北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

北洛河上游县域土地利用时空变化及其对水沙的影响

樊琳 魏天兴 张晓明 缪今典 李亦然

Spatiotemporal variation of land use in counties of the upper reaches of the Beiluo River and its impact on runoff and sediment

Fan Lin, Wei Tianxing, Zhang Xiaoming, Miao Jindian, Li Yiran

引用本文:
樊琳, 魏天兴, 张晓明, 缪今典, 李亦然. 北洛河上游县域土地利用时空变化及其对水沙的影响[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(2):95–104. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230121
Fan Lin, Wei Tianxing, Zhang Xiaoming, Miao Jindian, Li Yiran. Spatiotemporal variation of land use in counties of the upper reaches of the Beiluo River and its impact on runoff and sediment[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(2):95–104. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230121

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230121

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

河北坝上土地利用变化对生态服务价值的影响

Impacts of land use change on ecosystem service value in Bashang Area of Hebei Province, northern China

北京林业大学学报, 2019, 41(8): 94–104. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180244

基于Budyko理论定量分析窟野河流域植被变化对径流的影响

Quantitative assessment on the effects of vegetation changes on runoff based on Budyko theory in the Kuyehe River Basin of northern China

北京林业大学学报, 2020, 42(8): 61–71. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190330

晋西黄土区不同植被格局坡面产流产沙特征

Effects of different vegetation slope patterns on infiltration and characteristics of runoff and sediment production in the loess area of western Shanxi Province, northern China

北京林业大学学报, 2021, 43(3): 85–95. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190231

固沙植被景观格局变化及其影响因子

Landscape pattern change and its influencing factors of sand–binding vegetation

北京林业大学学报, 2020, 42(4): 102–112. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190061

基于ENVI技术的永定河段景观格局演变与优化研究

Evolution and optimization research on landscape pattern of Yongding River section of Beijing based on ENVI technology

北京林业大学学报, 2021, 43(6): 118–129. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200204

不同幅度景观格局与水分利用效率耦合研究

Coupling of landscape pattern and water use efficiency with different amplitudes: a case study of Qianyanzhou in eastern China

北京林业大学学报, 2019, 41(12): 88–95. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190081

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230121

北洛河上游县域土地利用时空变化及其对水沙的影响

樊 琳[1,2] 魏天兴[1,2] 张晓明[3] 缪今典[1,2] 李亦然[1,2]
（1. 北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站，北京 100083；
3. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室，北京 100048）

摘要:【目的】探究土地利用变化有利于识别水沙变化原因，对流域水土保持及生态保护政策的实施与改进具有指导意义。**【方法】**以黄土高原北洛河上游为研究区，基于 GEE 与 PIE-Engine 平台获取 1990—2020 年土地利用、植被覆盖度数据，从地类转移、植被覆盖度（FVC）、土地利用强度（LUI）及景观格局（平均斑块面积 AREA_MN、聚合度指数 AI、最大斑块指数 LPI、景观形状指数 LSI）4 方面描述北洛河上游各县域土地利用情况，并结合水沙数据探究土地利用与水沙的相关关系。**【结果】**（1）2000 年后北洛河上游农田向草地、森林转移，其面积减幅达 79.05%，其中“农田→森林”集中分布于吴起县东南部，“农田→草地”在定边县分布最为密集。（2）2000—2020 年流域 FVC 迅速增加，吴起县整体 FVC 高于定边县同期水平；定边县 LUI 变化较吴起县存在滞后性，但二者均在 2010—2020 年间明显下降。（3）2000 年前后年径流、输沙减少率分别为 46.68%、81.83%；2000—2020 年来沙系数 0.42 小于 1990—2000 年来沙系数 0.80。（4）FVC 与水沙量呈显著负相关，森林 AREA_MN、AI 分别与径流量、输沙量呈显著正相关，森林 LPI、LSI 与径流量、森林 LSI 与输沙量呈显著负相关。**【结论】**北洛河上游水沙与土地利用结构布局关系密切，不同县域地表覆被与用地强度差异明显，在退耕还林（草）驱动下该地区土地总体变化趋势有助于削减径流泥沙。研究结果将为流域土地利用与黄土高原径流泥沙关系研究提供参考。

关键词：北洛河；土地利用强度；植被覆盖度；景观格局；径流泥沙
中图分类号：S728；P333 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)02−0095−10
引文格式：樊琳，魏天兴，张晓明，等. 北洛河上游县域土地利用时空变化及其对水沙的影响［J］. 北京林业大学学报，2024，46(2)：95−104. Fan Lin, Wei Tianxing, Zhang Xiaoming, et al. Spatiotemporal variation of land use in counties of the upper reaches of the Beiluo River and its impact on runoff and sediment［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(2): 95−104.

Spatiotemporal variation of land use in counties of the upper reaches of the Beiluo River and its impact on runoff and sediment

Fan Lin[1,2] Wei Tianxing[1,2] Zhang Xiaoming[3] Miao Jindian[1,2] Li Yiran[1,2]
(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, CFERN/CNERN, Beijing 100083, China;
3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Research and Hydropower Research, Beiing 100048, China)

Abstract:［**Objective**］The purpose of this study was to investigate the favorability of land use changes in identifying the causes of runoff and sediment variations, providing guiding significance for the implementation and improvement of watershed soil and water conservation and ecological protection policies.［**Method**］The research selected the upper reaches of the Beiluo River as the study area and utilized the GEE and PIE-Engine platforms to acquire land use and fraction vegetation cover (FVC) data

收稿日期: 2023−05−22 **修回日期:** 2023−06−14
基金项目: 国家重点研发计划（2022YFF1300801、2022YFF1300401）。
第一作者: 樊琳。主要研究方向：流域自然地理。Email：1526236707@qq.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。
责任作者: 魏天兴，教授，博士生导师。主要研究方向：林草生态工程与流域自然地理过程研究。Email：weitx@bjfu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

from 1990 to 2020. Descriptions of land use in various counties in the upper reaches of the Beiluo River were conducted from four aspects: land class transitions, FVC, land use intensity (LUI), and landscape pattern (average patch area, AREA_MN; largest patch index, LPI; landscape shape index, LSI; aggregation index, AI). Additionally, the correlation between land use and runoff-sediment was explored by integrating runoff and sediment data. [**Result**] (1) After 2000, there was a shift from farmland to grassland and forests in the upper reaches of the Beiluo River, with a reduction in area by 79.05%. The transition from "farmland to forest" was concentrated in the southeast of Wuqi County, while "farmland to grassland" was most densely distributed in Dingbian County, Shaanxi Province of northwestern China. (2) From 2000 to 2020, the FVC in the basin increased rapidly, with Wuqi County having an overall higher FVC than Dingbian County. The change in land use intensity in Dingbian County lagged behind that of Wuqi County, but both exhibited a significant decreasing trend from 2010 to 2020. (3) Around 2000, the reduction rates of annual runoff and sediment transport were 46.68% and 81.83%, respectively. Coefficient of sediment inflow from 2000 to 2020 (0.42) was less than that from 1990 to 2000 (0.80). (4) Under the same runoff volume, sediment transport from 2000 to 2020 was much lower than that from 1990 to 2000. FVC showed a significant negative correlation with runoff-sediment, while forest AREA_MN and AI were significantly positively correlated with runoff. Forest LPI, LSI were significantly negatively correlated with runoff, and forest LSI was negatively correlated with sediment transport. [**Conclusion**] The runoff and sediment in the upper reaches of the Beiluo River are closely related to the structural layout of land use. Different counties exhibit significant differences in land cover and land use intensity. Under the driving force of returning farmland to forest (grassland), the overall trend of land in this region contributes to the reduction of runoff sediment. The research results will provide reference for the study of the relationship between watershed land use and runoff sediment on the Loess Plateau.

Key words: the Beiluo River; land use intensity; vegetation coverage; landscape pattern; runoff sediment

土地利用/覆被变化被认为是影响土壤稳定性及流域水文过程的关键因素之一[1]，通过影响降雨入渗和土壤含水量改变地表径流和侵蚀等生态过程[2]，干扰景观类型的空间分布和组合结构，改变景观的连通性、稳定性和多样性，进而影响区域生态系统功能和服务。自新中国成立，人类活动日益频繁，不合理的土地利用加剧水土流失并引发河道淤积、水质恶化、环境破坏和农业减产等危害[3]。其中，我国黄土高原地区因其独特的地理条件，水土流失尤为严重。但随着 1999 年起国家实施的以植树造林、封山禁牧、25°以上坡耕地退还林草、土壤结皮恢复等为主要措施的"退耕还林(草)"工程的持续推进，土地利用与景观格局发生剧烈演变，水土流失控制、生态环境改善取得显著成效[4]。探究土地利用/覆被变化及景观格局演变，有利于识别流域水沙变化原因，对合理安排土地利用、科学制定水土保持措施、维持生态系统稳定性具有重要意义。因此，土地利用/覆被变化对生态安全的影响及其格局优化研究成为领域内的热点，近些年 RS/GIS 技术、时空数据挖掘、土地利用动态模拟等技术的应用，为研究该问题提供了丰富的方法指导与现实依据。马耘秀等[5]探究土地利用和气候变化对黄土高原地区水沙情势的影响，发现土地利用变化是导致黄河中游泥沙输运变化的主要原因；Wang 等[6]、Xiao 等[7]通过遥感图像解译及 SWAT 模型模拟复合侵蚀区不同土地利用类型下的水沙特征差异，发现草地、林地等植被覆盖度较高的土地利用类型的水土保持作用明显，而耕地等开垦程度较高的土地利用类型对水沙的贡献较大。

北洛河为黄河二级支流，其上游位于黄土高原风水复合侵蚀区，是黄土高原水土流失治理和退耕还林(草)的重点区域[8]。谢剑等[9]采用现代数理统计方法对径流特征进行分析，发现人类活动是近年来北洛河径流量发生减少和突变的关键因子。薛帆等[10]基于 1952—2019 年实测水文数据，采用水文统计法分析生态恢复对北洛河流域水沙影响，发现上游植被盖度虽低但受人类活动因素影响生态恢复程度大，产流产沙量极显著减少。谢敏等[11]采用 Pettitt 突变检验、双累积曲线等方法探讨北洛河流域降雨和土地利用变化对流域水沙的影响，发现人类活动影响下的土地利用变化是造成径流泥沙量减少的主要原因。然而目前研究主要从流域尺度探究人类活动对水沙的影响，从县域尺度分析土地利用强度和景观格局变化的研究较少。本研究选取北洛河上游(吴旗水文站以上流域)为研究区，比较 1990—2020 年流域内不同县域土地利用时空变化，定量描述土地

利用强度（land use intensity，LUI）、植被覆盖度（fractional vegetation cover，FVC）变化和景观格局演变，比较退耕还林（草）工程实施前后水沙变化情况，并探究年径流量、输沙量与 LUI、FVC 及各类型土地景观指标的相关关系，揭示北洛河上游水沙变化的影响因素，以期为北洛河上游各县域合理推进退耕还林（草）工程和流域可持续发展提供理论支持。

1　研究区概况

北洛河位于黄土高原中部，为黄河二级支流，自西北流向东南（图 1）。吴旗水文站以上部分河长 275 km，流经陕西省定边县、吴起县，流域面积 3 455 km^2。该区域属大陆性季风气候，年降水 448.7 mm，冬春干旱，夏季多暴雨；地处黄土丘陵沟壑区，平均海拔 1 509 m；土层深厚，以黄绵土为主，抗蚀性弱，加之位于风水复合侵蚀区，受到风力、水力双重外营力作用，土壤侵蚀模数高达 1.48 万 t/km^2，水土流失严重。草地、农田是主导土地利用类型，随着 1998 年退耕还林（草）工程实施，林地保护与治理加强，三北防护林体系建设持续推进，该区域土地利用发生较大变化。

2　数据与方法

2.1　数据来源与预处理

本研究土地利用数据来源于中国 30 m 年度土地覆盖产品[12]，采用 WGS-84 坐标系，空间分辨率为 30 m，总体精度为 79.31%，通过 PIE-Engine 平台获取。研究区内包含农田、森林、草地、水体、荒地、不透水 6 种土地类型，其中不透水是指由不透水材料覆盖的地表，通常包括屋顶、停车场和道路等渗透率较小的表面。植被覆盖度数据来源于美国地质勘探局（http://glovis.usgs.gov）提供的 Landsat5/7/8 卫星数据集，通过 GEE 平台获取，基于最大值合成法计算植被指数年值，采用像元二分模型计算植被覆盖度并对其批量投影、裁剪和重分类，得到 30 m 分辨率的年 FVC 栅格数据集。将植被覆盖度划分为 5 个等级，依次表示低覆盖度 [0，10%）、较低覆盖度 [10%，30%）、中等覆盖度 [30%，50%）、较高覆盖度 [50%，70%）和高覆盖度 [70%，100%]。水沙数据来源于国家地球系统科学数据中心（http://www.geodata.cn）和《黄河流域水文年鉴》。

2.2　研究方法

2.2.1　土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵定量表明不同土地利用类型之间的转换情况[13]。本研究通过土地利用转移矩阵获取北洛河上游 1990—2020 年 4 个时期不同土地利用类型间的动态信息。使用 ArcGIS 软件对 2000 年、2020 年的土地利用数据进行相交处理，选取面积 ≥ 1 km^2 的转移地块进行绘图，制作土地转移空间分布图。

2.2.2　土地利用强度

土地利用强度是反映人类活动对自然生态系统影响的重要指标[14]。本研究借鉴庄大方等[15]、冯新惠等[16]研究，结合研究区实际将土地利用强度分为 6 个等级（荒地、水体、草地、森林、农田、不透水），并分别赋予强度分级指数 1、2、3、4、5、6（表 1）。

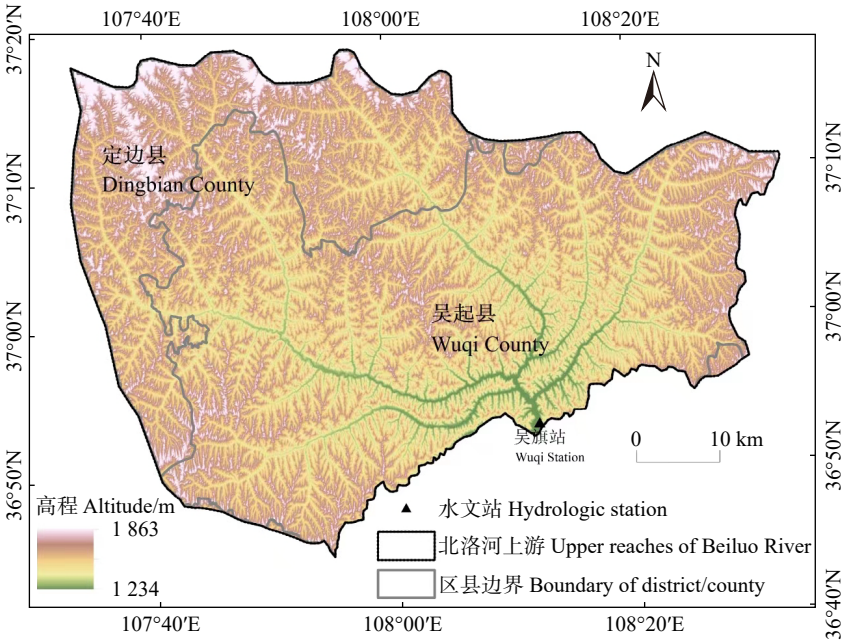


图 1　北洛河上游概况

Fig. 1　Overview of the upper reaches of Beiluo River

表 1 土地强度分级

Tab. 1 Classification of land use intensity

项目 Item	不透水 Impermeable land	农田 Farmland	森林 Forest	草地 Grassland	水体 Waters	荒地 Wasteland
用地强度等级 Land use intensity level	6	5	4	3	2	1

实际状态下 6 种类型混存，各自占据不同面积比例并对总土地利用强度做出贡献。本文采用 1 km × 1 km 的网格样方对土地利用强度进行可视化表达，共得到 3 649 个采样格网，选取 3、3.25、3.5、4、5 为节点划分以突出各样方区别。土地利用强度计算公式为

$$\mathrm{LUI} = \sum_{i=1}^{n} A_i \frac{S_i}{S}$$

式中：LUI为样本区域土地利用强度综合指数，取值区间为 [1，6]；A_i 为样本区域第 i 级土地利用强度分级指数；S_i为样本区域内第 i 级土地利用面积；S 为样本区域内各土地利用类型总面积，n 为土地利用强度分级数，本文取值为 6。

2.2.3 景观参数计算

景观格局指数综合了景观的阻滞能力及地理位置，反映了水土流失的潜在危险[17]。本研究运用 FRAGSTAS 4.2 计算 1990—2020 年北洛河上游的主要景观指数，分析该区域景观格局特征及演变规律。参考以往研究[18−20]，选取平均斑块面积、景观形状指数、最大斑块指数和聚合度指数进行分析，各指标生态学意义见表 2。

表 2 景观指数描述

Tab. 2 Landscape index description

景观指数 Landscape index	生态学意义 Ecological significance
平均斑块面积 Average patch area (AREA_MN)	反映景观结构，取值越小，景观破碎度程度越高 Reflecting the landscape structure, the smaller the value is, the higher the degree of landscape fragmentation is
最大斑块指数 Max. patch index (LPI)	最大斑块面积占总景观面积的百分比，反映人类干扰的强度和频率 This index is the percentage of the max. patch area to the total landscape area, reflecting the intensity and frequency of human disturbance
景观形状指数 Landscape shape index (LSI)	当景观形状为圆形或者正方形时，LSI = 1，当景观中斑块形状不规则或偏离正方形时，LSI值增大 When the landscape shape is circular or square, LSI = 1. When the patch shape in the landscape is irregular or deviates from the square, the LSI value increases
聚合度指数 Aggregation index (AI)	反映不同景观类型斑块之间的连通性，取值越小，景观越离散 Reflecting the connectivity between different landscape type patches, the smaller the value is, the more discrete the landscape is

3 结果与分析

3.1 土地利用变化

3.1.1 土地利用时空变化

北洛河上游土地类型以草地为主，面积贡献率达 88%，农田集中于东部、北部以及河流沿岸(图 2)。由 4 期土地类型数据(表 3)可知，1990—2020 年研究区面积变化最大的是农田，草地次之。分阶段看，1990—2000 年研究区农田面积增加，草地面积减少，农田面积的增加量约等于草地面积的减少量；2000—2010 年、2010—2020 年农田面积减小，降幅分别为 22.38%、73.00%，草地面积增加。与 2000—2010 年相比，2010—2020 年农田面积降幅更大。2010—2020 年森林面积也快速增加，10 年间森林增长率为 499.22%。

为探究北洛河上游退耕还林(草)工程实施后主要土地类型变化，本研究将面积较小的水体、荒地、不透水合并为其他地类，2000—2020 年北洛河上游土地转移空间分布见图 3。研究区内发生土地利用转移的面积有 381.89 km^2，占总面积的 11.01%。具体表现为草地、森林以转入为主，分别转入 282.11、21.79 km^2。农田以转出为主，转出量 306.66 km^2。

对北洛河上游退耕还林(草)效果进行县域分析。图 3a、3b 分别展示 2000—2020 年该地区“农田→森林”、“农田→草地”的土地空间分布。可知“农田→森林”主要分布于吴起县，集中于其东南地区；“农田→草地”全域均有分布，以北洛河沿岸及定边县东南部最为密集。这表明退耕还林(草)工程实施以来，北洛河上游林草面积增加，植被覆盖度提高，生态环境改善；定边县以退耕还草为主，而吴起县除退耕还草外，其东南地区退耕还林效果也十分显著。

3.1.2 植被覆盖度

退耕还林(草)工程导致北洛河上游植被覆盖度发生显著变化，研究期间每隔 10 年输出一张流域

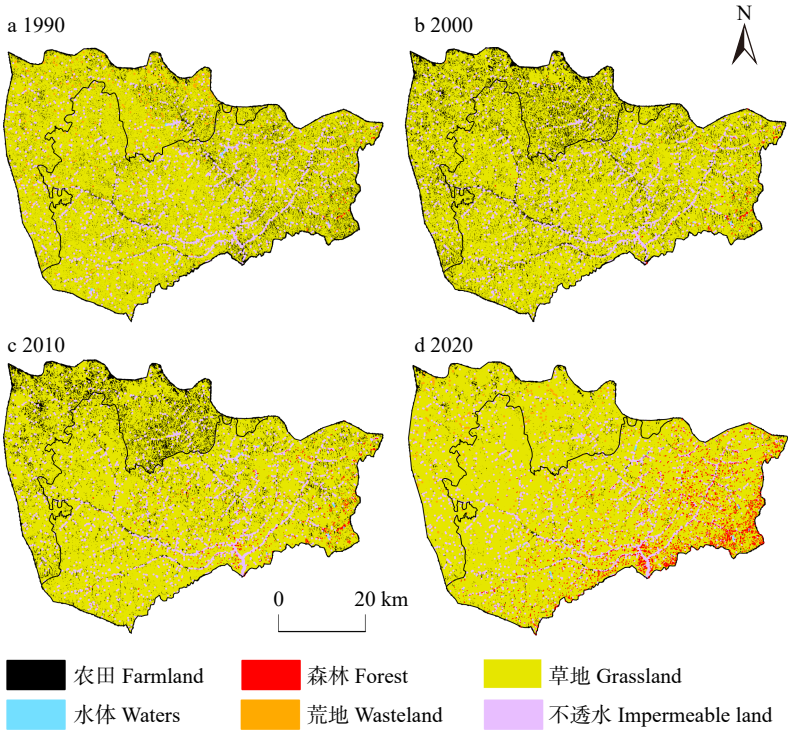


图 2　1990—2020 年土地利用时空变化

Fig. 2　Temporal and spatial changes of land use from 1990 to 2020

表 3　1990—2020 年土地利用年际统计特征

Tab. 3　Inter annual statistical characteristics of land use from 1990 to 2020　　km^2

土地利用类型 Land use type	1990	2000		2010		2020		1990—2020
	面积 Area	面积 Area	变化量 Variation	面积 Area	变化量 Variation	面积 Area	变化量 Variation	变化量 Variation
农田 Farmland	276.84	387.95	111.11	301.12	−86.83	81.29	−219.83	−195.55
森林 Forest	0.34	1.34	1.00	3.86	2.52	23.13	19.27	22.79
草地 Grassland	3 183.78	3 072.39	−111.39	3 155.61	83.22	3 354.50	198.89	170.72
水体 Waters	0.82	0.55	−0.27	0.37	−0.18	0.45	0.08	−0.37
荒地 Wasteland	0.77	0.10	−0.67	0.05	−0.05	1.27	1.22	0.50
不透水Impermeable land	4.71	4.93	0.22	6.25	1.32	6.62	0.37	1.91

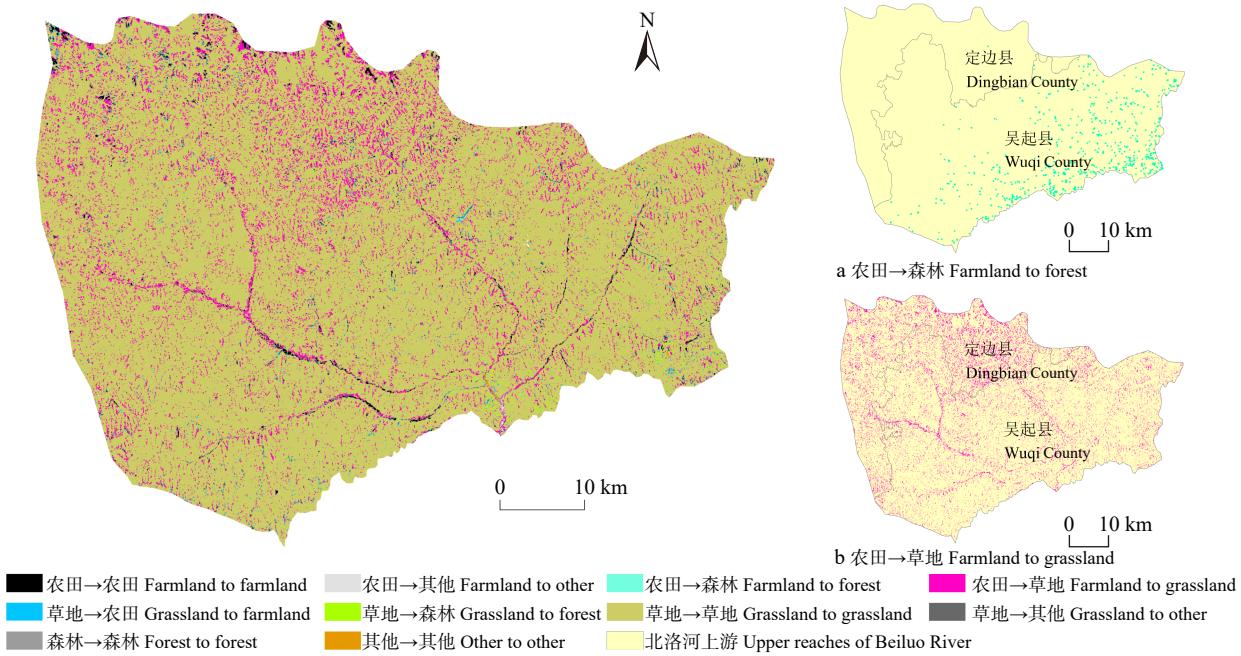


图 3　2000—2020 年土地利用转移空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of land use transfer from 2000 to 2020

FVC 图，植被覆盖度空间分布见图 4。1990—2000 年，流域整体 FVC 较低，吴起县大部分区域处于低、较低覆盖度状态；定边县植被呈退化趋势，年均 FVC 由 12.9% 下降至 9.5%。2000 年后，北洛河上游 FVC 迅速增加，吴起县中等覆盖度以上面积明显扩大，并在 2010—2020 年期间东南地区出现高覆盖度区域；定边县在 2000—2010 年间地表覆被转好，但其整体 FVC 低于吴起县同期水平。

3.1.3 土地利用强度

随着退耕还林(草)工程的推进，北洛河上游农田向林草地转变规模扩大，植被覆盖度提高，土地干扰逐渐减弱，表现为土地利用强度时空变化。图 5 显示：以 2000 年前后为转折点，研究区土地利用强度 LUI 呈现“先增加后减小”趋势；总体上，吴起县南部山地低 LUI，定边县农田密集地高 LUI；1990—2000 年，研究区 LUI 呈较高水平；2000—2010 年，北洛河沿岸 LUI 由高向低转移；2010—2020 年，整体 LUI 降低，东部出现大面积 LUI 低值区(LUI < 3)。这反映 2000 年后北洛河上游土地利用强度降低，人类活动影响减弱。

3.1.4 景观格局特征及其变化

1990—2020 年北洛河上游各土地类型景观指数变化见图 6。分析斑块破碎性(AREA_MN、LPI)：除草地外，其他地类均呈高破碎状态，2000 年后森林破碎度略升，农田破碎度趋降。分析斑块聚集性：草地 AI 指数长期处于 90% 以上，表明其斑块聚集性强，景观分布集中；其他土地斑块较分散，其中森林 AI 指数下降，2010 年达到最小值 3.57%，表明其离散程度增强。分析斑块形状：农田 LSI 最高，2000 年达到峰值后下降，森林 LSI 上升，表明农田受人类扰动最大，但 2000 年后人类对农田干扰降低，对森林影响加强。以上分析表明，随着退耕还林(草)工程的推进，草地表现出高聚集、低破碎的发展趋势；森林斑块形状趋于复杂，破碎度、聚集性均轻微下降；农田破碎度不断上升，形状趋于简单。此外，由不透水 AI 指数变化可知不透水随着城市化发展呈现出明显聚集化趋势。

3.2 水沙变化及其对土地利用变化的响应

3.2.1 水沙变化

1990—2020 年间，北洛河上游径流、泥沙均呈减小趋势(图 7)。以 2000 年为节点，分别统计 2000 年前后年均径流、输沙量。2000 年前平均年径流量、输沙量分别为 2.78×10^8 m^3、0.85×10^8 t，2000 年后平均年径流量、输沙量分别为 1.48×10^8 m^3、0.16×10^8 t。年均径流量、输沙量减少率分别为 46.76%、81.18%。相比年径流量，年输沙量减少更为明显。由 Pearson 相关分析可知 2000 年前后北洛河上游水沙关系均为高度相关($0.8 < |r| < 1$)，1990—2000 年年径流量与年输沙量相关系数为 0.99，2000—2020 年二者相关系数为 0.87，均通过 95% 的显著性检验。建立 2000 年前后年径流量−年输沙量关系，对比两阶段输沙量与径流量比值，即来沙系数，可知

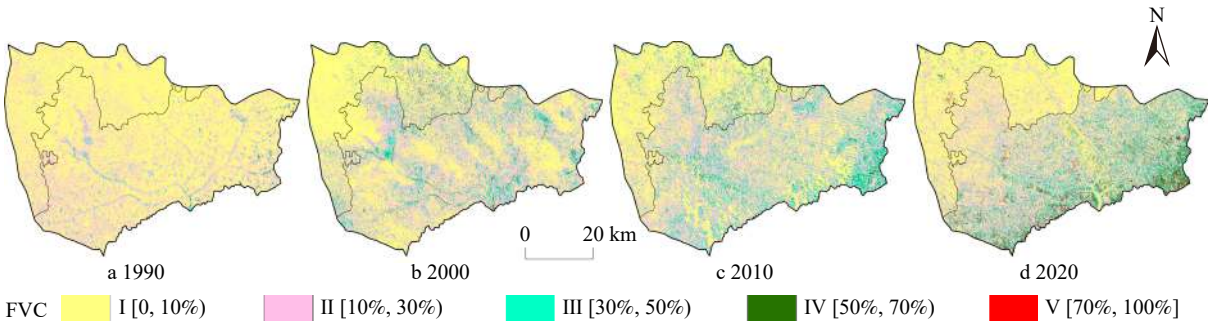


图 4 1990—2020 年植被覆盖度(FVC)空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of fraction vegetation cover (FVC) from 1990 to 2020

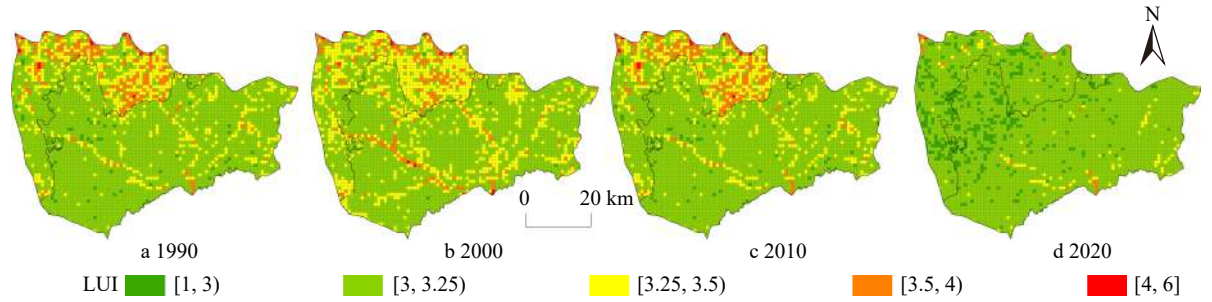


图 5 1990—2020 年土地利用强度(LUI)空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of land use intensity (LUI) from 1990 to 2020

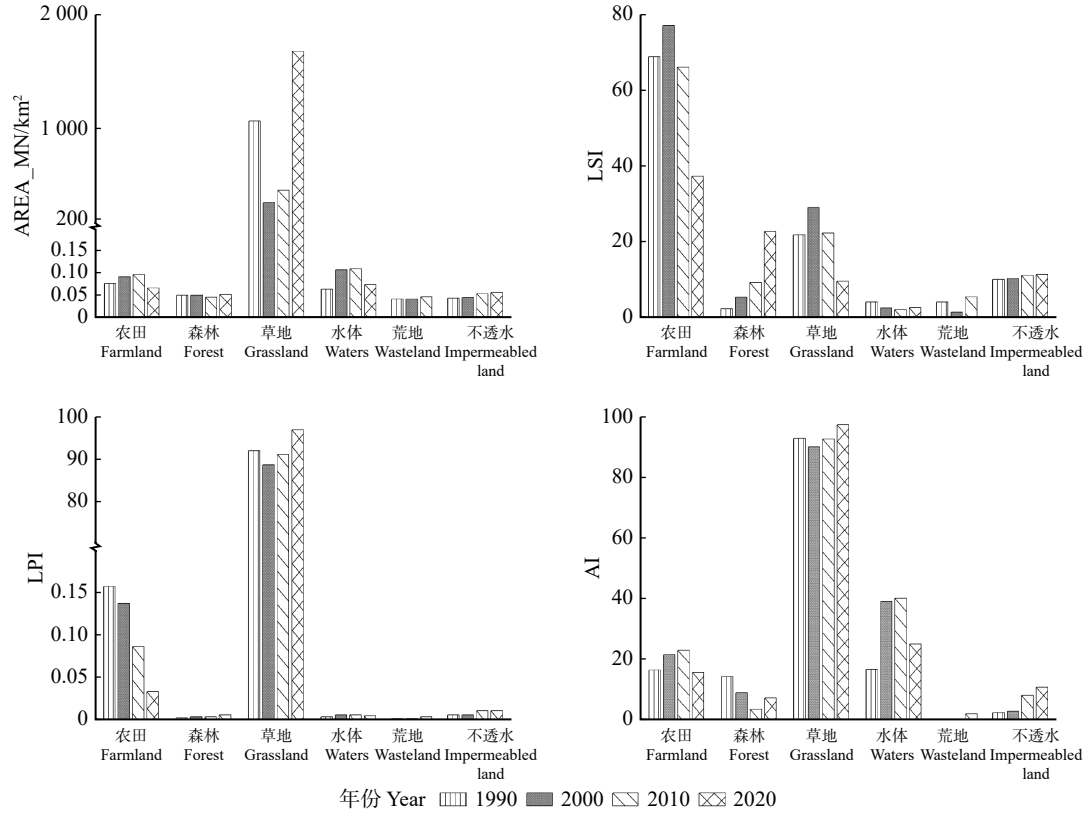
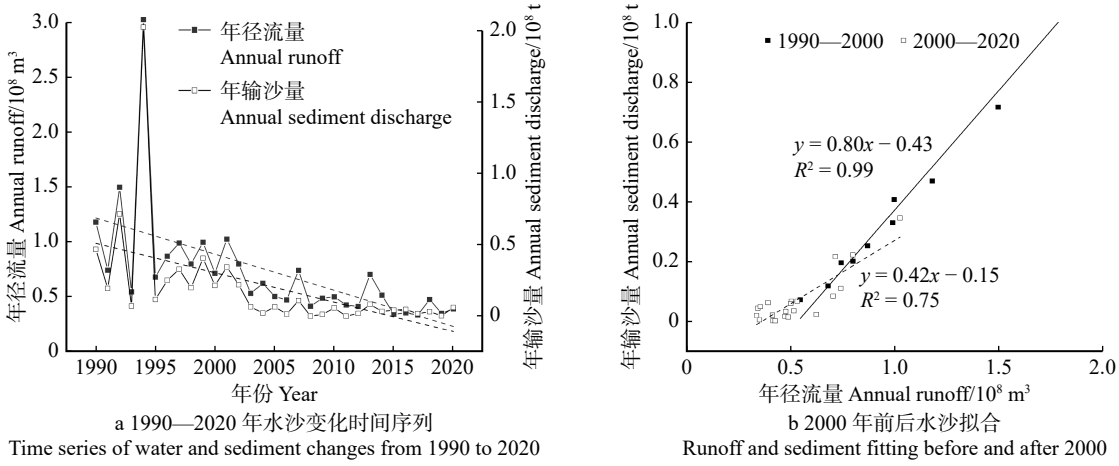


图 6　1990—2020 年北洛河上游景观指数变化

Fig. 6　Changes of landscape index in the upper reaches of the Beiluo River from 1990 to 2020



a 1990—2020 年水沙变化时间序列　Time series of water and sediment changes from 1990 to 2020

b 2000 年前后水沙拟合　Runoff and sediment fitting before and after 2000

图 7　水沙变化时间序列及分段拟合

Fig. 7　Time series and segmented fitting of runoff and sediment changes

2000—2020 年来沙系数为 0.42，远小于 1990—2000 年来沙系数 0.80，两阶段输沙量差异明显。

3.2.2　水沙对土地利用变化的响应

为深入探究土地利用对水沙的影响，本研究对北洛河上游 1990—2020 年水沙数据与土地利用强度 LUI、植被覆盖度 FVC 数据及各土地利用类型景观指数进行 Pearson 相关分析。结果表明：北洛河上游年径流量、输沙量仅与 FVC 及森林、不透水的部分景观参数有关（表 4）。FVC 与年径流量、输沙量均呈显著负相关，表明北洛河上游植被覆盖度与水沙之间存在相互制约作用，即：随着退耕还林（草）工程的推进，北洛河上游植被覆盖度增加，径流泥沙量将减少。不透水主要通过其破碎度、聚集度影响水沙，年径流量、输沙量与其 LPI、AREA_MN、AI 指数存在显著相关关系，不透水斑块面积越大、破碎度越低、聚集度越高，则年径流量、输沙量越小。森林通过其斑块形状、聚集度影响水沙，年径流量与其 LPI、LSI 指数显著负相关，与 AI 指数显著正相关，年输沙量与其 LSI 指数显著负相关，与 AI 指数显著正相关，表明森林斑块形状越不规则、聚集度越低，

表 4 水沙与 FVC 及部分景观参数 Pearson 相关分析

Tab. 4 Pearson correlation analysis of runoff and sediment, FVC, and some landscape parameters

项目 Item	FVC	森林 Forest				不透水 Impermeable land		
		LPI	LSI	AREA_MN	AI	LPI	AREA_MN	AI
年径流量 Annual runoff	−0.422*	−0.422*	−0.492**	0.094	0.475**	−0.543**	−0.456**	−0.477**
年输沙量 Annual sediment discharge	−0.380*	−0.330	−0.379*	0.119	0.431*	−0.473**	−0.358*	−0.373*

注：*表示显著性水平$P < 0.05$，**表示显著性水平$P < 0.01$。Notes: * indicates a significant level of $P < 0.05$, ** indicates a significant level of $P < 0.01$.

年径流量、输沙量越小。

4 讨 论

本研究结果表明，2000 年前后北洛河上游土地利用结构发生明显变化：1990—2000 年主要以草地向农田的转入为主；而 2000—2020 年以农田转出为主。以 2000 年为节点，反映地表覆被改善情况的 FVC 明显增加，而反映人类活动对自然环境干扰的 LUI 趋势下降，草地表现出高聚集、低破碎发展态势，森林斑块形状趋于复杂，破碎度、聚集性均轻微下降，而农田面积减小，破碎度上升。这表明我国自 1999 年推进实施的以退耕还林还草工程为核心的环境保护和生态恢复工作加速了北洛河上游土地利用变化与生态恢复，这也进一步证实了以往研究，即 30 年间黄土高原内流域的土地利用变化主要归功于以退耕还林（草）工程为首的人类活动[21−22]。

通过对比 LUI、FVC 以及“农田→草地/森林”的空间分布可知吴起县的土地结构和覆被改善情况优于定边县。作为北洛河流域退耕还林（草）工程实施的重点县之一，吴起县从减少耕地面积，建设林网、草网、绿化带等方面落实退耕还林（草）政策[23]，于 2007 年开展建设“绿色吴起”行动计划，2008 年实施草地生态保护和草原禁牧政策，2010 年至今加大水土保持和植树造林力度[24]，以逐步恢复和重建生态系统，推进吴起县生态文明建设。定边县出台“以奖代补”等政策，推行科学种植、高效利用的生态农业模式，鼓励农民种植经济作物和果蔬，也有益于退耕还林（草）政策在当地的落实。因此，30 年来北洛河上游地表覆被明显改善，其中吴起县作为工程的重点与试点示范县，其退耕还林效果尤为显著。

水沙变化结果表明，近 30 年研究区径流量、输沙量呈减少趋势，径流含沙量明显降低。由 FVC 和各景观参数与水沙 Pearson 相关分析结果可知：FVC 与水沙呈显著负相关，FVC 的提高对径流泥沙起到很好的拦蓄作用。刘强等[25]研究同样表明：地表覆被的提高增强了流域内植被截流下渗的能力与蒸发强度，削弱水沙动力关系，从而引起径流和泥沙的减少；森林的景观格局对水沙也具有显著影响，低聚集且斑块形状不规则的森林景观有助于削减径流泥沙。罗佳茹等[26]研究表明：不规则和低聚集度的斑块形状导致较多的边界和较小的斑块尺寸，有助于增加森林树木的根系面积和根系结构的复杂性，从而固定土壤，减少土壤侵蚀和沙粒的输送。因此，北洛河上游应继续科学实施退耕还林（草）工程，在此过程中相关部门要注重科学设置森林景观的廊道、斑块，进一步优化土地利用结构、完善土地利用布局。

北洛河上游水沙除了受土地利用/覆被变化影响外，水土保持措施的配置、气候变化对流域水沙也具有重要影响，尤其是梯田、淤地坝等水保措施在流域调洪蓄水、拦沙造地等方面发挥重要作用。本研究仅研究了土地利用变化及其驱动下的植被覆盖度、土地利用强度和景观格局演变对径流泥沙的影响，忽略了梯田和坝库工程对流域径流泥沙输移的重要作用。因此在今后的研究中将重点加强梯田、淤地坝等水土保持工程措施对流域水沙变化作用的分析。

5 结 论

（1）1990—2020 年草地为北洛河上游主要用地类型，受退耕还林（草）工程影响，2000 年后流域内农田向草地、森林转移，其中“农田→森林”集中分布于吴起县东南部，“农田→草地”以定边县分布最为密集。

（2）退耕还林（草）工程实施后，北洛河上游森林斑块形状趋于复杂，聚集度下降，地表覆被转好，用地强度降低，其中以吴起县最明显。

（3）近 30 年北洛河上游径流量、输沙量呈减少趋势。年径流量、输沙量与 FVC 和森林、不透水的部分景观参数相关，FVC 的提高对拦蓄水沙具有积极作用，低破碎、低聚集的森林景观有利于削减径流，低聚集且斑块形状复杂的森林景观有助于削减泥沙。

参 考 文 献

[1] 张玉珊, 舒栋才, 李瑞, 等. 赤水河流域生态水文过程对土地利用/覆被变化的响应 [J]. 土壤通报, 2022, 53(1): 56−65.
Zhang Y S, Shu D C, Li R, et al. Responses of ecohydrological processes to land use/cover change in the Chishui River Basin[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(1): 56−65.

[2] 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, 32(67): 3768−3779.
Fu B J. Ecological and environmental effects of land-use changes in the Loess Plateau of China[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 32(67): 3768−3779.

[3] 刘晓君, 李占斌, 李鹏, 等. 基于土地利用/覆被变化的流域景观格局与水沙响应关系研究 [J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5691−5700.
Liu X J, Li Z B, Li P, et al. Land use/cover change based relationship between landscape, runoff, and sedimentation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): 5691−5700.

[4] 陈浩. 黄土高原退耕还林前后流域土壤侵蚀时空变化及驱动因素研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
Chen H. Spatial and temporal changes of soil erosion and its driving factors before and after the “Grain for Green” project in the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.

[5] 马耘秀, 夏露, 范毅, 等. 土地利用和气候变化对黄土区典型流域水沙变化的影响 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 38−46.
Ma Y X, Xia L, Fan Y, et al. The impact of land use and climate change on water and sediment changes in typical watersheds in the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 38−46.

[6] Wang H, Zhang G, Liu F, et al. Effects of biological crust coverage on soil hydraulic properties for the Loess Plateau of China[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(19): 3396−3406.

[7] Xiao B, Sun F, Hu K, et al. Biocrusts reduce surface soil infiltrability and impede soil water infiltration under tension and ponding conditions in dryland ecosystem[J]. Journal of Hydrology, 2019, 568: 792−802.

[8] 张攀, 姚文艺, 刘国彬, 等. 土壤复合侵蚀研究进展与展望 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 154−161.
Zhang P, Yao W Y, Liu G B, et al. Research progress and prospects of complex soil erosion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(24): 154−161.

[9] 谢剑, 高鹏, 穆兴民, 等. 近 80 年来北洛河流域径流变化特征及其归因分析 [J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 122−128.
Xie J, Gao P, Mu X M, et al. Variation characteristics of runoff in Beiluo river basin over the past 80 years and its attribution analysis[J]. Soil and Water Conservation Research, 2023, 30(2): 122−128.

[10] 薛帆, 晁智龙, 何亮, 等. 近 70 年来不同地貌和植被类型区水沙特征演变及其对生态恢复的响应 [J]. 生态学报, 2023, 43(8): 3247−3260.
Xue F, Chao Z L, He L, et al. Hydrologic and sediment responses to ecological restoration in different geomorphological and vegetation type areas in past 70 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(8): 3247−3260.

[11] 谢敏, 张晓明, 赵阳, 等. 北洛河流域水沙变化对降雨和土地利用的响应 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(1): 39−44.
Xie M, Zhang X M, Zhao Y, et al. Response of water and sediment changes in the Beiluo River Basin to rainfall and land use[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019, 17(1): 39−44.

[12] Yang J , Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907−3925.

[13] 李峰平. 变化环境下松花江流域水文与水资源响应研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2015.
Li F P. Study on water cycle and water resources in Songhua River Basin under the changing environment[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2015.

[14] 曾志伟, 杨华, 宁启蒙,等. 洞庭湖区土地利用强度演变及其对生态系统服务的影响 [J]. 经济地理, 2022, 42(9): 176−185.
Zeng Z W, Yang H, Ning Q M, et al. Evolution of land use intensity in Dongting Lake area and its impact on ecosystem services[J]. Economic Geography, 2022, 42(9): 176−185.

[15] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究 [J]. 自然资源学报, 1997, 12(2): 10−16.
Zhuang D F, Liu J Y. Research on regional differentiation model of land use degree in China[J]. Journal of Natural Resources, 1997, 12(2): 10−16.

[16] 冯新惠, 李艳, 余迹, 等. 长三角城市群碳排放绩效与土地利用强度时空格局及协调发展特征 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(3): 208−218.
Feng X H, Li Y, Yu E, et al. Spatiotemporal pattern and coordinating development characteristics of carbon emission performance and land use intensity in the Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(3): 208−218.

[17] 许文旭, 毕华兴, 王亚娟. 晋西黄土区流域景观格局对径流及其组分的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(10): 118−126.
Xu W X, Bi H X, Wang Y J. Effects of watershed landscape pattern on runoff and its components in the loess region of western Shanxi Province, northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(10): 118−126.

[18] 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.

[19] 吴健生, 易腾云, 王晗. 2000—2030 年深港景观格局演变时空分异与趋势对比分析 [J]. 生态学报, 2021, 41(22): 8718−8731.
Wu J S, Yi T Y, Wang H. Compare live analysis of spatial and temporal variation and trend of landscape partem evolution between Shenzhen and Hongkong from 2000 to 2030[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22): 8718−8731.

[20] 李明珍, 李阳兵, 冉彩虹. 土地利用转型背景下的乡村景观格局演变响应: 基于草堂溪流域的样带分析 [J]. 自然资源学报, 2020, 35(9): 2283−2298.
Li M Z, Li Y B, Ran C H. Evolution of rural landscape pattern under the background of land use transformation: based on the transect analysis of Caotangxi Watershed[J]. Journal of Natural

Resources, 2020, 35(9): 2283−2298.

[21] 宋午椰, 许行, 林毅雁, 等. 黄土高原植被净初级生产力时空变化特征及驱动因子分析 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(8): 29−42.
Song W Y, Xu H, Lin Y Y, et al. Spatial and temporal variation and driving forces for the net primary productivity of vegetation on the Loess Plateau[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(8): 29−42.

[22] 邹亚东, 何亮, 张晓萍, 等. 基于 GEE 数据平台的北洛河流域 1970—2019 年土地利用结构变化特征 [J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 209−219.
Zou Y D, He L, Zhang X P, et al. Characteristics of land use structure change in Beiluo River basin during 1970−2019 based on Google Earth Engine[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 209−219.

[23] 王祯, 吴金华, 白帅, 等. 黄土丘陵沟壑区耕地细碎化评价与土地整治工程分区: 以吴起县为例 [J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 300−307.
Wang Z, Wu J H, Bai S, et al. Evaluation of cultivated land fragmentation and land consolidation engineering zoning in the loess hilly and gully region: a case study in Wuqi County[J]. Soil and Water Conservation Research, 2022, 29(4): 300−307.

[24] 周毅. 陕西吴起县退耕地植被恢复及生态效益研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
Zhou Y. Research on vegetation restoration and ecological benefits of returned farmland in Wuqi County, Shaanxi Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.

[25] 刘强, 尉飞鸿, 常康飞, 等. 黄河中游龙潼区间水沙变化特征及其对降水和人类活动的响应 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(3): 555−568.
Liu Q, Wei F H, Chang K F, et al. Characteristics of water and sediment changes in the Longtong section of the middle reaches of the Yellow River and their response to precipitation and human activities[J]. Journal of Applied Fundamentals and Engineering Science, 2023, 31(3): 555−568.

[26] 罗佳茹, 李斌斌, 张风宝, 等. 黄丘区特色治理开发小流域土壤侵蚀变化对景观格局演变的响应 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(12): 4165−4176.
Luo J R. Li B B, Zhang F B, et al. Responses of goll eroslon to changes in landecape paltern and its evolution in watershed in the loess hilly region under characteristic management and development[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(12): 4165−4176.

（责任编辑 孟 瑶
责任编委 杨晓晖）