

# 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

贾艳艳, 张芳源, 刘新龙

(山东农业大学 林学院, 山东 泰安 271018)

**摘要:** [目的] 探明大汶河流域碳储量对土地利用变化的响应及其脆弱性, 为促进流域绿色可持续发展  
和土地利用优化管控提供科学参考。[方法] 基于土地利用数据, 运用 InVEST 模型评估 2000—2020 年大  
汶河流域碳储量对土地利用转移的响应, 并采用潜在影响指数(PI)评估流域生态系统碳储量服务的脆弱  
性。[结果] ①2000—2020 年, 研究区用地结构发生明显变化, 主要表现为耕地大量减少(316.44 km<sup>2</sup>), 建  
设用地急剧增加(523.98 km<sup>2</sup>), 耕地转变为建设用地是主要的土地转移类型。②2000—2020 年, 研究区碳  
储量减少 $1.09 \times 10^7$  t, 其中耕地转变为建设用地是碳储量减少的主导因素; 碳储量空间分布呈“整体上北高  
南低、局部区域显著高或显著低”的空间格局。③2000—2020 年, 研究区土地利用强度指数增加 8.12, 前  
10 a 和后 10 a 的潜在影响指数分别为 -1.33 和 -1.42, 流域生态系统碳储量服务脆弱性逐渐增强。[结论]  
大汶河流域耕地、草地和林地的减少和建设用地的扩张对该流域碳储量及其脆弱性影响显著, 未来应将碳  
储量作为土地利用规划的重要参考因素, 以实现碳储量功能最优权衡。

**关键词:** 土地利用变化; 碳储量; InVEST 模型; 脆弱性; 大汶河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)01-0254-10

中图分类号: X171.1, F301.2

**文献参数:** 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.027; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.01.027.

## Assessment and vulnerability analysis of carbon storage in Dawen River basin based on land-use change

Jia Yanyan, Zhang Fangyuan, Liu Xinlong

(Forestry College, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

**Abstract:** [Objective] The response and vulnerability of carbon storage to land-use change in the Dawen  
River basin were analyzed in order to provide a reference for promoting the green and sustainable  
development of the basin and the land-use optimization management and control. [Methods] Based on land  
use data, the InVEST model was used to study the impact of land-use change on carbon storage evolution in  
the Dawen River basin from 2000 to 2020, and the potential impact index (PI) was used to assess the  
vulnerability of ecosystem carbon storage. [Results] ① During 2000—2020, the land-use structure of the  
study area changed significantly, with a sharp decline in cultivated land (316.44 km<sup>2</sup>) and a sharp increase in  
construction land (523.98 km<sup>2</sup>). The conversion of cultivated land into construction land was the primary  
type of land transfer. ② During 2000—2020, the carbon storage decreased by  $1.09 \times 10^7$  t, and the transfer of  
cultivated land to construction land was the leading factor in the decrease. The spatial distribution  
characteristics of basin carbon storage were “overall higher in the north and lower in the south, and  
significantly higher or significantly lower in local areas.” ③ During 2000—2020, the land use degree index

收稿日期: 2024-07-31

修回日期: 2024-10-28

采用日期: 2024-10-28

资助项目: 山东省自然科学基金项目“基于生态系统服务的流域生态安全格局构建及演变研究: 以黄河下游大汶河流域为例”  
(ZR2021QD124); 国家自然科学基金项目(32301658)

第一作者: 贾艳艳(1986—), 女(汉族), 河北省邯郸市人, 博士, 副教授, 主要从事景观生态规划和绿色空间生态系统服务相关研究。Email:  
jiayy@sdau.edu.cn.

increased by 8.12. The PI for the first and last 10 years was  $-1.33$  and  $-1.42$ , respectively, indicating that the vulnerability of carbon storage services increased. [Conclusion] The reduction in cultivated land, grassland and forest land, and the expansion of construction land in the Dawen River basin have significant effects on carbon storage and its vulnerability. In future, carbon storage should be considered as an important reference factor in land-use planning to achieve an optimal balance of carbon storage functions.

**Keywords:** land-use change; carbon storage; InVEST model; vulnerability; Dawen River basin

全球变暖已成为人类社会和经济可持续发展的重要影响因素,“碳排放”“碳减排”等问题引起越来越多的关注<sup>[1]</sup>。陆地生物圈碳储量是气候调节的重要因子,在维持全球碳平衡以及调节气候方面具有不可替代的作用<sup>[2]</sup>,陆地生态系统固碳被认为是最经济可行和环境友好的减缓大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高的重要途径之一<sup>[3]</sup>。土地利用变化是人类活动最主要的表现方式,通过改变陆地生态系统结构与功能,进而影响植被碳储量、土壤碳储量,是全球碳储量变化的主要驱动力<sup>[4]</sup>。因此,综合评估土地利用变化与生态系统碳储量之间的关系,对提升区域碳固存能力和促进区域低碳绿色可持续发展具有重要意义。

目前,碳储量的计算主要包括两类研究方法,一类主要是野外样地调查与实测法,如 Contosta 等<sup>[5]</sup>采用样地调查、取样测定等方法探讨生物—地理—社会—化学因素对小城市庭院地被地上和地下碳储量的影响。虽然样地实测法是最基本、最有效的方法,但操作复杂,较适用于小尺度研究。另一类是基于不同土地利用类型的碳密度采用遥感反演和模型模拟法,适用于中、大尺度研究,该方法已在区域<sup>[6]</sup>、国家<sup>[7]</sup>和全球<sup>[8]</sup>层面针对土地利用变化对生态系统碳储量的影响进行了大量研究。其中,InVEST 模型以土地利用数据为基础,具有所需参数少、模拟精度较高、可视性强等优势,在碳储量评估中被国内外学者广泛应用<sup>[9-10]</sup>。脆弱性指标可以用来作为人类暴露于环境变化以及自身缺乏适应能力产生的压力下,敏感性程度的表征<sup>[11]</sup>,也可以成为制定政策以减轻气候变化风险的有用工具<sup>[12]</sup>。其中,关于生态系统服务的脆弱性以 Schröter 等<sup>[13]</sup>的研究影响较大,其将土地利用变化纳入到脆弱性概念中,并对全欧洲的生态系统服务供给及其脆弱性进行评估;之后, Metzger 等<sup>[14]</sup>将潜在影响纳入脆弱性评估,强调在环境变化下人类—环境系统的脆弱性。生态系统服务脆弱性是指人类—生态系统容易受到或不能应对气候变化或土地利用变化等带来的负面影响导致生态系统服务供给能力下降的程度<sup>[15]</sup>。碳储量服务是生态系统服务的重要组成部分之一,研究其变化及脆弱性对改善生态系统服务功能退化具有重要意义<sup>[10]</sup>。但目前的研

究无论在县域、市域、省域、城市群还是流域等尺度<sup>[4-6]</sup>,大多聚焦探讨用地类型转换引起陆地生态系统碳储量变化,而关于碳储量对土地利用变化脆弱性的研究还相对较少。向江书等<sup>[10]</sup>、万海峰等<sup>[16]</sup>、张斌等<sup>[17]</sup>采用 InVEST 模型、脆弱性评估、土地利用强度综合指数等方法分别探讨了重庆市主城区、黔中城市群和武汉都市圈的碳储量对土地利用变化的响应及脆弱性,方法的可行性得到有效验证。然而,上述研究的尺度多见于单个城市或城市群,缺乏流域尺度碳储量演变及其脆弱性特征的分析。

黄河下游是我国重要的生态安全屏障,同时也是黄河流域经济发展高地。大汶河流域是黄河下游生态保护和高质量发展的主战场,地貌类型多样,生态本底资源丰富。但近年来,随着人口增加和城镇化进程加快,流域内土地利用覆被发生了强烈变化,导致生态空间破碎、生态系统服务功能衰退。目前,针对大汶河流域的研究多见于湿地时空演变特征<sup>[18]</sup>、生态安全格局构建等<sup>[19]</sup>,而关于碳储量时空演变及脆弱性分析的研究较少。因此,本研究以大汶河流域 2000—2020 年土地利用数据为基础,利用 InVEST 模型和生态系统服务对土地利用变化的脆弱性评估方法,分析流域碳储量时空变化及其脆弱性。本研究对于有效评估大汶河流域生态系统碳汇潜力和维持黄河下游生态系统稳定性具有重要意义,也可为流域绿色低碳发展和优化流域生态系统管理提供科学依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

大汶河是黄河下游最大的一条支流,大汶河流域位于黄河下游右岸、山东省中部的泰山南麓,地处  $116^{\circ}7'—118^{\circ}6'E$ ,  $35^{\circ}48'—36^{\circ}45'N$ 。大汶河流域发源于东部莱芜、沂源、新泰一带的山区,迂回西流,主要涉及泰安市的泰山区、岱岳区、肥城市、新泰市、东平县、宁阳县和济南市的莱芜区、钢城区、平阴县,流域面积  $8\,947.65\text{ km}^2$ 。研究区域属半湿润大陆性季风气候区,年平均气温  $12\sim 14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;年平均降水量  $640\sim 760\text{ mm}$ 。流域内地势东高西低,北高南低,北、东为山地,西、南为丘陵和平原。境内具有世界自然和文化双遗产之称的泰山、徂徕山、大汶河和东平湖等,山水格局独具

特色、生态区位优势突出,动植物资源丰富,生态系统多样,生态本底资源丰富。但 20 世纪 80 年代以来,由于城镇化建设,流域用地格局变化显著。

## 1.2 数据来源

基础数据为山东省 2000,2010 和 2020 年的土地利用栅格数据,空间分辨率为 30 m,来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。根据山东省景观类型的组成和特点,将大汶河流域景观类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 个一级类别。大汶河流域矢量边界数据根据大汶河流域水文站网分布图矢量化得到,社会经济和人口数据来源于山东省统计年鉴、国家统计局(<http://data.stats.gov.cn/index.htm>)。降水和温度数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)。

## 2 研究方法

### 2.1 土地利用程度指数

土地利用程度与生态系统密切相关,反映人类活动和自然环境的相互作用,是促进生态系统服务变化的重要因素<sup>[17]</sup>。计算公式为:

$$L = 100 \times \sum_{i=1}^n (D_i \cdot P_i) \quad (1)$$

式中: $L$  为土地利用程度指数; $D_i$  为第  $i$  级的土地利用程度分级指数; $P_i$  为第  $i$  级土地利用类型面积比例(%) ;  $n$  为土地利用程度分级数。本研究参考智菲等<sup>[20]</sup>和向书江等<sup>[10]</sup>的研究,将土地利用程度分级指数分为 4 级,其中耕地为 3,林地、草地和水域为 2,建设用地为 4,未利用地为 1。

### 2.2 碳储量估算方法

(1) 碳储量的计算。采用 InVEST 模型的 Carbon 模块计算研究区碳储量。Carbon 模块将生态系统碳储量划分为地上、地下、土壤和死亡有机质碳储量 4 部分<sup>[20]</sup>。计算公式为:

$$C_i = C_{i\_above} + C_{i\_below} + C_{i\_soil} + C_{i\_dead} \quad (2)$$

$$C_{i\_total} = C_i \cdot A_i \quad (3)$$

式中: $C_i$  为地类  $i$  的总碳密度; $C_{i\_above}$ 、 $C_{i\_below}$ 、 $C_{i\_soil}$ 、 $C_{i\_dead}$  分别为第  $i$  种用地类型的地上生物量碳密度、地下生物量碳密度、土壤有机质碳密度和死亡有机质碳密度( $t/hm^2$ ) ;  $C_{i\_total}$  为地类  $i$  的碳储量( $t$ ) ;  $A_i$  为地类  $i$  的面积( $hm^2$ )。

(2) 碳密度的获取及修正。实测碳密度数据可以有效提高碳储量估算精度,但目前研究区基于土地利用类型的实测碳密度数据比较缺乏。本研究中不同地类碳密度参考《2010s 中国陆地生态系统碳密度

数据集》<sup>[21]</sup>,数据来源于国家生态科学数据中心资源共享服务平台(<http://www.nesdc.org.cn/>),同时参考杨洁等<sup>[22]</sup>、苗议艺<sup>[23]</sup>有关黄河流域和山东地区碳储量的研究成果。碳密度主要受气候、地形、水文条件、植被类型等影响<sup>[1]</sup>,但由于植被类型与水文条件量化较困难,本研究采用陈光水等<sup>[24]</sup>、Alam 等<sup>[25]</sup>研究中关于生物量碳密度和土壤碳密度分别与气温和降水量的关系模型对碳密度进行修正。计算公式为:

$$C_{SP} = 3.3968 \times MAP + 3996.1 \quad (R^2 = 0.11) \quad (4)$$

$$C_{BP} = 6.798 \times e^{0.0054 \times MAP} \quad (R^2 = 0.70) \quad (5)$$

$$C_{BT} = 28 \times MAT + 398 \quad (R^2 = 0.47, p < 0.01) \quad (6)$$

$$K_B = K_{BP} \times K_{BT} = \frac{C'_{BP}}{C''_{BP}} \times \frac{C'_{BT}}{C''_{BT}} \quad (7)$$

$$K_S = \frac{C'_{SP}}{C''_{SP}} \quad (8)$$

式中: $C_{SP}$  为根据年降水量得到的土壤碳密度( $t/hm^2$ ) ;  $C_{BP}$ 、 $C_{BT}$  分别为根据年降水和年均气温得到的生物量碳密度( $t/hm^2$ ) ;  $MAP$  为年均降水量( $mm$ ) ;  $MAT$  为年均气温( $^{\circ}C$ ) ;  $K_{BP}$ 、 $K_{BT}$  分别为生物量碳密度的降水因子和气温因子修正系数;  $C'_{BP}$ 、 $C'_{BT}$ 、 $C'_{SP}$  和  $C''_{BP}$ 、 $C''_{BT}$ 、 $C''_{SP}$  分别为大汶河流域与全国尺度根据年降水量得到的生物量碳密度数据、根据年均气温得到的生物量碳密度数据、根据年均气温得到的土壤碳密度数据;  $K_B$ 、 $K_S$  分别为生物量碳密度修正系数和土壤碳密度修正系数。

分别将大汶河流域和全国的年均气温、年降水量代入上述公式(2000—2020 年,大汶河流域和全国的年均气温、年均降水量分别为  $13.87^{\circ}C$ 、 $9.88^{\circ}C$  和  $719.77\text{ mm}$ 、 $671.03\text{ mm}$ ),根据两者之比得到碳密度修正系数,修正后的大汶河流域碳密度详见表 1。

表 1 大汶河流域不同土地利用类型的碳密度  
Table 1 Carbon density of different land-use types in Dawen River basin  $t/hm^2$

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤有机质碳密度	死亡有机质碳密度
耕地	36.78	65.15	92.15	14.89
林地	63.76	121.93	162.99	21.40
草地	27.58	70.97	83.54	11.04
水域	4.12	1.58	19.77	0
建设用地	3.79	0.00	40.03	0
未利用地	1.97	0.00	22.17	0

### 2.3 生态系统脆弱性评估方法

本研究参考相关文献<sup>[10,16,26]</sup>,基于 Schröter 等<sup>[13]</sup>提出的起点脆弱性评估方法和 Metzger 等<sup>[14]</sup>提出的潜在影响指数(PI)来度量大汶河流域生态系统

服务中碳储量服务的脆弱性。计算公式为:

$$PI = \frac{\Delta C}{\Delta L} \quad (9)$$

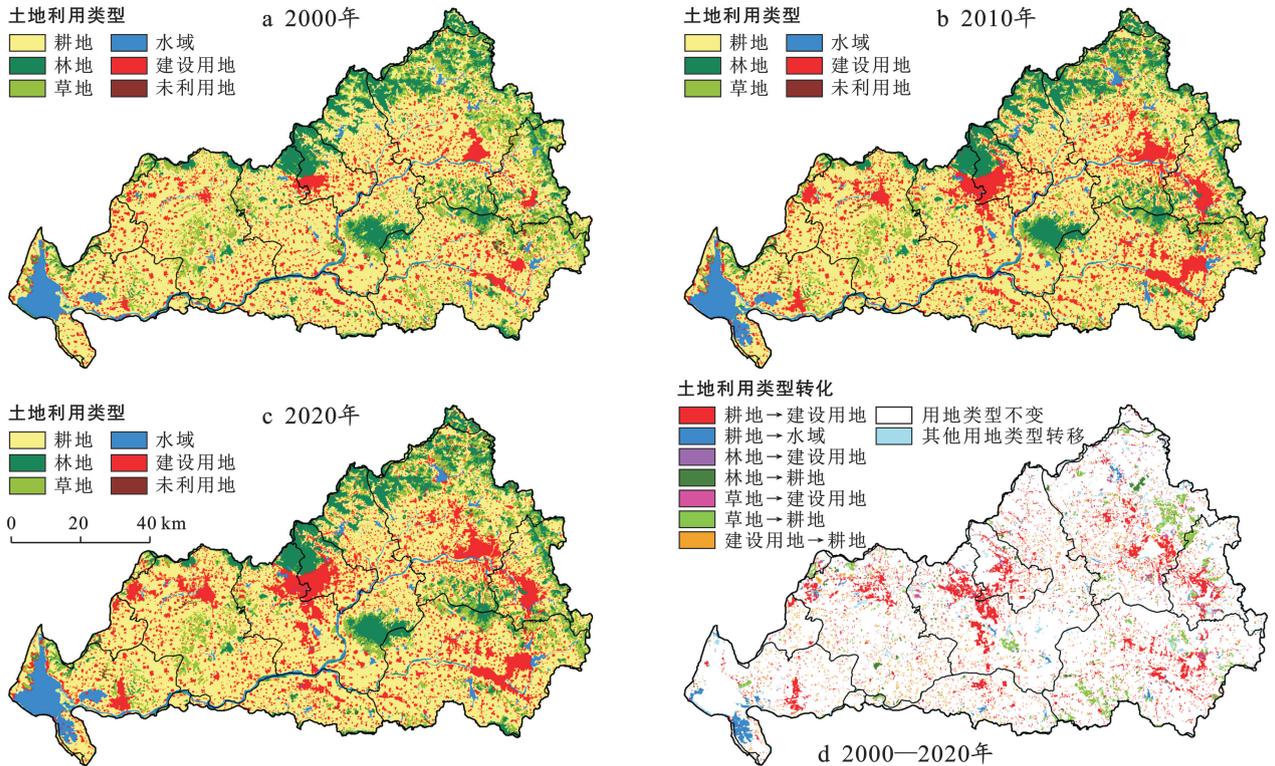
式中: $\Delta C$  表示碳储量的变化量(t);  $\Delta L$  表示土地利用程度指数变化量。

### 3 结果与分析

#### 3.1 大汶河流域土地利用变化特征

2000—2020 年,耕地是大汶河流域的主要地类,占研究区土地总面积的 58% 以上,但所占比例呈减少趋势;其次是林地和建设用地,均在 10% 以上,但林地呈减少趋势,建设用地面积不断增加;草地比例在 8% 以上,呈减少趋势。近 20 a,研究区土地利用格局发生了明显变化(图 1),并且各用地类型均以

2000—2010 年变化尤为显著(表 2),因为该时段是泰安市城区大力扩张和建设时期。2000—2020 年,耕地减少 316.44 km<sup>2</sup>,减幅为 5.17%,其中前 10 a 减少 222.31 km<sup>2</sup>,后 10 a 减少 94.13 km<sup>2</sup>;近 20 a,林地共减少 68.78 km<sup>2</sup>,变化率为 -6.75%,其中前 10 a 减少显著,变化率为 -6.61%,后 10 a 变化率为 -0.16%;草地在 10 a 减幅为 21.49%(主要由于莱芜区对草地的开垦),后 10 a 变化量较小,减幅为 0.17%;水域和建设用地均呈增加趋势,前 10 a 增加显著,水域增加 72.09 km<sup>2</sup>(主要由于“退养还滩”“退耕还湿”“退渔还湖”等政策实施使东平湖周边区域的耕地逐渐转变为水域),建设用地增加 427.00 km<sup>2</sup>,增幅为 43.93%,变化率最大,后 10 a 建设用地增加 96.99 km<sup>2</sup>;未利用地变化不明显。



注:由于本研究流域边界与流域内县区边界不完全一致,导致图中的两类边界线条不完全重合。下同。

图 1 大汶河流域 2000—2020 年土地利用类型及类型转化空间分布

Fig.1 Spatial distribution of land-use types and type transformation in Dawen River basin from 2000 to 2020

表 2 大汶河流域 2000—2020 年土地利用面积及变化

Table 2 Land-use area and its change in Dawen River basin from 2000 to 2020

土地利用类型	2000 年		2010 年		2020 年		2000—2010 年		2010—2020 年	
	面积/ km <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ km <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ km <sup>2</sup>	比例/ %	变化量/ km <sup>2</sup>	变化率/ %	变化量/ km <sup>2</sup>	变化率/ %
耕地	5 537.81	61.89	5 315.50	59.41	5 221.37	58.35	-222.31	-4.01	-94.13	-1.77
林地	1 018.28	11.38	950.99	10.63	949.50	10.61	-67.29	-6.61	-1.48	-0.16
草地	1 009.08	11.28	792.22	8.85	790.87	8.84	-216.87	-21.49	-1.35	-0.17
水域	384.34	4.30	456.43	5.10	458.93	5.13	72.09	18.76	2.50	0.55
建设用地	971.89	10.86	1 398.89	15.63	1 495.88	16.72	427.00	43.93	96.99	6.93
未利用地	26.24	0.29	33.63	0.38	31.11	0.35	7.39	28.15	-2.52	-7.49

2000—2020年,大汶河流域土地利用转移主要发生在耕地、草地、建设用地和林地之间,前10a的转移量明显高于后10a(表3)。2000—2010年,耕地主要流向建设用地(537.77 km<sup>2</sup>)和水域(83.17 km<sup>2</sup>),分别占耕地总转出量的82.79%和12.80%,空间上分别主要分布在泰山区、新泰市等各区县主城区和东平湖东南部(图1);林地主要流向耕地和建设用地,分别占林地总转出量的64.68%和20.11%,主要分布在泰山区域,泰山区域建设用地由泰山山麓向山顶方

向蔓延,导致植被退化;草地转出量的77.27%和13.57%分别转为耕地和建设用地;虽然水域呈增加趋势,由于城镇扩张等人类活动的干扰,仍有25.64 km<sup>2</sup>的水域转出,主要转为耕地和建设用地,集中分布在东平县东平湖西部区域。2010—2020年,除耕地外,其余各用地类型间的转换均相对较小;耕地主要转为建设用地(95.96 km<sup>2</sup>),占耕地转出总量的93.76%;总体上后10a各用地类型的变化量显著小于前10a。

表3 大汶河流域2000—2020年土地利用转移矩阵

Table 3 Transition matrix of land-use type of Dawen River basin from 2000 to 2020

km<sup>2</sup>

项目	土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	转出
2000—2010年 面积	耕地	4 888.22	9.29	12.21	83.17	537.77	7.15	649.59
	林地	55.49	932.49	5.94	5.75	17.25	1.36	85.79
	草地	185.70	7.68	768.75	5.12	32.62	9.22	240.34
	水域	18.66	0.16	0.72	358.70	5.64	0.47	25.64
	建设用地	158.58	1.35	3.65	3.52	804.65	0.16	167.25
	未利用地	8.85	0.02	0.95	0.17	0.97	15.28	10.96
2010—2020年 面积	耕地	5 213.16	0.91	1.95	2.74	95.96	0.78	102.34
	林地	0.88	947.32	1.07	0.86	0.39	0.46	3.67
	草地	1.75	1.07	787.54	0.13	1.15	0.58	4.68
	水域	1.01	0.05	0.11	455.05	0.19	0.01	1.38
	建设用地	4.46	0.11	0.17	0.14	1 394.00	0.01	4.89
	未利用地	0.11	0.04	0.03	0.01	4.19	29.27	4.36

### 3.2 大汶河流域碳储量时空变化特征

利用InVEST模型中的Carbon模块分别计算得到大汶河流域2000,2010和2020年的碳储量及其空间分布图(图2—3)。

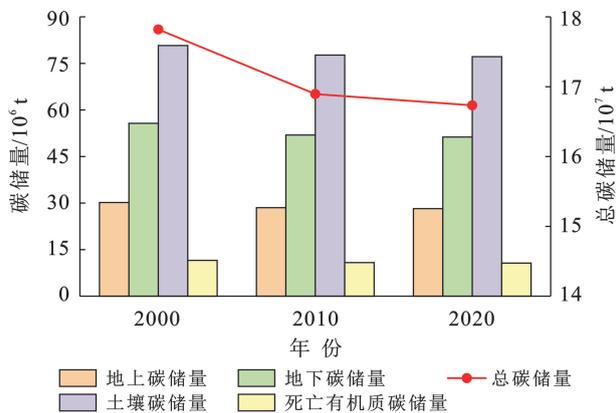


图2 大汶河流域2000—2020年各碳库碳储量

Fig.2 Carbon storage of different carbon pools in Dawen River basin from 2000 to 2020

时间上,研究区3个年份生态系统总碳储量分别为 $1.78 \times 10^8$  t,  $1.69 \times 10^8$  t和 $1.67 \times 10^8$  t,平均碳密度分别为199.16,188.82和187.00 t/hm<sup>2</sup>,呈减少趋

势,20a间总碳储量和碳密度分别减少 $1.09 \times 10^7$  t和12.16 t/hm<sup>2</sup>。在4种碳库中,土壤碳库对总碳储量的贡献最大,2020年,土壤碳储量为 $7.72 \times 10^7$  t,占总碳储量的46.12%;地下碳储量、地上碳储量和死亡有机质碳储量的比例分别为30.65% ( $5.13 \times 10^7$  t), 16.85% ( $2.82 \times 10^7$  t)和6.38% ( $1.07 \times 10^7$  t)。近20a,研究区各碳库均呈减少趋势,其中,地下碳储量减少最多,减少 $4.44 \times 10^6$  t,减幅为7.96%;土壤碳储量减少次之,减少 $3.60 \times 10^6$  t,减幅为4.46%。碳储量前10a相较后10a减少明显,因为2000—2010年大汶河流域内城镇化建设发展力度较大,土地需求增加,碳密度高的地类(耕地、林地、草地)被大量侵占。

空间上,大汶河流域碳储量高值区主要分布在林地、草地和耕地区域,但空间上仍有复杂的变化(图3)。2000,2010和2020年流域碳储量呈现“整体上北高南低、局部区域显著高或显著低”的空间分布特征;主要表现为研究区北部泰山山脉区域较高,南部平原及丘陵区域较低;局部地区主要是流域中部的徂徕山和莲花山区域碳储量明显偏高、东平湖及各区县主城区碳储量明显偏低,这种分布格局在过去20a保持相对稳定。这与各区域用地类型和人类活

动强度密切相关,碳储量高值区主要为山地林区,因为林草景观固碳能力强,低值区主要为建设用地密集的城镇区域,其中主城区呈片状分布、村镇区域呈点状分布。为进一步分析大汶河流域碳储量的局部变化特征,通过栅格计算将空间变化值分为 3 类:不变、增加、减少。2000—2020 年,流域面积 85.95% 的

区域碳储量不变;碳储量增加区比例仅 4.39%,主要分布在流域东部;碳储量减少区比例为 9.66%,集中分布在各区县的主城区,因为这些地区城市化水平高,土地开发利用强度大,人口密度大,对建设用地需求大,开发过程中生态空间被侵占,导致区域碳储量减少。

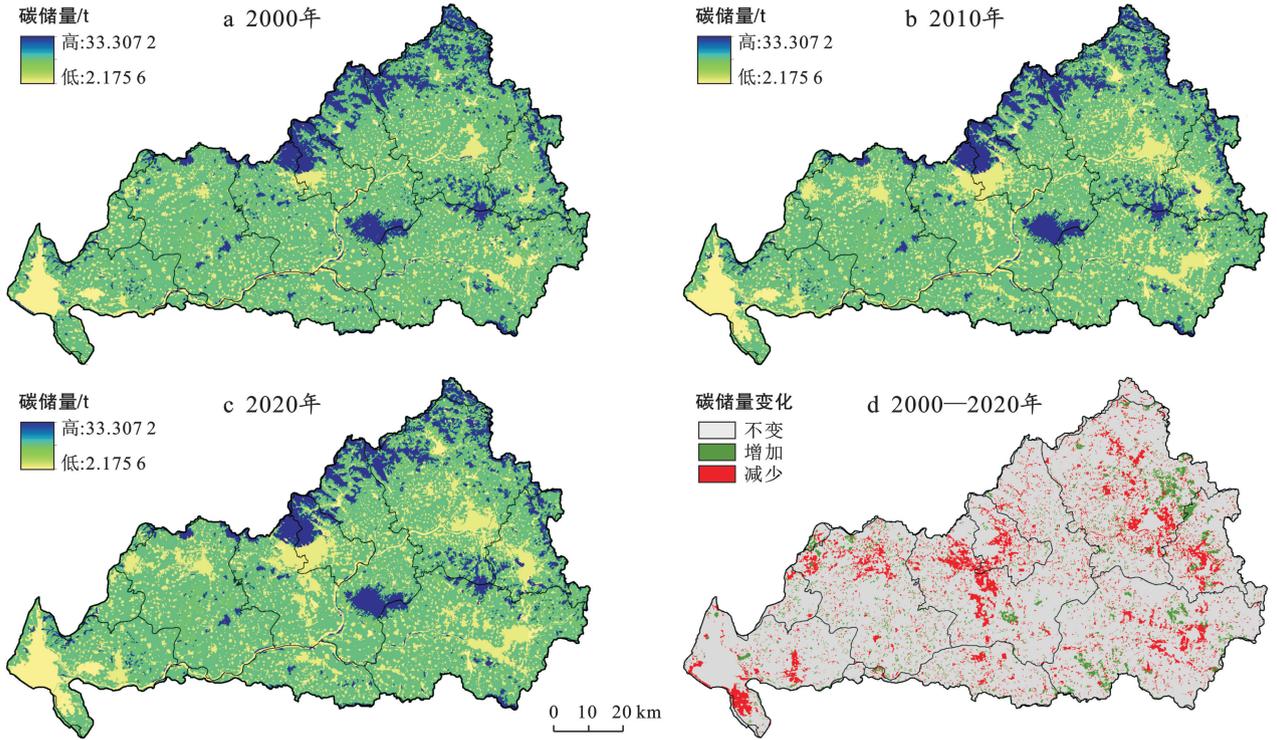


图 3 大汶河流域 2000—2020 年碳储量空间分布及变化

Fig.3 Spatial distribution and changes of carbon storage in Dawen River basin from 2000 to 2020

### 3.3 大汶河流域碳储量对土地利用变化的响应

研究区不同用地类型的面积及碳密度均影响流域碳储量,不同用地类型之间的转换改变了大汶河流域碳储量及其空间格局。由表 4 可知,2000—2020 年土地利用变化引起流域碳储量增加了  $3.38 \times 10^6$  t,减少了  $1.43 \times 10^7$  t,整体净减少了  $1.09 \times 10^7$  t;其中,耕地、

草地和林地面积的变化是碳储量减少的主要因素,耕地、草地和林地的碳储量分别减少了  $6.61 \times 10^6$  t,  $4.21 \times 10^6$  t 和  $2.55 \times 10^6$  t;虽然建设用地的碳密度很低,但由于研究期内建设用地面积增加显著,导致建设用地碳储量增加了  $2.30 \times 10^6$  t,增幅达 53.91%;水域和未利用地的碳储量整体呈增加趋势,但变化不明显。

表 4 大汶河流域 2000—2020 年不同土地利用类型碳储量及变化

Table 4 Carbon storage and change of different land-use types of Dawen River basin from 2000 to 2020

项目	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计
碳储量							
2000 年	$1.16 \times 10^8$	$3.77 \times 10^7$	$1.95 \times 10^7$	$9.79 \times 10^5$	$4.26 \times 10^6$	$6.33 \times 10^4$	$1.78 \times 10^8$
2010 年	$1.11 \times 10^8$	$3.52 \times 10^7$	$1.53 \times 10^7$	$1.16 \times 10^6$	$6.13 \times 10^6$	$8.12 \times 10^4$	$1.69 \times 10^8$
2020 年	$1.10 \times 10^8$	$3.51 \times 10^7$	$1.52742 \times 10^7$	$1.17 \times 10^6$	$6.56 \times 10^6$	$7.51 \times 10^4$	$1.67 \times 10^8$
碳储量变化							
2000—2010 年	$-4.65 \times 10^6$	$-2.49 \times 10^6$	$-4.19 \times 10^6$	$1.84 \times 10^5$	$1.87 \times 10^6$	$1.78 \times 10^4$	$-9.25 \times 10^6$
2010—2020 年	$-1.97 \times 10^6$	$-5.48 \times 10^4$	$-2.61 \times 10^4$	$6.40 \times 10^3$	$4.25 \times 10^5$	$-6.10 \times 10^3$	$-1.62 \times 10^6$
2000—2020 年	$-6.61 \times 10^6$	$-2.55 \times 10^6$	$-4.21 \times 10^6$	$1.90 \times 10^5$	$2.30 \times 10^6$	$1.18 \times 10^4$	$-1.09 \times 10^7$

进一步由碳储量转移矩阵(表 5)分析可知,2000—2010 年大汶河流域用地类型变化导致碳储量

增加了  $3.85 \times 10^6$  t,减少了  $1.31 \times 10^7$  t,整体净减少了  $9.25 \times 10^6$  t。

建设用")和水域转耕地是碳储量增加的主要贡献者(76.93%),耕地转变为建设用地、耕地转变为水域、林地转变为耕地是碳储量减少的主要因素,其贡献率分别为 67.79%,11.65%,6.82%。2010—2020 年,用地类型变化导致碳储量增加了  $1.51 \times 10^5$  t,

减少了  $1.77 \times 10^6$  t,整体净减少了  $1.62 \times 10^6$  t;耕地转变为建设用地是碳储量减少的主要贡献者(89.35%)。此外,碳储量的变化率在前 10 a 显著高于后 10 a,这与各用地类型结构的变化相一致,进一步表明研究区用地类型改变对碳储量的影响。

表 5 大汶河流域 2000—2020 年碳储量转移矩阵

Table 5 Transfer matrix of carbon storage in Dawen River basin from 2000 to 2020

项目	土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2000—2010 年 碳储量变化/t	耕地	0	$1.50 \times 10^5$	$-1.93 \times 10^4$	$-1.53 \times 10^6$	$-8.88 \times 10^6$	$-1.32 \times 10^5$
	林地	$-8.94 \times 10^5$	0	$-1.05 \times 10^5$	$-1.98 \times 10^5$	$-5.63 \times 10^5$	$-4.70 \times 10^4$
	草地	$2.94 \times 10^5$	$1.36 \times 10^5$	0	$-8.58 \times 10^4$	$-4.87 \times 10^5$	$-1.56 \times 10^5$
	水域	$3.42 \times 10^5$	$5.60 \times 10^3$	$1.21 \times 10^4$	0	$1.03 \times 10^4$	$-1.00 \times 10^2$
	建设用地	$2.62 \times 10^6$	$4.40 \times 10^4$	$5.44 \times 10^4$	$-6.50 \times 10^3$	0	$-3.00 \times 10^2$
	未利用地	$1.64 \times 10^5$	$7.00 \times 10^2$	$1.60 \times 10^4$	0	$1.90 \times 10^3$	0
	2010—2020 年 碳储量变化/t	耕地	0	$1.47 \times 10^4$	$-3.10 \times 10^3$	$-5.02 \times 10^4$	$-1.58 \times 10^6$
林地		$-1.42 \times 10^4$	0	$-1.89 \times 10^4$	$-2.98 \times 10^4$	$-1.28 \times 10^4$	$-1.59 \times 10^4$
草地		$2.80 \times 10^3$	$1.89 \times 10^4$	0	$-2.10 \times 10^3$	$-1.72 \times 10^4$	$-9.80 \times 10^3$
水域		$1.86 \times 10^4$	$1.80 \times 10^3$	$1.90 \times 10^3$	0	$4.00 \times 10^2$	0
建设用地		$7.37 \times 10^4$	$3.80 \times 10^3$	$2.60 \times 10^3$	$-3.00 \times 10^2$	0	0
未利用地		$1.90 \times 10^3$	$1.20 \times 10^3$	$5.00 \times 10^2$	0.00	$8.20 \times 10^3$	0

### 3.4 大汶河流域碳储量服务脆弱性评估

根据脆弱性评估方法和生态系统服务对土地利用变化的脆弱性响应机理,评估 2000—2010 年、2010—2020 年两个时段大汶河流域碳储量对土地利用变化的脆弱性(表 6)。

表 6 大汶河流域土地利用变化对碳储备能力的潜在影响

Table 6 Potential impacts of land-use change on carbon storage capacity in Dawen River basin

年份	土地利用强度指数	土地利用强度变化	总碳储量/ $10^6$ t	总碳储量变化/ $10^6$ t	PI
2000	283.32	—	178.20	—	—
2010	290.30	6.98	168.95	-9.25	-1.33
2020	291.44	1.14	167.32	-1.62	-1.42

注:PI<0 表示负面潜在影响;PI=0 无潜在影响;PI>0 表示正向潜在影响。

研究期内流域土地利用强度指数整体呈增强趋势,近 20 a 增加 8.12,增幅为 2.87%,其中前 10 a 土地利用强度指数增加 6.98,增幅为 2.46%,后 10 a 增加 1.14,增幅趋于减弱,其原因是分级指数较高的建设用地急剧增加并且前 10 a 扩张力度显著高于后 10 a,导致流域土地利用强度综合指数上升;同时,两个时段流域碳储量分别减少  $9.25 \times 10^6$  t 和  $1.62 \times 10^6$  t,主要是耕地大量流向碳密度较低的建设用地。2000—2010 年和 2010—2020 年的潜在影响指数(PI)分别为 -1.33 和 -1.42,均表现为负面潜在影

响,并且土地利用变化对碳储量服务的负面影响是增加的,说明大汶河流域碳储量服务脆弱性在不断增强。未来大汶河流域内应该合理进行土地利用管控,加强对建设用地扩张的管控和未利用地的开发利用,加强对林地、草地和水域景观的保护,维持或增加碳密度较高的林地和草地景观,促进耕地和建设用地向平衡态发展,减缓土地利用变化对碳平衡的扰动,降低流域生态系统脆弱性。

## 4 讨论

本研究分析了大汶河流域 2000—2020 年土地利用变化对碳储量的影响,由碳储量变化对土地利用变化的响应分析可知,当生物量较高的地类转向较低的地类时会导致碳储量减少,其他地类转化为林草等生态用地更有利于生态系统碳储量的蓄积;大汶河流域城市及乡镇区域的建设用地侵占林地、草地和耕地,引发明显的碳排放效应。20 a 间,土地利用变化显著的地区主要位于流域北部(泰山区城区)、东部(新泰市主城区),因为该区域人类开发建设强度大、建设用地扩张显著,生态系统碳储量损失严重。2000—2010 年是近 20 a 大汶河流域碳储量变化最大的时段,主要原因在于城镇化扩张、人口增加、社会经济发展等。根据《泰安市统计年鉴(2021 年)》2000—2010 年泰安市地区生产总值增加了 1 742.18 亿元,年末总人口增长率为 3.01%,2010 年的地区生产总值是 2000 年的

5.46 倍;而 2010—2020 年增加了 694.53 亿元,前 10 a 泰安市的发展建设力度较大,土地利用类型变化较大。在该时段流域内泰安市主城区处于大力扩张和建设时期,建设用地的大量扩张(增幅为 43.93%),侵占耕地、林地、草地等生态用地,一系列土地利用方式的改变造成了大量碳密度高的地类转换成碳密度低的地类。Xiang 等<sup>[26]</sup>、Sadat 等<sup>[27]</sup>的研究均发现城市化的发展和建设用地的增加对区域碳储量的减少有显著影响;杨洁等<sup>[22]</sup>、杨小琬等<sup>[28]</sup>的研究均表明黄河下游碳储量呈减少趋势,用地类型主要转移特征为大量耕地转为建设用地,这与本研究的结果一致。

大汶河流域是黄河下游生态保护和高质量发展的主战场,是保障黄河安澜、南水北调水质安全的重要阵地,生态区位极其重要。为促进区域可持续发展,建议从以下方面采取措施。首先,林地作为流域的主要用地类型及碳库,在发展过程中应强化森林保护,尤其应加强对泰山、徂徕山、莱芜东部山区林草景观的保护与恢复,严格管控各类建设项目,减少或最大限度地避免对林地的侵占;同时,应切实加强“废弃工矿、废弃山区村庄及村中空闲地的整治”,开展林地补充和困难立地森林植被恢复项目。其次,耕地是流域被侵占最大的用地类型,耕地也具有较强的固碳能力<sup>[29]</sup>,Jiang 等<sup>[30]</sup>研究发现加强耕地的保护有助于减缓城市群碳储存功能的下降。因此,应确保大汶河流域耕地面积,严禁不合理占用,同时提高耕地利用效率。此外,在城镇地区应实施见缝插绿,充分利用城乡边角用地、闲置地等小区域,营造街角花园、休闲公园,实施沿路补绿等措施增加城镇绿地,拓展城镇生态空间,以增强生态系统碳储量服务的功能。基于土地利用类型与碳储量之间的密切联系,在未来区域或城市规划过程中,应将碳储量作为重要参考因素,以实现碳储量功能最优权衡。

本研究揭示了大汶河流域土地利用与碳储量变化之间的关系以及碳储量服务的脆弱性,为流域低碳发展规划的制定提供了理论依据。但还存在一定的局限性,本研究中碳密度值主要参考相关文献,并采用降水和气温数据进行了修正,但不同地区的碳密度受地形地貌、降水、人类活动等因素影响存在区域分异特征,与实地测量数据相比仍会存在一定误差;此外,评估中使用的碳密度数据假定在研究时段内不变,但实际上不同用地类型的碳密度存在动态变化<sup>[6]</sup>。因此,未来将通过连续监测或实地调研获取大汶河流域多年动态碳密度数据,从而提高碳储量估算的精度;此外,应进一步模拟预测不同土地利用发展情景下大汶河流域碳储量及脆弱性的变化,以制定优

化管控策略,促进流域低碳绿色健康发展。

## 5 结论

(1) 2000—2020 年,大汶河流域土地利用结构发生显著变化,主要表现为耕地大量减少(316.44 km<sup>2</sup>),建设用地急剧增加(523.98 km<sup>2</sup>);土地利用转移主要发生在耕地、草地、建设用地和林地之间,而各用地类型前 10 a 的转移量明显高于后 10 a,耕地转变为建设用地是主要的土地转移类型,空间上主要分布在泰山区、新泰市等各区县的主城区。

(2) 2000—2020 年,大汶河流域碳储量呈减少趋势,减少  $1.09 \times 10^7$  t,减幅为 6.10%,其中耕地大量转变为建设用地是碳储量减少的主导因素;碳储量空间分布呈“整体上北高南低、局部区域显著高或显著低”的空间格局,高值区集中在北部泰山山脉区域、中部的徂徕山和莲花山区域,主要用地类型为林地和草地,低值区集中于南部平原及各区县主城区,主要用地类型为建设用地。

(3) 2000—2020 年,大汶河流域土地利用强度指数增加 8.12,前 10 a 和后 10 a 的潜在影响指数分别为 -1.33 和 -1.42,说明土地利用变化对碳储量服务的负面影响在增加,研究区碳储量服务脆弱性逐渐增强。基于碳储量脆弱性评估结果以及“双碳”目标,研究区应加强林草景观本底资源保护和耕地保护,在未来区域或城市规划中,应将碳储量作为重要参考因素。

## 参考文献(References)

- [1] 许澳康,胡梦璐,石晶,等.石羊河流域生态系统碳储量时空变化及多情景模拟[J].中国环境科学,2024,44(6):3365-3375.  
Xu Aokang, Hu Mengjun, Shi Jing, et al. Spatial and temporal variability of ecosystem carbon storages and multi-scenario simulation in the Shiyang River basin [J]. China Environmental Science, 2024,44(6):3365-3375.
- [2] Schimel D S, House J I, Hibbard K A, et al. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems [J]. Nature, 2001,414(6860):169-172.
- [3] 方精云,于贵瑞,任小波,等.中国陆地生态系统固碳效应:中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之生态系统固碳任务群研究进展[J].中国科学院院刊,2015,30(6):848-857.  
Fang Jingyun, Yu Guirui, Ren Xiaobo, et al. Carbon sequestration in China's terrestrial ecosystems under climate change: Progress on ecosystem carbon sequestration from the CAS strategic priority research program [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015,30(6):848-857.

- [4] 兰健,渠立权.未来 10 年珠江流域土地利用多情景模拟及碳储量评估[J].水土保持学报,2024,38(3):266-275.  
Lan Jian, Qu Liquan. Multi-scenario simulation of land use and carbon storage assessment in the Pearl River basin in the next decade [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(3):266-275.
- [5] Contosta A R, Lerman S B, Xiao J F, et al. Biogeochemical and socioeconomic drivers of above-and below-ground carbon stocks in urban residential yards of a small city [J]. Landscape and Urban Planning, 2020, 196:103724.
- [6] 郑慧玲,郑辉峰.基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测[J].环境科学,2024,45(4):2321-2331.  
Zheng Huiling, Zheng Huifeng. Assessment and prediction of carbon storage based on land use/land cover dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area [J]. Environmental Science, 2024,45(4):2321-2331.
- [7] Sleeter B M, Liu Jinxun, Daniel C, et al. Effects of contemporary land-use and land-cover change on the carbon balance of terrestrial ecosystems in the United States [J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(4):045006.
- [8] Bhan M, Gingrich S, Matej S, et al. Land use increases the correlation between tree cover and biomass carbon stocks in the global tropics [J]. Land, 2021,10(11):1217.
- [9] 马勇洁,仲俊涛,米文宝,等.基于青海湖流域土地利用多情景模拟预测的碳储量评估及其脆弱性分析[J].干旱区资源与环境,2023,37(10):46-55.  
Ma Yongjie, Zhong Juntao, Mi Wenbao, et al. Assessment and vulnerability analysis on carbon storage based on multi-scenarios simulation and prediction of land use in Qinghai Lake basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023,37(10):46-55.
- [10] 向书江,张骞,王丹,等.近 20 年重庆市主城区碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性分析[J].自然资源学报,2022,37(5):1198-1213.  
Xiang Shujiang, Zhang Qian, Wang Dan, et al. Response and vulnerability analysis of carbon storage to LUCC in the main urban area of Chongqing during 2000—2020 [J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(5):1198-1213.
- [11] Adger W N. Vulnerability [J]. Global environmental change, 2006,16(3):268-281.
- [12] Eriksen S H, Kelly P M. Developing credible vulnerability indicators for climate adaptation policy assessment [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2007,12(4):495-524.
- [13] Schröter D, Cramer W, Leemans R, et al. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe [J]. Science, 2005,310(5752):1333-1337.
- [14] Metzger M J, Rounsevell M D A, Acosta-Michlik L, et al. The vulnerability of ecosystem services to land use change [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006,114(1):69-85.
- [15] 刘金龙,马程,王阳,等.基于径向基函数网络的京津冀地区生态系统服务脆弱性评估[J].北京大学学报(自然科学版),2013,49(6):1040-1046.  
Liu Jinlong, Ma Cheng, Wang Yang, et al. Assessing the vulnerability of ecosystem services of Beijing Tianjin-Hebei area based on radial basis function network [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2013,49(6):1040-1046.
- [16] 万海峰,蒙友波,陈洋,等.黔中城市群碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性[J].水土保持通报,2024,44(1):443-452.  
Wan Haifeng, Meng Youbo, Chen Yang, et al. Response of carbon storage to land use/cover changes and vulnerability for central Guizhou urban agglomeration [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(1):443-452.
- [17] 张斌,夏秋月.武汉城市圈碳储量的地形梯度效应及脆弱性[J].水土保持研究,2023,30(5):443-452.  
Zhang Bin, Xia Qiuyue. Topographic gradient effect and vulnerability analysis of carbon storage in Wuhan urban circle [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(5):443-452.
- [18] 何振芳,牟婷婷,郭立春,等.近 40 年来黄河下游大汶河流域湿地时空演变与分异研究[EJ/OL].水资源保护 [2023-09-19]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20230918.1726.002.html>.  
He Zhenfang, Mou Tingting, Guo Qingchun, et al. Study on the spatial and temporal evolution and differentiation of wetlands in Dawen River basin in downstream of the Yellow River in the past 40 years [EJ/OL]. Water Resources Protection [2023-09-19]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.TV.20230918.1726.002.html>.
- [19] Zhang Fangyuan, Jia Yanyan, Liu Xinlong, et al. Application of MSPA-MCR models to construct ecological security pattern in the basin: A case study of Dawen River basin [J]. Ecological Indicators, 2024, 160:111887.
- [20] 智菲,周振宏,赵铭,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的合肥市生态系统碳储量时空演变特征[J].水土保持学报,2024,38(2):205-215.  
Zhi Fei, Zhou Zhenhong, Zhao Ming, et al. Temporal

- and spatial evolution characteristics of carbon storage in Hefei ecosystem based on PLUS and InVEST models [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2):205-215.
- [21] 徐丽,何念鹏,于贵瑞.2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集[J].*中国科学数据*,2019,4(1):86-92.  
Xu Li, He Nianpeng, Yu Guirui. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems(2010s) [J]. *China Scientific Data*, 2019,4(1):86-92.
- [22] 杨洁,谢保鹏,张德罡.基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J].*中国生态农业学报(中英文)*,2021,29(6):1018-1029.  
Yang Jie, Xie Baopeng, Zhang Degang. Spatio-temporal evolution of carbon stocks in the Yellow River basin based on InVEST and CA-Markov models [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021,29(6):1018-1029.
- [23] 苗议艺.基于 FLUS 和 InVEST 模型的县域土地利用变化及碳储量优化模拟研究[D].山东 泰安:山东农业大学,2022.  
Miao Yiyi. Optimization and simulation of county land use change and carbon storage based on FLUS and InVEST models [D]. Taian, Shangdong: Shandong Agricultural University, 2022.
- [24] 陈光水,杨玉盛,谢锦升,等.中国森林的地下碳分配[J].*生态学报*,2007,27(12):5148-5157.  
Chen Guangshui, Yang Yusheng, Xie Jinsheng, et al. Total belowground carbon allocation in China's forests [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007,27(12):5148-5157.
- [25] 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.
- [26] Xiang Shujiang, Wang Ying, Deng Hua, et al. Response and multi-scenario prediction of carbon storage to land use/cover change in the main urban area of Chongqing, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 142:109205.
- [27] Sadat M, Zoghi M, Malekmohammadi B. Spatiotemporal modeling of urban land cover changes and carbon storage ecosystem services: Case study in Qaem Shahr County, Iran [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2020,22(8):8135-8158.
- [28] 杨小琬,张丽君,秦耀辰,等.1995 年以来黄河下游碳储量时空变化及驱动因素[J].*河南大学学报(自然科学版)*,2022,52(1):20-33.  
Yang Xiaowan, Zhang Lijun, Qin Yaochen, et al. Temporal and spatial variation and driving factors of carbon storage in the lower Yellow River since 1995 [J]. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 2022,52(1):20-33.
- [29] Chimdi A, Gurmessa E. Effects of land use on selected soil properties and carbon sequestration in the Gurra watershed: The case of Chalia District, West Shoa Zone, Oromia, Ethiopia [J]. *South African Journal of Botany*, 2023,156:21-28.
- [30] Jiang Weiguo, Deng Yue, Tang Zhenghong, et al. Modelling the potential impacts of urban ecosystem changes on carbon storage under different scenarios by linking the CLUE-S and the InVEST models [J]. *Ecological Modelling*, 2017,345:30-40.

(上接第 224 页)

- [25] Shi Zhongjie, Wang Yanhui, Yu Pengtao, et al. Effect of rock fragments on the percolation and evaporation of forest soil in Liupan Mountains, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008,28(12):6090-6098.
- [26] 李玥,王春霞,何新林,等.残膜密度及面积对土壤水分累积入渗量的影响[J].*应用生态学报*,2022,33(4):894-900.  
Li Yue, Wang Chunxia, He Xinlin, et al. Effects of residual film density and area on water accumulation infiltration amount of soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022,33(4):894-900.
- [27] 陈雨,陈璇,刘瑞芬.基于 HYDRUS-1D 模型的植物根系对人工基质水分特征曲线参数的影响[J].*环境科学学报*,2022,42(8):325-336.  
Chen Yu, Chen Xuan, Liu Ruifen. Effect of plant roots on water characteristic curve parameters of artificial substrate based on HYDRUS-1D model [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022,42(8):325-336.
- [28] 巩炜.荒漠—绿洲过渡带斑块状植被区土壤水分入渗特征及其影响因素[D].甘肃 兰州:兰州交通大学,2021.  
Gong Wei. Characteristics of soil water infiltration and its influencing factors in patchy vegetation areas in the desert-oasis transition zone [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou Jiaotong University, 2021.
- [29] Wang Zhichao, Li Xianyue, Shi Haibin, et al. Estimating the water characteristic curve for soil containing residual plastic film based on an improved pore-size distribution [J]. *Geoderma*, 2020,370:114341.