图7 1990—2020年于桥水库流域景观多样性指数

Figure 7 Landscape diversity index in Yuqiao Reservoir watershed from 1990 to 2020

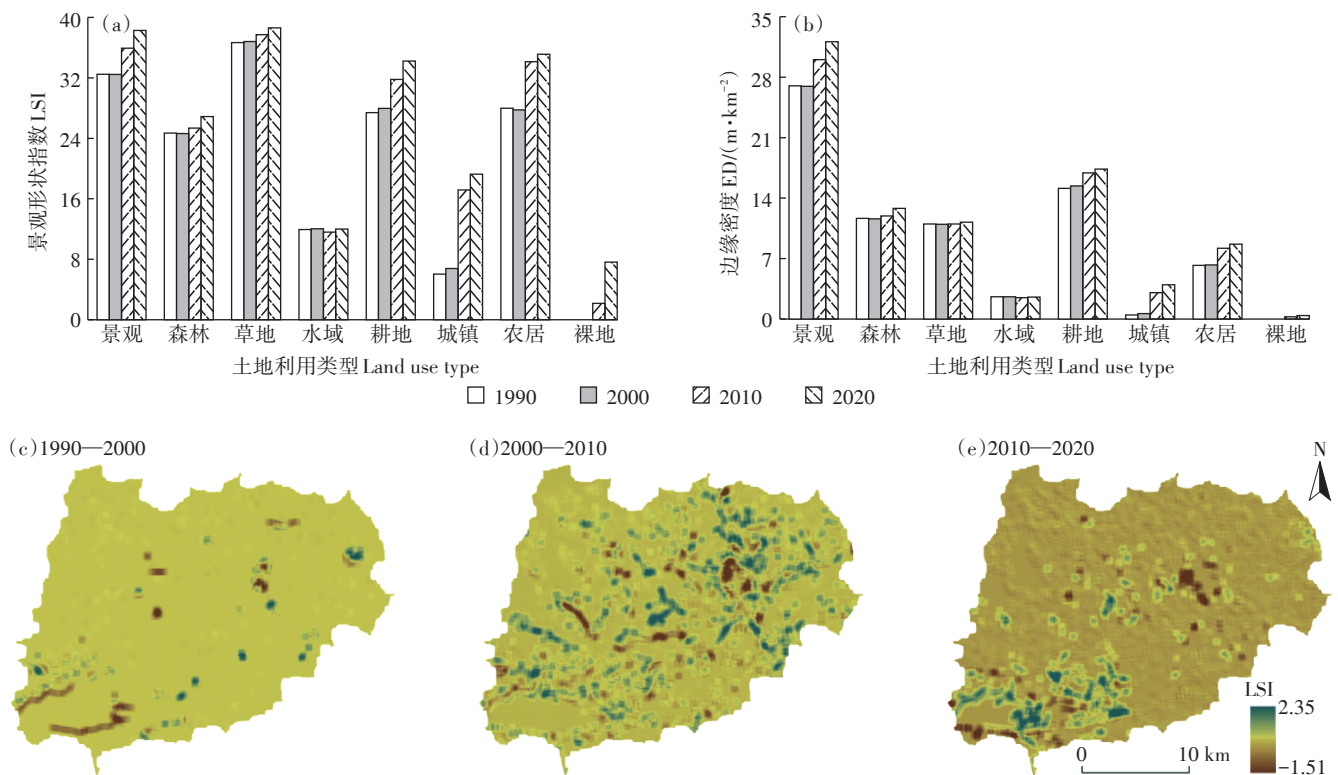


图6 1990—2020年于桥水库流域景观斑块形状变化

Figure 6 Change of landscape patch shape in Yuqiao Reservoir watershed from 1990 to 2020

性均发生变化(图8)。1990—2000年,流域内景观多样性指数变化小。2000—2010年,景观多样性指数变化集中在遵化市区及郊区,遵化市区景观多样性降低,郊区景观多样性增加。2010—2020年,流域内景观多样性变化集中于桥水库周边,库区周边景观多样性增加。

2.3 景观变化驱动力分析

2.3.1 社会因素对景观格局的影响

选取的5个社会因素(X1~X5)与7个景观指数的

关联度在0.561~0.963之间,平均关联度为0.771,表明社会因子对景观格局产生了较大影响(表2)。整体上,人口密度、农村人口数与7个景观指数关联度强,人口密度和农村人口数与MPS、ED、SHEI、AI和LSI的灰色关联度均在0.9以上,表明于桥水库流域内景观格局变化与流域内人口数量及人口的迁移有密切联系。同时,工业发展、农业机械化程度提升和人工造林也对流域内景观格局的改变有较强的作用。

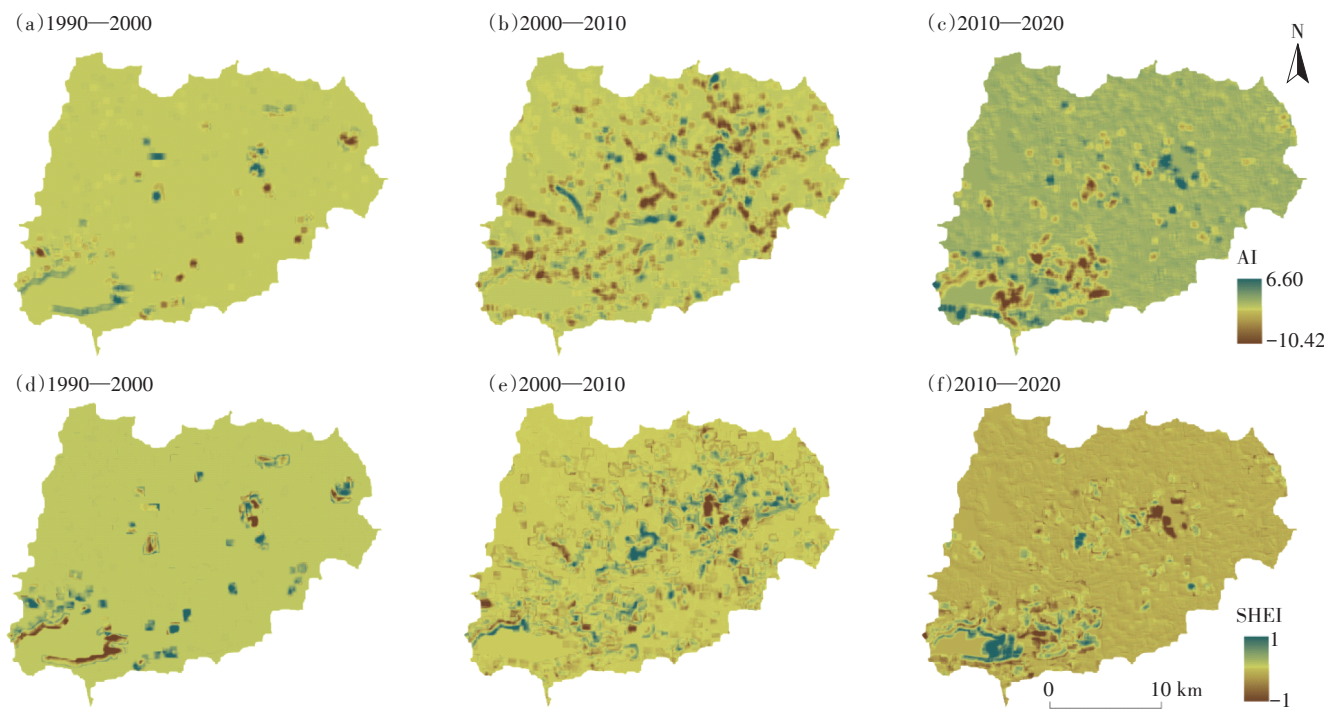


图8 1990—2020年于桥水库流域景观多样性变化

Figure 8 Change of landscape diversity in Yuqiao Reservoir watershed from 1990 to 2020

表2 景观指数与驱动因素关联度

Table 2 Correlation between landscape index and driving factors

方向 Direction	景观指数 Landscape index	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
破碎度	PD	0.830	0.827	0.765	0.686	0.652	0.527	0.734	0.472	0.506	0.612
	LPI	0.690	0.694	0.734	0.561	0.606	0.391	0.498	0.362	0.392	0.745
	MPS	0.947	0.953	0.798	0.724	0.605	0.451	0.602	0.410	0.442	0.744
斑块形状	ED	0.963	0.961	0.741	0.719	0.593	0.457	0.623	0.412	0.444	0.678
	LSI	0.928	0.929	0.739	0.726	0.584	0.448	0.612	0.404	0.434	0.668
多样性	SHEI	0.957	0.962	0.755	0.717	0.604	0.452	0.603	0.411	0.441	0.724
	AI	0.947	0.953	0.798	0.724	0.605	0.451	0.602	0.410	0.442	0.744

注:X1:人口密度;X2:农村人口数;X3:规模以上工业企业数;X4:农业机械总动力;X5:人工造林面积;X6:地区生产总值;X7:农林牧渔总产值;X8:工业企业总产值;X9:第三产业增加值;X10:年降雨量。

Note: X1: Population density; X2: Rural population; X3: Number of scaled industrial enterprises; X4: Total power of agricultural machinery; X5: Artificial afforestation area; X6: Regional GDP; X7: Gross output value of agriculture, forestry, animal husbandry, and fishery; X8: Gross output value of industrial enterprises; X9: Added value of tertiary industry; X10: Annual rainfall.

2.3.2 经济和气候因素对景观格局的影响

选取的4个经济因素(X6~X9)与流域景观指数的关联度分布在0.362~0.734之间,平均关联度为0.480。整体上经济因素与景观指数间关联度低,仅农林牧渔总产值与景观指数有较高关联度,其与景观斑块形状指数、景观破碎度指数和景观多样性指数的平均关联度分别为0.618、0.611和0.603,表明流域内第一产业即农林牧渔业的发展对景观破碎度、景观斑块形状和景观多样性均有重要影响。年降雨量(X10)与景观指数间关联度分布在0.612~0.745之间,平均关联度为0.702,其与景观多样性指数平均关联度最高,表明年降雨量是影响流域内景观格局尤其是景观多样性变化的重要因素。

3 讨论

1990—2020年,于桥水库流域景观格局发生了剧烈变化。建设用地大幅增加,耕地大量减少,并且景观格局破碎化、形状复杂化、景观多样性增加。1990—2000年,流域内景观格局变化较小;2000—2010年,流域内景观格局变化剧烈,主要表现为遵化城区建设用地的大量扩张;2010—2020年,流域城镇扩张速率下降,流域内土地利用变化集中在于桥水库库区周边,主要是耕地转化为林地。

城镇化是影响于桥水库流域景观格局变化的主要驱动因素。城镇化分为人口城镇化、经济城镇化和土地城镇化三个方面。30年间流域内人口密度、GDP不断增加,遵化市人口密度和GDP分别增长了15%和1600%,城乡居民点面积增大以及工矿企业数量的增加和规模的扩大也导致流域内景观格局的变化。遵化市是唐山市重要的铁矿产区,遵化市城区北部和东部乡镇形成了以矿业开采为主的相关产业区,主要沿河分布。同时城西旅游产业的发展,使建设用地进一步增加,耕地破碎化加剧。1990—2020年,流域内城镇建设用地增加了588.89%,农村居民点增加了24.19%,城镇建设用地和农村居民点的最大斑块指数(LPI)增加,表现出遵化城区建设用地集中连片发展的趋势。城镇建设用地、农村居民点的增加加剧了耕地破碎化,景观水平上最大斑块指数(LPI)下降了54.17%,流域的斑块密度(PD)增大,流域景观破碎度增加。与人口增长速率相比,遵化市的土地城镇化水平大幅提升,土地转化效率不高,为粗放式发展。2013年,我国提出新型城镇化建设方针,着力提升城镇化发展质量,更加注重生态保护^[27]。遵化市开始从

资源型城市向生态旅游型城市过渡,表现为严控工矿矿业发展,注重生态保护、旅游业发展和城乡发展质量提升。2010—2020年流域城镇建设用地扩张速率比1990—2000年下降了约70%。

水质保护工程也是影响于桥水库流域景观格局变化的重要因素。2010—2020年,流域内林地增加了1616 hm²,主要分布在于桥水库河流入库口。2000年以来,当地政府为保护于桥水库水质,采取了大量生态保护措施,带来了水库周围土地利用和景观格局的改变。水库周围进行环湖生态防护带建设,在水库入库口建设前置库湿地,占用了库区周边部分耕地及水域。当地政府实施“南迁北管”措施,对水库南岸农村居民点进行搬迁,严控北岸开展对水质有害的经济生产活动^[28]。同时在流域上游也实行水质协同保护措施,如上游水库生态防护带建设和植树造林等。2002年,天津市实施《天津市引滦水源污染防治管理条例》,划定了于桥水库三级保护区范围,并在一级保护区内开展湖滨生态防护带建设^[29]。2009年,天津市水务局与原蓟县政府联合成立于桥水库水资源保护工作领导小组,进一步加强于桥水库水质安全管理^[30]。2015年,天津市水务局和蓟州区政府联合发布《于桥水库库区封闭管理实施意见》,实行库区一级保护区封闭管理。2015—2018年,相关部门进行入库河口前置库湿地建设。2018年天津市出台《天津市打好水源地保护攻坚战三年作战计划(2018—2020年)》,要求开展于桥水库周边非法经营活动排查,构建入库湿地示范区^[31]。流域生态保护政策的实施驱动流域内景观格局发生改变。此外,经济因素尤其是农林牧渔业的发展与景观变化的相关性也较强。1990年以来,流域内年降雨量持续减少,水域面积减少了3.13%,这也对流域内景观格局产生了一定影响。

库区周边一系列生态工程措施的实施,已基本消除了库区周围污染对水库水质的影响,但流域上游景观格局变化带来的农业和工业结构变化,以及城乡居民点和旅游业排污增加,仍然对引滦水有严重影响^[32-33],建议在今后的研究中关注流域上游区域,加强风险管理。

4 结论

基于ArcGIS和Fragstats 4.2.1软件,本研究对1990—2020年于桥水库流域土地利用和景观格局变化过程进行了量化和可视化,采用半变异函数法确定

移动窗口大小,较好地消除了景观幅度效应对原始景观格局变化的影响,并采用灰色关联法分析了景观格局变化的主要驱动因子。研究结论如下:

(1)30年间于桥水库流域内发生了剧烈的土地利用变化,城镇建设用地、农村居民点和林地面积增加,耕地、草地和水域面积减少。城镇建设用地增长集中在遵化市城区,林地在于桥水库周边区域增加。2010年以来,城镇建设用地的增长速率放缓,林地开始增加。

(2)流域内景观斑块形状趋于复杂化,景观破碎度和景观多样性增加。城镇建设用地和农村居民点呈现连片化和跨越式增长,而耕地和草地呈现破碎化趋势,城镇建设用地的跨越式增长是流域景观斑块形状复杂化的主要成因。

(3)流域内土地利用结构和景观格局变化主要受城镇化和于桥水库水质保护工程措施的影响,农村居民点扩张、农林牧渔业和工矿业发展也对流域景观格局产生了重要影响。

参考文献:

- [1] 车通,李成,罗云建.城市扩张过程中建设用地景观格局演变特征及其驱动力[J].生态学报,2020,40(10):3283-3294. CHE T, LI C, LUO Y J. Changes in landscape pattern of built-up land and its driving factors during urban sprawl[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(10): 3283-3294.
- [2] 陈利顶,刘洋,吕一河,等.景观生态学中的格局分析:现状、困境与未来[J].生态学报,2008,28(11):5521-5531. CHEN L D, LIU Y, LÜ Y H, et al. Landscape pattern analysis in landscape ecology: Current, challenges and future[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5521-5531.
- [3] 张秋菊,傅伯杰,陈利顶.关于景观格局演变研究的几个问题[J].地理科学,2003,23(3):264-270. ZHANG Q J, FU B J, CHEN L D. Several problems about landscape pattern change research[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(3):264-270.
- [4] 徐晓龙,王新军,朱新萍,等.1996—2015年巴音布鲁克天鹅湖高寒湿地景观格局演变分析[J].自然资源学报,2018,33(11):1897-1911. XU X L, WANG X J, ZHU X P, et al. Landscape pattern changes in alpine wetland of Bayanbulak Swan Lake during 1996—2015[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(11):1897-1911.
- [5] 刘吉平,赵丹丹,田学智,等.1954—2010年三江平原土地利用景观格局动态变化及驱动力[J].生态学报,2014,34(12):3234-3244. LIU J P, ZHAO D D, TIAN X Z, et al. Landscape pattern dynamics and driving forces analysis in Sanjiang Plain from 1954 to 2010[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12):3234-3244.
- [6] LI H L, PENG J, LIU Y X, et al. Urbanization impact on landscape patterns in Beijing City, China: A spatial heterogeneity perspective[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 82:50-60.
- [7] 张莹莹,蔡晓斌,杨超,等.1974—2017年洪湖湿地自然保护区景观格局演变及驱动力分析[J].湖泊科学,2019,31(1):171-182. ZHANG Y Y, CAI X B, YANG C, et al. Driving force analysis of landscape pattern changes in Honghu Wetland Nature Reserve in recent 40 years[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(1):171-182.
- [8] 任嘉衍,刘慧敏,丁圣彦,等.伊河流域景观格局变化及其驱动机制[J].应用生态学报,2017,28(8):2611-2620. REN J Y, LIU H M, DING S Y, et al. Landscape pattern change and its driving mechanism in Yihe River basin, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8):2611-2620.
- [9] LI J X, LI C, ZHU F G, et al. Spatiotemporal pattern of urbanization in Shanghai, China between 1989 and 2005[J]. *Landscape Ecology*, 2013, 28(8):1545-1565.
- [10] 赵文武,房学宁.景观可持续性与景观可持续性科学[J].生态学报,2014,34(10):2453-2459. ZHAO W W, FANG X N. Landscape sustainability and landscape sustainability science[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(10):2453-2459.
- [11] KEFALAS G, KALOGIROU S, POIRAZIDIS K, et al. Landscape transition in Mediterranean islands: The case of Ionian islands, Greece 1985—2015[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 191:103641.
- [12] MA L B, BO J, LI X Y, et al. Identifying key landscape pattern indices influencing the ecological security of inland river basin: The middle and lower reaches of Shule River basin as an example[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 674:424-438.
- [13] 任玲玲,栗云召,于森,等.1984—2015年黄河三角洲人工湿地的演变及主要驱动因子[J].农业资源与环境学报,2020,37(4):493-502. REN L L, LI Y Z, YU M, et al. Evolution of artificial wetlands in the Yellow River Delta and related driving factors during 1984—2015[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4):493-502.
- [14] 周正龙,沙晋明,范跃新,等.厦门市不透水面景观格局时空变化及驱动力分析[J].应用生态学报,2020,31(1):230-238. ZHOU Z L, SHA J M, FAN Y X, et al. Temporal and spatial variations of impervious surface landscape pattern and the driving factors in Xiamen City, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(1):230-238.
- [15] 易阿岚,王钧.上海市湿地景观格局时空演变与驱动机制的量化研究[J].生态学报,2021,41(7):2622-2631. YI A L, WANG J. Quantitative study on spatio-temporal evolution and mechanisms of wetland landscape patterns in Shanghai[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(7):2622-2631.
- [16] 邢璐平,方斌,向梦杰.基于GWR模型的江苏省耕地集约利用水平时空变化特征及影响因素[J].长江流域资源与环境,2019,28(2):376-386. XING L P, FANG B, XIANG M J. Temporal and spatial variation of cultivated land intensive use level and its influencing factors in Jiangsu Province based on GWR model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(2):376-386.
- [17] 刘思峰,蔡华,杨英杰,等.灰色关联分析模型研究进展[J].系统工程理论与实践,2013,33(8):2041-2046. LIU S F, CAI H, YANG Y J, et al. Advance in grey incidence analysis modelling[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2013, 33(8):2041-2046.

- [18] 谢慧君, 李崇巍, 张亚娟, 等. 城镇化过程中流域不透水面演变格局——以天津于桥水库流域为例[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1069–1076. XIE H J, LI C W, ZHANG Y J, et al. Evolution pattern of impervious surface in the Yuqiao Reservoir watershed, Tianjin, China during the process of urbanization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(4): 1069–1076.
- [19] 包姗姗, 李崇巍, 王祖伟, 等. 天津于桥水库流域水体氮磷空间分异与景观格局的关系[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1609–1616. BAO S S, LI C W, WANG Z W, et al. Relationship between spatial variation of nitrogen and phosphorus in water and landscape pattern in Yuqiao Reservoir basin, Tianjin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(8): 1609–1616.
- [20] 李崇巍, 胡婕, 王飒, 等. 流域“源-汇”景观格局变化及其对磷污染负荷的影响——以天津于桥水库流域为例[J]. 生态学报, 2012, 32(8): 2430–2438. LI C W, HU J, WANG S, et al. The source-sink landscape pattern change and its effect on phosphorus pollution in Yuqiao watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(8): 2430–2438.
- [21] 张亚娟, 李崇巍, 胡蓓蓓, 等. 城镇化流域“源-汇”景观格局对河流氮磷空间分异的影响——以天津于桥水库流域为例[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2437–2446. ZHANG Y J, LI C W, HU B B, et al. Impact of a “source-sink” landscape pattern in an urbanized watershed on nitrogen and phosphorus spatial variations in rivers: A case study of Yuqiao Reservoir watershed, Tianjin, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(7): 2437–2446.
- [22] 陈萍, 李崇巍, 王中良, 等. 天津于桥水库流域典型景观类型时空演变分析[J]. 生态学杂志, 2015, 34(1): 227–236. CHEN P, LI C W, WANG Z L, et al. Spatiotemporal patterns of typical landscapes in the Yuqiao watershed, Tianjin[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(1): 227–236.
- [23] 吕乐婷, 张杰, 彭秋志, 等. 东辽河流域景观格局演变分析及变化预测[J]. 生态学报, 2019, 39(18): 6850–6859. LÜ L T, ZHANG J, PENG Q Z, et al. Landscape pattern analysis and prediction in the Dongjiang River basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(18): 6850–6859.
- [24] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级[M]. 二版. 北京: 高等教育出版社, 2012: 106–115. WU J G. Landscape ecology: Pattern, process, scale and hierarchy[M]. 2nd Edition. Beijing: Higher Education Press, 2012: 106–115.
- [25] 苏显力. 基于移动窗口法的下辽河平原区农田景观异质性研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018: 18–20. SU X L. Study on the heterogeneity of farmland landscape in the lower Liaohe Plain based on the moving window method[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018: 18–20.
- [26] 胡荣明, 杜嵩, 李朋飞, 等. 基于移动窗口法的半干旱生态脆弱区景观破碎化及驱动力分析[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 502–511. HU R M, DU S, LI P F, et al. Analysis of landscape fragmentation and driving forces in semi-arid ecologically fragile regions based on the moving window method[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(3): 502–511.
- [27] 高阳. 基于结构与功能演变规律的农村居民点更新研究——以河北省遵化市为例[D]. 北京: 中国农业大学, 2017: 25–28. GAO Y. Rural settlements renewal based on structure and function evolution: A case study of Zunhua County, Hebei Province[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017: 25–28.
- [28] 天津市水务局. 鱼塘变湿地, 于桥水库前置库每年削减氮磷千余吨[EB/OL]. (2019-04-17)[2021-11-02]. http://swj.tj.gov.cn/xwzx_17135/tpxw/202012/t20201212_4940206.html. Tianjin Water Bureau. The transformation of fish pond into wetland in Yuqiao Reservoir reduces nitrogen and phosphorus by more than 1000 tons per year [EB/OL]. (2019-04-17)[2021-11-02]. http://swj.tj.gov.cn/xwzx_17135/tpxw/202012/t20201212_4940206.html.
- [29] 天津市人民代表大会. 天津市引滦水源污染防治管理条例[EB/OL]. (2011-02-05)[2021-11-02]. <http://www.npc.gov.cn/npc/c1193/201102/acc54895d1ad4c688ac567de446579c8.shtml>. The Tianjin Municipal People's Congress. Regulations of Tianjin on prevention and control of water source pollution from Luanhe River[EB/OL]. (2011-02-05)[2021-11-02]. <http://www.npc.gov.cn/npc/c1193/201102/acc54895d1ad4c688ac567de446579c8.shtml>.
- [30] 天津市水务局. 市水务局、蓟县人民政府关于联合成立于桥水库水资源保护工作领导小组的通知[EB/OL]. (2009-09-14)[2021-11-02]. http://swj.tj.gov.cn/zwgk_17147/zcwj/swjwj/202012/t20201213_4957088.html. Tianjin Water Bureau. Notice of Jixian People's Government and Municipal Water Resources Bureau on the joint establishment of Yuqiao Reservoir Water Resources Protection Leading Group[EB/OL]. (2009-09-14)[2021-11-02]. http://swj.tj.gov.cn/zwgk_17147/zcwj/swjwj/202012/t20201213_4957088.html.
- [31] 中国水网. 《天津市打好水源保护攻坚战三年作战计划(2018—2020年)》发布[EB/OL]. (2018-08-22)[2021-11-03]. <https://www.h2o-china.com/news/279596.html>. China's Water. A Three-year Battle Plan for Water Protection in Tianjin (2018—2020) was released[EB/OL]. (2018-08-22)[2021-11-03]. <https://www.h2o-china.com/news/279596.html>.
- [32] 李泽利, 罗娜, 苏德岳, 等. 基于GWLF模型的于桥水库流域氮磷负荷估算及来源变化解析[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 63–71. LI Z L, LUO N, SU D Y, et al. Load estimation and source variation analysis of nitrogen and phosphorus for the Yuqiao Reservoir watershed based on the GWLF model[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(1): 63–71.
- [33] 张淼. 于桥水库周边区域污染负荷分布特征研究[D]. 天津: 天津大学, 2013: 52–56. ZHANG M. Study on contaminant load distribution characteristics at the peripheral areas of Yuqiao Reservoir[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013: 52–56.