

伊犁河三角洲水资源条件变化对景观格局演变的影响

陈启慧¹, 纪璐¹, 李琼芳^{1,2}, 白浩男³, 韩幸焯¹, 姚佳¹, 崔罡¹, 周正模¹, 杨坤凡¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098;
3. 长江水利委员会水文局, 湖北 武汉 430010)

摘要:在分析 1992—2020 年伊犁河三角洲水资源条件和定量评估研究期内土地利用变化的基础上,选取景观类型水平和景观水平指数解析景观格局变化特征,采用皮尔逊相关系数分析了水资源条件变化对景观格局指数的影响。结果表明:乌斯热尔玛水文站年径流总体偏大,巴尔喀什湖年平均水位在 2002 年发生突变,三角洲水资源补给总体处于增加状态;湿地和稀疏植被面积增大且聚集性增强,裸地向稀疏植被转化且优势度不断下降,林地破碎程度剧烈;景观水平指数在时程上呈阶段性变化,2016 年伊犁河三角洲破碎化程度最低,在空间上伊犁河沿岸连通性增强,巴尔喀什湖沿岸景观多样性增加;景观水平指数与巴尔喀什湖年平均水位相关性最高,与乌斯热尔玛水文站年径流量的相关性次之,与伊犁河三角洲年降水量的相关性最低,且景观水平指数对三角洲水资源条件变化存在迟滞响应。

关键词:景观格局;水资源;移动窗口法;土地利用;伊犁河三角洲

中图分类号:TV11;P901 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2024)02-0090-10

Influence of water resources condition changes on landscape pattern evolution in the Ili River Delta//CHEN Qihui¹, JI Lu¹, LI Qiongfang^{1,2}, BAI Haonan³, HAN Xingye¹, YAO Jia¹, CUI Gang¹, ZHOU Zhengmo¹, YANG Kunfan¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Green Development, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: The changes of water resources conditions in the Ili River Delta were analyzed, and land use changes during the study period were quantitatively evaluated. The change characteristics of landscape pattern were analyzed by using the landscape pattern indexes, including the landscape type level index and landscape level index, and the influence of water resources condition changes on the landscape pattern indexes was analyzed with the Pearson correlation coefficient. The results show that the volume of annual runoff at the Uskarma Hydrological Station was relatively large, the average annual water level of Balkhash Lake changed abruptly in 2002, and the water resources recharge in the delta was generally increasing. The areas of wetland and sparse vegetation increased, with the increase of their aggregation, the bare land was gradually transformed into sparse vegetation, with continuous decrease of its landscape dominance, and the fragmentation degree of forest was severe. Landscape level index showed a phased change in time course, and the fragmentation degree of the Ili River Delta was the lowest in 2016. Spatially, the landscape level index showed a gradual increase in connectivity along the Ili River, and the diversity increased along Balkhash Lake. The correlation of the landscape level index with the annual average water level of Balkhash Lake is the highest, followed by the correlation with the annual runoff at the Uskarma Hydrological Station, and the correlation with the annual precipitation in the Ili River Delta is the lowest. Furthermore, the landscape level index had a hysteresis response to the change of water resources conditions in the delta.

Key words: landscape pattern; water resources; moving window method; land use; Ili River Delta

伊犁河是新疆境内水量最大的一条跨中国与哈萨克斯坦的国际河流,流域内水资源主要来自我国。伊犁河三角洲由伊犁河注入巴尔喀什湖冲击形成,是中亚干旱区唯一保存较完好的重要而独特的生态系统,于 2012 年 2 月列入《拉姆萨尔公约》,是许多稀有物种包括全球濒危物种的栖息地^[1]。自 20 世

基金项目:新疆维吾尔自治区寒旱区水资源与生态水利工程研究中心(院士专家工作站)合作研究项目(2020. E-001,2020. E-002,2020. E-004);中央高校基本科研业务费专项经费资助项目(B210204024,B210204025,B210204026)
作者简介:陈启慧(1974—),女,副教授,博士,主要从事生态水文与国际河流研究。E-mail:Chenqh@hhu.edu.cn
通信作者:李琼芳(1966—),女,教授,博士,主要从事水文水资源与生态水文学研究。E-mail:qfli@hhu.edu.cn

纪 60 年代以来,在气候变暖、过度放牧和灌溉用水持续增加等因素的作用下,同样位于中亚干旱区的咸海日趋干涸,湖泊水位急剧下降,导致周边三角洲沙化和盐渍化加重,土地利用类型发生转变,景观结构和功能遭到破坏,三角洲的生态服务价值下降^[2]。中亚干旱区是全球水资源系统和生态系统最脆弱的地区之一,其跨界河流地区的土地利用变化和水资源利用问题往往是各国矛盾的焦点^[3-4]。与咸海流域的阿姆河三角洲^[2,5]和锡尔河三角洲^[6]相比,伊犁河三角洲受人类活动直接干扰和土地利用政策变化的影响相对较小^[7-8],其景观格局的变化主要取决于三角洲的顶端来水和巴尔喀什湖的水位变化^[5,9-10]。在气候变化及人类活动影响下,伊犁河径流量及巴尔喀什湖水位等水资源条件发生变化。王正等^[11-12]研究表明,气候变化和人类活动使伊犁河入三角洲水量波动,1987—2015 年巴尔喀什湖水位呈现显著上升趋势。国内外学者针对伊犁河三角洲景观格局变化也开展了相关研究,郑青华等^[13]利用 CA-Markov 模型研究了 1975 年、1990 年、2000 年和 2007 年伊犁河三角洲景观格局的时空演变特征,并对未来景观格局情景进行了预测;罗格平等^[14]基于这 4 年的土地覆被遥感影像,分析了景观结构的干扰源和影响因素;Laishkanov 等^[15]通过 1979 年和 2019 年 Landsat 数据发现三角洲植被覆盖景观减少了 12%,湖泊变为盐沼,1979—2019 年非盐渍土的体积减小了 41.3%。目前,国内外学者多基于个别代表年份讨论早期伊犁河三角洲的景观格局变化,定性分析影响三角洲景观演化的自然和人为因素,未见基于长序列数据资料开展伊犁河三角洲景观格局的时空演变规律分析和水资源条件变化对景观格局演变的影响研究。

本文选取 1992—2020 年伊犁河三角洲水资源和土地利用数据,分析三角洲水资源补给关键影响因素变化,解析三角洲景观时空演变规律,进而揭示水资源条件变化下的三角洲景观格局演变特征。研究成果可为伊犁河流域水资源科学管理及三角洲生态保护提供依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

伊犁河三角洲(图 1)位于哈萨克斯坦东南部和巴尔喀什湖的西南部(45°20′~46°15′N,74°00′~76°30′E),研究中提取的伊犁河三角洲面积为 7 808 km²,三角洲内水系空间分布表现出明显的水文梯度,伊犁河主河道在距巴尔喀什湖约 105 ~

130 km 处被划分为向西和西北发散的三角洲河道扇。日杰利河水系是 20 世纪末三角洲冲淤工程后形成的主要水系,伊犁河支流随着河道泥沙淤积逐渐成为三角洲的次要水系,而只有当伊犁河水位较高时在托帕尔河水系中才能观察到径流^[16]。伊犁河三角洲属于温带干旱气候,年均气温 5.6℃,季节分明,夏季最高温度为 45℃,冬季最低温度为 -45℃;年平均降水量在 130 ~ 150 mm 之间,变幅较小^[13-14,16];多年平均年蒸发量为 22.64 亿 m³。伊犁河三角洲是巴尔喀什湖流域生态系统的重要组成部分。

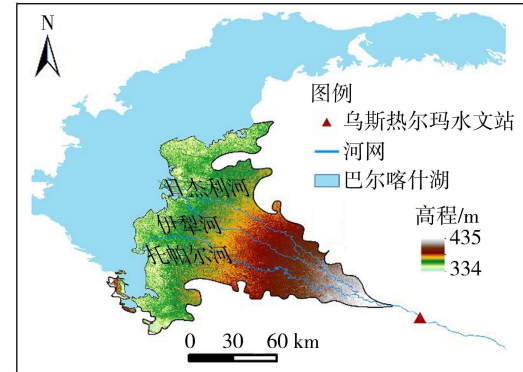


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源与处理

1.2.1 水资源数据

1992—2020 降水数据来自欧洲中期天气预报中心第五代全球大气再分析数据集 ERA5-Land^[17],其原始空间分辨率为 0.1°×0.1°,综合运用数理统计法和 ArcGIS 重采样技术,将各要素数据的时空尺度分别调整为年尺度和 1 km×1 km。巴尔喀什湖 1992—2020 年水位数据来自 Hydroweb 平台(<http://hydroweb.theia-land.fr/>),经处理得到巴尔喀什湖 1992—2020 年逐年平均水位数据。1992—2020 年伊犁河三角洲顶端乌斯热尔玛水文站年径流量数据和 1975—2005 年伊犁河三角洲生态耗水数据分别来自 Cao 等^[18]和 Dostay 等^[9]的研究。

1.2.2 土地利用数据

土地利用/覆被数据源于欧洲航天局气候变化协议与哥白尼气候变化服务局提供的全球 300 m 分辨率土地利用数据(CCI-LC 和 C3S-LC),此数据在中亚地区的准确性和实用性已得到验证^[12,19]。本文利用 ArcGIS 重采样技术将空间尺度调整为 1 km×1 km,并结合一级土地利用分类^[20]和欧洲航天局原始土地利用分类。考虑到伊犁河三角洲区域无城镇分布的特点,将伊犁河流域土地利用类型划分为草地、灌丛、林地、裸地、农田、湿地、水体和稀疏植被共 8 种类型。

2 研究方法

2.1 三角洲水资源补给的关键影响因素变化特征分析

对伊犁河三角洲年降水量、乌斯热尔玛水文站年径流量和巴尔喀什湖年平均水位数据变化进行分析,并采用累计距平法对巴尔喀什湖年平均水位进行突变分析,探讨研究期内伊犁河三角洲水资源演变规律。

2.2 景观格局计算及其变化规律分析

景观格局主要指构成景观的土地利用/土地覆被类型的形状、比例和空间配置,景观格局指数是景观格局分析的主要工具。其中,景观类型水平指数反映不同景观类型的特征,景观水平指数反映景观整体特征^[21]。土地利用分析不仅包括其面积时间变化分析,也涵盖空间分布变化分析,从源头上为景观水平指数和景观类型水平指数的变化分析提供依据。

2.2.1 土地利用分析

本文基于长序列土地利用遥感数据分析不同土地类型面积的时程变化;借助马尔科夫矩阵分析2020年相对于1992年土地利用类型在空间上的转移方向及变化情况。

2.2.2 景观格局指数选取与分析计算

本文景观格局指数的计算对于研究景观的生态过程和功能变化具有重要意义^[22],为反映伊犁河三角洲不同景观结构构成和空间配置等特征,定量描述了1992—2020年伊犁河三角洲景观类型水平指数和景观水平指数的时程变化规律。景观格局指数参考前人相关研究^[22-23]选择,见表1。

采用Fragstats4.2中移动窗口法^[24]生成景观格局指数栅格图。该方法要求选择合适的窗口半径,通过对2、4、5、6 km的窗口进行调试,选择4 km窗口范围展示三角洲的景观水平指数,并在Fragstats 4.2中进行计算。

2.3 景观格局变化与水资源补给关键影响因素相关关系分析

景观格局是生态过程的载体,而生态过程包含众多影响景观格局的驱动因素,二者不可分割^[25-26]。本文利用SPSS软件计算景观格局指数与巴尔喀什湖年平均水位、乌斯热尔玛水文站年径流量、伊犁河三角洲年降水量之间的皮尔逊相关系数,分析景观格局与水资源条件的相关关系。

3 结果与分析

3.1 水资源补给关键影响因素演变规律

伊犁河三角洲的水资源补给主要为伊犁河三角洲降水、乌斯热尔玛水文站径流、巴尔喀什湖的侧向补给,而伊犁河入湖水量是巴尔喀什湖水量的主要收入项。伊犁河入湖水量在很大程度上取决于乌斯热尔玛水文站的径流量,同时也受三角洲生态耗水的影响。

20世纪70—80年代乌斯热尔玛水文站多年平均径流量明显低于研究期(1992—2020年),如图2(a)所示,其1975—1991年多年平均径流量(122.2亿m³)显著小于1992—2020年的值(137.7亿m³)。根据Dostay等^[9]的研究,生态耗水量随着乌斯热尔玛水文站径流量的增加而增加,但其平均增幅小于乌斯热尔玛水文站径流量。鉴于伊犁河年入湖水量(由乌斯热尔玛水文站的径流量与三角洲生态耗水量的差值进行初步估算)与巴尔喀什湖水位变化量具有显著的相关关系^[11],针对研究期内不同阶段分析伊犁河年入湖水量和巴尔喀什湖年平均水位(图2(b))的变化特点。1992—2002年,乌斯热尔玛水文站年径流量呈上升趋势,2002年的径流量比1992年增加了56.5%,伊犁河入湖径流量也呈增加趋势,由1992年的92.8亿m³增至2002年121.5亿m³,导致巴尔喀什湖年平均水位呈现上升趋势;2002年后乌斯热尔玛水文站年径

表1 景观格局指数及其生态学含义

Table 1 Landscape pattern indexes and their ecological meanings

景观格局指数	尺度	含义
斑块密度	类型水平/景观水平	反映景观单位面积上的异质性
平均斑块面积	类型水平/景观水平	代表景观生态平均状况,反映景观破碎程度
最大斑块面积指数	类型水平	有助于确定景观优势类型等,反映人类活动方向和影响的强弱
景观形状指数	类型水平	反映景观斑块形状规则程度
结合度指数	类型水平	反映斑块在景观中聚集、分散的程度和自然景观连接程度
散布与并列指数	类型水平	显著反映受自然条件严重制约的生态系统分布特征
蔓延度指数	景观水平	反映景观中不同斑块类型的聚集程度或延展趋势
聚合度指数	景观水平	反映景观斑块间连通性
香农多样性指数	景观水平	反映景观异质性,对各景观类型非均衡分布状况比较敏感
香农均匀度指数	景观水平	反映景观异质性,比较景观不同时期多样性变化程度,反映不同斑块类型在其数目或面积上的均匀程度

流虽然呈下降趋势,但2003—2005年期间伊犁河流经三角洲后平均入湖水量(118.8亿 m^3)明显高于1992—2002年的多年平均值(108.8亿 m^3),使得巴尔喀什湖年水量收入仍高于其包括蒸发在内的水量支出^[11],巴尔喀什湖水位继续上升至2005年的局部最高水位342.9 m,且上升速率自2002年显著增加,通过计算湖泊水位变化的累计距平发现其突变发生在2002年;2006—2020年乌斯热尔玛水文站多年平均径流量(128.8亿 m^3)略低于1975—2020年的多年平均值(132.0亿 m^3),明显低于2003—2005年的多年平均值,导致巴尔喀什湖水位未能呈现出继续上升趋势,但由于水位基数高,且乌

斯热尔玛水文站径流未出现明显的下降或上升趋势,因此,巴尔喀什湖水位随来水量波动,在高水位342.4~343.0 m之间变化,总体上变化比较平稳。此外,研究期内伊犁河三角洲多年平均降水量(177.1 mm)较小,降水基本不产流,且年际变化相对稳定。

3.2 景观格局时空演变

3.2.1 土地利用/覆被变化特征

1992—2020年伊犁河三角洲土地利用及覆被变化情况见图3,其中图3(c)中仅给出了转换面积大于20 km^2 的土地利用转换类型。如图4所示,研究期内伊犁河三角洲湿地、稀疏植被、草地、水体、农

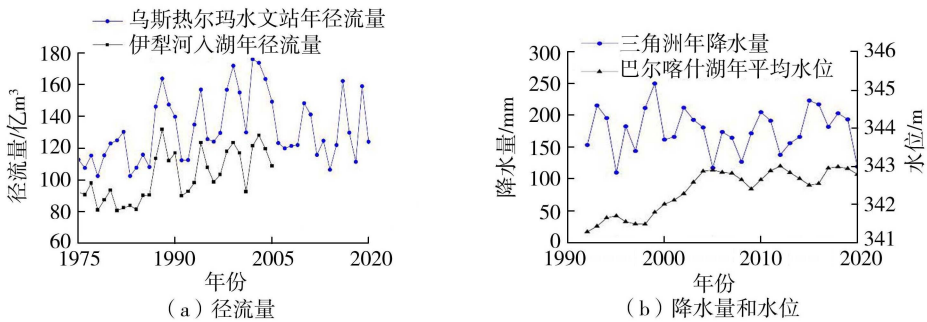


图2 伊犁河三角洲水资源条件变化
Fig.2 Trend of water resources conditions in the Ili River Delta

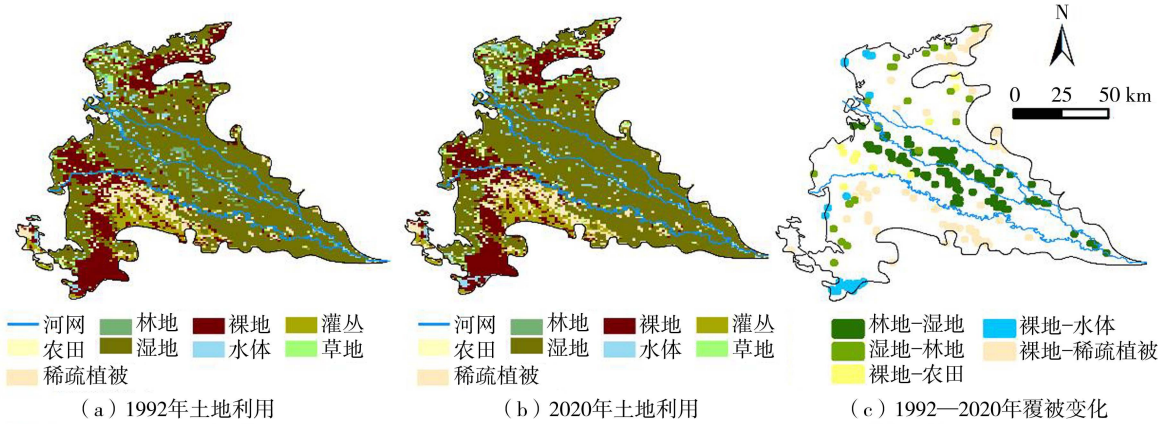


图3 1992—2020年伊犁河三角洲土地利用与覆被变化
Fig.3 Land use and its change in the Ili River Delta from 1992 to 2020

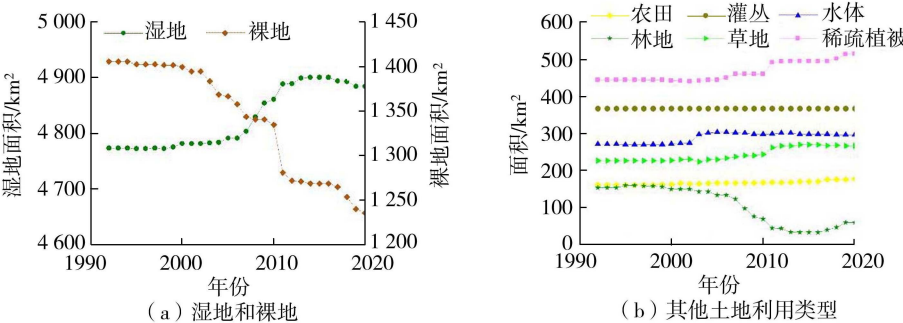


图4 1992—2020年伊犁河三角洲各土地利用类型面积变化
Fig.4 Land use area change in the Ili River Delta from 1992 to 2020

田呈增加趋势,面积较期初分别增加 111、72、40、25、16 km²;裸地和林地面积呈减少趋势,期末分别减少了 170、94 km²,研究期内裸地为最主要变化形式;灌丛的面积相对稳定,研究期内未发生变化。

1992—2020 年伊犁河三角洲裸地面积减少最为显著,裸地主要转化为稀疏植被、草地和水体。林地与湿地面积转化频繁,至研究期末共有 100 km²林地转化为湿地,林地面积减少为原面积的 39%,湿地的优势逐渐上升。如图 3(c)所示,土地利用转换频繁区主要分布在伊犁河两岸和不同土地利用类型的交界地带,河流纵向上表现为林地向湿地转化,横向上表现为裸地向其他土地利用类型转化;总体上伊犁河三角洲的植被面积(湿地、林地、草地、稀疏植被、灌丛面积之和)增加。

3.2.2 景观类型水平指数时程变化特征

图 5 反映了研究期内景观类型水平指数的变化情况。斑块密度和平均斑块面积不仅反映了景观的异质性,其值与斑块的破碎度也呈一定的相关关系。研究期内草地、农田、水体斑块密度呈上升趋势,平均斑块面积变化较为平稳,景观无破碎化发生。裸地和林地平均斑块面积呈下降趋势,意味着其发生破碎化现象;裸地和林地斑块密度下降也可能导致部分区域异质性的降低。

研究期内湿地最大斑块面积指数在所有土地利用类型中优势度进一步增强,大面积斑块更有利于湿地内部具有较为稳定的内部环境,对生境敏感物

种、地下蓄水层和湖泊水质均具有保护作用。镶嵌分布的草地、林地、农田、水体斑块面积较为均匀,没有主要优势区。灌丛主要分布在三角洲的西南部,林地镶嵌在湿地中,二者相邻的土地利用类型少,景观形状指数值更低,其形状有利于内部保蓄能量、养分和生物,而过渡区的其他土地利用类型斑块形状复杂,景观形状指数值相对较大,更易于促进其内部与外界环境的相互作用。

三角洲各土地利用类型的空间分布与水系密切相关,由于三角洲内水系分布影响,各土地利用类型彼此邻近,散布与并列指数值较高。尤其湿地面积占三角洲总面积的 60% 左右,地处三角洲中心,临近其他土地利用类型,散布与并列指数值最高。2010 年后湿地边缘部分转化为林地,林地面积逐渐恢复,其相邻景观类型丰富度有所增加。结合度指数反映景观中某一斑块类型聚集程度,灌丛、裸地、湿地、稀疏植被结合度指数超过 70%,说明其斑块聚集分布。林地结合度指数呈下降趋势,林地聚集程度降低、逐渐分散。

3.2.3 景观水平指数时空变化特征

斑块密度和平均斑块面积反映景观的异质性程度,蔓延度和聚合度指数反映不同景观类型的聚集状态,香农多样性指数和香农均匀度指数反映景观水平的多样性。从 6 个指数的内涵和生态意义来看,斑块密度、香农多样性指数、香农均匀度指数与景观破碎化程度呈正相关关系,平均斑块面积、蔓延

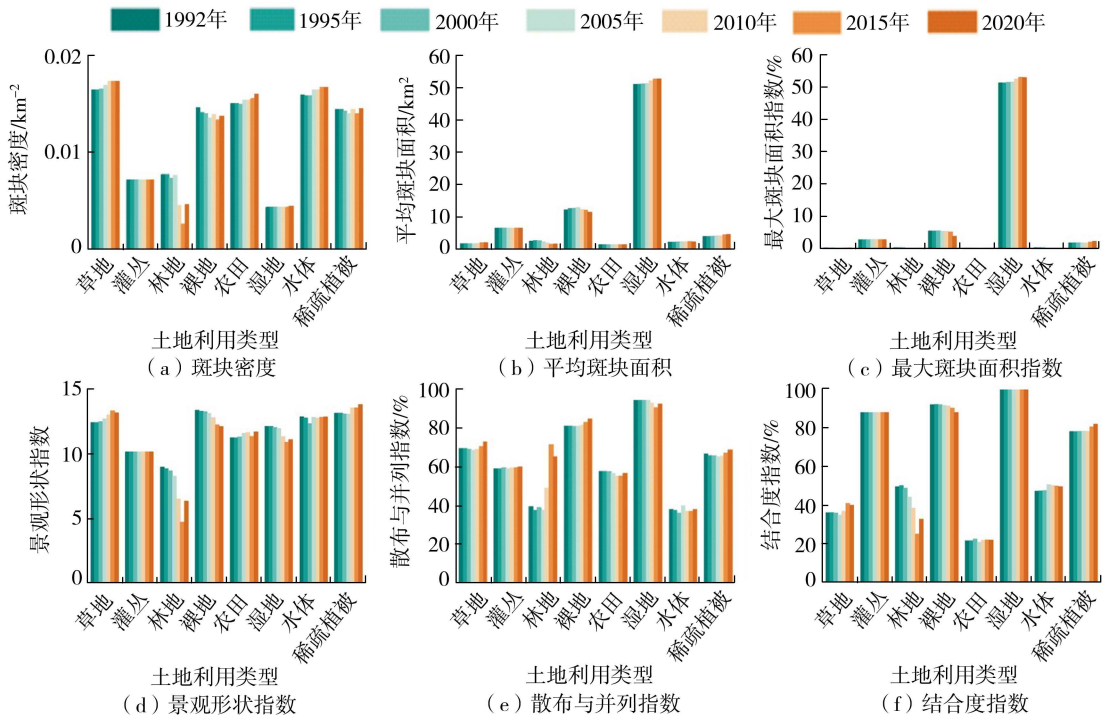


图 5 景观类型水平指数变化

Fig. 5 Changes of landscape type level indexes

度指数、聚合度指数与景观破碎化程度呈负相关关系。

从图 6 可以看出,景观水平指数变化呈现一定的阶段性,1992—2007 年相对稳定,2007—2016 年向景观多样性减小、空间连通性增强、景观聚集的方向发展,2016—2020 年又向反方向演化。总体而言,研究期内斑块密度值减小,平均斑块面积值增大,斑块数目总和减少。平均斑块面积增大,景观稳定性增强,更有利于保护对生态环境破碎化敏感的物种;蔓延度指数和聚合度指数增大,部分离散斑块聚集,向连通性增强方向发展,有利于斑块间的能量流动、物质交换和生物迁移;香农多样性指数和香农均匀度指数值减小,景观多样性减少,三角洲景观组成复杂程度降低,斑块分布的均匀程度亦增强。利用累积距平法对景观水平指数进行突变点检验,斑块密度、平均斑块面积突变点分别为 2008 年和 2009 年,其他各景观水平指数突变点均为 2007 年,由此可得,2007 年为伊犁河三角洲景观水平指数突变点,比巴尔喀什湖水位突变延迟了 5 年。为了验证突变点,将 1992—2020 年的连续时间序列以 2007 年为界,分为两个子时间序列,结合 K-S 检验法对两个子时间序列进行差异性检验。检验结果表明,斑块密度和平均斑块面积的 K-S 检验 Z 值均为 2.275,其他各景观水平指数的 K-S 检验 Z 值均为 2.625,各景观水平指数双尾显著性检验均低于 0.01,两个子时间序列差异显著,所得结果可靠。

图 7 所示的景观水平指数空间分布中,斑块密度、香农多样性指数和香农均匀度指数与平均斑块面积、蔓延度指数和聚合度指数的高值区空间分布大致相反。研究期内斑块密度、香农多样性指数和香农均匀度指数的高值区集中在巴尔喀什湖的湖岸和托帕尔河左岸,两区域是不同土地利用类型交界地带,土地利用类型复杂,裸地等土地利用类型的转化也使该区域斑块面积分布不均匀、景观异质性程度高、土地利用类型景观优势度低、斑块间连通能力弱。斑块密度、香农多样性指数和香农均匀度指数

低值区主要集中在伊犁河和日杰利河沿岸,该区域是湿地集中分布区,随着研究期内河流沿岸湿地的填充式发展,林地转化为湿地,景观聚集性增强,景观异质性降低。

3.3 水资源补给关键影响因素变化对景观格局的影响

为了分析水资源补给关键影响因素变化对景观格局演变的影响,本文计算了伊犁河三角洲年降水量、乌斯热尔玛水文站年径流量和巴尔喀什湖年平均水位与景观格局指数间的皮尔逊相关系数。

3.3.1 对景观类型水平指数的影响

图 8 为景观类型水平指数与不同水资源因素之间的皮尔逊相关系数,可以看出,各土地利用景观类型水平指数与巴尔喀什湖年平均水位相关性最高,与乌斯热尔玛水文站年径流量相关性次之,与伊犁河三角洲年降水量相关性最低。草地、湿地、稀疏植被等自然植被面积增长,三者平均斑块面积与巴尔喀什湖年平均水位呈正相关关系;裸地减少和部分林地转化为湿地导致二者斑块密度、平均斑块面积与巴尔喀什湖水位呈显著负相关关系。此外,草地、湿地、稀疏植被的面积增长在空间上存在差异,在伊犁河三角洲下游,草地和稀疏植被的面积增长增加了与其他土地利用类型的邻近程度,使得二者的散布与并列指数与巴尔喀什湖年平均水位呈正相关关系;在河流沿岸,湿地填充式发展降低了与林地等景观的邻近程度,其散布与并列指数与巴尔喀什湖年平均水位呈负相关关系。巴尔喀什湖水位升高对三角洲内水体影响尤为显著,水体的主要增长面积分布在巴尔喀什湖沿岸,其景观类型水平指数变化与水位相关性最高,尤其是水体最大斑块面积指数与水位的皮尔逊相关系数高达 0.916。

3.3.2 对景观水平指数的影响

表 2 给出了伊犁河三角洲水资源补给关键影响因素与景观水平指数间的皮尔逊相关系数。从表 2 可以看出,三角洲景观水平指数与巴尔喀什湖年平

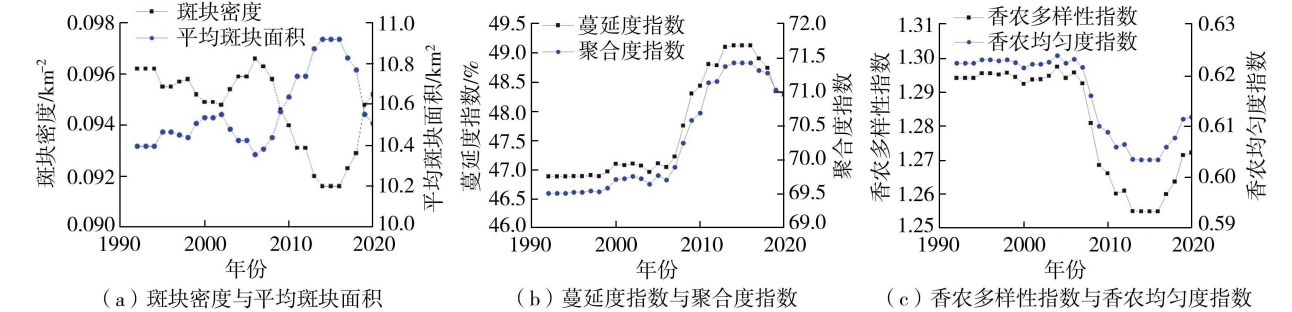


图 6 景观水平指数变化
Fig. 6 Changes of landscape level indexes

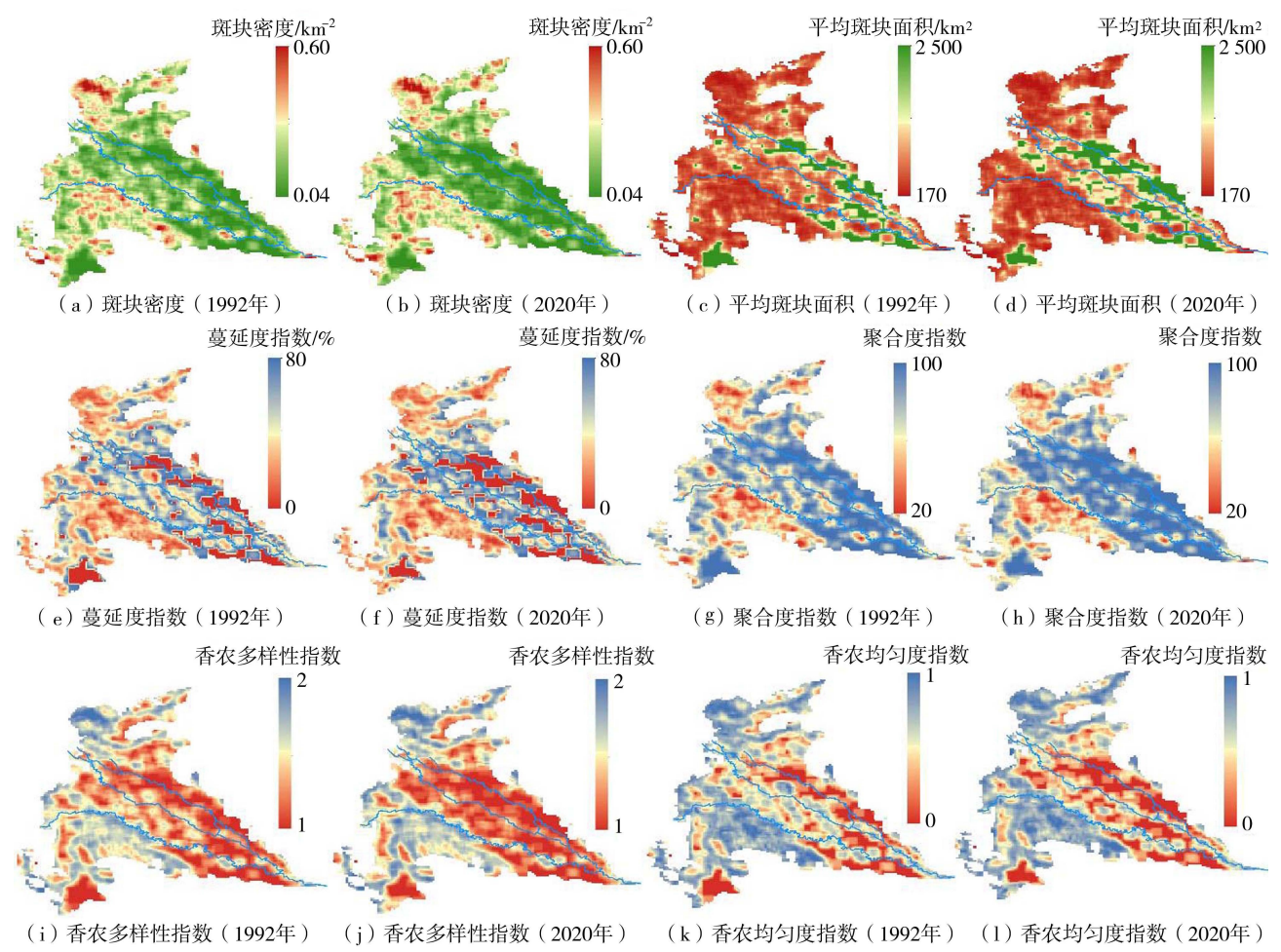


图 7 基于移动窗口的景观水平指数分布

Fig. 7 Landscape level index distribution based on moving windows

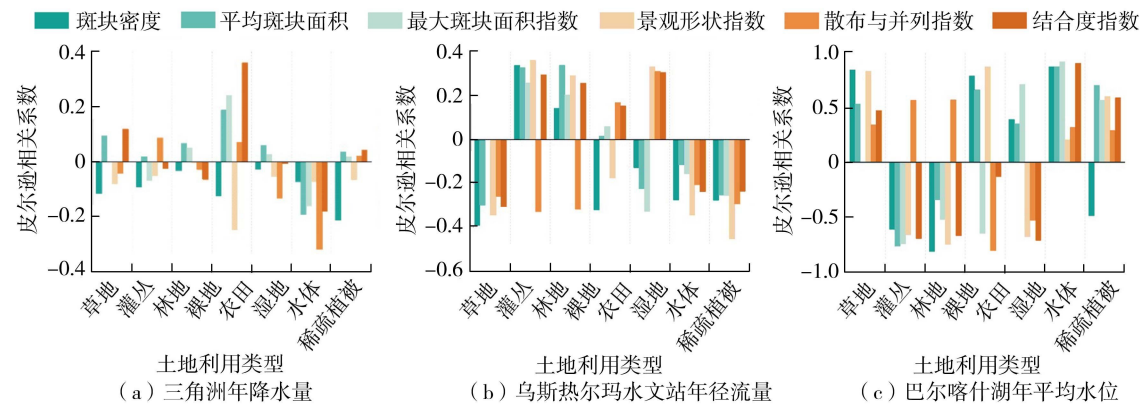


图 8 水资源补给关键影响因素与景观类型水平指数相关关系

Fig. 8 Correlation between key influencing factors of water resources recharge and landscape type level indexes

表 2 水资源补给关键影响因素与景观水平指数的皮尔逊相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficients between key influencing factors of water resources recharge and landscape level indexes

关键影响因素	斑块密度	平均斑块面积	蔓延度指数	聚合度指数	香农多样性指数	香农均匀度指数
三角洲年降水量	-0.219	0.224	0.081	0.064	0.093	0.095
乌斯热尔玛水文站年径流量	0.203	-0.206	-0.325	-0.319	0.337	0.334
巴尔喀什湖年平均水位	-0.457 *	0.454 *	0.647 **	0.680 **	-0.589 **	-0.589 **

注：**、* 分别表示在 0.01 和 0.05 级别(双尾)相关性显著。

均水位相关性最高。三角洲景观由不同景观类型构成,其景观水平指数是不同景观类型水平指数的综合结果。三角洲斑块密度的减小主要取决于林地和裸地斑块密度的减小,与巴尔喀什湖水位呈负相关关系;三角洲平均斑块面积的变化主要取决于草地、湿地、水体、稀疏植被平均斑块面积的变化。总体而言,三角洲平均斑块面积增大,其与巴尔喀什湖年平均水位呈正相关关系。从图 7 可以看出伊犁河三角洲景观水平指数存在显著的空间差异,伊犁河沿岸主要发生湿地填充式扩张,使得蔓延度指数、聚合度指数与巴尔喀什湖年平均水位呈正相关关系,而香农多样性指数、香农均匀度指数与巴尔喀什湖年平均水位呈负相关关系。

伊犁河三角洲景观格局在人为间接干扰和自然因素影响下发生演化^[13],考虑生态系统的时间延迟效应,将伊犁河三角洲水资源变化与景观水平指数进行年际尺度滞后响应分析发现,虽然表 2 中景观水平指数与三角洲年降水量、乌斯热尔玛水文站年径流量在时间序列上相关性未达到显著性水平,但景观水平指数对乌斯热尔玛水文站年径流存在 2 ~ 4 a 迟滞响应,而对巴尔喀什湖年平均水位存在 3 ~ 5 a 迟滞响应,考虑时间延迟效应后两者与景观水平指数相关性均明显提高(图 9)。

4 讨 论

1992—2020 年伊犁河三角洲景观格局的时空变化分析结果表明,伊犁河沿岸景观连通性呈增强趋势、巴尔喀什湖沿岸景观丰富度呈增大趋势。该结论与郑青华等^[13-14,16]的研究结论一致。为了探究景观格局演变的重要驱动力,对研究区水资源条件变化及其与景观格局指数相关性的分析是直观的研究手段^[27]。孟焕等^[28]研究指出,湿地生态系统对气候变化的响应需要综合考虑不同水源补给项的影响。本文研究表明伊犁河三角洲景观水平指数变化与三角洲年降水量的相关性较低,Mukhitdinov 等^[10]研究也表明,伊犁河三角洲生态环境变化与本地降水量关联不大。伊犁河三角洲景观水平指数变化与巴尔喀什湖年平均水位相关性较高,其他内陆湖如咸海水位急剧下降后,其三角洲沙化和盐渍化加重,尤其在阿姆河三角洲,其景观生态风险增加^[2],博斯腾湖水位的变化也导致西岸湖滨湿地景观状态的变化^[29],这些都说明内陆河流三角洲的生态演变与其尾间湖的水位变化密切相关。此外,许多生态过程的因果之间或者对自然生态系统的干扰及其生态反应之间的时间常常超过 1a^[30],本文的景观格局指

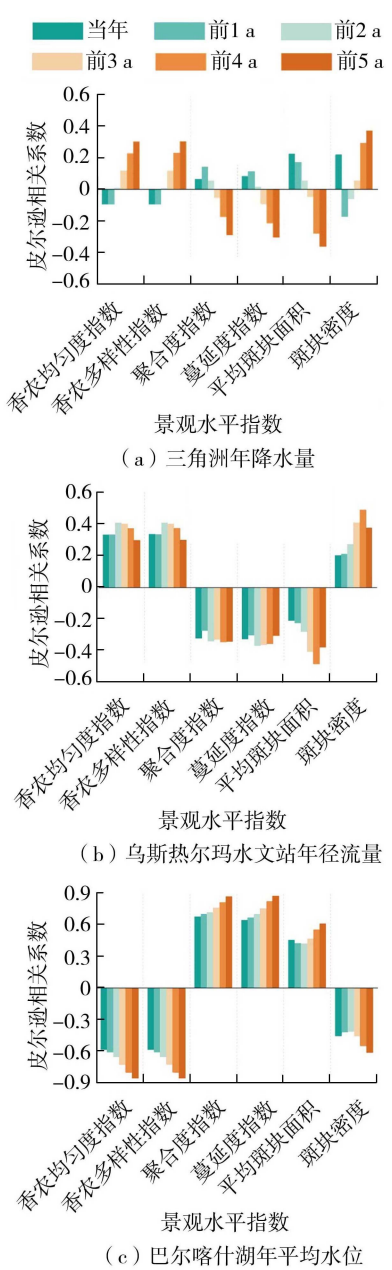


图 9 景观水平指数对水资源补给关键影响因素年际尺度滞后响应分析结果

Fig. 9 Interannual lagging response analysis results of landscape level indexes to key influencing factors of water resources recharge

数对水资源补给关键影响因素存在迟滞响应,生态系统的时间延迟效应也十分明显。

5 结 论

- a. 1992—2002 年乌斯热尔玛水文站径流和巴尔喀什湖水位均呈上升趋势;2003—2005 年乌斯热尔玛水文站径流呈下降趋势,巴尔喀什湖水位保持上升趋势;2006—2020 年巴尔喀什湖水位随来水变化,在高水位 342.3 ~ 343.0 m 之间波动。
- b. 研究期内主要土地利用变化表现为伊犁河

沿岸林地转化为湿地和巴尔喀什湖沿岸裸地转化为稀疏植被。灌丛、裸地、湿地、稀疏植被存在集中分布区,灌丛、湿地、稀疏植被在研究期内景观优势度高,斑块聚集分布,湿地扩张趋势显著,稀疏植被次之;部分裸地转化为其他土地利用类型,优势度不断下降。镶嵌分布的草地、农田、水体面积增加,斑块密度增加;镶嵌分布的林地景观类型水平指数强烈波动,破碎程度剧烈。

c. 景观水平指数变化呈阶段性,1992—2007 年相对稳定;2007 年后向景观多样性减小、空间连通性增强、景观聚集的方向发展;2016 年破碎化程度最低、景观聚集性最强、完整性最好;研究期末三角洲内斑块数目减少、景观内连通性增强、景观异质性降低。景观格局空间分布在三水系中存在明显差异,日杰利河沿岸景观结构完整性最强,伊犁河沿岸景观连通性逐渐增强且景观复杂度降低,托帕尔河左岸多斑块交织且景观异质性高;在横向分布中,巴尔喀什湖沿岸,尤其在三角洲西南和东北部,裸地景观优势度降低,趋向均衡化。

d. 三角洲水资源补给总体处于增加状态,促进了林地向湿地、裸地向稀疏植被的转化。景观水平指数与巴尔喀什湖年平均水位相关性最高,与乌斯热尔玛水文站年径流量的相关性次之,与伊犁河三角洲年降水量的相关性最低。此外,景观水平指数对乌斯热尔玛水文站年径流量和巴尔喀什湖年平均水位分别存在 2~4 a 和 3~5 a 的迟滞响应。

参考文献:

[1] DU Zhiqiang,LI Wenbo,ZHOU Dongbo,et al. Analysis of Landsat-8 OLI imagery for land surface water mapping [J]. Remote Sensing Letters,2014,5(7):672-681.

[2] YU Tao,BAO Anming,XU Wenqiang,et al. Exploring variability in landscape ecological risk and quantifying its driving factors in the Amu Darya Delta[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019,17(1):79.

[3] 杨恕,王婷婷. 中亚水资源争议及其对国家关系的影响 [J]. 兰州大学学报(社会科学版),2010,38(5):52-59. (YANG Shu,WANG Tingting. On the impact of water resources dispute on international relations[J]. Journal of Lanzhou University (Social Sciences),2010,38(5):52-59. (in Chinese))

[4] 何大明,苟俊华,KUNG H T. 国际河流(湖泊)水资源的竞争利用、冲突和求解[J]. 地理学报,1999,54(增刊 1):38-46. (HE Daming,GOU Junhua,KUNG H T. Competitive utilization, conflicts and solutions of water

resources in international rivers (lakes) [J]. Acta Geographica Sinica, 1999, 54 (Supl):38-46. (in Chinese))

[5] 王玉娟,国冬梅. 中哈界河伊犁河流域生态环境演变及其驱动力[J]. 欧亚经济,2016(4):100-107. (WANG Yujuan, GUO Dongmei. The evolution of ecological environment of Ili River drainage area and the driving force behind it[J]. Journal of Eurasian Economy, 2016 (4):100-107. (in Chinese))

[6] 张久丹,李均力,包安明,等. 1962—2019 年锡尔河-咸海三角洲湿地时空变化及驱动因素[J]. 水科学进展, 2021,32(4):587-596. (ZHANG Jiudan, LI Junli, BAO Anming, et al. Spatio-temporal changes and driving factors of wetlands in the delta of the Syr Darya River-Aral Sea during 1962-2019[J]. Advances in Water Science,2021, 32(4):587-596. (in Chinese))

[7] KIPSHAKBAEV N K, ABDRASIOLOV S A. Effect of economic activity on the hydrologic regime and dynamics of the Ili Delta[J]. Hydrotechnical Construction,1994,28 (8):416-420.

[8] KEZER K, MATSUYAMA H. Decrease of river runoff in the Lake Balkhash Basin in Central Asia[J]. Hydrological Processes,2006,20(6):1407-1423.

[9] DOSTAY Z H, ALIMKULOV S, MYRZAKHMETOV A. Modern state of the wetland ecosystem of Ili River Delta [J]. International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology,2017,4(10):4730-4741.

[10] MUKHITDINOV A, NURTAZIN S, ALIMOVA S, et al. The transformation of ecosystems of the Ili River Delta (Kazakhstan) under the flow regulation and climate change [J]. Applied Ecology and Environmental Research,2020,18(2):2483-2498.

[11] 王正,黄粤,刘铁,等. 近 60a 巴尔喀什湖水量平衡变化及其影响因素[J]. 干旱区研究,2022,39(2):400-409. (WANG Zheng, HUANG Yue, LIU Tie, et al. Analyzing the water balance of Lake Balkhash and its influencing factors[J]. Arid Zone Research,2022,39(2):400-409. (in Chinese))

[12] 段伟利,邹珊,陈亚宁,等. 1879—2015 年巴尔喀什湖水位变化及其主要影响因素分析[J]. 地球科学进展, 2021,36(9):950-961. (DUAN Weili,ZOU Shan,CHEN Yaning, et al. Analysis of water level changes in Lake Balkhash and its main influencing factors during 1879-2015[J]. Advances in Earth Science,2021,36(9):950-961. (in Chinese))

[13] 郑青华,罗格平,朱磊,等. 基于 CA_Markov 模型的伊犁河三角洲景观格局预测[J]. 应用生态学报,2010,21 (4):873-882. (ZHENG Qinghua,LUO Geping,ZHU Lei,

- et al. Prediction of landscape patterns in Ili River Delta based on CA _ Markov model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21 (4) : 873-882. (in Chinese))
- [14] 罗格平,王渊刚,朱磊,等. 伊犁河三角洲景观结构的影响机制研究[J]. 干旱区地理, 2012, 35 (6) : 897-908. (LUO Geping, WANG Yuangang, ZHU Lei, et al. Influence mechanism of landscape structure in River Ili Delta[J]. Arid Land Geography, 2012, 35 (6) : 897-908. (in Chinese))
- [15] LAISKHANOV S U, POSHANOV M N, SMANOV Z M, et al. A study of the processes of desertification at the modern delta of the Ili River with the application of remote sensing data[J]. Journal of Ecological Engineering, 2021, 22 (3) : 169-178.
- [16] 谢蕾,龙爱华,邓铭江,等. 伊犁河下游三角洲生态耗水研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33 (6) : 1330-1340. (XIE Lei, LONG Aihua, DENG Mingjiang, et al. Study on ecological water consumption in delta of the lower reaches of Ili River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33 (6) : 1330-1340. (in Chinese))
- [17] MUÑOZ-SABATER J, DUTRA E, AGUSTÍ-PANAREDA A, et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications [J]. Earth System Science Data, 2021, 13 (9) : 4349-4383.
- [18] CAO Yijie, MA Yonggang, LIU Tie, et al. Analysis of spatial-temporal variations and driving factors of typical tail-reach wetlands in the Ili-Balkhash Basin, Central Asia [J]. Remote Sensing, 2022, 14 (16) : 3986.
- [19] 阮宏威,于静洁. 1992—2015 年中亚五国土地覆盖与蒸散发变化[J]. 地理学报, 2019, 74 (7) : 1292-1304. (RUAN Hongwei, YU Jingjie. Changes in land cover and evapotranspiration in the five Central Asian countries from 1992 to 2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74 (7) : 1292-1304. (in Chinese))
- [20] LI Jiangyue, CHEN Hongxing, ZHANG Chi, et al. Variations in ecosystem service value in response to land use/land cover changes in Central Asia from 1995-2035 [J]. PeerJ, 2019, 7 : e7665.
- [21] 谈娟娟,董增川,付晓花,等. 流域景观生态健康演变及其驱动因子贡献分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43 (2) : 107-113. (TAN Juanjuan, DONG Zengchuan, FU Xiaohua, et al. Analysis of watershed landscape ecological health evolution and contribution of driving factors[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43 (2) : 107-113. (in Chinese))
- [22] 吕乐婷,乔皓,郑德凤,等. 太子河流域景观格局时空演变及其对水源涵养的影响[J]. 水资源保护, 2023, 39 (6) : 111-120. (LYU Leting, QIAO Hao, ZHENG Defeng, et al. Spatial-temporal evolution of landscape pattern in the Taizi River Basin and its impact on water conservation [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (6) : 111-120. (in Chinese))
- [23] 彭娜,周立志. 基于地理探测器的菜子湖群湿地景观格局变化及驱动因子分析[J]. 水资源保护, 2021, 37 (6) : 168-176. (PENG Na, ZHOU Lizhi. Analysis of wetland landscape pattern variation and its driving factors of Caizi Lake group based on geodetector [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (6) : 168-176. (in Chinese))
- [24] 巩杰,孙朋,谢余初,等. 基于移动窗口法的肃州绿洲化与景观破碎化时空变化[J]. 生态学报, 2015, 35 (19) : 6470-6480. (GONG Jie, SUN Peng, XIE Yuchu, et al. Spatiotemporal change and landscape fragmentation in Suzhou Oasis using the moving window method [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35 (19) : 6470-6480. (in Chinese))
- [25] 傅伯杰. 黄土高原土地利用变化的生态环境效应[J]. 科学通报, 2022, 67 (32) : 3769-3779. (FU Bojie. Ecological and environmental effects of land-use changes in the Loess Plateau of China [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67 (32) : 3769-3779. (in Chinese))
- [26] 吕佳南,李常斌,武磊,等. 黑河和白河流域湿地变化及其归因分析[J]. 水资源保护, 2022, 38 (3) : 131-139. (LYU Jianan, LI Changbin, WU Lei, et al. Analysis on wetland change and its attribution in Heihe River and Baihe River basins [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (3) : 131-139. (in Chinese))
- [27] 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[J]. 生态学报, 2016, 36 (15) : 4780-4791. (ZHANG Min, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al. Landscape pattern change and the driving forces in Baiyangdian wetland from 1984 to 2014 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36 (15) : 4780-4791. (in Chinese))
- [28] 孟焕,王琳,张仲胜,等. 气候变化对中国内陆湿地空间分布和主要生态功能的影响研究[J]. 湿地科学, 2016, 14 (5) : 710-716. (MENG Huan, WANG Lin, ZHANG Zhongsheng, et al. Researches on the impacts of climate change on spatial distribution and main ecological functions of inland wetland ecosystem in China [J]. Wetland Science, 2016, 14 (5) : 710-716. (in Chinese))
- [29] 张皓. 基于 RS/GIS 的博斯腾湖西岸湖滨湿地景观演变研究[D]. 乌鲁木齐:新疆师范大学, 2017.
- [30] MORAN M S, PETERS D P C, MCCLARAN M P, et al. Long-term data collection at USDA experimental sites for studies of ecohydrology [J]. Ecohydrology, 2008, 1 (4) : 377-393.

(收稿日期: 2023 - 06 - 08 编辑: 施业)