丹江流域河南段土地利用碳储量变化及其脆弱性

王国重[1], 陈朝阳[2], 徐新龙[2], 张武云[2], 张继宇[3], 徐维东[2]
(1.黄河水文水资源科学研究院, 河南 郑州 450004; 2.河南省南阳水文水资源测报分中心, 河南 南阳 473000; 3.河南黄河河务局, 河南 郑州 450003)

摘　要: [目的]探究丹江流域河南段碳储量空间分布、演变特征及其对用地类型转移的响应,并在此基础上对系统碳储量脆弱性进行分析,为该区合理利用土地资源,实现绿色低碳发展提供科学指导。[方法]根据丹江流域河南段1990,2000,2010和2023年土地利用数据,借助InVEST模型分析了该区域碳储量时空分布与演变特征,探究用地类型变化对当地碳储量的影响,并根据潜在影响指数(PI)对其碳储量的脆弱性进行分析。[结果]①1990—2023年该区域用地类型以林地和耕地为主,前者面积占总面积的61.1%以上,后者超过26.80%,其面积之和占总面积的90%以上。研究期间14.22%的用地发生了转移,耕地转出面积最多,主要是转换成林地、建设用地、水域,分别为其转出面积的51.33%,27.75%,19.76%。②1990,2000,2010和2023年总体碳储量分别为1.252×10^8,1.240×10^8,1.234×10^8和1.250×10^8 t,呈"减少—减少—增加"变化。1990—2023年耕地共计减少2.00×10^5 t,转换成水域、建设用地是其减少的主要原因。碳储量空间分布呈北部高,南部较低的特征,地表覆盖变化是导致其分布差异的主导因子,地形、气温等的影响也很显著。碳储量主要源于林地、耕地,其他5类用地对总体碳储量的贡献不到5%。[结论]研究区各时期用地变化对系统碳储量虽呈负向影响,但其PI值较小,影响较弱。这可能是林地面积占据绝对优势增强了系统碳库的稳定性,加上当地政府严格的生态保护政策,稀释、淡化了人类活动造成的负面影响。今后应大力培育水保林、水源涵养林,同时优化用地结构,以提升生态系统的碳储量,助力国家"双碳"目标实现。

关键词: 碳储量; 脆弱性; InVEST模型; 潜在影响指数(PI); 丹江流域河南段
文献标识码: A　　**文章编号:** 1000-288X(2026)05-0231-09　　**中图分类号:** X196, F062.2

文献参数: 王国重, 陈朝阳, 徐新龙, 等.丹江流域河南段土地利用碳储量变化及其脆弱性[J].水土保持通报,2026,46(5):231-239. Wang Guozhong, Chen Zhaoyang, Xu Xinlong, et al. Carbon storage changes of land use and its vulnerability in Henan section of Danjiang River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(5):231-239.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.037　　**CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.037**

Carbon storage changes of land use and its vulnerability in Henan section of Danjiang River basin

Wang Guozhong[1], Chen Zhaoyang[2], Xu Xinlong[2], Zhang Wuyun[2], Zhang Jiyu[3], Xu Weidong[2]
(1.*Hydrology and Water Resources of Yellow River Scientific Research Institute, Zhengzhou, Henan* 450004, *China*; 2.*Nanyang Branch of Hydrology and Water Resources Survey and Forecast Center in Henan, Nanyang, Henan* 473000, *China*; 3.*Henan Yellow River Bureau, Zhengzhou, Henan* 450003, *China*)

Abstract: [Objective] The spatial distribution and evolution characteristics of carbon storage, as well as its response to land use type transition, were investigated in Henan section of the Danjiang River basin. On this basis, the vulnerability of carbon storage was analyzed in order to provide scientific guidance for rational land resource utilization and green, low-carbon development in the region. [Methods] Based on land use data from 1990, 2000, 2010, and 2023 in the Henan section of the Danjiang River basin, the InVEST model was used to analyze the spatiotemporal distribution and evolution characteristics of carbon storage in the region, and the effects of land use change on local carbon storage were investigated. Additionally, the vulnerability of carbon storage was analyzed

收稿日期:2026-01-28　　**修回日期:**2026-05-06　　**采用日期:**2026-05-06
资助项目:河南省科技攻关计划项目"基于土地利用的丹江口水库水源区生态系统服务权衡协同关系分析"(GG202410)
第一作者:王国重(1972—),男(汉族),河南省南阳市人,博士,正高级工程师,从事水文水资源和水土保持方面的研究。Email:zhonggw2020@163.com。

according to the potential impact index (PI). [Results] ① From 1990 to 2023, the land use types in this region were mainly forest land and cultivated land. The area of the former covered more than 61.1% of the total area, while the latter accounted for more than 26.80%, with the combined area of the two accounting for over 90% of the total area. During this period, about 14.22% of the land use underwent transition, with the area of cultivated land being the largest, mainly converted into forest land, construction land, and water bodies, accounting for 51.33%, 27.75% and 19.76% of the converted area, respectively. ② The overall carbon storage in 1990, 2000, 2010, and 2023 was 1.252×10^8, 1.240×10^8, 1.234×10^8 tons and 1.250×10^8 tons, respectively. The trend was "decrease—decrease—increase." From 1990 to 2023, a total reduction of 2.00×10^5 tons occurred. The conversion of cultivated land into water bodies and construction land was the main reason for the reduction. The spatial distribution of carbon storage showed a pattern of higher in the north and lower in the south. The change of surface coverage was the dominant factor causing spatial differences in carbon storage distribution, and the effects of terrain and temperature were also very significant. The carbon storage mainly originated from forest land and cultivated land, and the contribution of the other five land use types to the overall carbon storage was less than 5%. [Conclusion] Although land use changes during each period in the study area have a negative impact on system carbon storage, their PI values are relatively small, indicating limited impact. This may be attributed to the absolute dominance of forest land, which enhances the stability of the system carbon pool. Furthermore, strict ecological protection policies of the local government mitigate the adverse effects of human activities. In the future, water conservation forests and water source conservation forests should be vigorously cultivated, while the land use structure should be optimized to increase the carbon storage capacity of the ecosystem, thereby contributing to the realization of China's "dual carbon" goals.

Keywords: carbon storage; vulnerability; InVEST model; potential impact index (PI); Henan section of Danjiang River basin

土地类型演变是陆域碳循环变化的主要驱动力,用地类型从高碳储量转化成低碳储量会造成碳排放源;反之,则使碳汇功能增强,抵消部分人为排放[1]。分析用地类型变化对系统碳储量的影响,有利于优化区域土地结构以提升固碳能力,实现绿色低碳发展[2]。碳储量的测度方法主要有实地采样测算和模型模拟,前者计算精度较高,但成本也高,不适合大尺度与长时间序列的研究;后者易于空间量化、可视化,且能降低人力、物力、财力等支出,以CASA,CEVSA,InVEST等模型较为常用[3]。其中InVEST模型因涉及参数较少,操作简捷,运行快速,结果可靠,可用于多元尺度等特点[4],广受学界关注。

丹江口水库是南水北调中线工程水源区,也是国家级水土流失重点治理区,生态环境较为脆弱[5],库区生态系统碳储量变化与水源涵养、水土保持、水质净化功能直接关联,也是保障水源地生态安全,服务国家"双碳"战略,支撑库区可持续发展的基础[6]。用地生态系统碳储量变化可以反映自然因素与人类活动的作用强度、过程与交互效应[7],该区域地处暖温带与亚热带、半湿润与湿润过渡带,对生态与气候变化较为敏感,碳储量研究对揭示气候过渡带碳库对土地利用与气候变化的响应机制,实现国土空间优化,对生态保护-碳汇-民生-水质的协同有着重要意义。以该水库所在的丹江流域河南段为例,基于1990,2000,2010和2023年4期土地利用影像数据,尝试借助InVEST模型碳储量模块测算并探究该区域碳储量空间分布与演变特征,及其对用地类型转移的响应,在此基础上对系统碳储量的脆弱性进行剖析,为当地用地结构合理规划提供科技支撑,为实现国家"双碳"目标提供助力。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

丹江流域河南段是南水北调中线工程的直接水源地,地处河南省西南端,涉及三门峡市卢氏县6个乡镇,洛阳市栾川县3个乡镇,南阳市内乡县4个乡镇,邓州市1个乡镇和西峡县,淅川县全域,共计5个街道,45个乡镇,总面积8 238.8 km^2,地理坐标为110°52′—112°E,33°30′—34°N。流域内较大支流以滔河、淇河、老鹳河为主,气候上属于北亚热带与暖温带过渡区,年降水量约870 mm,且自北向南递增[8]。

1.2 数据来源

所用土地类型数据源自武汉大学黄昕教授团队

研制的1990—2023年中国年度土地覆盖数据成果(网址:https://irsip.whu.edu.cn/resv2/resources_v2.php),该成果基于GEE平台与Landsat影像,采用WGS 1984 Albers投影坐标系,空间分辨率30 m。该成果将用地类型分为林地、耕地、灌丛地、草地、水域、未利用地、冰雪地、湿地、建设用地等9类。基于成果中1990,2000,2010和2023年4期影像,经GIS软件提取工具得到研究区林地、耕地、灌丛地、草地、未利用地、建设用地、水域等7种类型,再将栅格转换为矢量、斑块合并,得到所需的各时期用地类型图。

1.3　研究方法

1.3.1　碳储量估算

(1)估算方法。丹江流域河南段1990,2000,2010和2023年的碳储量计算,须借助InVEST模型的碳储量与碳汇模块来实现,其原理是以地表用地类型来体现流域陆地生态系统,其碳储量为地上、土壤、地下和死亡有机质4类碳库的储量之和,即各类碳库的碳密度乘以相应面积之和,计算公式[9]为

$$C_k = C_{k,\text{above}} + C_{k,\text{below}} + C_{k,\text{soil}} + C_{k,\text{dead}} \tag{1}$$

$$C_t = \sum_{k=}^{n} C_k \cdot S_k \tag{2}$$

式中:C_k表示第k类用地的碳密度(t/hm²);C_t为总的碳储量(t);$C_{k,\text{above}}$,$C_{k,\text{below}}$分别是第k类用地的地上、地下生物量碳密度(t/hm²);$C_{k,\text{soil}}$,$C_{k,\text{dead}}$分别为第k类用地土壤中、死亡有机质的碳密度(t/hm²);S_k代表第k类用地的面积(hm²);n为用地类型的数量,本项目n为7。

(2)密度及其修正。张哲等[10]基于已有研究与碳密度修正公式,得到了河南省伏牛山区耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地的地上、地下生物量碳密度与土壤碳密度数据。河南省伏牛山区主要涉及三门峡的卢氏县,洛阳的栾川县、嵩县、汝阳县,南阳的淅川县、西峡县、内乡县、南召县,平顶山的鲁山县[11],除邓州市彭桥镇外,基本涵盖了研究区,故只需得到灌丛地的碳密度数据并予以修正。李琳等[12]对豫西北灌丛地的碳密度进行了实地采样测试,得到地上、地下生物量碳密度和土壤层碳密度数据。参考Alam[13],Giardina[14]和陈光水等[15]的研究成果,以降水与气温作为影响用地生态系统碳密度的主要因素,对其灌丛地的碳密度值进行相应修正,计算公式为

$$K_b = \frac{6.798 \times e^{0.0054 \times P_1}}{6.798 \times e^{0.0054 \times P_2}} \times \frac{28 \times T_1 + 398}{28 \times T_2 + 398} \tag{3}$$

$$K_s = \frac{3.3968 \times P_1 + 3\,996.1}{3.3968 \times P_2 + 3\,996.1} \tag{4}$$

式中:K_b,K_s分别是区域生物量碳密度、土壤碳密度修正系数;P_1,P_2分别为地区1,2的年均降水量(mm);T_1,T_2分别为地区1与2的年均气温(℃)。豫西北与研究区多年平均降水量分别是692.87和863.7 mm,多年平均气温分别是12.32 ℃和14.2 ℃。由公式(3)—(4)可得到研究区灌丛地的碳密度修正值。Delaney等[16]的研究发现,死亡有机质碳库约为地上碳库量的1/10,以此为标准计算植被死亡有机质碳密度。则研究区各类用地碳密度数值详见表1。

表1　研究区各类用地碳密度

Table 1　Carbon density of various land use types in study area　　单位:t/hm²

用地类型	碳密度			
	地上碳库	地下碳库	土壤碳库	死亡有机质碳库
耕地	2.02	0.76	99.97	0.202
林地	47.25	14.46	117.72	4.725
草地	1.20	2.46	92.13	0.120
灌丛地	3.66	59.15	50.32	0.370
水域	0.04	0	57.28	0.004
建设用地	0.60	0	51.55	0.060
未利用地	0.01	0	52.68	0.001

1.3.2　生态脆弱性分析

借鉴文献[17—18]方法,采用潜在影响指数(PI)来测度研究区生态系统中碳储量服务的脆弱性,若PI>0,用地程度变化对碳储量呈正向潜在影响;PI<0,则为负向潜在影响;PI=0,无潜在影响。其数学表达式为

$$\text{PI} = \Delta C_t / \Delta L \tag{5}$$

$$L = \sum_{k=1}^{m} A_k \cdot P_k \tag{6}$$

式中:ΔC_t为系统总碳储量的改变量(t);ΔL为用地程度综合指数的改变量;L代表用地程度综合指数;A_k为第k级用地分级指数,根据文献[19],未利用地取1,水域、草地、林地为2,耕地、建设用地分别取3和4;m=4,表示用地程度分级数;P_k为第k级用地程度面积比例(%)。

2　结果分析

2.1　用地结构变化特征

2.1.1　用地面积变化

研究区用地类型以林地、耕地为主,二者占总面积的90%以上(表2)。2023年林地、耕地面积分别为5 331.944和2 212.264 km²,分别为总面积的64.717%,26.852%;水域、建设用地分别为381.15和

275.492 km²，所占比例分别为4.626%，3.344%；草地、灌丛地面积相对较小，分别为36.008和1.936 km²，所占份额为0.437%，0.024%；未利用地零星分布于个别乡镇，其面积比例不足0.001%。

表2 研究区不同时期用地面积及比例

Table 2 Area and proportion of land use types during different periods in study area

用地类型	1990年		2000年		2010年		2023年	
	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%
耕地	2 263.398	27.472	2 464.035	29.908	2 599.187	31.548	2 212.264	26.852
林地	5 229.057	63.469	5 083.720	61.704	5 036.920	61.136	5 331.944	64.717
灌丛地	48.008	0.583	27.736	0.337	10.059	0.122	1.936	0.024
草地	284.191	3.449	249.870	3.033	124.317	1.509	36.008	0.437
水域	269.292	3.269	208.727	2.533	238.407	2.894	381.150	4.626
未利用地	0.092	0.001	0.008	0	0.002	0	0.023	0
建设用地	144.776	1.757	204.718	2.485	229.922	2.791	275.492	3.344

从表2还可看出，1990—2023年各类用地间发生了相应转换，但各时期林地、耕地面积始终占总面积的61.13%，26.85%以上，草地、灌丛地面积呈减少态势，建设用地则是持续增加；水域面积表现为“减少—增加—增加”，未利用地则是“减少—减少—增加”。与1990年相比，耕地、灌丛地、草地、未利用地面积有所减少，草地减少最多，达248.183 km²，占总面积的3.012%；林地、水域、建设用地面积却是增加的，建设用地增加最多，达130.716 km²，占总面积的1.587%（图1）。

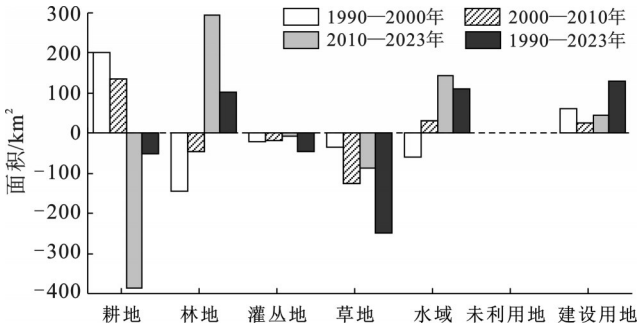


图1 研究区1990—2023年用地类型面积变化

Fig.1 Changes in area of land use types in study area from 1990 to 2023

2.1.2 用地转移分析

表3为1990—2023年研究区各类用地间面积转换情况，约1 171.348 km²的用地面积发生转移，占总面积的14.218%，以耕地、林地、草地、灌丛地、建设用地为主。耕地、林地和草地是主要的转出者，分别占总转出面积的42.209%，29.268%和22.320%。耕地以转移为林地、水域、建设用地为主，分别占耕地转出面积的51.328%，19.755%，27.748%；林地主要转移成耕地，占其转出面积的96.174%；草地则以耕地、林地为主要转移对象，分别占其转出面积的40.911%，56.258%。对转入面积来说，耕地、林地、建设用地、水域和草地是主要的转入者，分别占总转入面积的37.835%，38.058%，12.726%，10.145%，1.131%。33 a间研究区耕地、灌丛地、草地和未利用地面积分别减少了总面积的0.621%，0.559%，3.012%，0.001%；林地、水域和建设用地面积则有所增加，分别增加了总面积的1.249%，1.358%，1.587%。

2.2 碳储量时空变化规律

经计算，丹江流域河南段1990，2000，2010和2023年陆地生态系统的碳储量分别是1.252×10^8 t，1.240×10^8 t，1.234×10^8 t和1.250×10^8 t，表现为1990年最高，2010年最低。1990—2010年呈逐渐减少变化，1990—2000年的减幅显然大于2000—2010年；2010—2023年则是明显增加态势。时间尺度上，33 a间研究区总的碳储量共减少2.00×10^5 t，空间分布上，研究区各时期的碳储量均表现为北部高、南部低的特征（如图2所示）。北部多为山区、丘陵且植被覆盖度高、生态环境破坏程度低，使得碳储量较高；碳储量低值区沿着河流水系呈片状、条带状分布于南部、中部，少量延伸至北部，受自然条件影响，利于灌溉耕作等生产活动，地类多为耕地、水域、建设用地，人类活动强度大，植被覆盖度低，因而碳储量较低；研究区的碳储量空间分布格局也与其用地类型密切相关，即高值区以林地、草地、灌丛地等生态用地为主，低值区则以建设用地、耕地、水域和未利用地为主。从行政区域视角，碳储量高值区多分布于卢氏县（双槐树乡、汤河乡、五里川镇、狮子坪乡、瓦窑沟乡、朱阳关镇）、栾川县（冷水镇、三川镇、叫河镇）、西峡县大部、淅川县的荆紫关镇、西簧乡、毛堂乡、盛湾镇、金河镇等区域。

表 3　研究区 1990—2023 年各类用地间面积转换

Table 3　Area transition among different land use types in study area from 1990 to 2023　　单位:km^2

项目		2023年面积							
		耕地	林地	灌丛地	草地	水域	未利用地	建设地	转出量
1990年面积	耕地	1 769.079	253.776	0.051	5.723	97.674	0.001	137.193	494.418
	林地	329.713	4 886.155	0.714	5.198	1.764	0.004	5.436	342.831
	灌丛地	1.593	44.394	0.726	1.288	0	0.013	0.013	47.300
	草地	106.959	147.083	0.444	22.762	3.135	0.004	3.819	261.445
	水域	2.886	0.477	0	1.010	262.313	0	2.557	6.930
	未利用地	0.032	0	0	0	0.017	0	0.042	0.092
	建设用地	2.002	0.058	0	0.026	16.247	0	126.431	18.333
	转入量	443.185	445.788	1.210	13.245	118.837	0.022	149.061	—

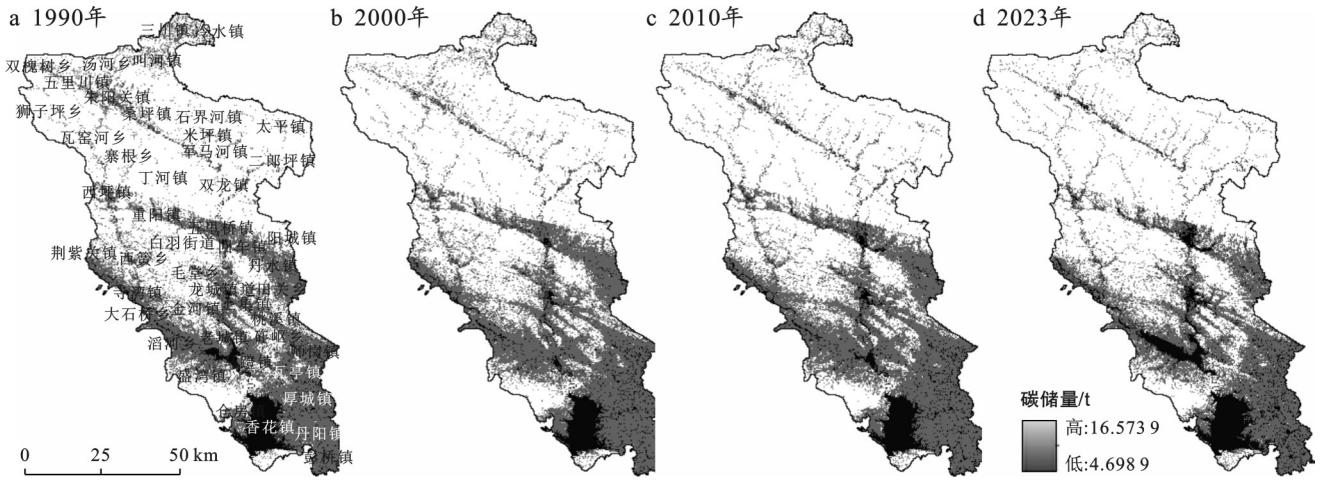


图 2　研究区 1990—2023 年碳储量空间分布

Fig.2　Spatial distribution of carbon storage in study area from 1990 to 2023

姚佳吟等[20]以河南省淅川县、西峡县和湖北省丹江口市、郧西县、郧阳区、张湾区、茅箭区为研究区(面积 17 949 km^2),利用与本研究相同的用地遥感数据和 INVEST 模型,测算的 2022 年该区域碳储量是 1.790×10^8 t;张启迪[21]以河南省淅川县,湖北省丹江口市与十堰市的张湾区、茅箭区、郧阳区为研究区(面积约 10 971.2 km^2),基于 GlobeLand30 数据与 INVEST 模型,得到 2000,2010 和 2020 年碳储量依次为 1.852×10^8,1.854×10^8,1.808×10^8 t。因研究区域不同,采用的用地遥感影像、碳密度数据也不同,两者与本次计算结果难免有所差异,但数量级是一致的,说明本次计算结果是可靠的、合理的。其碳储量分布规律皆表现为山区、丘陵区的碳储量较高,临近水域则较低,与本研究基本一致。

2.3　碳储量分布影响因素分析

碳储量分布主要受自然因素和人类活动影响[22-23]。以乡镇(街道)为单元,选取高程、坡度、年均气温、年平均降水、NDVI、地均 GDP、灾害区域分布、人口密度、到水系距离、到公路距离、到铁路距离、到居民点距离共 12 个影响因子,分别代表自然、人类活动因素,将其与碳储量栅格数据通过 GIS 的重采样工具统一投影坐标和精度,然后由分区统计得到各乡镇(街道)数值。以 2010 年为例,借助 SPSS 软件和逐步回归方法辨识这些因素对碳储量分布的影响,结果详见表 4。从表 4 可知,单因子回归中,NDVI(地表覆盖度)的 t 值是 7.606,在 0.01 置信水平下极显著,说明地表覆盖变化是影响研究区碳储量分布的主要因子;二因子组合回归中,NDVI 与到居民点距离的 t 值在 0.01 水平仍然是极显著;3 因子组合中,到居民点距离、坡度分布的 t 值在 0.01 水平下极显著,NDVI 则在 0.05 水平下显著;NDVI、到居民点距离、坡度、年均气温组成的四因子模式中,其 t 值在 0.01 置信水平下皆是极显著,充分说明地表覆盖变化是导致该区域碳储量空间分布差异的主导因子,坡度、气温等也有显著影响,这跟李曼等[24]对黄河流域碳储量研究的结论一致。杨轩等[25]的研究表明,人类生态修复工程可强烈改变碳储量,提升土壤有机碳含量;廖雯[26]指出:丹江口库区碳储量变化与土地利用变化完全同步,自然因素(地形、气候)仅解释空间背景,不驱动时间变化;Liu 等[27]也认为人为土地覆

盖变化是丹江口库区碳储量分布格局演变的首要驱动因子。

表4 碳储量分布影响因素回归分析

Table 4 Regression analysis of influencing factors of carbon storage distribution

模式	因子	未标准化系数B	t值	sig.
1	常量	−0.619	−4.668	0.000
	NDVI	1.170	7.606	0.000
2	常量	−0.742	−5.687	0.000
	NDVI	1.107	6.665	0.000
	到居民点距离	0.493	2.901	0.006
3	常量	−0.519	−3.676	0.001
	NDVI	0.478	2.101	0.041
	到居民点距离	0.543	3.435	0.001
	坡度	0.354	3.013	0.004
4	常量	−0.943	−5.649	0.000
	NDVI	0.609	2.997	0.004
	到居民点距离	0.507	3.641	0.001
	坡度	0.418	3.993	0.000
	年均气温	0.358	3.802	0.000

2.4 碳储量对用地转移的响应

由表5可知,各时期平均而言,各类用地对总体碳储量的贡献从大到小排序为林地、耕地、草地、水域、建设用地、灌丛地、未利用地,前二者的贡献率在95%以上。1990—2023年研究区总的碳储量呈缩减态势,但减少量不大,仅占总体碳储量的0.169%。就用地类型而论,林地对总体碳储量的贡献各时期都在75.173%以上,耕地在18.227%～21.687%间呈“增加—增加—减少”变化,草地、灌丛地的碳储量贡献随时间逐渐减少,分别从1990年的2.178%,0.435%直降到2023年的0.276%,0.018%,建设用地则呈扩张态势,2023年对总体碳储量的贡献率较1990年增加了0.547%;水域的碳储量贡献率呈“减少—增加—增加”在0.965%～1.804%之间变化,未利用地因面积非常小,对碳储量的贡献率微乎其微,不足0.001%。

由各类用地的碳储量及面积可测算其相应的综合碳密度(表5)。由表5可知,未利用地因面积变动较大,2010年的综合碳密度与其他时期差异明显;其他用地各个时期的综合碳密度略有不同,但差异不大:耕地随时间的变化呈微弱减少迹象,林地表现为微弱增加,草地、灌丛地、水域、建设用地则是微弱的波动变化。依据各类用地不同时期的均值,对其综合碳密度排序为:林地>灌丛地>耕地>草地>水域>建设用地>未利用地。其中,林地的碳密度184.202 4 t/hm^2,远超其他用地类型。

表5 各时期不同用地的碳储量与综合碳密度

Table 5 Carbon storage and comprehensive carbon density of different land use types during various periods

用地类型	碳储量/10^4 t				综合碳密度/(t·hm^{-2})			
	1990年	2000年	2010年	2023年	1990年	2000年	2010年	2023年
耕地	2 330.933 8	2 537.552 0	2 676.730 9	2 278.174 1	102.983 8	102.983 6	102.983 4	102.979 3
林地	9 631.994 0	9 364.311 5	9 278.123 6	9 821.644 8	184.201 4	184.202 0	184.202 3	184.203 8
草地	272.655 0	239.700 1	119.259 2	34.544 0	95.940 8	95.929 9	95.931 5	95.934 2
灌丛地	54.524 6	31.511 2	11.429 6	2.198 3	113.574 0	113.611 2	113.625 6	113.548 6
水域	154.381 7	119.661 6	136.676 0	218.548 2	57.328 7	57.329 2	57.328 9	57.339 2
建设用地	75.601 1	106.901 9	120.063 5	143.872 3	52.219 4	52.219 1	52.219 2	52.223 8
未利用地	0.048 4	0.004 3	0.000 9	0.011 9	52.608 7	53.750 0	45	51.739 1
合计	12 520.138 6	12 399.642 6	12 342.283 7	12 498.993 6	—	—	—	—

不同用地的碳密度不同,为探究用地类型转移期间碳储量减少的影响路径提供了便利。由表3和表5可知,林地转换为耕地、耕地转换成建设用地及水域分别造成研究区2.678×10^6 t,6.964×10^5 t,4.459×10^5 t的碳储量损失,而耕地转变为林地使得碳储量增加2.061×10^6 t,草地转化为林地,水域转移成耕地相应增加1.298×10^6 t与1.320×10^4 t。未利用地与建设用地的碳密度较为接近,两者间的转移面积也不多,对系统碳储量平衡的影响不明显。

2.5 生态系统碳储量脆弱性分析

由公式(5)—(6)得到了研究区土地利用变化对流域不同时期生态系统碳储量的影响情况(表6)。由表6可知,1990—2023年用地程度指数呈“增加—增加—减少”变化,33 a里增加2.553,其中1990—2000年用地程度指数增加3.891,2000—2010年增加2.253,2010—2023年增加−3.590,增幅呈减少趋势;总体碳储量则表现为“减少—减少—增加”,33 a内减少2.10×10^5 t,1990—2000年减少1.20×10^6 t,2000—2010年减少5.80×10^5 t,2010—2023年增加1.57×10^6 t。这使得PI指数始终为负值,即用地程度变化对其碳储量呈负向影响,但各时期的PI值较小,虽然对生态系统造成了负向影响,但影响较弱。

表 6　土地利用演变对碳储量的潜在影响

Table 6　Potential impact of land use change on carbon storage

年份	用地程度综合指数(L)	用地程度综合指数改变量(ΔL)	碳储量(C_t)/10^8 t	碳储量改变量(ΔC_t)/10^8 t	PI
1990	230.986 1	—	1.252 0	—	—
2000	234.876 9	3.890 8	1.240 0	−0.012 0	−0.003 1
2010	237.129 5	2.252 6	1.234 2	−0.005 8	−0.002 6
2023	233.539 2	−3.590 3	1.249 9	0.015 7	−0.004 4

3　讨　论

3.1　用地变化对碳储量的影响

1990—2023年丹江流域河南段用地变化比较明显:耕地、灌丛地、草地、未利用地面积是减少的,其中草地减少最多,占总减少面积的71.842%;而林地、水域和建设用地面积则是增加的,分别占总增加量的29.783%,32.379%,37.838%。原因可能是2000年以来实施的退耕还林、天然林保护工程产生了实际效果,造成林地面积增加,耕地面积减少;2013年丹江口水库加高完成并加大蓄水使水域面积增加,城乡经济发展使得建设用地面积持续增加、灌丛地与草地面积减少。

研究区2023年碳储量较1990年降低2.0×10^5 t,其变化与各类用地间的面积转移情形高度吻合。耕地、灌丛地、草地、未利用地的碳储量是减少的,共计减少3.43×10^6 t,其中草地占69.373%,灌丛地15.245%,耕地15.371%,而减少的草地、灌丛地面积主要是转移为林地与耕地,二者碳密度较高,对研究区碳储量的降低影响不大。

造成总体碳储量降低的原因可能与水域、建设用地相关。2023年林地、水域、建设用地的碳储量是增加的,共计增加3.22×10^6 t,所占份额分别为林地58.882%,水域19.922%,建设用地21.196%,而水域、建设用地主要由耕地转移而来,从高碳密度用地转换成低碳密度用地,类似于碳排放效果,使得用地系统总体碳储量降低。故个别用地类型面积的增加(如水域、建设用地)未必就能提升区域的碳汇能力,自碳密度高的用地转换成低值用地时,将降低系统的碳汇能力,甚至使系统成为"碳源"。结果表明:林地的碳密度较其他用地类型更高,同汪兴[28]、童荣鑫[29]、Walker等[30]的研究一致。

3.2　林地对碳储量的突出作用

由表7可知,1990—2000年林地、草地、灌丛地、水域面积是减少的,前者减少最多,耕地、建设用地面积是增加的,虽然耕地增加的面积较林地减少的面积还多55.300 km^2,但林地碳密度远高于耕地,从而使总体碳储量减少;2000—2010年耕地、水域、建设用地面积是增加的,而林地、草地、灌丛地面积是减少的,草地减少最多,即便耕地增加的面积较草地减少的面积多9.599 km^2,且前者碳密度略高于后者,还是林地缘故使总体碳储量不高;2010—2023年林地、水域、建设用地面积是增加的,前者增加最多,耕地、草地、灌丛地面积是减少的,耕地减少的面积比林地增加的面积还多91.899 km^2,依然是林地的碳密度最高使得总体碳储量增加。说明研究区林地面积占绝对优势,使系统碳库的稳定性增加,抗干扰能力增强;再者,研究区是南水北调中线工程的水源地,国家和当地政府严格的生态保护政策也使其用地变化温和可控,两者效应叠加,稀释了人类活动造成的局部碳损失,这可能是各时期PI值较小的原因。

表 7　不同时期用地类型面积与碳储量变化量

Table 7　Changes in land use type area and carbon storage during different periods

用地类型	1990—2000年		2000—2010年		2010—2023年	
	面积/km^2	碳储量/10^4 t	面积/km^2	碳储量/10^4 t	面积/km^2	碳储量/10^4 t
耕地	200.637	206.618	135.152	139.179	−386.923	−398.557
林地	−145.337	−267.683	−46.800	−86.188	295.024	543.521
草地	−34.321	−32.955	−125.553	−120.441	−88.309	−84.715
灌丛地	−20.272	−23.013	−17.677	−20.082	−8.123	−9.231
水域	−60.565	−34.720	29.680	17.014	142.743	81.872
建设	59.942	31.301	25.204	13.162	45.570	23.809
未利用	−0.084	−0.044	−0.006	−0.003	0.021	0.011
合计		−120.496		57.359		156.710

4 结 论

（1）林地和耕地是丹江流域河南段的主要用地类型，林地各时期面积都在总面积的61.1%以上，耕地也超过26.8%，使得各时期用地转移面积幅度较小，不足总面积的15%；受退耕还林、天然林保护政策影响，1990—2023年耕地、灌丛地、草地、未利用地面积是减少的，分别减少了51.134，46.072，248.183和0.069 km^2，林地、水域、建设用地则有所增加，依次增加了102.887，111.858，130.716 km^2。

（2）该区域1990年、2000年、2010年、2023年生态系统碳储量分别是1.252×10^8 t，1.240×10^8 t，1.234×10^8 t和1.250×10^8 t，各时期碳储量分布均呈北部高南部低的特征；逐步回归分析表明：用地类型（地表覆盖）变化是碳储量空间分异的主导因子，地形、气温等因子也有显著影响。

（3）1990—2023年研究区总体碳储量共计减少2.0×10^5 t，耕地转换成水域、建设用地是其减少的主要原因，碳储量主要源于林地、耕地，其他5类用地对总体碳储量的贡献率不足5%；各类用地各时期平均综合碳密度排序为：林地（184.202 t/hm^2）＞灌丛地（113.590 t/hm^2）＞耕地（102.983 t/hm^2）＞草地（95.934 t/hm^2）＞水域（57.332 t/hm^2）＞建设用地（52.220 t/hm^2）＞未利用地（50.775 t/hm^2），林地的碳密度值远超其他地类。

（4）1990—2023年研究区用地类型变化对系统碳储量呈负向影响，但各时期的PI值较小，意味着影响不大，原因可能是林地占据绝对优势使系统碳库具有较强的抗干扰能力，加之政府严格的生态保护政策抵消、进一步减弱了人类活动造成的负向影响。

参考文献（References）

[1] 赵宁，周蕾，庄杰，等.中国陆地生态系统碳源/汇整合分析[J].生态学报，2021，41（19）：7648-7658.
Zhao Ning, Zhou Lei, Zhuang Jie, et al. Integration analysis of the carbon sources and sinks in terrestrial ecosystems, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19):7648-7658.

[2] 温芮，高燕燕，吴志豪，等.关中平原城市群土地利用变化对碳储量时空格局的影响[J].中国生态农业学报（中英文），2024，32（4）：592-604.
Wen Rui, Gao Yanyan, Wu Zhihao, et al. Effects of land use change on the temporal and spatial pattern of carbon storage in Guanzhong Plain urban agglomeration [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(4): 592-604.

[3] 王怀毅，李忠魁.基于LUCC的渭河流域生态系统碳储量动态变化及脆弱性分析[J].水土保持研究，2024，31（6）：252-260.
Wang Huaiyi, Li Zhongkui. Dynamic changes and vulnerability analysis of carbon storage in the Weihe River basin ecosystem based on LUCC [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(6):252-260.

[4] 刘洋，张军，周冬梅，等.基于InVEST模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J].生态学报，2021，41（10）：4052-4065.
Liu Yang, Zhang Jun, Zhou Dongmei, et al. Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River basin based on InVEST model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(10):4052-4065.

[5] 王庭辉，王喜，秦耀辰，等.丹江口库区生态系统服务价值与人类活动时空关联分析[J].长江流域资源与环境，2021，30（2）：330-341.
Wang Tinghui, Wang Xi, Qin Yaochen, et al. Spatial-temporal correlation analysis of ecosystem services value and human activities in Danjiangkou Reservoir area [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(2):330-341.

[6] 沈东亮，史晓刚，李玉英，等.南水北调中线水源区生态产品价值实现路径[J].南水北调与水利科技（中英文），2025，23（4）：873-882.
Shen Dongliang, Shi Xiaogang, Li Yuying, et al. The value realization pathways of ecological products in the water source area of the middle route of the south-to-north water transfers project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(4):873-882.

[7] 李靖业，梁羽洁，杨桂山，等.城市扩张对土地碳储量的影响及其梯度效应：以南京市为例[J].中国土地科学，2025，39（3）：45-57.
Li Jingye, Liang Yujie, Yang Guishan, et al. Impact of urban expansion on land carbon storage and its gradient effect: A case study of Nanjing City [J]. China Land Science, 2025,39(3):45-57.

[8] 姜永涛，王丽美，高松峰，等.2000—2022年南水北调中线工程水源区植被覆盖度变化及其归因[J].环境科学，2025，46（5）：3009-3020.
Jiang Yongtao, Wang Limei, Gao Songfeng, et al. Dynamics and attribution of vegetation coverage in the water-source area of the central south-to-north water diversion from 2000 to 2022 [J]. Environmental Science, 2025,46(5):3009-3020.

[9] 姜筱筱，李雪梅，韩惠，等.甘肃省土地利用转变对碳储量变化的影响研究[J].干旱区地理，2024，47（12）：2075-2082.
Jiang Xiaoxiao, Li Xuemei, Han Hui, et al. Influence of land use transformation on carbon storage change in

Gansu Province [J]. Arid Land Geography, 2024, 47(12):2075-2082.

[10] 张哲,时振钦,朱文博,等.基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟[J].环境科学,2024,45(4):2332-2341.
Zhang Zhe, Shi Zhenqin, Zhu Wenbo, et al. Simulation of temporal and spatial changes in ecosystem carbon storage in Funiu Mountains based on InVEST model [J]. Environmental Science, 2024,45(4):2332-2341.

[11] 郭椿阳,高尚,周伯燕,等.基于格网的伏牛山区土地利用变化对生态服务价值影响研究[J].生态学报,2019,39(10):3482-3493.
Guo Chunyang, Gao Shang, Zhou Boyan, et al.Effects of land use change on ecosystem service value in Funiu Mountain based upon a grid square [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(10):3482-3493.

[12] 李琳,赵威.豫西北地区暖性灌草丛类草地生态系统固碳特征[J].草业学报,2019,28(5): 26-35.
Li Lin, Zhao Wei. Carbon sequestration characteristics of a warm shrub tussock grassland ecosystem in northwestern Henan [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019,28(5):26-35.

[13] Alam S A, Starr M, Clark B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland Savannah: A regional carbon sequestration study [J]. Journal of Arid Environments, 2013,89:67-76.

[14] Giardina C P, Ryan M G.Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature [J]. Nature, 2000,404(6780):858-861.

[15] 陈光水,杨玉盛,刘乐中,等.森林地下碳分配(TBCA)研究进展[J].亚热带资源与环境学报,2007,2(1):34-42.
Chen Guangshui, Yang Yusheng, Liu Lezhong, et al. Research review on total belowground carbon allocation in forest ecosystems [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2007,2(1):34-42.

[16] Delaney M, Brown S, Lugo A E, et al. The quantity and turnover of dead wood in permanent forest plots in six life zones of Venezuela [J]. Biotropica, 1998, 30(1):2-11.

[17] 陈大蓉,周旭,杨胜天,等.基于贵州省土地变化的碳储量演变及其脆弱性特征分析[J].水土保持通报,2023,43(3):301-309.
Chen Darong, Zhou Xu, Yang Shengtian, et al. Analysis of carbon stock evolution and its vulnerability characteristics based on land use change in Guizhou Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3):301-309.

[18] 贾艳艳,张芳源,刘新龙.基于土地利用变化的大汶河流域碳储量评估及其脆弱性分析[J].水土保持通报,2025,45(1):254-263.
Jia Yanyan, Zhang Fangyuan, Liu Xinlong. Assessment and vulnerability analysis of carbon storage in Dawen River basin based on land-use change [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 254-263.

[19] 陈晓日,冯永财,杨鹏,等.牟平区土地利用空间动态演化分析[J].中国生态环境产业与技术,2025,6(1):22-28.
Chen Xiaori, Feng Yongcai, Yang Peng, et al. Analysis of spatial dynamic evolution of land use in Mouping District [J]. Chinese Industry and Technology of Eco-environment, 2025,6(1):22-28.

[20] 姚佳吟,李楠鑫,邓紫浠.基于土地利用碳密度的丹江口库区碳储量空间分布特征分析[J].安徽农业科学,2025,53(15):41-44.
Yao Jiayin, Li Nanxin, Deng Zixi. Analysis of spatial distribution characteristics of carbon storage in Danjiangkou Reservoir region based on land-use carbon density [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2025, 53(15):41-44.

[21] 张启迪.丹江口库区生态系统碳储量时空演变及预测分析[D].河南 开封: 河南大学,2024.
Zhang Qidi. Spatial and temporal evolution of ecosystem carbon stocks in Danjiangkou Reservoir area and forecast analysis [D]. Kaifeng: Henan, Henan University, 2024.

[22] 赵明华,饶志国,李云霞,等.气候变化和人类活动驱动下的中国泥炭地全新世碳累积时空变化特征[J].中国科学(地球科学),2025,55(12):4345-4362.
Zhao Minghua, Rao Zhiguo, Li Yunxia, et al. Climatic and human drivers of spatio-temporal trends in holocene carbon accumulation in Chinese peatlands [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2025,55(12):4345-4362.

[23] 杨卫东,曾联波,李想.碳汇效应及其影响因素研究进展[J].地球科学进展,2023,38(2):151-167.
Yang Weidong, Zeng Lianbo, Li Xiang. Advances in research of carbon sinks and their influencing factors evaluation [J]. Advances in Earth Science, 2023, 38(2):151-167.

[24] 李曼,吴东丽,何昊,等.1990—2020年黄河流域碳储量时空演变及驱动因素研究[J].生态环境学报,2025,34(3):333-344.
Li Man, Wu Dongli, He Hao, et al. Spatio-temporal evolution and driving factors of carbon storage in the Yellow River basin from 1990 to 2020 [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2025,34(3):333-344.

(下转第 249 页)