

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2026.05.018

南水北调中线工程水源区土地利用与覆被变化及其驱动力分析

李小根¹,董馨月¹,朱四新¹,段小芳¹,付景保²,郜婷婷¹,彭亮¹

(1. 华北水利水电大学地球科学与工程学院; 2. 河南工程学院环境与生物工程学院)

摘要:基于 1999—2019 年 30 m 分辨率中国年度土地覆盖产品,运用 GIS 空间分析、土地利用转移矩阵及土地利用与覆被变化(LUCC)特征指数,系统分析了 1999—2019 年南水北调中线工程水源区 LUCC 时空演变过程,并构建了引入空间滞后项的 Logistic 回归模型,从自然、气候、区位和社会经济 4 个维度定量识别了 LUCC 的主导驱动力。结果表明:1999—2019 年水源区土地利用格局发生显著结构性调整,森林、水体和不透水地表持续扩张,农田、灌木和草地显著缩减,整体呈现生态修复、城镇化与工程驱动的阶段性演进特征;土地利用转移以农田向森林与不透水地表转移为主,转移强度随阶段推进持续增强,形成上游高耗减与高恢复、中游城镇扩张与高强度开发、库区以工程转移为主导的差异性格局;LUCC 具有明显的空间集聚与传导特征,农田收缩和森林扩张同时受自然因素、区位因素与社会经济因素的共同作用,而水体扩张主要由工程调蓄过程主导,对传统因素响应较弱;在重大水利工程运行背景下,水源区 LUCC 呈现出向生态安全与工程保障双重目标导向转变的重构规律。

关键词:南水北调中线工程水源区;土地利用与覆被变化;GIS;Logistic 回归模型;驱动力

中图分类号:F301.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2026)05-0164-11

Analysis of land use and cover change and its driving forces in water source area of Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project//Li Xiaogen¹, Dong Xinyue¹, Zhu Sixin¹, Duan Xiaofang¹, Fu Jingbao², Gao Tingting¹, Peng Liang¹(1. College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power; 2. College of Environment and Biological Engineering, Henan University of Engineering)

Abstract: Based on the 30-m resolution annual land cover products of China from 1999 to 2019, GIS spatial analysis, land use transfer matrices, and land use and land cover change (LUCC) feature indices were employed to systematically analyze the spatiotemporal evolution process of LUCC in water source area of Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project from 1999 to 2019. A Logistic regression model with spatial lag terms was constructed to quantitatively identify the dominant driving forces of LUCC from natural, climatic, locational, and socioeconomic dimensions. The results show that significant structural adjustments are observed in land use patterns, with continuous expansion of forest, water body, and impervious surfaces, and notable reduction of cropland, shrubland and grassland. Overall, it presents phased evolution characteristics driven by ecological restoration, urbanization and engineering. Land use transitions are dominated by cropland to forest and cropland to impervious surface transfers, with transfer intensity increasing over time, forming a heterogeneous pattern characterized by high depletion and high recovery in the upstream, urban expansion and intensive development in the midstream, and engineering-induced conversion in reservoir areas. LUCC exhibits significant spatial clustering and spillover effects. Cropland reduction and forest expansion are jointly influenced by natural, locational, and socioeconomic factors, whereas water body expansion is primarily controlled by engineering regulation, showing weak responses to conventional factors. Under the operation of major water transfer projects, LUCC in the water source area has shown a restructuring pattern that shifts toward dual objectives of ecological security and engineering guarantee.

基金项目:国家自然科学基金项目(42377490,42077449);河南省重点实验室项目(豫科[2025]113号;58,59);河南省哲学社会科学规划项目(2022BJJ035);河南省研究生教育改革与质量提升工程项目(YJS2024JC03,YJS2026AL003);华北水利水电大学研究生教育改革与质量提升工程项目(NCWUJJC202302)

作者简介:李小根(1973—),男,教授,博士,主要从事地理信息系统研究。E-mail:lixiaogen@ncwu.edu.cn
通信作者:付景保(1966—),男,教授,硕士,主要从事区域生态环境保护与可持续发展研究。E-mail:fujingbao@126.com

南水北调工程作为国家重大战略性基础设施,其水源区生态环境质量与土地利用格局稳定性直接关系到工程运行安全与长期综合效益^[1-2]。南水北调中线工程水源区(以下简称“水源区”)横跨鄂、豫、陕等多个省份,地貌类型复杂多样,涵盖山地丘陵、河谷平原等典型地形单元,不仅是重要的生态屏障和水源涵养区,也承载着区域经济发展与民生改善的压力^[3-4]。在全球气候变化与高强度人类活动双重胁迫下,水源区土地利用与覆被变化(land use and cover change,LUCC)正经历显著而复杂的重构过程。这一过程不仅反映了自然地理条件与区域经济社会发展的综合作用,也集中体现了退耕还林、生态移民、库区建设及城镇化扩张等多重政策与工程活动的叠加影响^[5]。因此,系统刻画水源区 LUCC 的长时间序列时空特征,深入揭示其驱动机制,对于统筹水源保护与区域发展、保障南水北调工程“一泓清水永续北送”具有重要现实意义。

LUCC 研究在国内外已形成较为成熟的研究体系。相关研究方法由早期的遥感解译与空间统计分析,逐步发展为融合景观格局指数^[6-8]、土地转移矩阵^[9-10]和多种模拟预测模型^[11-14],以及与水文等其他研究领域融合^[15-17]的综合分析框架;在驱动机制分析方面,普遍强调自然环境因子与社会经济因子的协同作用^[18-21]。例如:杨丽萍等^[22]基于随机森林算法完成了西安市多期土地利用分类,揭示了2010—2019年土地利用格局的时空演变特征,并从自然与社会经济层面探讨了其驱动机制;徐勇等^[23]通过挖掘多时相卫星影像的季节特征,系统分析了奈曼旗地区1985—2022年土地利用变化规律。然而,针对水源区这类受重大工程扰动显著、生态功能敏感且政策干预集中的区域,现有研究仍存在一定不足。多数研究聚焦短时间尺度下的宏观格局演变,对复杂背景下多因素耦合驱动的刻画相对有限。例如:刘克等^[24]基于遥感与地理信息系统(GIS)技术对2009—2019年南水北调核心水源区土地利用变化进行了时空分析,但未进一步深入探讨其驱动机制;申怀飞等^[25]利用陆地卫星(Landsat)专题制图仪遥感影像分析了1990—2010年水源区土地利用变化特征及其影响因素,但研究时段为通水之前,难以反映工程运行阶段的土地利用响应特征。因此,对于水源区长期整体格局演变、土地利用转移路径、变化强度定量表征及多维驱动机制的系统整合研究仍相对缺乏,限制了在重大跨流域调水工程背

景下对水源区土地利用重构规律的深入理解。

鉴于此,本文基于水源区1999—2019年30 m分辨率中国年度土地覆盖长时间序列数据,构建集时空演变、转移路径、变化强度、驱动机制于一体的分析框架,系统揭示水源区LUCC时空分异特征与演变过程,从自然、气候、区位与社会经济等多维度定量识别水源区LUCC的主导驱动机制,以期为重大水利工程背景下水源区土地资源的可持续利用、分区精准管控及生态保护与工程管理协同发展提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

水源区包括丹江口库区及上游区域,涉及河南、湖北、陕西、四川、重庆、甘肃6省(市)49个县(市、区),地理范围介于31°15'N~34°30'N、105°30'E~112°15'E之间,总面积约9.52万km²,地形以山地和丘陵为主,地势起伏较大,是典型的秦巴山地-汉江流域复合地貌区。区域气候属亚热带季风气候,温和湿润,年降水量为800~1600 mm,年际差异明显。区内植被类型丰富,以天然亚热带常绿阔叶林、落叶阔叶林、针叶林及其混交林为主,生态系统类型多样,生物多样性水平较高。区内水系发育密集,以汉江及其重要支流丹江为主体,径流最终汇入丹江口水库。研究区农业用地占比较高,人口分布具有明显空间差异。随着南水北调工程建设与通水运行,大规模移民安置、城镇扩展及基础设施建设显著增强了人类活动强度,对区域土地利用格局和生态系统结构产生了深刻影响。水源区如图1所示。



图1 水源区概况

Fig.1 Overview of water source area

1.2 数据来源

研究数据主要包括 LUCC 数据与驱动因子数据

两类。

a. LUCC 数据采用 30 m 分辨率中国年度土地覆盖数据集 (China annual land cover dataset, CLCD), 选取 1999—2019 年年度覆盖产品^[26]。该数据集基于 Landsat 系列遥感影像构建, 整体分类精度达到 80%, 能够较好地反映中国尺度长期土地覆盖动态变化。考虑到 CLCD 在复杂山区地形中可能存在地类混淆风险, 为确保数据在水源区尺度的适用性, 在预处理阶段对数据在研究区内的时序一致性与空间逻辑进行了系统检验。结果显示, 各类土地覆被面积随年份变化总体连续且趋势合理, 未出现突变或异常波动。进一步以全球 30 m 地表覆盖 (GlobeLand30) 数据为参照, 在研究区范围内对主要土地利用与覆被类型进行对比验证, 其总体精度达到 83%, 表明 CLCD 数据在研究区具有较高的区域可靠性。

b. 驱动因子数据涵盖自然、区位、气候及社会经济 4 个维度。自然因子包括数字高程模型 (DEM) 及基于 DEM 计算得到的坡度和坡向数据, DEM 数据来源于全国地理信息资源目录服务系统中的 1:100 万全国基础地理数据库, 空间分辨率为 30 m; 区位因子中的铁路、公路、水系、居民点矢量数据以及气候因子和社会经济因子中的年平均温度、年平均降水量、人口密度及人均国内生产总值 (GDP) 空间分布数据, 空间分辨率均为 1 km。

2 研究方法

2.1 LUCC 分析方法

2.1.1 土地利用转移矩阵

本文以 10 a 作为土地利用转移分析的时间步长, 既能够完整覆盖丹江口工程建设及初期运行过程中土地利用调整的传导周期, 综合反映工程扰动下土地系统的整体响应过程, 又有助于减少年度土地覆盖数据分类误差, 降低短期波动对结果的干扰, 更有利于识别区域长时间尺度土地利用格局演变的主导方向及阶段性差异^[27]。基于此, 采用马尔可夫模型构建土地利用转移矩阵^[28-29], 以 1999—2009 年和 2009—2019 年为两个分析阶段, 对不同土地利用与覆被类型之间的转移关系进行定量刻画。1999—2009 年主要反映工程建设及初期蓄水背景下的土地利用调整过程, 2009—2019 年则对应工程稳定运行阶段土地利用格局的进一步重构与巩固。通过转移矩阵分析, 系统揭示不同阶段土地利用与覆被类型的主要转入与转出路径, 为后续对驱动力机制的分析提供基础数据支撑。

2.1.2 LUCC 特征指数

为进一步刻画 LUCC 的速率、强度及土地利用特征, 在面积变化与转移路径分析的基础上, 引入土地利用动态度、开发度和耗减度指标, 从变化速率、开发水平与资源消耗 3 个维度综合表征土地利用系统的演变特征。动态度用于衡量不同土地利用与覆被类型在研究期内的年均变化速率, 反映其扩张或收缩的快慢程度; 开发度用于刻画区域土地利用的整体水平及其随时间的变化; 耗减度则用于表征土地资源在利用过程中由高生态功能类型向低生态功能类型转移的消耗强度。相关指标的计算方法与公式参见文献^[30]。

2.2 LUCC 驱动力分析方法

2.2.1 驱动因子的选取

目前对 LUCC 驱动力研究多以城市扩张区或一般流域为对象, 其指标体系通常侧重刻画土地开发强度与经济增长对 LUCC 的直接作用^[31-32]。然而, 水源区作为国家核心水源保障区, 其 LUCC 不仅受自然与经济因素影响, 还受到水源保护政策与工程建设约束的长期调控。因此, 本文在参考国内外相关研究成果的基础上, 结合水源区的功能定位, 对驱动力分析指标体系进行情景化重构与功能拓展。通过引入能够反映生态约束强度、人类活动可达性及工程调控背景下 LUCC 响应特征的空间代理变量, 实现对政策驱动因素的间接量化表达, 从而提升指标体系对水源区 LUCC 驱动机制的解释力。

本文从自然、气候、区位和社会经济 4 个维度, 选取 11 个代表性驱动因子 (图 2)。其中, 自然因素以高程、坡度和坡向为指标, 分别代表地表起伏程度、开发适宜性及地表能量分布, 构成土地利用空间分异的基础约束; 气候因素采用年平均温度与年平均降水量两项指标, 用以反映秦巴山区显著的气候梯度对植被生长及土地利用和覆被类型的长期影响; 区位因素通过到铁路、公路、河流及居民点的距

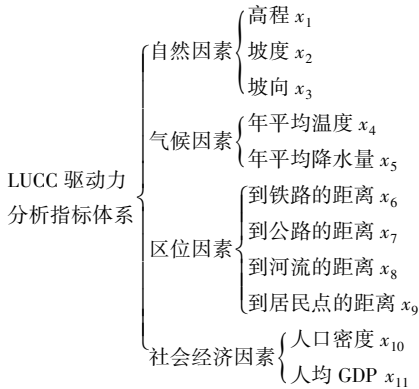


图 2 LUCC 驱动力分析指标体系

Fig. 2 LUCC driving force analysis index system

离表征,既反映人类活动可达性和集聚程度,亦间接刻画水源区在工程建设和保护政策约束下的空间管控特征;社会经济因素则以人口密度和人均 GDP 为指标,表征人类活动规模与资源利用强度,揭示水源保护政策下社会经济活动对 LUCC 的间接驱动效应。

2.2.2 驱动因子数据处理

为确保多源驱动因子在时空尺度上的一致性,对各类数据进行统一空间基准转换与尺度协调处理。所有数据均转换至 Krasovsky_1940_Albers 投影坐标系,并以研究区边界为统一空间范围进行裁剪,避免因投影差异和空间错位引入系统误差。基于 DEM 数据提取坡度与坡向,用以表征自然条件;基于铁路、公路、水系和居民点矢量数据生成相应距离栅格,以量化人类活动可达性及生态空间约束;气候因素与社会经济因素在裁剪与重采样后,与土地覆盖数据保持完全一致的空间分辨率和范围。最终,所有因子被构建为标准化栅格数据集,为后续回归分析提供可靠的数据基础。

2.2.3 Logistic 回归模型

与线性回归或多项式回归相比,Logistic 回归模型能有效处理二分类或多分类的因变量,并同时纳入连续型与分类型自变量,精准刻画自然因素与社会经济因素对 LUCC 发生概率的影响,因此 Logistic 回归模型被广泛用于相关研究^[33-34]。然而,LUCC 通常表现出显著的空间集聚性与扩散特征,传统 Logistic 回归模型在忽略空间依赖的情况下,可能低估或扭曲部分驱动因子的实际影响效应。为此,本文以像元尺度的二值 LUCC 栅格数据为基础,采用 K 近邻权重矩阵计算目标像元在邻域内发生变化的比例,构建了空间滞后变量,并将其作为空间解释变量与其他驱动因子一并纳入回归模型,以表征 LUCC 的空间依赖特征^[35-36]。模型拟合优度采用受试者工作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线的曲线下面积 (area under curve, AUC) 进行评价, AUC 值越大表明模型对变化格点与未变化格点的判别能力越强,通常以 0.7 ~ 0.8 为可接

受、>0.8 ~ 0.9 为较好、>0.9 为优秀^[37-38]。

3 结果与分析

3.1 水源区 LUCC 时空演变特征

水源区土地利用与覆被类型分为农田、森林、灌木、草地、水体、荒地和不透水地表 7 类。从时间演变来看,共分为 4 个连续变化时期 (表 1) : ①1999—2004 年,以生态修复型调整为主,农田和草地面积分别减少 610.58、570.32 km²,森林面积增加 1428.31 km²,生态恢复措施初显成效;不透水地表面积增幅较小,建设扰动处于较低水平。②2004—2009 年,变化强度明显增强,农田面积减少 2149.41 km²,森林扩张速度达到峰值,生态恢复效应持续累积;不透水地表面积变化率达到 12.26%,城镇化因素开始产生影响。③2009—2014 年,变化进入土地类型分化加剧的时期,森林面积仍保持增长但增速放缓,灌木和草地面积在林地扩张与建设用地挤压下持续减少;不透水地表面积快速增加 262.00 km²,逐渐成为影响格局变化的重要因素。④2014—2019 年,水体面积显著增加 269.15 km²,主要集中于丹江口库区及输水干线沿线,与南水北调中线工程蓄水运行高度一致;不透水地表仍保持增长,但增速较前一阶段回落,土地开发节奏趋于阶段性调整。

从空间分布特征看 (图 3、表 2),水源区 LUCC 具有明显区域差异。陕西省变化主要集中在南部山地林区,森林面积增加 5665.41 km²,农田、灌木和草地面积减少,生态恢复作用明显。甘肃省和四川省均表现为森林扩张的趋势,生态空间持续改善。湖北省水体面积增加 179.76 km²,森林面积增加 1262.60 km²,农田和草地面积减少。这一变化主要分布在丹江口库区和周边区域,反映出水库运行及生态保护对土地格局的重要影响。河南省农田面积减少 429.55 km²,不透水地表面积增加 125.46 km²,体现人类活动与城镇扩张影响。重庆市整体土地变化幅度较小,呈现森林面积增加与农田、草地面积减

表 1 水源区不同时期 LUCC 统计

Table 1 LUCC statistics in water source area during different periods

土地利用与 覆被类型	面积变化/km ²				变化率/%			
	1999—2004 年	2004—2009 年	2009—2014 年	2014—2019 年	1999—2004 年	2004—2009 年	2009—2014 年	2014—2019 年
农田	-610.58	-2149.41	-975.78	-2128.44	-2.36	-8.52	-4.23	-9.63
森林	1428.31	2656.12	1457.65	2664.10	1.47	2.70	1.44	2.60
灌木	-367.18	-133.17	-297.58	-190.97	-31.49	-16.67	-44.70	-51.87
草地	-570.32	-557.84	-472.93	-765.43	-15.56	-18.02	-18.64	-37.07
水体	39.32	65.03	26.59	269.15	5.79	9.05	3.39	33.22
荒地	-0.32	-0.08	0.05	0.52	-76.19	-80.00	250.00	742.86
不透水地表	80.77	119.35	262.00	151.07	9.04	12.26	23.97	11.15

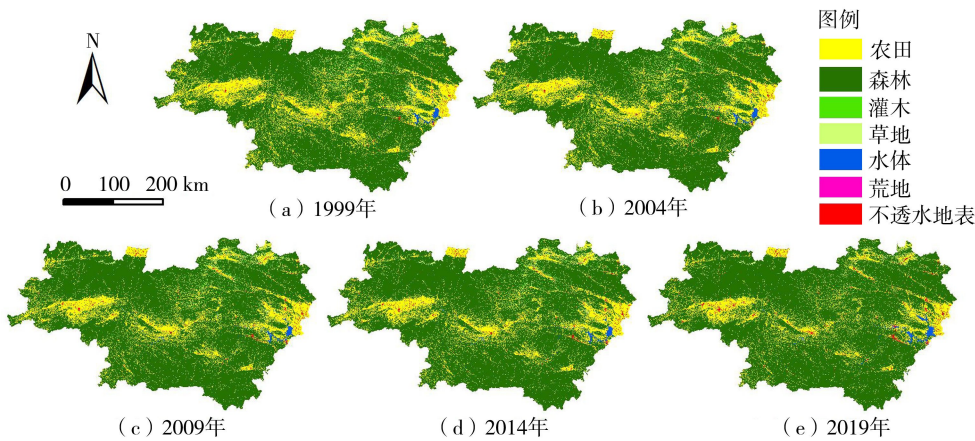


图3 水源区不同年份土地覆被空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of land cover in water source area in different years

表2 1999—2019年水源区各省(市)LUCC统计

单位: km²

Table 2 LUCC statistics in different provinces (municipalities) of water source area from 1999 to 2019

unit: km²

省(市)	农田	森林	灌木	草地	水体	荒地	不透水地表
陕西	-4023.42	5665.41	-674.11	-1408.41	50.36	-0.18	390.35
甘肃	-80.25	87.84	-2.02	-8.25	0.14	0	2.53
四川	-271.76	290.83	-20.50	-5.92	1.99	0	5.37
重庆	-31.21	73.42	27.05	-20.57	1.85	0	3.57
湖北	-927.40	1262.60	-130.78	-484.88	179.76	0.12	100.58
河南	-429.55	630.66	-111.69	-398.26	183.13	0.25	125.46

少并存的特征。

3.2 土地利用转移路径与时空异质性

基于土地利用转移矩阵,以2009年为时间节点,将研究期划分为1999—2009年和2009—2019年两个连续变化时期,对水源区主要土地利用转移路径进行分析。两个时期的土地利用转移路径既具有显著延续性,又呈现出明显的时序差异。1999—2009年,土地利用转移呈现出生态恢复趋势(表3),农田向森林转移面积达4176.82 km²,占森林总转入面积的73%,构成该阶段最核心的转移方向,与同期全国退耕还林还草工程高度一致,政策性生态恢复是该阶段土地系统演变的主导驱动力。草地向森林的转移为森林扩张提供了重要补充,反映自然演替与政策干预的叠加效应。农田向不透水地

表的转移虽规模较小,但已开始显现,城镇化空间压力产生局部影响。2009—2019年,转移结构在延续前期趋势的同时逐渐趋于复杂(表4)。农田向森林转移面积进一步扩大至4492.95 km²,生态恢复型转移持续存在;但与前一阶段相比,人类活动相关转移路径更为突出。农田向不透水地表转移面积显著增加,对城镇化进程和经济发展的影响提升;农田向水体转移路径在该阶段集中显现,与南水北调中线工程蓄水运行时间契合,显示大型水利工程开始成为驱动土地变化的关键因素。

在整体转移格局的背景下,从空间尺度分析,在陕西、甘肃和四川等上游山区,土地利用与覆被变化以农田和草地向森林转移为主导,这些区域地形起伏大、生态环境相对脆弱,是退耕还林等生态工程的

表3 1999—2009年水源区土地利用转移矩阵

单位: km²

Table 3 Land use transition matrix in water source area from 1999 to 2009

unit: km²

土地利用 与覆被类型	不同类型面积		转入面积							向其他类型转 移的总面积
	1999年	2009年	农田	森林	灌木	草地	水体	荒地	不透水地表	
农田	25833.59	23073.60	20899.49	4176.82	40.08	419.83	71.04	0.01	226.32	4934.10
森林	97073.87	101158.30	1540.31	95431.43	60.25	34.57	0.46	0	6.85	1642.44
灌木	1166.09	665.74	39.28	617.36	427.63	81.81	0	0	0.01	738.46
草地	3665.68	2537.52	581.95	929.99	137.78	2000.28	4.12	0	11.56	1665.40
水体	679.19	11.29	11.29	2.68	0	0.81	652.43	0	11.98	26.76
荒地	0.07	0.02	0.07	0	0	0.21	0.05	0.01	0.08	0.41
不透水地表	893.11	1093.23	1.21	0.02	0	0.01	55.44	0	836.43	56.68
总和	129311.95	129311.95	2174.11*	5726.87*	238.11*	537.24*	131.11*	0.01*	256.80*	

注: *表示由其他土地利用与覆被类型转入的总面积。下同。

表 4 2009—2019 年水源区土地利用转移矩阵										单位:km ²
Table 4 Land use transition matrix in water source area from 2009 to 2019										unit: km ²
土地利用 与覆被类型	不同类型面积		转入面积							向其他类型 转移的总面积
	2009 年	2019 年	农田	森林	灌木	草地	水体	荒地	不透水地表	
农田	23 073.60	19 969.38	17 704.9	4 492.95	6.35	175.53	251.85	0.33	441.69	5 368.70
森林	101 158.30	105 280.05	1 739.15	99 321.35	50.25	12.89	2.55	0	32.11	1 836.95
灌木	665.74	177.19	29.63	481.06	102.18	52.84	0.01	0.01	0.01	563.56
草地	2 537.52	1 299.16	466.42	982.28	18.41	1 057.54	5.47	0.23	7.17	1 479.98
水体	783.54	1 079.28	26.05	2.38	0	0.33	738.25	0.01	16.52	45.29
荒地	0.02	0.59	0	99 321.35	0	0	0	0.01	0.01	0.01
不透水地表	1 093.23	1 506.30	3.23	20.03	0	0.03	81.15	0	1 008.79	84.44
总和	129 311.95	129 311.95	2 264.48 *	5 958.70 *	75.01 *	241.62 *	341.03 *	0.58 *	497.51 *	

重点实施区。河南平原—丘陵区则呈现出生态修复与建设扩张并存的复合转移格局:农田向森林的转移依然存在,生态修复政策在该区域持续作用;农田向不透水地表转移规模扩大,反映出城镇化扩张、交通基础设施建设以及人口集聚对耕地资源的持续侵占压力。湖北的转移路径具有显著的工程主导性与空间定向性,农田及其他地类向水体的集中转移高度对应水库淹没区及输水干线沿线,这是南水北调中线工程加坝蓄水和通水运行背景下,重大水利工程改变地表覆被结构的典型表现。重庆等位于山地与丘陵过渡区的区域,其转移路径表现出复杂的混合性与过渡性,同时存在一定比例的农田向森林转移的生态恢复路径、农田向不透水地表转移的城镇扩张路径和草地向灌木转移的自然演替路径,反映出地形条件复杂、功能定位多元的区域在响应政策实施时表现出的适应性。

3.3 LUCC 特征指数

从时间演变特征来看(表 5),1999—2009 年,各项指数呈典型的生态恢复主导特征。森林动态度达到 0.32%,居各地类之首,农田、草地和灌木均呈负向变化,这与转移矩阵中大规模农田向森林及草地向森林的转移路径一致。灌木和草地耗减度分别达到 6.33%和 4.54%,在各地类中处于较高水平,说明低覆盖度植被在人工造林与自然演替的共同作用下被持续替代,是较活跃的转移对象。同时,不透水地表开发度达到 2.88%,表明城镇建设和基础设施发展对土地系统产生初步干扰。2009—2019 年,

LUCC 呈现生态恢复持续推进与人类活动干扰显著增强并存的格局。森林动态度维持在 0.32%,农田和草地负向变化略有加剧,生态修复过程具有明显的延续性;不透水地表和水体开发度迅速上升,分别达到 4.55%和 4.35%,成为变化最剧烈的指标。这一趋势与表 4 转移矩阵中农田向不透水地表和水体转移路径的集中出现高度吻合,表明城镇化进程加速以及南水北调中线工程蓄水、通水等重大工程活动已成为影响土地系统演变的重要驱动力。此外,农田、草地和灌木耗减度在第二阶段全面提高,分别达到 2.33%、5.83%和 8.47%,说明这些类型作为土地转出的主要供给源,承受的空间转移压力持续加大,人地关系趋于紧张。

LUCC 特征指数存在内部空间的显著差异。陕西、甘肃和四川等上游山区地形起伏大、生态环境脆弱,是森林高动态度及灌木、草地高耗减度的主要分布区。农田和低覆盖度植被持续向森林转移,表现出较显著的耗减特征。而森林开发度长期维持在较低水平,进一步印证了其以生态保护和水源涵养为主的功能定位。相比之下,在平原及丘陵区,由于城镇集聚区域持续扩张,农田向不透水地表转移路径呈现明显集中趋势,反映出城镇化和建设用地扩张对土地系统的持续挤压。水体开发度的突增则在空间上具有明确的指向性,其分布范围契合湖北丹江口库区及输水干线沿线,与第二阶段农田及其他地类向水体转移路径的出现相对应。重庆等区域在空间上同时呈现草地、灌木耗减与局部不透水地表开

表 5 水源区 LUCC 特征指数						
Table 5 LUCC characteristic indices in water source area						
土地利用与 覆被类型	动态度/%		开发度/%		耗减度/%	
	1999—2009 年	2009—2019 年	1999—2009 年	2009—2019 年	1999—2009 年	2009—2019 年
农田	-0.21	-0.24	0.84	0.98	1.91	2.33
森林	0.32	0.32	0.59	0.59	0.17	0.18
灌木	-0.04	-0.04	2.04	1.13	6.33	8.47
草地	-0.09	-0.10	1.47	0.95	4.54	5.83
水体	0.01	0.02	1.93	4.35	0.39	0.58
不透水地表	0.02	0.03	2.88	4.55	0.63	0.77

发的特征,生态恢复与城镇发展叠加作用的过渡性特征直观显现。

3.4 LUCC 驱动因素

3.4.1 农田变化的驱动因素

农田变化回归模型 ROC 曲线的 AUC 值为 0.862,判别能力较好。由图 4 可知,早期生态政策强化阶段,农田变化多集中在自然条件受限区域,直观反映了退耕还林的政策效应;后期城镇化与基建加速阶段,农田流失则转向沿交通干线和居民点周边集聚。坡度较大和地形破碎的山区,农田变化更为集中,铁路、公路及城镇周边农田转出区域呈带状分布,农田变化受到地形条件约束和人类活动空间扩张的双重影响。

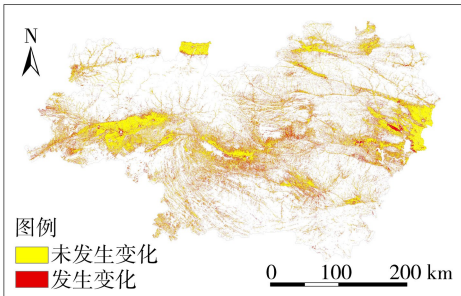


图 4 水源区农田变化空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of cropland changes in water source area

回归分析进一步揭示了各因子的影响方向及显著性水平。坡度是对农田变化影响显著的正向驱动因子,反映了陡坡耕地的生态敏感性及退耕还林等政策的干预效应。高程同样呈显著的正向影响,而坡向影响不显著,说明水源区尺度下地形起伏比坡向更能决定农田的稳定性。气候因素中,年平均温度和年平均降水量均呈显著正向影响,表明气候通过影响农业生产潜力参与农田变化过程。区位因素中,到铁路距离和到居民点距离呈显著正向影响,反映交通干线和城镇周边农田受到更严格的用途管制,偏远地区则更易在生态修复政策引导下转出;到公路距离和到河流距离呈不显著影响,其影响已被交通改善和灌溉体系弱化。社会经济因素中,人口密度和人均 GDP 均呈显著负向影响,表明人口集聚区农田利用稳定,耕地保护执行力度较强,农田变化并非简单由经济或人口压力驱动,而是体现水源区特殊功能下经济发展与耕地保护的阶段性协调。空间滞后变量呈显著正向影响,反映农田变化由点状扩展为片状或带状,存在明显的空间集聚与扩散效应。

3.4.2 森林变化的驱动因素

森林变化回归模型 ROC 曲线的 AUC 值为 0.891,判别能力同样较好。由图 5 可知,研究初期

森林扩张主要集中于低海拔、缓坡区域,受自然地形约束明显,交通干线及居民点周边森林格局总体稳定;中后期随着南水北调中线工程推进及退耕还林、封山育林等政策深入实施,森林扩张向坡度较大的生态脆弱区延伸,政策引导与人类活动管控对森林恢复开始发挥显著调控作用,驱动机制由自然与气候主导逐步转向人类活动与政策共同驱动的复合模式。空间分布上,自然保护区和生态保护红线范围内森林扩张呈连续成片分布,体现了制度性保护措施集中效应;人类活动频繁区则呈点状或斑块状扩张,反映了自然条件与人为干扰共同作用下的局地响应。

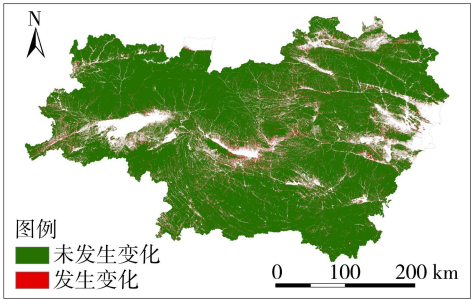


图 5 水源区森林变化空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of forest changes in water source area

回归分析进一步揭示了多维度因子与政策调节效应共同塑造森林扩张格局的机制。自然因素中,高程与坡度呈显著负向影响,表明低海拔、平缓区域更利于森林扩张;坡向影响不显著,说明地形起伏强度(而非日照条件)主导扩张。气候因素中,年平均温度呈显著负向影响,反映高温对森林扩张的抑制作用;年平均降水量呈显著正向影响但效应较弱,表明在水源区整体水分充足条件下,降水不再是主导因子。区位因素中,到居民点距离呈显著负向影响,表明邻近人类聚居区对森林扩张具有抑制作用;到铁路、公路及河流距离影响均不显著,其直接作用已被政策背景弱化。社会经济因素中,人口密度和人均 GDP 均呈正向影响但不显著,表明人口相对集聚但经济发展尚未进入高强度建设阶段的区域森林扩张更为活跃,而高发展水平区域的建设需求可能对森林恢复形成制约。空间滞后变量呈高度显著正向影响,再次证实森林扩张具有明显空间依赖性与联动特征,其通过邻近关系集聚和扩散,反映了生态修复工程的空间连贯性及森林恢复的自然演替过程。

3.4.3 水体变化的驱动因素

水体变化回归模型 ROC 曲线的 AUC 值为 0.897,判别能力在三者中最优。结合图 6 可知,水体扩张与丹江口水库加高、分阶段蓄水及运行调度制度的实施节奏高度契合,呈现工程干预主导的阶

段性响应。由上述结果可知,2014—2019 年水体面积突增至 269.15 km²,变化率达 33.22%,这种短期内大幅变化难以用自然水文过程或长期气候波动解释,工程性水文调整具有更强的解释力。在空间格局上,水体扩张高度集中于丹江口库区及其上游河谷地带,沿主要河谷向高程梯度呈带状与阶梯式扩展,清晰地反映了库区蓄水对周边土地覆被的系统性重塑,是南水北调工程在空间层面的直接投影。而远离库区的区域水体变化较弱,表现了水体变化显著的空间异质性。

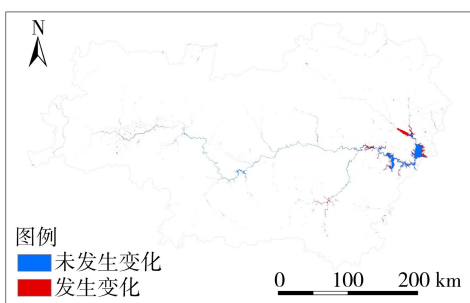


图 6 水源区水体变化空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of water body changes in water source area

回归分析结果显示,自然因素中仅高程对水体变化具有基础性约束作用,坡度、坡向均未通过显著性检验,表明在强工程扰动背景下,自然因素对水体变化的解释力被削弱。年平均降水量与水体变化呈现弱正向关系,但未通过显著性检验,进一步说明了在水源区工程调蓄能力显著增强的条件下,自然降水已不再是水体格局演变的主导因素。在区位因素和社会经济因素方面,传统区位及社会经济因素的整体影响有限,仅到公路的距离和到居民点的距离呈显著负向影响,反映了邻近交通和居民区的水体扩张受到工程和人类活动的限制。其他社会经济因素未表现出稳定的显著性,表明在高强度政策约束的水源区内,常规社会经济指标已难以有效解释水体变化过程,水体扩张更多受到跨流域调水工程、水源地保护政策及配套土地利用管控措施的综合影响。空间滞后变量呈高度显著正向影响,但其数值明显小于农田和森林模型,进一步揭示水体扩张虽存在空间集聚性,但受工程制约,其空间扩张更多表现为受工程建设影响的填充式扩张,而非自然过程下的渐进式蔓延。

4 讨论

4.1 多尺度驱动力耦合下的水源区 LUCC 驱动机制

水源区 LUCC 是在宏观战略约束与微观空间过

程共同作用下形成的复杂系统演化过程。宏观层面上,国家生态安全战略、水源区功能定位及重大工程建设通过生态保护政策、工程调控和空间管制持续影响土地利用与覆被类型转移方向;区域尺度上,不同自然地理条件和发展阶段导致 LUCC 呈现差异化响应,上游生态敏感区以生态恢复为主,中下游区域则表现为生态保护与建设扩张并存;局地尺度上,地形、水热条件等自然因素仍发挥约束作用,但工程建设和人类活动可在特定情景下改变传统自然主导模式。不同土地利用与覆被类型具有差异化驱动机制。农田变化主要受生态政策与城镇扩张共同影响,森林扩张则与生态工程和自然恢复过程密切相关,水体变化高度依赖工程调度和地形条件。总体而言,研究区 LUCC 具有明显的多尺度耦合特征,是政策调控、工程干预、社会经济活动与自然约束共同作用下的动态演化过程。

4.2 水源区土地利用治理政策建议

水源区治理应采取分区分类管理策略。上游生态屏障区应持续巩固生态修复成果,加强坡耕地和生态恢复区域监管;城镇化压力区需强化建设用地扩张管控,提高土地集约利用水平,减少对耕地和生态空间的占用;库区及工程影响区应加强工程运行、土地利用和生态保护协同管理,建立长期动态监测机制;山地—河谷过渡区则需协调生态保护与城镇发展,控制沿河沿路无序建设。然而,本文主要以自然和社会经济因素间接表征政策与工程影响,尚未纳入政策实施强度、工程运行过程与水位调度等因素,制约了部分驱动机制的因果识别。未来应结合更高精度的工程运行和政策数据,进一步提升驱动机制解析能力。

5 结论

a. 1999—2019 年水源区土地利用格局发生结构性转型,呈现生态恢复、工程调控、城镇扩张的协同演变特征。森林、水体与不透水地表持续扩张,农田、灌木与草地面积显著缩减,标志着区域土地功能从农业生产向生态保育、水源调蓄和城乡建设多元复合利用的根本性转变。森林的稳步增长体现了国家生态工程的持续成效;工程运行后水体的跃升式扩张是对丹江口水库蓄水与调水的直接响应,凸显了重大水利工程对景观的塑造效应;不透水地表增长则反映了伴随工程实施的移民安置与区域城镇化进程。

b. 水源区土地利用转移以农田持续转出、森林稳定转入为核心路径,形成生态恢复与城镇扩张并行的复合演变模式。上游山地丘陵区以农田和草地

向森林转移为主导路径,生态修复效应显著;平原及过渡区则呈现农田向不透水地表转移与农田向森林转移并存的复合格局;库区及输水干线沿线区域,农田及其他地类向水体工程性转移集中发生,显示工程建设已成为重塑水源区局部土地利用格局的关键力量。

c. LUCC 强度与压力随时间演进而增强,系统处于动态再平衡过程。研究初期变化相对平缓,以生态恢复和结构优化为主导;后期伴随工程运行及相关配套建设推进,不透水地表与水体扩张明显加速,农田、草地等地类耗减度显著上升,人类活动对土地系统的扰动强度明显增强,水源区土地系统由相对稳定状态转向在生态功能提升与人类利用强化之间不断调整的新平衡状态。

d. 水源区 LUCC 呈现人类活动和工程建设双主导机制,自然因素构成基础约束框架。农田收缩显著受人口密度、经济水平及交通区位影响,反映人类活动对土地资源再分配的直接驱动;森林扩张受退耕还林等生态政策与社会经济因素复合调控,体现可持续发展背景下的人地关系再平衡;水体扩张中,自然与社会经济因素作用被削弱,重大水利工程成为主导力量,显示工程干预已深刻重塑区域土地利用格局,并逐步改变传统自然-社会经济耦合模式。

参考文献:

[1] 钟华昱,方国华,闻昕,等. 洪泽湖和骆马湖北调水位控制对南水北调东线工程江苏段水量调度的影响[J]. 水资源保护, 2026, 42 (1): 49-58. (Zhong Huayu, Fang Guohua, Wen Xin, et al. Impact of northward diversion water level control of Hongze Lake and Luoma Lake on water dispatching in Jiangsu section of the South-to-North Water Diversion Eastern Route Project [J]. Water Resources Protection, 2026, 42 (1): 49-58. (in Chinese))

[2] 徐章星,刘滨,张兵. 南水北调工程与受水区县域高质量发展:新结构经济学视角下的临清例证[J]. 水利经济, 2025, 43 (5): 41-50. (Xu Zhangxing, Liu Bin, Zhang Bing. The South-to-North Water Diversion Project and high-quality development of counties in water-receiving areas: example of Linqing under the new structural economics [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43 (5): 41-50. (in Chinese))

[3] 杨明明,赵勇,秦长海,等. 南水北调东、中线一期工程综合效益评估及预测[J]. 水利学报, 2025, 56 (5): 659-671. (Yang Mingming, Zhao Yong, Qin Changhai, et al. Comprehensive benefit evaluation and prediction for Phase I of the East and Middle Routes of South-to-North Water Diversion Project [J]. Journal of Hydraulic Engineering,

2025, 56 (5): 659-671. (in Chinese))

[4] 黄进,王伟,田野,等. 南水北调中线工程水源区环境规制对经济高质量发展的影响[J]. 水资源保护, 2024, 40 (4): 148-156. (Huang Jin, Wang Wei, Tian Ye, et al. Impact of environmental regulations on high-quality economic development in water source area of middle route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (4): 148-156. (in Chinese))

[5] 李小根,段小芳,付景保,等. 基于 GIS 的丹江口水库土地利用/覆被动态变化特征分析[J]. 华北水利水电大学学报 (自然科学版), 2022, 43 (3): 90-98. (Li Xiaogen, Duan Xiaofang, Fu Jingbao, et al. Analysis of land use and land cover dynamic change characteristics of Danjiangkou reservoir based on GIS [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2022, 43 (3): 90-98. (in Chinese))

[6] 井云清,张飞,陈丽华,等. 艾比湖湿地土地利用/覆被-景观格局和气候变化的生态环境效应研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37 (9): 3590-3601. (Jing Yunqing, Zhang Fei, Chen Lihua, et al. Investigation on eco-environmental effects of land use/cover-landscape pattern and climate change in Ebinur Lake Wetland Nature Reserve [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37 (9): 3590-3601. (in Chinese))

[7] 陆科成,李瑞栋,倪广恒,等. 银川市典型区土地利用格局演变对城市内涝特征的影响[J]. 水资源保护, 2025, 41 (4): 51-59. (Lu Kecheng, Li Ruidong, Ni Guangheng, et al. Influence of land use pattern evolution on urban waterlogging characteristics in typical area of Yinchuan City [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (4): 51-59. (in Chinese))

[8] 王梦婧,王建锋,戴承霖,等. 基于土地利用覆被变化的城市生境网络时空演变特征及韧性评估:以黄河下游平原城市为例[J]. 生态学报, 2026, 46 (1): 476-489. (Wang Mengjing, Wang Jianfeng, Dai Chenglin, et al. Spatial and temporal evolution and resilience assessment of urban habitat network based on land use and cover change: a case study of city in the lower Yellow River Plain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46 (1): 476-489. (in Chinese))

[9] 王华,徐浩森,邓燕青,等. 流域土地利用类型变化对鄱阳湖入湖水质的驱动特征[J]. 水资源保护, 2025, 41 (4): 244-252. (Wang Hua, Xu Haosen, Deng Yanqing, et al. Driving characteristics of watershed land use type changes on water quality of inflow rivers to Poyang Lake [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (4): 244-252. (in Chinese))

[10] 麦丽开·艾麦提,满苏尔·沙比提,张雪琪. 近 35a 叶尔羌河中下游流域土地利用/覆被时空动态演变特征

- [J].生态与农村环境学报,2019,35(9):1118-1126. (Amat M, Shabit M, Zhang Xueqi. Spatial-temporal dynamic evolution characteristics of land use/cover in the middle and lower reaches of Yarkant River Basin in recent 35 years[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019,35(9):1118-1126. (in Chinese))
- [11] 徐梦菲,孙一帆,汪霞.郑州市土地利用/覆被变化与生境质量的时空演变及情景预测[J].水土保持通报,2024,44(2):364-377. (Xu Mengfei, Sun Yifan, Wang Xia. Spatiotemporal evolution and scenario prediction of land-use/land-cover changes and habitat quality in Zhengzhou City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2024,44(2):364-377. (in Chinese))
- [12] 周馨冉,何文,王金叶,等.基于LUCC的漓江流域碳储量时空变化及模拟预测[J].水生态学杂志,2025,46(4):96-105. (Zhou Xinran, He Wen, Wang Jinye, et al. Prediction of carbon storage in the Lijiang River Basin based on land use/land cover (LUCC) [J]. Journal of Hydroecology,2025,46(4):96-105. (in Chinese))
- [13] 李泽君,黄本胜,邱静,等.变化环境下韩江生态流量演变特征分析[J].水资源保护,2021,37(5):22-29. (Li Zejun, Huang Bensheng, Qiu Jing, et al. Analysis on evolution characteristics of ecological flow of Hanjiang River under changing environment[J]. Water Resources Protection,2021,37(5):22-29. (in Chinese))
- [14] 苏钊贤,陈佳川,陈基豪,等.南水北调中线河南段水资源承载力时空差异与情景预测[J].水资源保护,2026,42(2):199-208. (Su Zhaoxian, Chen Jiachuan, Chen Jihao, et al. Spatiotemporal differences and scenario prediction of water resources carrying capacity in Henan section of Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project[J]. Water Resources Protection,2026,42(2):199-208. (in Chinese))
- [15] 李小根,刘泓辰,付景保,等.基于CNN-Attention-LSTM模型的地下水水位预测[J].水资源保护,2025,41(4):228-235. (Li Xiaogen, Liu Hongchen, Fu Jingbao, et al. Groundwater level prediction based on CNN-Attention-LSTM model [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (4):228-235. (in Chinese))
- [16] 李彬权,任泽凌,王国庆,等.考虑地形地貌特征与土地利用变化的小流域设计洪水计算方法[J].河海大学学报(自然科学版),2025,53(6):33-40. (Li Binqun, Ren Zeling, Wang Guoqing, et al. A method for design flood calculation in small watershed considering geomorphological features and land use change [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(6):33-40. (in Chinese))
- [17] 郭明辰,张润润,闻余华.基于PSO-LSTM模型的平原河网汛期水位预测[J].水利水电科技进展,2024,44(6):64-70. (Guo Mingchen, Zhang Runrun, Wen Yuhua. Prediction of water level of plain river network during flood season based on PSO-LSTM model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (6):64-70. (in Chinese))
- [18] 赵晨光,程业森,李慧瑛,等.腾格里沙漠东北缘人工植被恢复区土地利用/覆被变化及其驱动因素分析[J].干旱区资源与环境,2021,35(6):131-138. (Zhao Chenguang, Cheng Yesen, Li Huiying, et al. Land use/cover change of an artificial vegetation system in the northeastern edge of Tengger Desert [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2021,35(6):131-138. (in Chinese))
- [19] 刘采,张海燕,李迁.1980—2018年海南岛人类活动强度时空变化特征及其驱动机制[J].地理科学进展,2020,39(4):567-576. (Liu Cai, Zhang Haiyan, Li Qian. Spatiotemporal characteristics of human activity intensity and its driving mechanism in Hainan Island from 1980 to 2018 [J]. Progress in Geography, 2020, 39 (4):567-576. (in Chinese))
- [20] 贾丹阳,熊祯祯,高岩,等.近30a台特玛湖地区土地利用/土地覆被变化及其影响因素[J].干旱区地理,2021,44(4):1022-1031. (Jia Danyang, Xiong Zhenzhen, Gao Yan, et al. Land use/land cover change and influencing factors in the Taitema Lake in the past 30 years [J]. Arid Land Geography, 2021, 44 (4):1022-1031. (in Chinese))
- [21] 王广博,徐翠兰,黄蕊,等.江苏沿海地区围垦动态与土地利用变化驱动力研究[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):163-170. (Wang Guangbo, Xu Cuilan, Huang Rui, et al. Research on driving forces of reclamation dynamics and land use change in coastal areas of Jiangsu Province [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(2):163-170. (in Chinese))
- [22] 杨丽萍,张静,贡恩军,等.GEE联合多源数据的西安市土地利用时空格局及驱动力分析[J].农业工程学报,2022,38(2):279-288. (Yang Liping, Zhang Jing, Gong Enjun, et al. Analysis of spatio-temporal land-use patterns and the driving forces in Xi'an City using GEE and multi-source data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38 (2):279-288. (in Chinese))
- [23] 徐勇,胡迪,洪亮.近40年奈曼旗土地利用动态变化与时空分析[J].地球科学进展,2025,40(12):1297-1306. (Xu Yong, Hu Di, Hong Liang. Spatial-temporal analysis of land use/cover change in Naiman Banner over the past 40 years [J]. Advances in Earth Science,2025,40(12):1297-1306. (in Chinese))
- [24] 刘克,甘宇航,张涛,等.南水北调中线工程核心水源区土地利用空间格局动态变化研究[J].测绘与空间地理信息,2019,42(4):4-8. (Liu Ke, Gan Yuhang, Zhang Tao, et al. Study on land use change in the water supplying core area of Middle Route of South-to-North Water

- Transfer Project [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2019, 42(4): 4-8. (in Chinese))
- [25] 申怀飞, 田庆久, 吴国玺. 南水北调中线水源区土地利用时空变化分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 204-208. (Shen Huaifei, Tian Qingjiu, Wu Guoxi. Study on land use cover change in the water supply area of the Middle-Route of the South-to-North Water Diversion (MR-SNWD) Project[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(2): 204-208. (in Chinese))
- [26] Yang Jie, Huang Xin. 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.
- [27] 郑颖雯, 王周锋, 李思杰, 等. 近 30a 渭河流域土地利用/覆被时空动态演化特征及驱动力分析[J]. 环境科学, 2025, 46(11): 7106-7118. (Zheng Yingwen, Wang Zhoufeng, Li Sijie, et al. Analysis of spatiotemporal dynamic evolution characteristics and driving forces of land use/cover change in the Weihe River Basin in the past 30 years[J]. Environmental Science, 2025, 46(11): 7106-7118. (in Chinese))
- [28] 孙定钊, 梁友嘉. 基于改进 Markov-CA 模型的黄土高原土地利用多情景模拟[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(5): 825-836. (Sun Dingzhao, Liang Youjia. Multi-scenario simulation of land use dynamic in the Loess Plateau using an improved Markov-CA model[J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(5): 825-836. (in Chinese))
- [29] 裴亮, 陈晨, 戴激光, 等. 基于马尔科夫模型的大凌河流域土地利用/覆被变化趋势研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 525-531. (Pei Liang, Chen Chen, Dai Jiguang, et al. Research on forecast trend of land use and land cover change in Daling River Basin based on Markov model[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(3): 525-531. (in Chinese))
- [30] 龙辉, 廖和平, 张茜茜, 等. 基于 GIS 的土地利用/覆被与景观格局变化研究: 以重庆市两江新区为例[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(6): 90-98. (Long Hui, Liao Heping, Zhang Qianqian, et al. A GIS-based research of the changes of land use/land cover and landscape pattern: a case study of Liangjiang New Area of Chongqing[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2019, 41(6): 90-98. (in Chinese))
- [31] 徐佩, 吕开云, 龚循强, 等. 环鄱阳湖城市群土地利用/覆盖变化及其驱动因素分析[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(27): 11514-11525. (Xu Pei, Lyu Kaiyun, Gong Xunqiang, et al. Analysis of land use/land cover change and its driving factors in urban agglomeration around Poyang Lake[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(27): 11514-11525. (in Chinese))
- [32] 谢玲, 黄玉航, 宋知劲, 等. 山地城市扩张与碳排放响应: 以重庆主城区为例[J]. 中国环境科学, 2026, 46(2): 1099-1113. (Xie Ling, Huang Yuhang, Song Zhijin, et al. Mountain city expansion and carbon emission response: a case study of the main urban area of Chongqing[J]. China Environmental Science, 2026, 46(2): 1099-1113. (in Chinese))
- [33] 袁晓蕾, 王超, 李柏延, 等. 长江流域土地利用/覆盖变化驱动力及影响综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(8): 1241-1255. (Yuan Xiaolei, Wang Chao, Li Boyan, et al. Review of the driving forces and impacts of land use/cover change in the Yangtze River Basin[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(8): 1241-1255. (in Chinese))
- [34] 杨鸿魁, 寇明珠, 祁万强, 等. 基于 LUCC 变化的黑河流域碳储量时空模拟预测及驱动力分析[J]. 环境科学, 2025, 46(11): 7070-7082. (Yang Hongkui, Kou Mingzhu, Qi Wanqiang, et al. Spatiotemporal simulation and driving force analysis of carbon storage in Heihe River Basin based on LUCC changes[J]. Environmental Science, 2025, 46(11): 7070-7082. (in Chinese))
- [35] 雷金睿, 陈宗铸, 吴庭天, 等. 海南岛东北部土地利用与生态系统服务价值空间自相关格局分析[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2366-2377. (Lei Jinrui, Chen Zongzhu, Wu Tingtian, et al. Spatial autocorrelation pattern analysis of land use and the value of ecosystem services in northeast Hainan island[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2366-2377. (in Chinese))
- [36] Chen T L, Lin Z H, Jheng D C. Spatial regression analysis of land use impact on land surface temperature in four East Asian metropolises[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 22252.
- [37] 王萍, 林乐乐, 彭杨靖, 等. 基于 CLUE-S 模型的浙江省土地利用结构变化趋势分析[J]. 生态科学, 2024, 43(3): 196-206. (Wang Ping, Lin Lele, Peng Yangjing, et al. The trend analysis of land-use structure change in Zhejiang Province based on CLUE-S Model[J]. Ecological Science, 2024, 43(3): 196-206. (in Chinese))
- [38] 黄哲, 杨艳芬. 延河流域土地利用空间格局模拟对比研究[J]. 水土保持研究, 2022, 29(6): 268-274. (Huang Zhe, Yang Yanfen. Comparative study on the simulation of spatial patterns of land use in the Yanhe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(6): 268-274. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-11-14 编辑: 施业)