

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.02.030

廖美玉, 方秀琴, 蒋心远, 等. 黄河流域近 40 年土地利用/覆被时空变化特征[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 165-177.

LIAO Meiyu, FANG Xiuqin, JIANG Xinyuan, et al. Spatiotemporal characteristics of land use/cover changes in the yellow river Basin over the past 40 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 165-177.

黄河流域近 40 年土地利用/覆被时空变化特征

廖美玉^{1,2}, 方秀琴^{1,2}, 蒋心远^{1,2}, 朱求安^{1,2}, 金佳鑫^{1,2}, 任立良^{1,3}, 颜亦琪⁴

(1. 水灾害防御全国重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学地理与遥感学院, 南京 210024;

3. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 南京 210098; 4. 水利部黄河水利委员会水文局, 郑州 450003)

摘要: [目的] 研究土地利用/覆被时空变化特征对于黄河流域土地资源保护与合理开发具有重要意义, 可为黄河流域生态保护与高质量发展战略实施提供重要参考。[方法] 基于黄河流域 1980—2021 逐年土地利用/覆被数据, 采用 Mann-Kendall 和滑动 t 检验、地学信息图谱、标准差椭圆和重心迁移模型等方法, 探究近 40 年黄河流域土地利用/覆被变化特征。[结果] (1) 1980—2021 年林地、灌丛、水域、建设用地显著增加, 耕地、草地、湿地显著减少。(2) 流域土地利用/覆被变化时段可划分为 1980—1992 年, 1993—2001 年, 2002—2012 年, 2013—2021 年, 数量结构逐渐呈现快速变化特点, 建设用地、湿地和水域变化敏感。土地利用结构均衡度逐渐增强, 呈现的阶段性变化与实施的重大战略措施关联性高, 并与划分的阶段较符合。(3) 流域中上游以 2012—2021 年和间歇变化型、耕地和草地的相互转换为主, 下游以 2001—2012 年和 2012—2021 年变化型、耕地转为建设用地和草地为主。流域内宁夏北部、内蒙古东部及部分沿黄河水系分布的地区变化频繁。(4) 湿地、水域和建设用地的重心向西迁移, 分别呈现向西南集中分布、向东分散、向西北集中分布态势。[结论] 土地利用结构在政策导向下总体趋势变好, 未来应重点关注湿地以及土地利用变化频繁的地区。

关键词: 黄河流域; 土地利用; Mann-Kendall 检验; 滑动 t 检验; 地学信息图谱

中图分类号: Q149

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)02-0165-13

Spatiotemporal Characteristics of Land Use/Cover Changes in the Yellow River Basin Over the Past 40 Years

LIAO Meiyu^{1,2}, FANG Xiuqin^{1,2}, JIANG Xinyuan^{1,2}, ZHU Qiu'an^{1,2},

JIN Jiaxin^{1,2}, REN Liliang^{1,3}, YAN Yiqi⁴

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210098, China;

2. College of Geography and Remote Sensing, Hohai University, Nanjing 210024, China;

3. Cooperative Innovation Center for Water Safety and Hydro-Science, Hohai University, Nanjing 210098, China;

4. Hydrology Bureau of Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: [Objective] The study on the spatial-temporal change characteristics of land use/cover is of great significance for the protection and rational development of land resources in the Yellow River Basin, and can provide an important reference for the implementation of ecological protection and high-quality development strategy in the Yellow River Basin. [Methods] Based on the annual land use/cover data of the Yellow River Basin from 1980 to 2021, the characteristics of land use/cover change in the Yellow River Basin in recent 40 years were investigated by using Mann-Kendall and sliding t -test, geographic information TUPU standard deviation ellipse and gravity shift model. [Results] (1) From 1980 to 2021, forest land, shrub, water area, and construction land increased significantly, while the cultivated land, grassland, and wetland decreased significantly. (2) The periods of land use/cover change in the basin can be divided into 1980—1992, 1993—

收稿日期: 2023-09-07

修回日期: 2023-10-23

录用日期: 2023-11-26

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-02-02

资助项目: 国家自然科学基金项目 (U2243203, 42041005); 国家重点研发计划项目 (2023YFC3006701)

第一作者: 廖美玉 (2000—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土地利用/覆被变化及其水文响应研究。E-mail: myliao@hhu.edu.cn

通信作者: 方秀琴 (1978—), 女, 博士生导师, 主要从事地表参数遥感反演、分布式水文模型及山洪灾害防治研究。E-mail: kinkinfang@hhu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

2001, 2002—2012, and 2013—2021, and the quantitative structure gradually presented by rapid changes, and the changes of construction land, wetland and water area were sensitive. The balance of land-use structure was gradually increased, and the stage changes showed a high correlation with the implementation of major strategic measures, and more consistent with the divided stage. (3) In the middle and upper reaches of the basin, the main changes were from 2012 to 2021 and intermittent changes, and the main changes were from 2001 to 2012 and from 2012 to 2021, and the main changes were from 2001 to 2012 and from 2012 to 2021, and the main changes were from arable land to construction land and grassland. The basin changed frequently in northern Ningxia, eastern inner Mongolia and some areas along the Yellow River system. (4) The centers of gravity of wetland, water and construction land moved westward, showing concentrated distribution to the southwest, east and northwest, respectively. [Conclusion] The overall trend of land use structure becomed better under the guidance of policies. In the future, we should pay more attention to wetlands and areas with frequent land use changes.

Keywords: Yellow River basin; land use; Mann-Kendall test; sliding t -test; geographic information TUPU

Received: 2023-09-07

Revised: 2023-10-23

Accepted: 2023-11-26

Online(www.cnki.net): 2024-02-02

显著变化的地表是人类活动与自然环境之间相互作用的直接表现形式^[1]。土地利用/覆被变化(land use/ cover change, LUCC)是人类活动作用于地表的重要表征,是全球环境变化和人类可持续发展的重要研究内容之一^[2-5],不仅在一定程度上影响区域的经济活跃程度,还直接影响生态环境质量^[6],尤其是在生态环境脆弱区,如黄河流域、绿洲地区等。黄河流域在国土总面积和经济生产总量中占有较大比重,而且此区域内生物多样性高,是连接青藏高原、黄土高原和华北平原的生态廊道^[7-9],是重要的生态功能区。习近平总书记强调黄河流域是我国重要的生态屏障和经济地带,并将黄河流域的生态保护和高质量发展上升为国家重大战略。然而长期不合理的土地利用开发方式已使得上游土地荒漠化严重^[10]、中游土壤侵蚀剧烈^[11]、下游“二级地上悬河”持续发育、用水紧张等问题日益突显^[12],因此分析流域LUCC的时空特征为实现结构合理、空间有序的土地利用格局提供参考。

目前关于黄河流域 LUCC 研究较多,邴龙飞等^[13]研究发现,1970—2008 年黄河源区流域尺度的宏观生态状况经历变差到缓慢恢复的趋势;刘璐璐等^[14]运用转移矩阵、土地覆被转类指数等方法发现,黄河源区的覆被总体变差,且变化情况比长江源区剧烈;李艳忠等^[15]揭示了黄河中游退耕还林/还草工程实施后的主要转换类型是由耕地转为草地;张冉等^[16]基于水资源二级分区,采用动态度指标及土地利用变化重要性、林草植被变化指数等方法定量分析黄河流域的土地利用变化方向和程度;肖东洋等^[17]以黄河流域的河南段为研究区,采用土地利用变化指

数、重心迁移模型等方法研究 1990—2018 年土地覆被变化的流量、流向和多样性程度;付景保等^[18]运用信息熵及多元线性回归等方法分析南阳市土地利用结构及产业结构动态变化;付乐等^[19]运用动态度模型及转移矩阵等方法定量分析流域不同尺度的土地利用变化特征及其变化的主要因素。现有的研究将整个黄河流域作为研究对象的研究较少,且大多基于几个典型年份,鲜少利用土地利用资料的长时间序列信息,对土地利用变化规律挖掘不充分。本文在前人研究基础上,利用连续 42 年的土地利用/覆被数据对流域的土地利用分布格局及其动态变化进行定量分析,旨在揭示黄河流域的 LUCC 时空特征,填补该流域在长时间序列土地利用变化研究上的空白,为协调黄河流域的人地矛盾提供参考。

1 研究区概况与数据

黄河流域发源于青海省巴颜喀拉山脉,于山东省东营市注入渤海(图 1)。流域流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东 9 个省区,总面积约为 $7.96 \times 10^5 \text{ km}^2$,约占全国面积的 8.30%。水利部黄河水利委员会按照真实的自然流域将河源至内蒙古自治区托克托县河口镇划分为黄河上游,面积为 $4.08 \times 10^5 \text{ km}^2$;河口镇至河南省郑州市桃花峪为中游,面积为 $3.65 \times 10^5 \text{ km}^2$;桃花峪至入海口为下游,面积为 $0.23 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。上游以山地为主,下游以平原丘陵为主。流域属于温带、暖温带和寒温带高原气候区,呈东、中、西三级阶梯分布,自西北向东南由冷变暖、降水量递增,经济发展水平呈现下游、中游、上游递减特征。

本研究采用由清华大学发布的 1980—2021 年逐

年土地利用/覆被数据^[20-21], 空间分辨率为 1 km。参考《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)^[22], 并结合流域的具体实际情况, 将土地利用类型重新合并划分为耕地(1)、林地(2)、草地(3)、灌丛(4)、湿地(5)、水域(6)、建设用地(7)、未利用地(8)和冰雪(9)等 9 类。

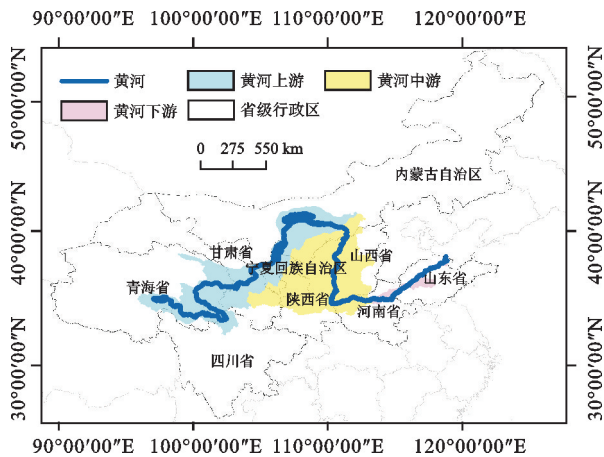


图 1 黄河流域地理位置

Fig. 1 Location of Yellow River Basin

2 研究方法

2.1 Mann—Kendall 和滑动 *t* 检验法

Mann—Kendall(M—K)是一种非参数检验方法,用来检验基于时间序列的增加和减少趋势以及是否发生突变,滑动 *t* 检验是通过检验 2 组数据样本的平均值差异是否显著以此判断是否有突变点的存在^[23-24],其中,本研究的 M—K 检验基于 0.05 的显著性水平,若统计量的绝对值>1.96,则表示变化趋势显著,反之则不显著,滑动 *t* 检验则基于 0.01 的显著性水平。本文结合 M—K 和滑动 *t* 检验法判断土地利用类型的面积变化趋势并寻找突变点年份。

2.2 土地利用结构均衡度和动态度

2.2.1 土地利用结构均衡度 土地利用信息熵(*H*)可以反映土地利用的均衡程度,熵值越高表明土地利用的类型越多,各类型的面积相差越小^[25]。土地利用结构均衡度(*E*)是基于土地利用信息熵构建的函数,是实际信息熵与最大信息熵之比, $E \in [0, 1]$, *E* 越高,均质性越强,反之越弱^[26]。

$$H = - \sum_{i=1}^n (P_i) \ln(P_i)$$

(1)

$$E = H / \ln n = - \sum_{i=1}^n \frac{[(P_i) \ln (P_i)]}{\ln n}$$

(2)

式中: P_i 为第 *i* 类土地利用类型的面积比例(%); *n* 为土地利用类型数。

2.2.2 单一土地利用动态度 研究区某一时期内某种土地利用类型的平均变化率可以用单一土地利用

动态度来衡量^[19,27],常用 *K* 表示,其表达式为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100 \%$$

(3)

式中: U_a 、 U_b 分别为初期、末期某种土地利用类型的面积(km²); *T* 为初、末两期间隔的时间段。

2.2.3 综合土地利用动态度 综合土地利用动态度可以反映出某一时期内该研究区的整体土地利用类型平均变化率^[19,27],常用 *LC* 表示,其表达式为:

$$LC = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n LU_i} \right] \times \frac{1}{T} \times 100 \%$$

(4)

式中: LU_i 为第 *i* 类土地利用类型的初期面积(km²); ΔLU_{i-j} 为研究时期内第 *i* 类土地利用类型转换为第 *j* 类土地利用类型的面积绝对值; *n* 为土地利用类型数; *T* 为初、末两期间隔的时间段。

2.3 地学信息图谱

主要采用变化图谱、涨落势图谱和变化模式图谱方法。涨势图谱是指其他土地利用类型转为该种类型的新增面积图谱,落势图谱是指该种土地利用类型转为其他类型的萎缩面积图谱,本文分别对多期各土地利用类型生成各期的土地利用类型涨落势图谱^[27-29]。变化模式图谱同样基于栅格属性值代码融合方法,根据突变年份的土地利用数据构建 5 位数编码的变化图谱,之后根据图谱编码将变化图谱进行模式分类。

2.4 标准差椭圆与重心迁移模型

(1)标准差椭圆

标准差椭圆的大小可用来表征数据分布的集中程度,方位角表示数据的主导方向,长轴的分布方向反映空间分布的主要走向,短轴的长短反映集散程度,椭圆的长短轴标准差用来判断数据分布的方向性是否明显,可以用来反映土地利用空间格局的分布特征^[30]。

(2)重心迁移模型

重心可以反映研究区内某土地利用类型空间分布的平衡点,重心迁移速率和方向可以呈现一定时期内某土地利用类型在空间演变过程中的重心变化^[31],其计算公式为:

$$X_t = \frac{\sum_{i=1}^l (S_i \times x_i)}{\sum S_i}, Y_t = \frac{\sum_{i=1}^l (S_i \times y_i)}{\sum S_i}$$

(5)

$$V_{(i,m-n)} = \frac{H \times \sqrt{(X_m - X_n)^2 + (Y_m - Y_n)^2}}{t_m - t_n}$$

(6)

式中: X_t 和 Y_t 分别为第 *t* 年该土地利用类型的重心经、纬度坐标; *l* 为第 *t* 年该土地利用类型的斑块数;

S_i 为 t 年该土地利用类型分布第 i 个斑块的面积 (km^2); x_i 和 y_i 分别为该土地利用类型第 i 个斑块的几何重心经、纬度坐标; H 为常数, 取值 111.111; $V_{(i, m-n)}$ 为第 i 种土地利用类型从 n 到 m 年的重心迁移速率; t_m 、 t_n 为研究末期和研究初期。

3 结果与分析

3.1 趋势和突变检验分析

通过 R 语言进行趋势和突变检验, 结果见表 1。

表 1 1980—2021 年黄河流域各土地利用类型面积趋势和突变检验结果

Table 1 Results of area trend and abrupt change test for each land use type in the Yellow River Basin from 1980 to 2021

土地利用类型	M-K 趋势检验		突变点检验	
	统计量 Z 值	变化趋势 ($\alpha=0.05$)	M-K 检验 ($\alpha=0.05$)	滑动 t 检验 ($\alpha=0.01$)
耕地	-7.542 8	显著 ↓	无	1992 年、2001 年
林地	5.570 4	显著 ↑	无	1993 年、2001 年
草地	-8.366 5	显著 ↓	无	1995 年、2001 年、2012 年
灌丛	3.099 5	显著 ↑	1999 年	1988 年、1995 年、2001 年、2012 年
湿地	-7.434 4	显著 ↓	无	1986 年、1992 年、2004 年
水域	2.947 8	显著 ↑	2012 年	1992 年、2003 年、2012 年
建设用地	9.276 8	显著 ↑	无	2001 年、2012 年
未利用地	1.582 3	不显著 ↑	2020 年	2001 年、2009 年
冰雪	-4.494 3	显著 ↓	1981 年、1982 年、1984 年	2007 年

3.2 土地利用数量结构变化分析

黄河流域 1980—2021 年土地利用结构均衡度变化及相关的重大战略措施见图 2。1980—1992 年包括在三北工程防护林体系建设第 1 阶段内, 均衡度逐渐提升; 1993—2001 年启动太行山绿化工程、黄河中游防护林体系建设、天然林保护及三北工程防护林第 2 阶段等生态建设并颁布《中国湿地保护行动计划》, 均衡度持续上升; 2002—2012 年进一步实施天然林保护并全面启动退耕还林还草、三江源自然保护区等

在给定显著性水平 $\alpha=0.05$ 下检验, 林地、灌丛、水域和建设用地面积呈现明显的上升趋势, 耕地、草地、湿地、冰雪的面积呈现明显的下降趋势, 分别在给定显著性水平 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 进行 M-K 和滑动 t 突变点检验, 最终确定突变点年份为 1992 年、2001 年、2012 年, 故将 1980—2021 年划分为 4 个阶段: 1980—1992 年、1993—2001 年、2002—2012 年和 2013—2021 年。

工程, 并实施西部崛起、中原经济区建设等经济发展战略, 生态工程明显发挥作用, 均衡指数大幅上升; 2013—2021 年实施山水林田湖草生态修复措施, 京津风沙源治理以及三北防护林建设进入下一阶段, 均衡指数快速大幅提升。

结果表明, 均衡度变化规律有明显的阶段性, 与这些重大战略措施关联性高, 并与划分的 4 个阶段较吻合, 重大战略措施为流域的高质量协调发展创造良好条件, 均质性不断增强。

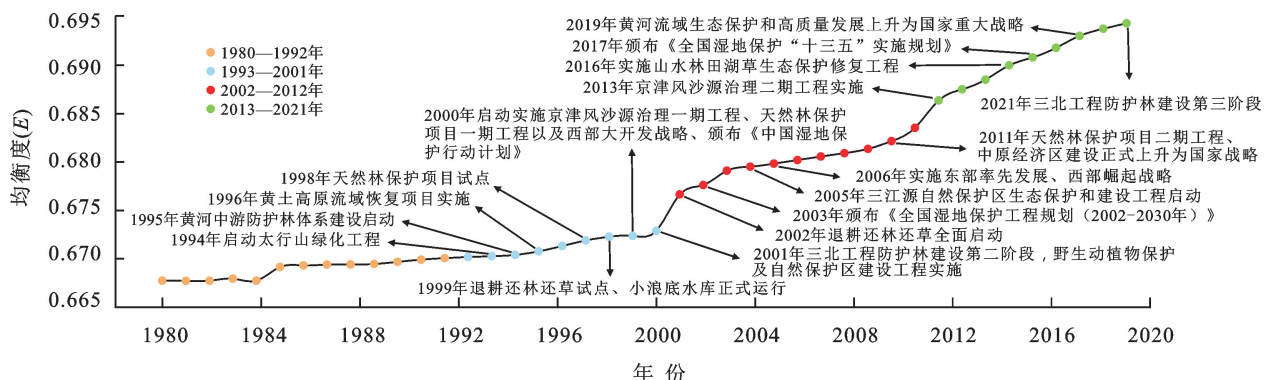


图 2 黄河流域 1980—2021 年土地利用结构均衡度变化及相关的重大战略措施

Fig. 2 Changes in land use structural equilibrium in the Yellow River Basin from 1980 to 2021 and associated major strategies measures

黄河流域的典型年份土地利用类型分布见图 3。整个流域以草地(约 46%)、耕地(约 26%)和未利用地(约 8%)为主要结构, 草地和湿地主要分布在流域西部, 未利用地主要分布在流域北部, 而耕地、林地和建设用地主要

分布在流域的东南部。各流域段土地利用类型占比见图 4。上游以草地为主, 下游以耕地和建设用地为主, 而中游以草地和耕地为主, 表明中上游主导生态保育、下游主导经济发展和粮食生产, 中游为两者过渡区域。

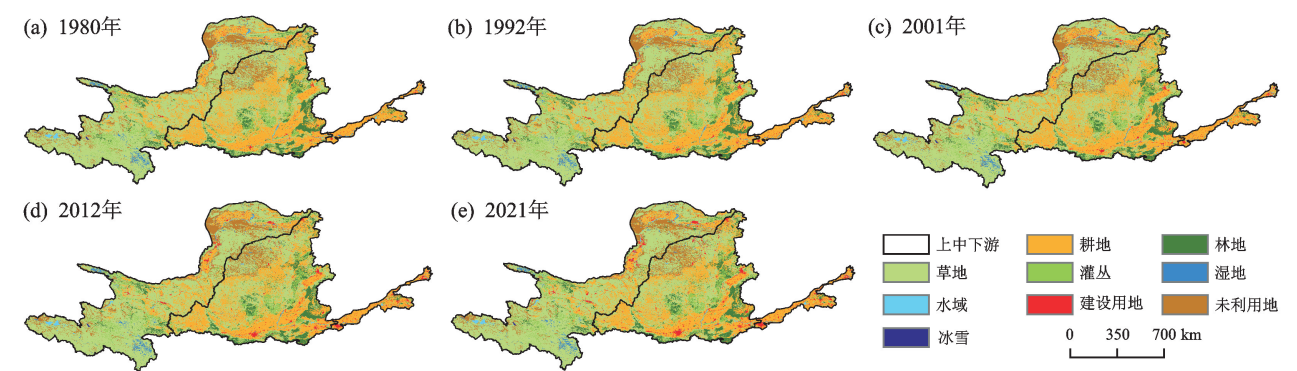


图 3 黄河流域典型年份土地利用类型分布

Fig. 3 Distribution of land use types in the Yellow River Basin in typical years

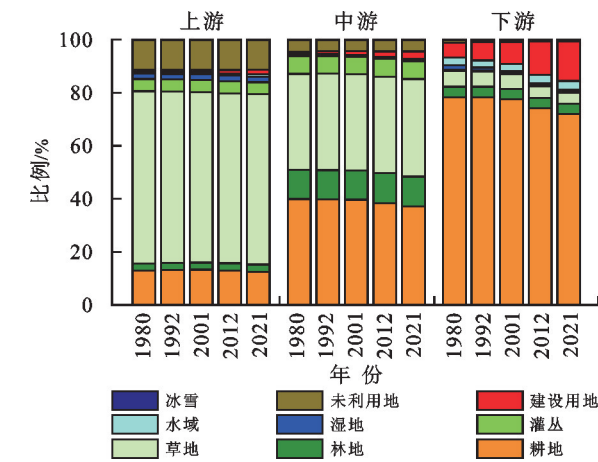


图 4 各流域段土地利用类型占比

Fig. 4 Proportion of land use types in each basins

在 ArcGIS 中进行空间叠加和栅格统计计算并通过 Origin 可视化得到土地利用转移弦图(图 5), 1980—1992 年未利用地净减少最大,减少的未利用地主要转成草地(77.64%)和耕地(13.29%)。1993—2001 年草地净减少最大,减少的草地主要转为耕地(51.24%)和未利用地(27.67%)。2002—2012 年耕地和草地净减少最大,减少的耕地主要转为草地(19.68%)和建设用地(59.24%),减少的草地主要转为耕地(33.05%)、未利用地(27.19%)和建设

用地(20.90%)。林地增加的部分主要由耕地(53.31%)和草地(29.10%)转入。2013—2021 年的轨迹线最为稠密复杂,表明该期间土地利用变化活动最活跃,而且耕地净减少和草地净增加最大,减少的耕地主要流向草地(68.87%)、建设用地(12.36%)和林地(7.62%),增加的草地主要由耕地(50.06%)、未利用地(18.28%)和灌丛(14.55%)转入。1980—2021 年建设用地的净增加均最大,增加的部分主要由耕地(约 70.00%)和草地(约 20.00%)转入。

表 2 为 1980—2021 年土地利用动态度,4 期的综合土地利用动态度逐渐增加,后 2 期明显高于前 2 期。未利用地在 1980—1992 年达到峰值-0.23,说明未利用地萎缩程度高。林地、水域、建设用地和冰雪在 2002—2012 年动态度最高,分别高达 0.11%, 1.25%, 4.07%, -0.21%, 其中建设用地的动态度变化最为剧烈,说明林地、水域、建设用地扩张强劲而冰雪萎缩程度高。草地、灌丛和湿地在 2012 年之后动态度迅速提高,耕地减少速度加快,分别达到峰值 0.11%, -0.12%, -0.39%, -0.34%, 表明耕地、湿地、灌丛萎缩程度高而草地扩张强劲。虽然这些年陆续实施一系列湿地保护与修复工程,但湿地仍在迅速减少。建设用地、湿地和水域在各时期内的动态度较高,表明建设用地、湿地、水域变动敏感。

图 5 1980—2021 年土地利用转移弦图

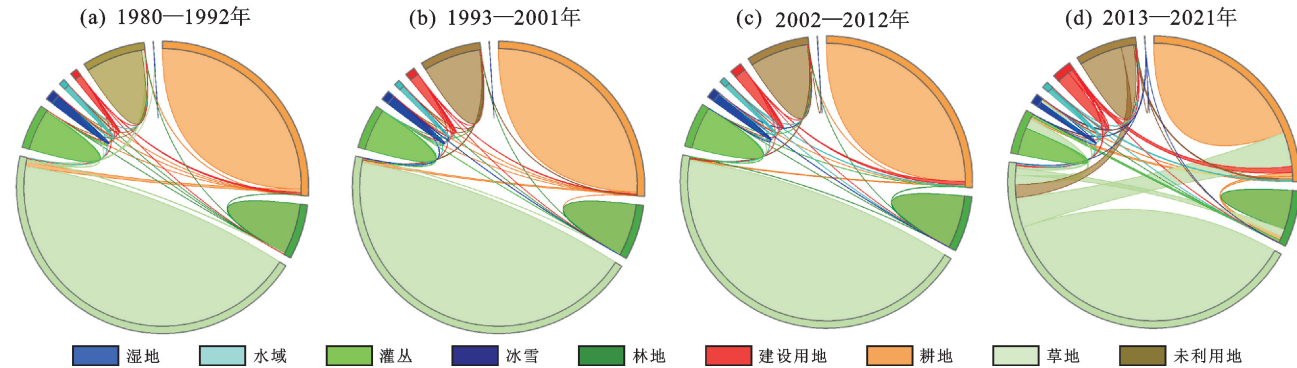


Fig. 5 Chord diagram of land use transfer matrix from 1980 to 2021

表 2 黄河流域 1980—2021 年单一和综合土地利用动态度

Table 2 Dynamic changes of single and comprehensive land use in the Yellow River Basin from 1980 to 2021		%			
土地利用动态度	类型	1980—1992 年	1993—2001 年	2002—2012 年	2013—2021 年
单一土地利用动态度	耕地	0.009	−0.013	−0.186	−0.340
	林地	0.007	−0.058	0.109	−0.085
	草地	−0.008	−0.046	−0.031	0.111
	灌丛	−0.059	0.042	0.012	−0.121
	湿地	−0.365	0.167	−0.189	−0.390
	水域	−0.121	−0.610	1.250	0.141
	建设用地	3.186	1.839	4.067	1.746
	未利用地	−0.233	0.103	−0.095	0.154
	冰雪	−0.132	0	−0.214	0.205
综合土地利用动态度		0.031	0.034	0.077	0.110

3.3 土地利用空间变化图谱

各期土地利用类型变化及占比见图 6。1980—1992 年,最大的变化面积类型是草地转为耕地(20.91%),集中分布在流域内宁夏和内蒙古东北部等地,其次是未利用地转草地(11.57%)、耕地转建设用地(8.80%),其中未利用地转草地集中分布在榆林市西北部。

中分布在流域内宁夏和内蒙古东北部等地,其次是未利用地转草地(11.57%)、耕地转建设用地(8.80%),其中未利用地转草地集中分布在榆林市西北部。

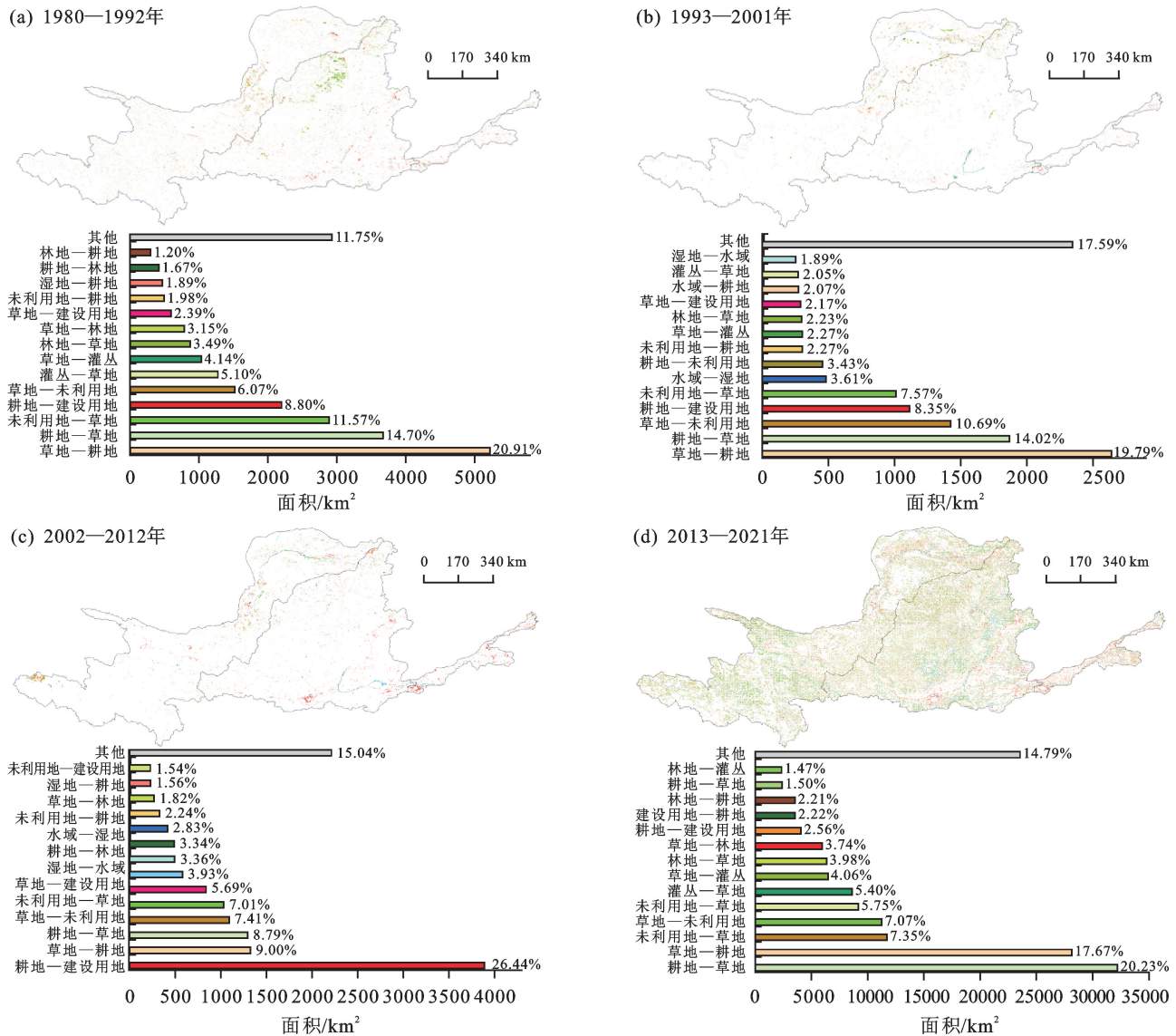


图 6 黄河流域各期土地利用类型变化及占比

Fig. 6 Changes in land use types and their proportion in the Yellow River Basin in each period

1993—2001 年,与前期相比,耕地与草地之间的转换以及耕地转为建设用地的占比基本相同,但其中草地变为转未利用地(10.69%)。水域与湿地之间的转换首次占比前 15(5.50%),沿内蒙古段、山西和陕西及河南交界段、河南段的黄河水系集中分布。2002—2012 年,耕地转建设用地变化最大(26.44%),集中分布在西安、郑州、银川、泰安、济南、太原和东营等地。

耕地转为林地和水域、湿地转为耕地首次占比前 15(3.34%,3.93%,1.56%),其中耕地转林地主要分

布在内蒙古东北部及山西北部,草地转未利用地发生明显的聚集,集中分布在上游源区青海段,天然草地退化严重;2013—2021 年退耕还草明显(20.23%),广泛分布于中上游,耕地转建设用地放缓(3.74%),草地和灌丛之间的转换集中分布在流域青海段内。

各时期上中下游涨落势土地利用类型占比见图 7。在流域中上游,草地和耕地的转出及转入占变化的主导地位,在下游,第 1 期和最后 1 期以耕地的转入转出、建设用地的转入为主,中间 2 期以未利用地的转出、耕地的转入为主。

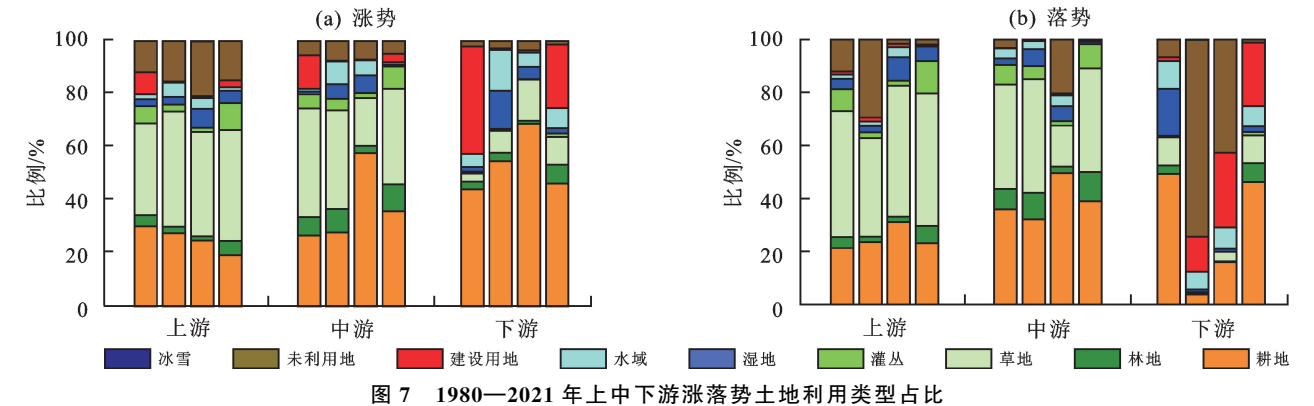


Fig. 7 Proportion of land use types in the upper, middle and lower reaches of the fluctuation in each period

根据各期土地利用类型转入转出率(表 3、表 4)、涨落势的空间分布(图 8、图 9)所示,土地利用变化在空间上呈现明显的分异特征。1980—2021 年建设用地涨势最强。1980—1992 年湿地落势最强,沿山西和陕西及河南交界段、河南段的黄河水系集中分布。陕西北部发生未利用地集中转出和草地集中转入。1993—2001 年水域落势最强,沿山西和陕西及河南交界段、河南段的黄河水系集中分布。宁夏发生未利

用地和草地集中转出、耕地集中转入。2002—2012 年水域落势最强,主要沿山西和陕西及河南交界段、河南段的黄河水系集中分布。建设用地的转入集中分布在宁夏北部、西安、郑州、济南、泰安等地。上游青海中部发生草地集中转出、未利用地集中转入林地转入集中发生在流域东北部。2013—2021 年湿地落势最强,沿着内蒙古段的黄河水系及在上游四川、青海北部集中分布。

Table 3 Turn-in rate by land use type from 1980 to 2021									
时期	耕地	林地	草地	灌丛	湿地	水域	建设用地	未利用地	冰雪
1980—1992	3.01	2.50	2.21	3.02	3.97	6.42	42.61	2.93	0
1993—2001	1.53	0.71	0.89	1.26	7.55	11.30	15.21	3.21	0
2002—2012	0.91	1.61	0.67	0.59	7.44	25.10	41.34	1.91	0
2013—2021	17.57	21.78	15.57	29.89	35.05	32.95	42.54	23.35	15.37

Table 4 Turn-out rate by land use type from 1980 to 2021									
时期	耕地	林地	草地	灌丛	湿地	水域	建设用地	未利用地	冰雪
1980—1992	2.90	2.42	2.30	3.73	8.35	7.88	4.38	5.73	1.58
1993—2001	1.64	1.18	1.25	0.92	6.22	16.18	0.50	2.39	0
2002—2012	2.77	0.52	0.98	0.47	9.33	12.60	0.67	2.86	2.14
2013—2021	20.29	22.35	14.66	30.86	38.10	31.90	28.58	22.17	13.72

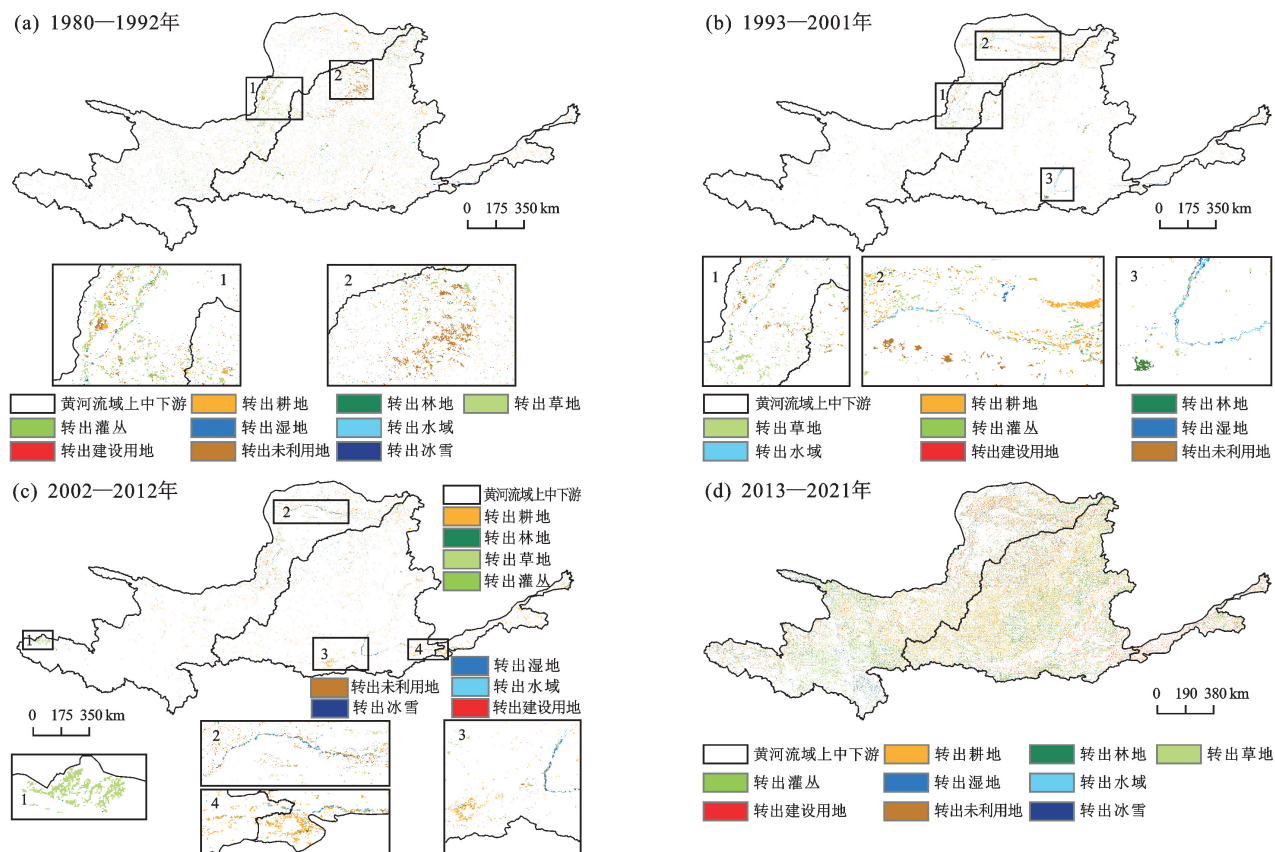


图 8 黄河流域各时期的落势图谱

Fig. 8 Falling TUPU of each period in the Yellow River Basin

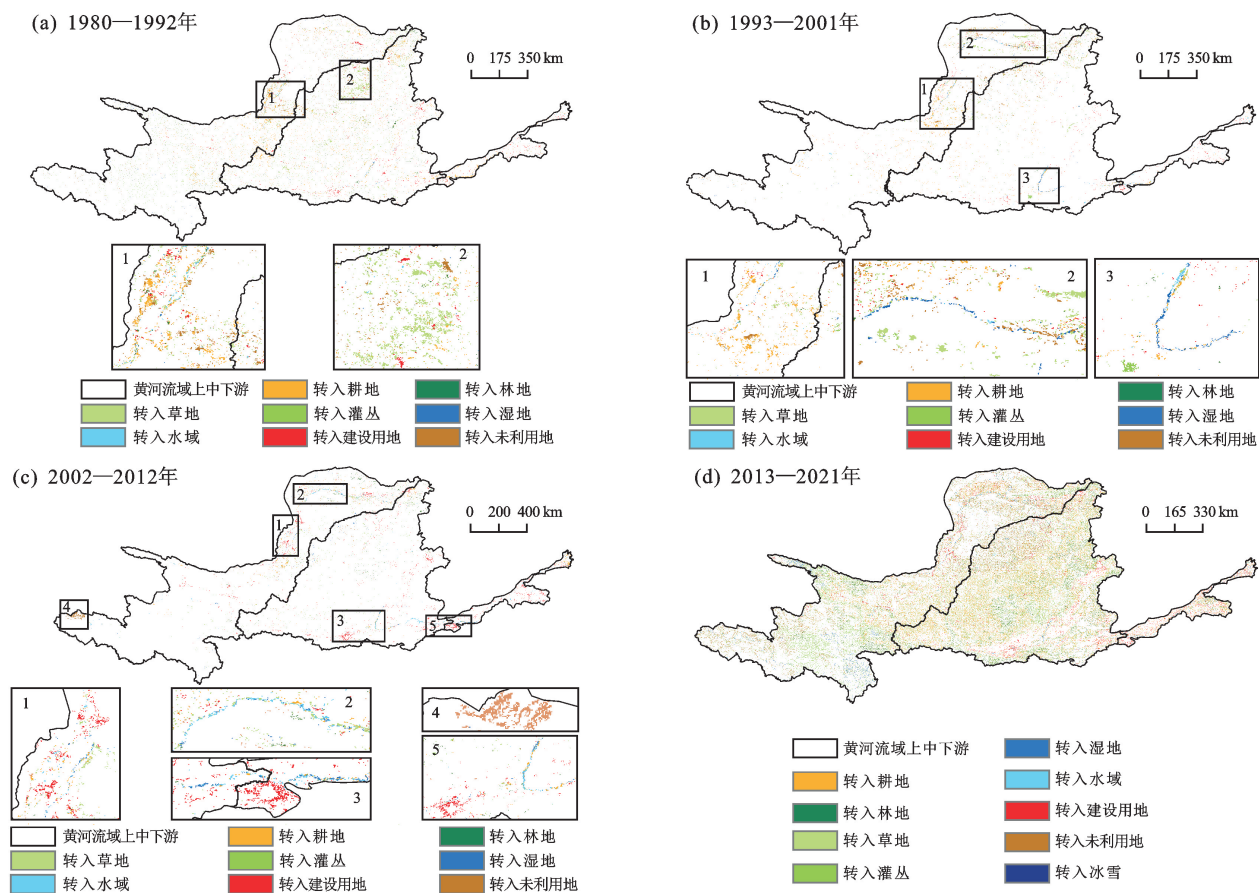


图 9 黄河流域各时期的涨势图谱

Fig. 9 Rising TUPU of each period in the Yellow River Basin

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

为揭示流域整体变化规律,根据突变点分析结果将研究时段重新划分为Ⅰ期(1980—1992 年)、Ⅱ期(1992—2001 年)、Ⅲ期(2001—2012 年)、Ⅳ期(2012—2021 年),进而对土地利用变化模式进行分类,见表 5 和图 10。

稳定不变型的占比最大(76.52%),呈现“草地和耕地长期不变”的稳定格局,在上游所占比重最大,表明上游的土地利用格局较为稳定。Ⅳ期变化型(16.26%)以“耕地转为草地”为主。间歇变化型(3.15%)和持续变化型(0.37%)在中下游所占比重最大,以“耕地和草地”双向转换为主,前者广泛分布于中

上游,后者主要分布在上游宁夏北部和内蒙古东部,沿内蒙古段、山西和陕西及河南交界段、河南段的黄河水系集中分布。Ⅲ期变化型(1.68%)以“耕地转为建设用地”为主,在下游所占比重最大,集中分布在西安、郑州、东营、呼和浩特、宁夏北部及青海中部。Ⅰ期变化型(1.37%)和Ⅱ期变化型(0.65%)均在下游所占比重最大并以“草地转为耕地”为主,前者集中分布在宁夏、陕西北部以及内蒙古东部等,后者集中分布在流域北部及东南部等地。宁夏和内蒙古变化模式多样,中上游以Ⅳ期变化型和间歇变化型为主(22.50%,16.58%),下游以Ⅲ期变化型和Ⅳ期变化型为主(18.74%)。

表 5 1980—2021 年土地利用类型变化模式
Table 5 Patterns of land use type change from 1980 to 2021

变化模式	演变模式	面积占比/%				最大变化	
		全域	上游	中游	下游	最大面积类型	面积/km ²
Ⅰ期(1980—1992 年)变化型	只有Ⅰ期变化,其他时期不变	1.37	1.02	1.66	2.14	草地—耕地	2 352
Ⅱ期(1992—2001 年)变化型	只有Ⅱ期变化,其他时期不变	0.65	0.77	0.44	1.64	草地—耕地	979
Ⅲ期(2001—2012 年)变化型	只有Ⅲ期变化,其他时期不变	1.68	1.41	1.67	5.06	耕地—建设用地	3 379
Ⅳ期(2012—2021 年)变化型	只有Ⅳ期变化,其他时期不变	16.26	13.83	18.98	13.68	耕地—草地	29 569
稳定不变型	土地利用类型始终不变	76.52	79.89	73.33	73.40	草地 耕地	335 816 176 324
间歇变化型	2 个或连续 2 个时期不变	3.15	2.75	3.52	3.61	草地—耕地—草地	1 451
持续变化型	变化 3~4 次	0.37	0.33	0.41	0.47	耕地—草地—耕地—草地	308

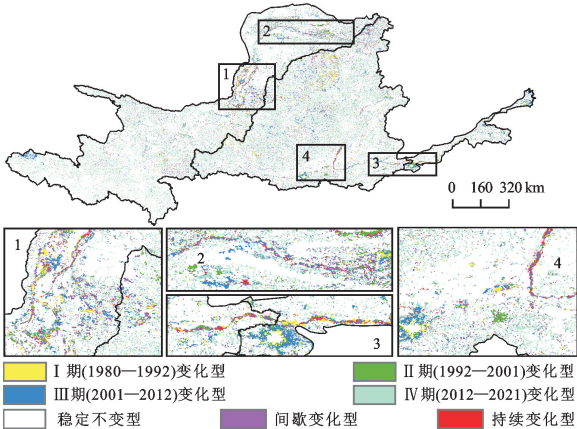


图 10 黄河流域 1980—2021 年变化模式图谱
Fig. 10 Change Pattern TUPU in the Yellow River Basin from 1980 to 2021

3.4 空间格局分析

根据涨落势图谱选择转出率最高的湿地与水域、转入率最高的建设用地进行分析。湿地、水域、建设用地的标准差椭圆及重心迁移轨迹(图 11、表 6 和表 7)可知,湿地重心在 2001 年之前偏西北,之后偏向西南,标准差椭圆覆盖范围整体向西南移动,面积逐渐减少,表明分布偏向西南并逐渐集中,扁率呈增大趋

势,表明方向性明显,重心迁移速度逐年增加。水域重心的迁移速度逐渐降低,重心在 2001 年之前向东南偏移,之后回转并偏向西北,椭圆覆盖范围整体向东移动且面积逐渐增加,表明分布整体偏东并呈逐渐分散态势,扁率呈增大趋势,表明方向性明显。建设用地重心的迁移速度加快,2012 年之前偏向西南,之后偏向西北,椭圆覆盖范围整体向西北移动且面积逐渐减少,扁率逐渐缩小,表明分布呈逐渐集中态势。

4 讨论

随着黄河流域的经济不断发展及一系列生态保护政策的实施,该流域的土地利用结构趋向于多样性,变化速度不断加快,这与黄钰清等^[32]研究结果结论一致。本研究根据逐年土地利用/覆被数据划分阶段,土地利用结构均衡度呈现的阶段性变化证明划分的阶段是合理的,并与实施的重要政策有较强的关联性,说明政策对土地利用变化的影响较大。

1980—1992 年最大的变化面积类型是草地转为耕地,集中分布在流域内宁夏和内蒙古东北部等地,农田大面积开垦。1993—2001 年耕地挤占大量草地,主要变化趋势与上一阶段基本相同,但出现水域

转为湿地、在流域北部草地转为未利用地的明显现象,前者可能是由于自 1990 年代源区和上游径流大幅减少导致下游发生断流^[33],造成部分水域变为湿地,后者可能与长期过度放牧、人类取水增加及气候变暖、流域北部降水增加有关^[34],一方面上游畜牧量增加、中上游拦坝蓄水且中游工农业用水激增导致地下水位下降草地衰退^[35];另一方面,气候暖湿化使得植被生长期延长,同时也造成冻土退化导致冻融侵蚀和水力侵蚀,加剧水土流失,草地退化现象逐渐严重。2002—2012 年大量耕地和湿地转为水域,这可能主要与实施的生态退耕政策、更加注重水源保护以及降水增加^[36]有关。建设用地大幅挤占耕地,集中分布在西安、郑州和银川等经济发展重地,这主要与中国的城镇化进入新一轮快速发展时期有关^[1],这一时期被认为是建设用地“冒进式”增长^[37]。与此同时出现大量耕地转为林地,集中分布在内蒙古东北部及山西北部,这主要可能与 1978 年开始的三北防护林工程、2000 年启动天然林保护及 2002 年全面启动退

耕还林还草等工程项目有关,说明实施的一系列生态保护政策有明显效果,植被覆盖情况得到明显改善,这与相关研究^[38]结论一致。然而在上游源区青海段仍出现较严重的天然草地退化现象,推测可能是即使 2005 年实施三江源自然保护区生态建设,退化速率降低,但气温升高引起的区域暖干化是妨碍草地恢复的主要原因,过度放牧和不合理开发仍是退化加剧的重要原因^[39],因此源区的草地是重点关注对象。2013—2021 年耕地萎缩程度高而草地扩张强劲,2002 年全面启动的退耕还草仍是其主要原因。灌丛和湿地缩减严重,均主要流向草地。前者可能是灌丛常被视为多余的自然植被而被砍伐,以及促进草地恢复的生态保护政策的实施,而后者可能一方面是气温升高导致地下冻土层融化,地表水向土层深处渗透,湿地逐渐退化为草甸,另一方面在 2018 年流域大、中型水库由 157 座增加为 219 座^[40],大型水利工程及水库的建设会造成下游水位下降进而对湿地产生负面影响。

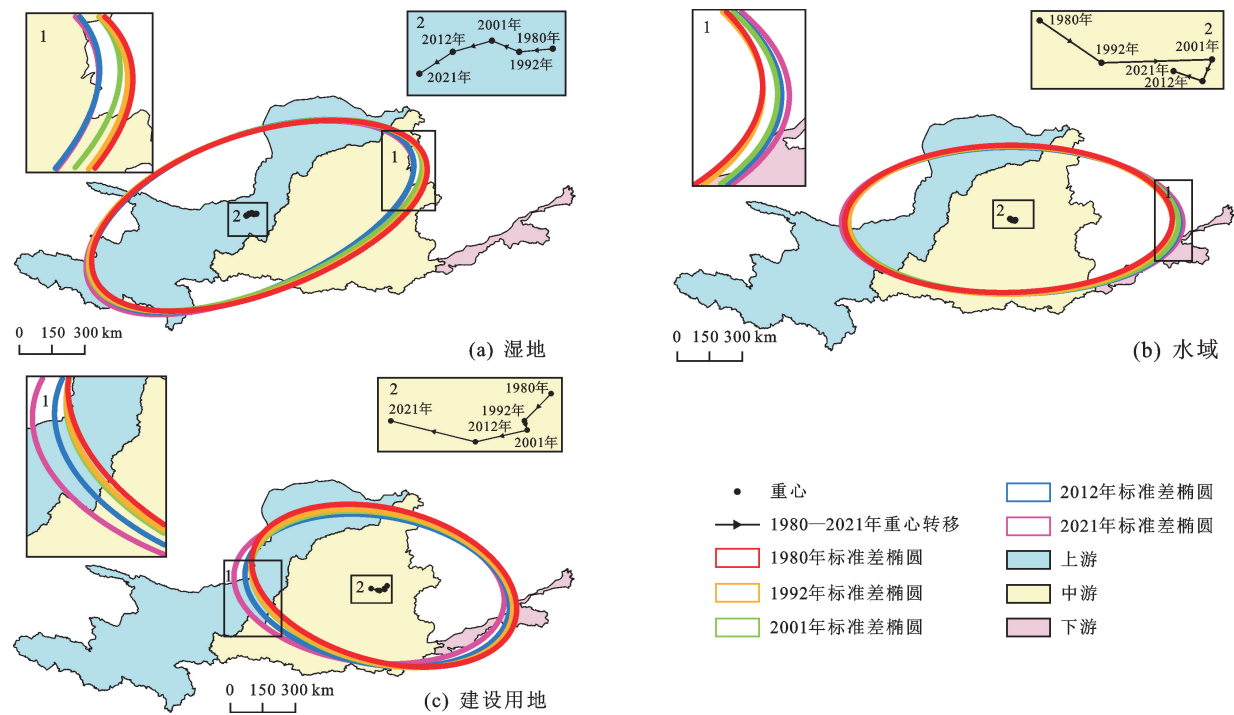


图 11 典型年份湿地、水域、建设用地的标准差椭圆及重心迁移轨迹

Fig. 11 Standard deviation ellipse and center of gravity migration trajectory of wetland, water, and construction land in typical years

表 6 湿地、水域、建设用地的标准差椭圆参数

Table 6 Standard deviation ellipse parameters for wetland, water, and construction land

年份	湿地				水域				建设用地			
	面积/ km ²	长轴标准 差/km	短轴标准 差/km	方位角/ (°)	面积/ km ²	长轴标准 差/km	短轴标准 差/km	方位角/ (°)	面积/ km ²	长轴标准 差/km	短轴标准 差/km	方位角/ (°)
1980	767 838	681.29	358.80	55.2	667 697	616.12	344.98	78.41	587 008	526.00	355.25	102.89
1992	742 692	683.50	357.00	55.11	665 686	610.45	347.14	78.96	570 234	515.20	352.34	100.42
2001	751 510	683.60	350.00	54.12	672 544	620.85	344.84	79.63	566 639	513.81	351.06	99.21
2012	729 802	668.90	347.40	52.39	678 716	628.49	343.78	79.65	562 394	512.20	349.52	95.19
2021	742 692	676.40	349.50	52.91	694 540	643.55	343.56	79.62	571 310	516.79	351.91	90.73

表 7 各期的土地利用类型重心迁移速率

Table 7 Migration rate of land use type center of gravity for each period

km/a

迁移时期	耕地	林地	草地	灌丛	湿地	水域	建设用地	未利用地	冰雪
I 期 (1980—1992)	0.11	0.19	0.03	0.13	0.98	0.86	1.47	0.12	0
II 期 (1992—2001)	0.28	0.26	0.30	0.43	1.12	1.69	0.50	0.99	0
III 期 (2001—2012)	0.42	1.15	0.33	0.48	1.28	0.30	2.23	0.16	2.21
IV 期 (2012—2021)	0.41	0.66	0.84	1.21	1.52	0.47	4.44	0.98	11.51

5 结 论

(1)将 1980—2021 年划分为 4 个阶段:1980—1992 年、1993—2001 年、2002—2012 年、2013—2021 年。土地利用结构均衡度阶段性变化与实施的重大工程措施关联性高,并与划分的阶段较吻合,政策与土地利用变化密切相关。后 2 期的数量结构变化明显比前 2 期快,建设用地、湿地和水域变动敏感。1980—1992 年末利用地萎缩程度高且主要流向草地。1993—2001 年耕地挤占大量草地。2002—2012 年建设用地、林地和水域扩张强劲,大量建设用地和林地挤占耕地,这与该流域人口快速增长、建设三北防护林及黄河中游防护林体系、实施退耕还林等措施有关,但上游源区青海段草地仍退化较为严重。2013—2021 年耕地、湿地和灌丛萎缩程度高而草地扩张强劲,退耕还草现象明显,城市化趋势放缓,作为流域主要结构之一的耕地(约 26.00%)仍在迅速减少。即使实施一系列湿地保护与修复工程,但湿地近些年仍在迅速减少,湿地应是未来重点关注对象。

(2)流域中上游以 2012—2021 年变化型和间歇变化型、耕地和草地相互转换为主,下游以 2001—2012 年和 2012—2021 年变化型、耕地转为建设用地和草地为主。上游宁夏北部和内蒙古东部及部分沿黄河水系分布的地区土地利用变化频繁,西安、郑州和呼和浩特等城市化现象明显。

(3)湿地和建设用地的重心迁移速度逐年增加,分别偏向西南和西北,分别呈现向西南和西北的集中分布态势。水域重心的迁移速度逐渐降低,在 2001 年之前向东南偏移,之后回转并偏向西北,呈向东分散态势,与近些年实施的“西部大开发”战略有关,自该政策实施,政府在西部出台一系列在城市建设、劳动力和土地管理等方面的激励政策,西部地区加速发展,人类活动重心西移。

6 政策建议

政策对土地利用变化的影响难以量化,但却非常重要,因地制宜制定合理的土地管理政策可以极大地优化土地利用/覆被结构,进而弥补气候变化及经济发展带来的负面影响。耕地和草地是黄河流域的主要分布类型,而耕地仍在迅速减少,鉴于黄河流域

承担着保障国家粮食安全和生态安全的重任,故在落实退耕还林还草生态保育措施的同时,必须坚守耕地红线,严格遵守耕地保护制度,平衡好草地、耕地和建设用地占比,促进建设用地和耕地集约发展。2002—2012 年源区发生严重的天然草地退化现象,虽然由于近些年实施的退耕还草等生态保护措施,草地整体逐渐恢复,但仍存在荒漠化现象,而源区是黄河流域的重中之重,因此不仅需要针对源区制定有效的草地恢复制度更需要严格的监督预防措施。湿地是蓄水防洪的天然“海绵”,然而虽然实施一系列湿地保护与修复工程,但湿地近些年仍在迅速减少,主要在沿着内蒙古段的黄河水系及在上游四川、青海北部等地,因此这些地区需要进一步制定更加严格有效的湿地保护与恢复制度,与此同时要严格把控一系列水库建设等水利工程的负面影响,并在引黄灌区内科学调控黄河水资源,以保证流域内水环境的稳定。对于土地利用变化频繁的地区如宁夏北部和内蒙古东部及部分沿黄河水系分布的地区同样需要密切关注。

参考文献:

[1] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等.20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J].地理学报,2014,69(1):3-14.
LIU J Y, KUANG W H, ZHANG Z X, et al. Spatio-temporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J].Acta Geographica Sinica,2014,69(1):3-14.

[2] GÜNERALP B, SETO K C, RAMACHANDRAN M. Evidence of urban land teleconnections and impacts on hinterlands[J].Current Opinion in Environmental Sustainability,2013,5(5):445-451.

[3] 李秀彬.全球环境变化研究的核心领域:土地利用/土地覆被变化的国际研究动向[J].地理学报,1996,51(5):553-557.
LI X B. A review of the international researches on land use/land cover change [J]. Acta Geographica Sinica, 1996,51(5):553-557.

[4] PERRING M P, DE FRENNE P, BAETEN L, et al. Global environmental change effects on ecosystems: The importance of land-use legacies[J].Global Change Biology,2016,22(4):1361-1371.

[5] TURNER B, SKOLE D L, SANDERSON S, et al. Land-

- use and land-cover change[J].Global Change Report (Sweden),1995,43(1995):669-679.
- [6] 仇振宇,朱记伟,解建仓,等.近 25 年来大西安地区土地利用时空格局变化和热区诊断分析[J].西安理工大学学报,2020,36(2):159-169.
- ZHANG Z Y, ZHU J W, XIE J C, et al. Spatial-temporal changes of land use and hot zone diagnosis analysis in the past 25 years of the Great Xi'an area[J].Journal of Xi'an University of Technology,2020,36(2):159-169.
- [7] 李通,崔丽珍,杨雅茜,等.黄河流域生态水文学研究态势分析[J].中国科学院大学学报,2023,40(1):29-38.
- LI T, CUI L Z, YANG Y Q, et al. Trend analysis of ecohydrology research of Yellow River Basin[J].Journal of University of Chinese Academy of Sciences,2023,40(1):29-38.
- [8] WANG X X, DONG S K, YANG B, et al. The effects of grassland degradation on plant diversity, primary productivity, and soil fertility in the alpine region of Asia's headwaters[J].Environmental Monitoring and Assessment,2014,186(10):6903-6917.
- [9] ZHOU D G, HUANG R H. Response of water budget to recent climatic changes in the source region of the Yellow River[J].Chinese Science Bulletin,2012,57(17):2155-2162.
- [10] 孙永军,周强,杨日红.黄河流域土地荒漠化动态变化遥感研究[J].国土资源遥感,2008,20(2):74-78,121.
- SUN Y J, ZHOU Q, YANG R H. A study of land desertification dynamic change in Yellow River Basin[J].Remote Sensing for Land and Resources,2008,20(2):74-78,121.
- [11] 胡春宏,张治昊.论黄河河道平衡输沙量临界阈值与黄土高原水土流失治理度[J].水利学报,2020,51(9):1015-1025.
- HU C H, ZHANG Z H. Discussing of the critical threshold of equilibrium sediment transport in the Yellow River and the degree of soil erosion control in the Loess Plateau[J].Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(9):1015-1025.
- [12] ZHANG Y, CHEN Y P. Research trends and areas of focus on the Chinese Loess Plateau: A bibliometric analysis during 1991—2018[J].Catena,2020,194:e104798.
- [13] 邴龙飞,邵全琴,刘纪远.近 30 年黄河源头土地覆被变化特征分析[J].地球信息科学学报,2011,13(3):289-296.
- BING L F, SHAO Q Q, LIU J Y. Characteristic of land cover changes in the Yellow River headwaters region over the past 30 years[J].Journal of Geo-Information Science,2011,13(3):289-296.
- [14] 刘璐璐,曹巍,邵全琴.近 30 年来长江源区与黄河源区土地覆被及其变化对比分析[J].地理科学,2017,37(2):311-320.
- LIU L L, CAO W, SHAO Q Q. Different characteristics of land cover changes in source region of the Yangtze River and the Yellow River in the past 30 years [J]. Scientia Geographica Sinica,2017,37(2):311-320.
- [15] 李艳忠,刘昌明,刘小莽,等.植被恢复工程对黄河中游土地利用/覆被变化的影响[J].自然资源学报,2016,31(12):2005-2020.
- LI Y Z, LIU C M, LIU X M, et al. Impact of the grain for green project on the land use/cover change in the middle Yellow River[J].Journal of Natural Resources,2016,31(12):2005-2020.
- [16] 张冉,王义民,畅建霞,等.基于水资源分区的黄河流域土地利用变化对人类活动的响应[J].自然资源学报,2019,34(2):274-287.
- ZHANG R, WANG Y M, CHANG J X, et al. Response of land use change to human activities in the Yellow River Basin based on water resources division [J].Journal of Natural Resources,2019,34(2):274-287.
- [17] 肖东洋,牛海鹏,闫弘轩,等.1990—2018 年黄河流域(河南段)土地利用格局时空演变[J].农业工程学报,2020,36(15):271-281,326.
- XIAO D Y, NIU H P, YAN H X, et al. Spatiotemporal evolution of land use pattern in the Yellow River Basin (Henan section) from 1990 to 2018[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2020,36(15):271-281,326.
- [18] 付景保,李思瑶,李小根,等.南水北调中线工程建设背景下南阳市土地利用结构及产业结构动态变化分析[J].河南理工大学学报(自然科学版),2023,42(1):87-94.
- FU J B, LI S Y, LI X G, et al. Analysis on the dynamic changes of land use structure and industrial structure in Nanyang City under the background of the construction of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project[J].Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science),2023,42(1):87-94.
- [19] 付乐,迟妍妍,于洋,等.2000—2020 年黄河流域土地利用变化特征及影响因素分析[J].生态环境学报,2022,31(10):1927-1938.
- FU L, CHI Y Y, YU Y, et al. Characteristics and driving forces of land use change in the Yellow River Basin from 2000 to 2020[J].Ecology and Environmental Sciences,2022,31(10):1927-1938.
- [20] GONG P, LI X C, ZHANG W. 40-Year (1978—2017) human settlement changes in China reflected by impervious surfaces from satellite remote sensing[J].Science Bulletin,2019,64(11):756-763.
- [21] XU Y D, YU L, PENG D L, et al. Annual 30-m land use/land cover maps of China for 1980—2015 from the integration of AVHRR, MODIS and Landsat data using

- the BFAST algorithm[J].Science China Earth Sciences, 2020,63(9):1390-1407.
- [22] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.土地利用现状分类:GB/T 21010—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Current land use classification: GB/T 21010 — 2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [23] 陈学凯,雷宏军,徐建新,等.气候变化背景下贵州省农作物生长期干旱时空变化规律[J].自然资源学报,2015,30(10):1735-1749.
- CHEN X K, LEI H J, XU J X, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of drought during crop growth period in Guizhou Province from climate change perspectives[J].Journal of Natural Resources, 2015, 30 (10):1735-1749.
- [24] 吴玥葶,郭利丹,曾天山,等.渭公河径流多时间尺度变化特征研究[J].中国农村水利水电,2021(10):42-49.
- WU Y T, GUO L D, ZENG T S, et al. An analysis of multi-time scales characteristics of runoff in mainstream of Mekong River [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(10):42-49.
- [25] 陈彦光,刘继生.城市土地利用结构和形态的定量描述:从信息熵到分数维[J].地理研究,2001,20(2):146-152.
- CHEN Y G, LIU J S. An index of equilibrium of urban land-use structure and information dimension of urban form[J].Geographical Research, 2001, 20(2):146-152.
- [26] 陈忠升,陈亚宁,李卫红.新疆和田河流域土地利用/覆被变化及其驱动力分析[J].中国沙漠,2010,30(2):326-333.
- CHEN Z S, CHEN Y N, LI W H. Land use/cover change and their driving forces in hotian river basin of Xinjiang[J].Journal of Desert Research, 2010, 30(2): 326-333.
- [27] 于元赫,李子君,林锦阔,等.沂河流域土地利用时空变化图谱特征分析[J].自然资源学报,2019,34(5):975-988.
- YU Y H, LI Z J, LIN J K, et al. TUPU characteristics of spatiotemporal variation for land use in the Yihe River Basin[J].Journal of Natural Resources, 2019, 34 (5):975-988.
- [28] 杨爱民,朱磊,陈署晃,等.1975—2015年玛纳斯河流域土地利用变化的地学信息图谱分析[J].应用生态学报, 2019,30(11):3863-3874.
- YANG A M, ZHU L, CHEN S H, et al. Geo-informatic spectrum analysis of land use change in the Manas River Basin, China during 1975—2015 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30 (11): 3863-3874.
- [29] YE Q H, LIU G H, TIAN G L, et al. Geospatial-temporal analysis of land-use changes in the Yellow River Delta during the last 40 years[J].Science in China Series D: Earth Sciences, 2004, 47(11):1008-1024.
- [30] 王健,刘欣雨.基于“风险—效应”的土地利用空间冲突识别与测度[J].农业工程学报,2022,38(12):291-300.
- WANG J, LIU X Y. Recognizing and measuring spatial conflict of land use via “risk-effect”[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(12):291-300.
- [31] 李森,王涛,颜长珍.1965—2015年毛乌素沙地人类活动强度时空变化研究[J].兰州大学学报(自然科学版), 2021,57(3):330-337.
- LI S, WANG T, YAN C Z. Spatial-temporal evolution of human activity intensity in the Mu Us Sandy Land from 1965 to 2015 [J].Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2021, 57(3):330-337.
- [32] 黄钰清,李骁尧,于强,等.1995—2018年黄河流域土地利用变化及驱动力分析[J].西北林学院学报,2022,37(6):113-121.
- HUANG Y Q, LI X Y, YU Q, et al. An analysis of land use change and driving forces in the Yellow River-Basin from 1995 to 2018[J].Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(6):113-121.
- [33] 黄荣辉,周德刚.气候变化对黄河径流以及源区生态和冻土环境的影响[J].自然杂志,2012,34(1):1-9.
- HUANG R H, ZHOU D G. The impact of climate change on the runoff of the Yellow River and ecosystem and frozen soil in its source area[J].Chinese Journal of Nature, 2012, 34(1):1-9.
- [34] 黄建平,张国龙,于海鹏,等.黄河流域近40年气候变化的时空特征[J].水利学报,2020,51(9):1048-1058.
- HUANG J P, ZHANG G L, YU H P, et al. Characteristics of climate change in the Yellow River Basin during recent 40 years[J].Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9):1048-1058.
- [35] 王尧,陈睿山,郭迟辉,等.近40年黄河流域资源环境格局变化分析与地质工作建议[J].中国地质,2021,48(1):1-20.
- WANG Y, CHEN R S, GUO C H, et al. Changes of resource and environmental pattern of the Yellow River Basin in the past 40 years and suggestions on geological work[J].Geology in China, 2021, 48(1):1-20.
- [36] 赵慧霞,卓莹莹,刘厚凤.1961—2019年黄河流域降水量时空变化特征分析[J].人民黄河,2022,44(3):26-31.
- ZHAO H X, ZHUO Y Y, LIU H F. Temporal and spatial variation characteristics of precipitation in the Yellow River Basin from 1961 to 2019[J].Yellow River, 2022, 44(3):26-31.

- system service value in Shaanxi Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(9): 3331-3342.
- [36] 陈万旭, 李江风, 朱丽君. 长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(2): 325-337.
- CHEN W X, LI J F, ZHU L J. Spatial heterogeneity and sensitivity analysis of ecosystem services value in the Middle Yangtze River region[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(2): 325-337.
- [37] 陈相标, 丁文荣, 李孝川. 滇中城市群土地利用转型及生态系统服务价值交叉敏感性分析[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(6): 233-241.
- CHEN X B, DING W R, LI X C. Analysis of cross-sensitivity of land use transition and ecosystem service value of urban agglomeration in central Yunnan[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(6): 233-241.
- [38] 尹登玉, 于昊辰, 卢彦琦, 等. 2000—2020年黄河流域国土空间格局演变及生态响应[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(4): 217-228.
- YIN D Y, YU H C, LU Y Q, et al. Spatial pattern evolution of territorial space and its effects on ecological response in the Yellow River Basin during 2000—2020[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(4): 217-228.
- [39] 秦明星, 杨翠翠, 徐立帅, 等. 黄河流域生态服务价值与经济协调发展的时空演化研究[J]. *地球环境学报*, 2022, 13(4): 491-505.
- QIN M X, YANG C C, XU L S, et al. Analysis of the spatiotemporal evolution of the coordinated development of ecosystem service value and economy in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Earth Environment*, 2022, 13(4): 491-505.
- [40] LUO Q L, ZHOU J F, LI Z G, et al. Spatial differences of ecosystem services and their driving factors: A comparison analysis among three urban agglomerations in China's Yangtze River Economic Belt[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 725: e138452.
- [41] 刘耕源, 杨青, 黄俊勇. 黄河流域近十五年生态系统服务价值变化特征及影响因素研究[J]. *中国环境管理*, 2020, 12(3): 90-97.
- LIU G Y, YANG Q, HUANG J Y. The change characteristics and influence factors of ecosystem services valuation of the Yellow River Basin from 2000 to 2015[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2020, 12(3): 90-97.
- [42] 刘翊涵. 川西高山高原区不同土地利用情景对生态服务价值的影响研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2022.
- LIU Y H. Evaluating the impacts of land use changes on ecosystem service value under different scenarios in the Alpine Plateau Area of Western Sichuan[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2022.
- [43] 庞一剑. 基于遥感技术的若尔盖高原湿地生态系统的评价及其监测[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- PANG Y J. Evaluation and monitoring of Zoigê Plateau wetland ecosystem based on remote sensing technology [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- (上接第177页)
- [37] 陆大道, 姚士谋, 李国平, 等. 基于我国国情的城镇化过程综合分析[J]. *经济地理*, 2007, 27(6): 883-887.
- LU D D, YAO S M, LI G P, et al. Comprehensive analysis of the urbanization process based on China's conditions[J]. *Economic Geography*, 2007, 27(6): 883-887.
- [38] 张乐艺, 李霞, 冯京辉, 等. 2000—2018年黄河流域NDVI时空变化及其对气候和人类活动的双重响应[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(5): 276-286.
- ZHANG L Y, LI X, FENG J H, et al. Spatial-temporal changes of NDVI in Yellow River Basin and its dual response to climate change and human activities during 2000—2018[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(5): 276-286.
- [39] 杜际增, 王根绪, 李元寿. 近45年长江黄河源区高寒草地退化特征及成因分析[J]. *草业学报*, 2015, 24(6): 5-15.
- DU J Z, WANG G X, LI Y S. Rate and causes of degradation of alpine grassland in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers during the last 45 years[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(6): 5-15.
- [40] 梁晓文. 基于GEE的黄河流域湿地时空演变及驱动力分析[D]. 郑州: 河南大学, 2023.
- LIANG X W. Temporal and spatial variations and driving forces of wetlands in the Yellow River basin based on GEE [D]. Zhengzhou: Henan University, 2023.