DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.02.033

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[]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 205-215.

基于 PLUS 和 InVEST 模型的合肥市生态系统碳储量时空演变特征

智菲,周振宏,赵铭,王诗琪

(安徽农业大学林学与园林学院,合肥 230036)

摘 要:[目的]为寻求"双碳"目标导向下的合肥市城市发展新方案。[方法] 依据合肥市 2000—2020 年 5 期土地利用数据,在合肥市国土空间规划指引下,运用 PLUS 模型模拟得到 2035 年合肥市土地利用时空演变规律,耦合 InVEST 模型探究多情景下合肥市碳储量时空变化特征,并进一步挖掘土地综合利用程度对碳储量的影响。[结果](1)2000—2020 年合肥市土地利用变化特征主要表现为耕地、林地减少,其中耕地为建设用地扩增主要来源。自然发展和农田资源保护情景的土地变化规律大致相同,主要表现为耕地、林地、水体减少;绿色汇增城市发展情景下,林地相比其余 2 个情景面积由减少转为增加。(2)2000—2020年合肥市碳储量逐年递减,其中 2005—2010 年碳损失最为剧烈。到 2035 年,自然发展情景、农田资源保护情景、绿色汇增城市发展情景碳储量分别为 138.96×10⁶,140.13×10⁶,139.81×10⁶ t。农田资源保护情景下,碳储量明显增加区域最低,建设用地扩张减缓;绿色汇增城市发展情景下,林地由碳损失转为碳固持,是最具固碳潜力的发展趋势。(3)绿色汇增城市发展情景土地利用率最高,可有效降低土地综合利用程度对碳储量流失的威胁。[结论] 农田资源保护情景与绿色汇增城市发展情景均有助于城市固碳发展,实施生态保护与城市发展并行政策,调整土地综合利用模式有助于改善城市碳流失。

关键词: InVEST 模型; PLUS 模型; 碳储量; 土地利用程度综合指数

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242-(2024)02-0205-11

Temporal and Spatial Evolution Characteristics of Carbon Storage in Hefei Ecosystem Based on PLUS and InVEST Models

ZHI Fei, ZHOU Zhenhong, ZHAO Ming, WANG Shiqi

(College of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: [Objective] To seek a new urban development plan of Hefei under the guidance of "double carbon" goal. [Methods] Based on the land use data of Hefei City in the 5th period from 2000 to 2020, under the guidance of territorial spatial Planning of Hefei City, the spatio-temporal evolution law of land use in 2035 was simulated by the PLUS model, and the spatio-temporal change characteristics of carbon storage in Hefei City under multiple scenarios were explored by coupling the InVEST model. And further explore the effect of the comprehensive land use on the carbon storage. [Results] (1) The main characteristics of land use change in Hefei City from 2000 to 2020 were the decrease of cultivated land and forest land, among which cultivated land was the main source of construction land expansion. The law of land change in the natural development and farmland resource protection scenarios was roughly the same, mainly represented by the reduction of cultivated land, forest land and water body. In the green urban development scenario, the area of forest land changed from decreasing to increasing compared with the other two scenarios. (2) Carbon storage in Hefei City decreased year by year from 2000 to 2020, and the carbon loss was the most 2005 to 2010. By 2035, the carbon reserves of natural development scenario, farmland resource protection scenario and green urban

资助项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(41301650)

第一作者:智菲(1999—),女,硕士研究生,主要从事土地利用、生态系统服务研究。E-mail; zhifeiff@163.com

通信作者:周振宏(1979—),男,讲师,硕士生导师,主要从事城乡规划、土地利用/覆盖变化和景观可持续研究。E-mail: zhouzhenhong@ahau.edu.cn

development scenario were 138.96×10^6 t, 140.13×10^6 t, and 139.81×10^6 t, respectively. Under the farmland resource protection scenario, the area with the lowest increase of carbon storage significantly slowed down the expansion of the construction land, under the scenario of urban development, forest land changes from carbon loss to carbon sequestration, which was the most potential trend of carbon sequestration. (3) The land utilization rate of green urban development scenario was the highest, which can effectively reduce the threat of comprehensive land use degree to carbon storage loss. [Conclusion] Both farmland resource protection scenario and green accumulation urban development scenario were conducive to urban carbon sequestration development. Implementing parallel policies of ecological protection and urban development, and adjusting comprehensive land use mode were conducive to improving urban carbon loss.

Keywords: InVEST model; PLUS model; carbon stocks; composite index of land use

Received: 2023-09-26 **Revised**: 2023-10-24 **Accepted**: 2023-11-27 **Online**(www.cnki,net): 2024-03-04

随着全球气候变暖和环境问题的日益突出,生态系统碳储量成为生态学和环境科学领域研究的热点之一。生态系统碳储量作为生态系统健康和稳定性的重要指标,其固碳功能可有效减少大气中的 CO₂ 浓度,缓解温室效应,降低全球气候变暖速度。2023年3月27日"美丽中国 2035"规划正式发布,旨在推进中国可持续发展。绿色发展的未来是实现民生、经济、生态的三赢,在"双碳"的大背景下,加速低碳转型,为2035美丽中国赋能刻不容缓。土地利用类型和变化直接影响生态系统碳储量。为此,探究土地利用变化与生态系统碳储量的响应,对评估生态系统健康状况、制定环境政策及实现可持续发展具有重要意义。

国内外学者对土地利用变化和陆地生态系统碳 储存变化的研究已经逐渐展开,多基于模型模拟土地 利用变化来预测区域碳储量[1-2],常用模型包括 CLUE - S^[3], CA - Markove^[4], CA - ANN^[5], FLUS[6-7],但此类模型难以揭示各个用地类型间的 内部关系[8]。PLUS模型在多目标耦合算法下,可以 实现不同政策导向下的情景模拟,同时具有模拟精度 准确、数据处理快等优点[9-10]。目前已有部分学者运 用 InVEST 与 PLUS 的耦合模型,探讨未来土地利用 及碳储量变化。孙欣欣等[11]、伍丹等[12]应用 PLUS 模 型模拟不同发展情景下碳储量的变化特征,忽视了政 策的影响;孙方虎等[13] 对安徽省碳储量进行演化分析 与预测,但情景设置较为单一;李文静等[14]对南昌市 碳储量的脆弱性进行多情景评估。以往研究主要针对 不同发展情景下土地利用对碳储量的响应进行研究, 但是考虑政策因素来优化土地利用结构并提升区域碳 储量的研究仍然缺乏,研究结果侧重于比较各个情景

下因地类转化引起碳储量变化的差异,而忽视从整体视角探讨土地综合利用程度与碳储量的关系,二者在空间尺度上是否有内在联系尚不清楚,无法系统全面地评估土地利用变化对碳储量的影响[15]。

本文以低碳试点城市合肥市为研究区,运用 PLUS与 InVEST 耦合模型,探究 2000—2020 年不同 时期土地利用方式及其对碳储量的影响,加入土地利 用程度综合指数,将人类活动对于土地利用的影响程 度量化,并进一步探究 2035 年政策导向下的碳储量时 空变化特征,以期为合肥市国土空间规划提供科学建 议,寻求"双碳"目标导向下的城市发展新方案。

1 研究区概况

合肥市(30°57′—32°32′N,116°41′—117°58′E) 为安徽省省会,总面积 11 445 km²。地形以丘陵岗地为主,属暖温带向亚热带的过渡带气候类型,为亚热带湿润季风气候。全市地形自西北向东南倾斜,丘陵、山地、平原、湖泊兼备,地表水系发达,平均海拔为18~42 m,西南临大别山余脉。

作为"一带一路"和长江经济带战略双节点城市,由于合肥城镇化和工业化同步进行,带来基础设施、工业和交通的迅猛扩张。这种发展模式也引发土地利用和生态环境的严重问题,"刚性"污染负荷越来越重,土地过度开发和不合理开发对土地利用格局和生态系统造成严重风险,在同等经济发展水平较快的城市中属典型,严重影响合肥市的可持续发展[16]。因此探索其生态系统碳储量的时空演变规律,并提出"双碳"目标导向下的土地利用结构优化建议是十分重要的。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据预处理

(1)土地利用数据

本文选用投影坐标系 WGS_1984_UTM_Zone_

50N,选取 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年 5 期合肥市土地利用数据(表 1),利用 ArcGIS 将数据重分类为 6 类,分别为耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地。

(2)土地利用驱动因子

本研究依据驱动因子可获得性、时效性和显著性原则,选取驱动因子共包含自然因素和社会因素 2 类,共计 8 个。

表 1 土地驱动样本及数据来源

Table 1 Land driven sample and data sources

数据类型	数据名称	格式或分辨率	数据来源
碳密度	合肥碳密度数据	Mg/hm^2	李克让等[17]、解宪丽等[18]、孙欣欣等[11]、徐丽等[19]
土地利用	2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年 5 期土地利用数据	30 m	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn)
	GDP	1 km	全国地理信息资源目录服务系统 (https://www.webmap.cn)
社会因素	人口	1 km	全国地理信息资源目录服务系统 (https://www.webmap.cn)
	公路	1 km	全国地理信息资源目录服务系统 (https://www.webmap.cn)
	铁路	1 km	全国地理信息资源目录服务系统 (https://www.webmap.cn)
	高程	30 m	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn)
自然因素	坡度	30 m	利用 ArcGIS10.4 结合 DEM 数据计算得
日巡日家	年平均气温	1 km	全国气象台网(http://www.nmc.cn)
	年平均降水量	1 km	全国气象台网(http://www.nmc.cn)

2.2 研究方法

基于 2000—2020 年合肥市土地利用数据,首先运用 PLUS 模型模拟分析得到 2000—2035 年的不同情景下的土地利用变化规律,耦合 InVEST 模型得到 2000—2035 年合肥市碳储量时空变化特征,并基于此提出"双碳"视角下合肥市城市发展建议。

2.2.1 基于 InVEST 模型的碳密度评估及修正 本文碳储量计算部分运用 InVEST 模型的碳模进行评估,共包括常见的 4 种碳库,即地上生物碳、地下生物碳、土壤有机碳和死亡凋落有机碳,碳储量的计算公式为^[20-21]:

$$C = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \tag{1}$$

式中:C 为生态系统的碳储量总量(Mg/hm²); C_{above} 为地上植被碳储量(Mg/hm²); C_{below} 为地下植被碳储量(Mg/hm²); C_{soil} 为土壤有机碳储量(Mg/hm²); C_{dead} 为死亡有机碳储量(Mg/hm²)。

本文通过查阅相关文献,修正得到合肥市碳密度数据库。以实地测量数据为主,数据通过查阅文献选取与研究区相同气候带、区域发展程度的研究成果。对碳密度值进行降水量以及气温的修正,年降水量与生物量和土壤碳密度的关系,采用 ALAM 等[22]研究中的公式作为修正降水量因子的公式,采用陈光水等[23]研究中的公式作为修正年平均气温和生物量碳密度的公式。

$$C_{\rm sp} = 3.398 \times P + 1996.1$$
 (2)

$$C_{\rm hp} = 6.798 \ 1e^{0.005 \ 41P} \tag{3}$$

$$C_{\rm bt} = 28 \times T + 398$$
 (4)

式中: C_{sp} 为根据年降水量得到的土壤碳密度(Mg/hm²); C_{bp} 、 C_{bt} 分别为根据年降水量和年平均气温得到的生物量碳密度(Mg/hm²);P 为年平均降水量(mm);T 为年平均气温(\mathbb{C})。分别将合肥市和全国的年平均气温和年降水量代入公式(4)(1980—2010年全国尺度和合肥市的年平均气温分别为 9.58, 16.61 \mathbb{C} ,全国尺度和合肥市的年降水量分别为 673.9,1 000.8 mm),二者之比为修正系数,全国的碳密度数据与修正系数的乘积为合肥市碳密度数据。

$$K_{\rm bp} = \frac{C_{\rm bpl}}{C_{\rm bp2}} \tag{5}$$

$$K_{\rm bt} = \frac{C_{\rm bt1}}{C_{\rm bt2}} \tag{6}$$

$$K_{\rm b} = K_{\rm bp} \times K_{\rm bt} = \frac{C_{\rm bpl}}{C_{\rm bp2}} \times \frac{C_{\rm btl}}{C_{\rm br2}}$$
 (7)

$$K_s = \frac{C_{\text{spl}}}{C_{\text{sn2}}} \tag{8}$$

式中: 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_{bp1} 、 C_{bp2} 分别为合肥市与全国尺度根据年降水量得到的生物量碳密度数据; C_{bt1} 、 C_{bt2} 分别为合肥市与全国尺度根据年平均气温得到的生物量碳密度数据; C_{sp1} 、 C_{sp2} 分别为合肥市与全国尺度根据年平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。 修正后的碳密度数据见表 2。

表 2 修正后生态系统碳密度

Table 2 Modified ecosystem carbon density

LULC_name	$C_{ m above}$	$C_{ m below}$	$C_{ m soil}$	$C_{ m dead}$	总计
耕地	15.95	4.03	111.81	0	131.79
林地	58.22	10.74	75.20	10.06	154.22
草地	33.27	12.18	66.11	1.08	112.63
水域	4.86	0	105.47	0	110.33
建设用地	0.84	0	91.92	0	92.75
湿地	0.84	0	52.14	0	52.98

2.2.2 基于 PLUS 模型的未来土地利用变化预测

(1)PLUS 模型准备

选取 2005 年、2020 年 2 期土地利用数据,带入 影响因子得到各个地类的土地转移概率,并模拟得到 2020 年土地利用数据。

(2)模拟精度验证

本文将 2020 年实际的土地利用数据与 PLUS 模型中预测到的 2020 年土地利用数据进行对比,通过 Kappa 检验得到结果为 0.82,检验精度 > 0.75,检验精度较高,故 PLUS 模型具有合理性,可以进行进一步的多情景土地模拟预测。

(3)情景模式构建

自然发展情景:不考虑任何政策的影响,各个土 地类型间的转移不设限制(不设置转化概率)。

农田资源保护情景:《合肥市国土空间总体规划(2021—2035年)》^[24]第七章第五部分提出,系统推进农用地整理、建设用地整理、乡村生态保护修复及乡土文化传承,促进耕地保护和土地集约利用(耕地向建设用地转移的概率—50%)。

绿色汇增城市发展情景:《总规》第七章第一部分明确提出,要科学推动森林数量、质量双提升。科学经营森林,优化林分结构,提升单位面积森林固碳能力,增加绿色碳汇。加强自然湿地保育,推动湿地治理,修复城市湿地网络,建立全市湿地保护体系(耕地转化为建设用地的概率-30%,林地、草地转化为建设用地的概率-40%,耕地、草地、转化为林地的概率+50%)。

2.2.3 土地利用程度综合指数 土地利用程度综合指数反映土地利用集约化程度,用以量化人类活动对于土地系统的影响程度,可以反映土地利用的高效性和可持续性^[25-26]。通过对不同地类进行分级处理,6类土地利用类型的土强度等级依次为3,2,2,2,4,1。计算公式为^[27]:

$$L = 100 \times \sum_{i=1}^{n} (P_i \times Q_i)$$
 (9)

式中: L 为土地利用强度综合指数; P_i 为第i 级土地利用程度; Q_i 为第i 级地类面积占比。

2.2.4 双变量自相关 本文基于 GeoDa 软件进行空间自相关分析,空间自相关可表示数据间的相互依赖程度^[28],局部自相关用于计算局部邻近单元间某一特征的相关水平,能更准确把握局部聚集和分异水平。双变量空间自相关在前者的基础上进一步扩展,可描述 2 种要素之间的空间关联性和显著性^[29]。公式^[30]为:

$$I_i = z_i \sum_{i=1}^n W_{ij} z_i \tag{10}$$

式中: I_i 为单元网格 i 的自变量(土地利用程度综合指数)与因变量(碳储量)的局部空间关系; z_i 、 z_j 为单元网格 i 、j 观测值的方差标准化值。经分析比较多尺度下碳储量与土地利用综合程度的空间特征发现,建立 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 尺度的网格采集数据可视化效果最优,因此共选取 3 070 个网格进行空间相关性分析。

3 结果与分析

3.1 土地利用时空变化特征分析

3.1.1 土地利用动态度分析 表 3 为合肥市土地利用类型的变化速率,其中 2005—2010 年间各类型土地利用动态度均较低,土地利用变化相对缓慢,其中建设用地增速最大,变化最为剧烈,动态度达 4.12%,共计增加 297.70 km²。2010—2020 年间各类型土地利用动态度明显上升,建设用地依旧保持快速扩张的趋势,在 2010—2015 年间水体动态度在各时段内达到最大值,为 0.64%,增长 33.11 km²;在 2015—2020年间,草地面积大幅增加,增长速率达到顶峰,动态度为 0.14%,增长 2.83 km²。耕地、林地动态度变化在 2000—2020 年间均呈现缓慢变化的趋势,耕地动态度均为负值,说明耕地面积逐年递减,未利用地在 2015—2020 年快速扩张,增长 4.25 km²。

3.1.2 土地利用转移变化分析 结合土地利用转移矩阵(表 4)分析 2000—2020 年土地利用转移规律可知,合肥市总面积为 11 448.46 km²,土地利用转移现象以耕地、林地、建设用地为主。在 2000—2020 年间,土地总计发生转移面积为 769.38 km²,在此期间耕地转出面积大于转入面积,且其余各地类由耕地转化的贡献值最高,其中耕地为建设用地提供贡献值最大,达到 667.88 km²;水体总转入量大于转出量为29.73 km²,呈积累式增加的趋势;林地、草地、未利用地总体变化面积不大,20 年间总计分别转入 6.43,8.85,4.26 km²;建设用地面积增加显著,累计增量681.99 km²。

表 3 合肥市 2000-2020 年土地利用面积变化

Table 3 Changes in land use area in Hefei City from 2000 to 2020

	耕	地	材	地	草	地	水	体	建设。	用地	未利	用地
研究时期	变化面积/	动态度/	变化面积	/ 动态度/	变化面积/	动态度/	变化面积/	动态度/	变化面积/	动态度/	变化面积/	动态度/
	km^2	%	km^2	%	km^2	%	km^2	%	km^2	%	km^2	%
2000-2005	-85.21	-0.21	1.39	0.06	0.76	0.04	1.22	0.02	82.29	1.21	0.01	0.51
2005-2010	-302.91	-0.75	-1.55	-0.06	-3.17	-0.15	9.94	0.19	297.70	4.12	0	0.07
2010-2015	-194.23	-0.50	-4.00	-0.16	0.30	0.01	33.11	0.64	164.83	1.89	0	-0.21
2015-2020	-90 . 12	-0.24	1.37	0.06	2.83	0.14	-28.70	-0.54	110.37	1.16	4.25	340.72
2000-2020	-672.49	-0.41	-2.79	-0.03	0.71	0.01	15.58	0.08	655.19	2.41	4.25	86.84

表 4 合肥市 2000-2020 年转移矩阵

Table 4 Transfer matrix of Hefei City from 2000 to 2020

km²

土地利用类型					20)20 年			
		耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地	总计	转出量
	耕地	7 445.91	4.80	6.18	27.91	667.88	3.85	8 156.53	710.62
2000年	林地	2.89	485.77	1.57	0.04	4.76	0	495.02	9.25
	草地	1.64	1.32	400.83	0.02	5.58	0.01	409.39	8.56
	水体	10.31	0.04	0.02	1 012.04	3.77	0	1 026.19	14.15
	建设用地	23.29	0.27	1.08	1.76	1 334.29	0.39	1 361.09	26.80
	未利用地	0	0	0	0	0	0.24	0.24	0
	总计	7 484.04	492.20	409.68	1 041.76	2 016.28	4.50	11 448.46	_
	转入量	38.13	6.43	8.85	29.73	681.99	4.26	_	769.38

3.1.3 土地预测结果分析 通过 PLUS 模型得到 2035 年的土地利用模拟预测结果(表 5)。到 2035 年,自然发展情景和农田资源保护情景的发展规律大致相同,自然发展情景耕地、林地减少,草地、水体、建

设用地、未利用地增加;农田资源保护情景除耕地、林地减少外,水体也有小幅减少;绿色汇增城市发展情景下,耕地、水体、未利用地减少,林地较2020年呈大幅上升趋势。

表 5 合肥市 2035 年土地利用模拟结果

Table 5 Land use simulation results in Hefei City in 2035

土地利用	2020年面积/-	2035 年			2020—2035 年变化			
工地利用 类型	,	NDC	FRP	DSGC	NDC	FRP	DSGC	
天型	km^2	面积/km²	面积 $/\mathrm{km}^2$	面积/km²	面积/km²	面积 $/\mathrm{km}^2$	面积/km²	
耕地	7 484.04	6 958.65	7 269.10	7 111.98	-525.39	-214.94	-372.06	
林地	492.23	487.50	487.60	528.32	-4.73	-4.63	36.09	
草地	410.11	410.47	410.65	412.37	0.36	0.54	2.26	
水体	1 041.76	1 054.91	1 017.44	1 023.23	13.14	-24.32	-18.54	
建设用地	2 016.28	2 528.59	2 258.36	2 368.60	512.31	242.08	352.32	
未利用地	4.50	8.60	5.57	4.41	4.10	1.07	-0.08	

自然发展情景下,到 2035 年各个地类的土地利用变化趋势与 2000—2020 年基本一致,其中,耕地面积减少最多,较 2020 年减少 525.39 km²;建设用地增量最多,占比增长率最大,达 20.26%,主要集中在市区中心区域,中心扩张的趋势。农田资源保护情景下,到 2035 年耕地、林地、水体均有所减少,其中,耕地、林地较自然发展情景中减少速率下降,分别减少214.94,4.63 km²;水体与 2015—2020 年的发展趋势相同,减少 24.32 km²。在面积增加的地类中,建设用地扩增速率较自然发展情景下有所减缓,为10.72%,主要由耕地转变而来。绿色汇增城市发展情景下,到 2035 年林地、草地、建设用地面积增加,其中,林地面积较自然发展情景与农田资源保护情景由

减反增,共计增长 36.09 km^2 ,草地增长占比在 3 种情景中最大,达 0.55%。

3.2 生态系统碳储量变化特征分析

结合 InVEST 模型的碳储存模块对合肥市 2000年、2005年、2010年、2015年、2020年5个时期碳储量进行计算(图1),得到碳储量空间分布情况。研究期内合肥市碳储量分别为 143.69×10⁶,143.37×10⁶,142.19×10⁶,141.47×10⁶,141.06×10⁶ t,总体呈逐年下降的趋势,共计损失 2.63×10⁶ t,其中2005—2010年碳损失剧烈,共流失碳 1.18×10⁶ t。其原因由主要受"十一五"期间安徽省城镇规划提出到 2010年底城镇化率达到 40%以上,到 2020年达50%以上,城镇高速发展影响。

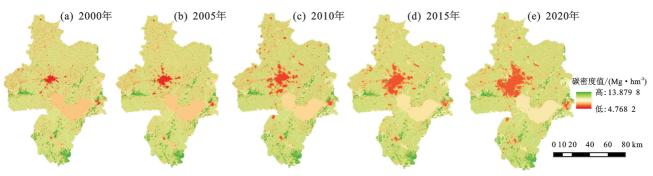


图 1 合肥市 2000-2020 年碳储量时空变化

Fig. 1 Spatial and temporal variation of carbon stock in Hefei City from 2000 to 2020

从行政区划来看,合肥市各区县碳储量时空变化存在较大差异性。碳储量高值区主要分布于研究区东南侧,且高值区主要集中在海拔较高的区域,涵盖肥东县东侧、巢湖市东南侧、庐江县、肥西县,这些区域位于市区边缘地带,城市化速率较慢,土地利用类型以林地草地为主,碳密度最高值为13.8798 Mg/hm²。碳储量低值区主要集中于合肥市中心区域,以及作为县级市的巢湖市中心区域,此外有少部分分布在庐江县内,这些区域城市化水平较高,土地利用类型以建设用地为主耕地为辅,人类开发程度较高,碳储量处于低值区域。

为了清晰展示 2000—2020 年间合肥市碳储量时空变化的趋势(图 2),对研究区内碳储量时空变化进行差值分析,并划分为明显减少、基本不变、明显增加 3 大类。总体来看,合肥市碳储量分布呈"大聚集,小散集"的特点。在 2000—2020 年间碳损失集中在蜀山区、瑶海区、包河区以及巢湖市人口较为密集的区域,主要因建设用地迅速扩张,使碳密度较高的耕地、林地转化为碳密度较低的建设用地;碳储量显著增加的区域均以小区域零散集中为主,但影响甚微,其中在碳损失显著的中心区域也出现局部碳汇集的现象。

3.3 多情景下碳储量预测结果分析

通过 PLUS 模型对土地利用数据进行处理,结合 InVEST 模型得到 3 种情景下 2035 年碳储量预测结果(图 3)。从空间分布上来看,在不同情景的约束下自然发展情景下碳储量低值区覆盖范围最广,其余2 个情景在不同程度上实现有效碳汇增。

(1)自然发展情景下,到 2035 年达到历史演变最低值,为 138.96×10⁶ t,相较 2020 年减少 2.10×10⁶ t。在市域范围内,碳储量低值区呈现大范围弥散分布的特点,包河区、庐江县为低值区汇集地,其原因主要由于城镇化发展快速以及无序扩增,耕地、林地大面积转向建设用地,从而导致碳流失。

(2)农田资源保护情景下,碳储量总值 140.13×

10⁶ t,为预测情景中最高,较自然发展情景下增加 1.16×10⁶ t。低碳密度区的扩张较自然发展情景受到一定程度的限制,说明依据《总规》中提到促进耕地保护和土地集约节约利用,对耕地转向建设用地进行限制,可以有效缓解碳损失。

(3)绿色汇增城市发展情景下,到 2035 年合肥市碳储量为 139.81×10⁶ t。在空间分布上,合肥市碳损失区域的扩张程度相比自然发展情景与农田资源保护情景得到大幅缓解,低密度区聚集式发展程度最为显著,主要集中在肥西县、庐江县、巢湖市内,相比其余 2个情景,市域范围内 95%的区域碳储量值趋于稳定,与自然情景相比增长 0.84×10⁶ t,碳损失得到控制。

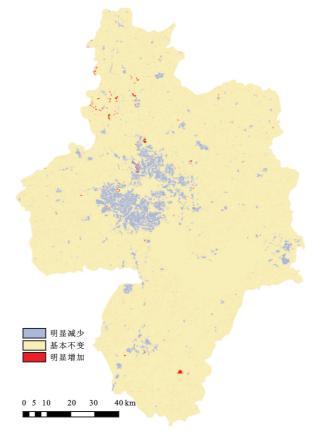


图 2 合肥市 2000-2020 年碳储量差值变化

Fig. 2 Change of carbon storage difference in Hefei City from 2000 to 2020

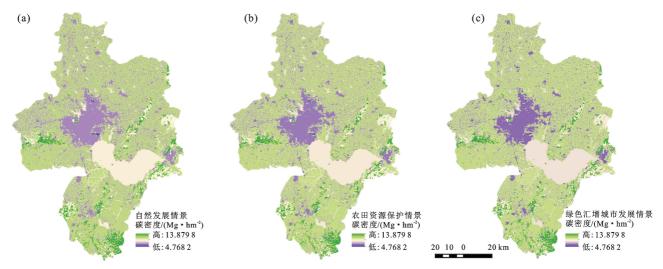


图 3 合肥市 2020-2035 年多情景碳储量空间变化

Fig. 3 Spatial variation of multi-scenario carbon storage in Hefei City from 2020 to 2035

从碳储量空间变化(图 4)来看,到 2035 年合肥市 3 种情景发展模式呈现明显的分异特征。自然发展情景下碳损失情况最为严重,相比较 2020 年市域内各个区域均有明显减少的现象,集中在庐阳区、瑶海区、蜀山区、包河区及庐江县西北部,主要由建设用地的无序扩张导致;相较于自然发展情景,其余 2 个情景均有不同程度的碳汇区域。

其中,农田资源保护情景碳储量明显增加区域栅

格占比 0.21%,为 3 种情景中最低,主要集中在长丰县北部、肥西县北部、巢湖西南沿岸和庐江县境内,以郊区县区范围为主,主要由于原有耕地得到保护,使高碳密度区的转出量降低;在绿色汇增城市发展情景中,碳损失较 2020 年得到明显控制,碳储量明显增加区域为 3 个情景中最多,栅格占比 0.47%,城市以集约发展为主,碳储量明显减少区域更多地转向碳密度较高的生态用地。

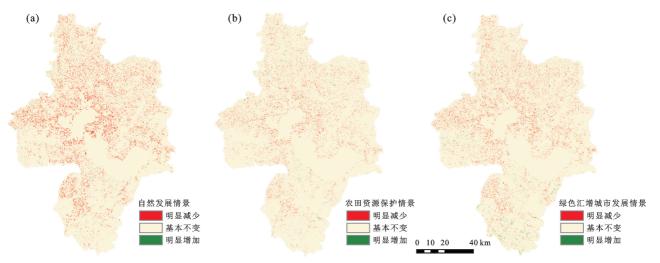


图 4 合肥市 2020—2035 年多情景下碳储量变化空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of carbon storage changes in Hefei City under multiple scenarios from 2020 to 2035

从土地利用各个类型的碳储量变化(表 6)来看, 3 种情景下林地、草地、建设用地、未利用地碳储量均有所增加。与 2020 年相比,除建设用地之外,自然发展情景下水体增长最多,为 1.48×10⁵ t,其次为未利用地与草地;耕地碳损失最为严重,达 70.28×10⁵ t,主要转移为建设用地,依照此情景发展到 2035 年,碳储量一直处于高速流失的趋势。农田资源保护情景下,水体由碳固持转为碳流失,但损失量较少,仅为

2.59×10⁵ t,耕地碳损失速度降低,建设用地扩张减少 1/2,农田资源得到充分保护。绿色汇增城市发展情景下,耕地与建设用地的转移趋于平衡,在稳定生态系统碳储存功能的基础上合理进行城市建设,较其余 2 个情景相比,林地由碳损失转为碳固持,是除建设用地外增长最多的土地类型,主要由耕地、水体、未利用地转来,与 2020 年相比,增长 5.57×10⁵ t,是最具固碳潜力的发展模式。

表 6 多情景下土地各地类碳储量变化

Table 6 Changes in local carbon stocks in land under multiple scenarios 10^5 t

土地利用	2020年		2035 年	
类型	2020 年	NDC	FRP	DSGC
耕地	986.32	916.04	957.10	937.29
林地	75.91	75.26	75.27	81.48
草地	46.19	46.24	46.26	46.45
水体	114.94	116.42	112.35	112.89
建设用地	187.03	235.22	210.00	219.71
未利用地	0.24	0.45	0.29	0.23

3.4 多情景模拟下土地利用程度综合指数与碳储量 双变量自相关分析

为了更深入探究土地开发利用程度对合肥市碳储量的影响,运用 Arc Map10.4 软件进行 2 km×2 km 单元网格裁剪,在表格中计算土地利用程度综合

指数并对每一栅格赋值,最后依据自然断点法划分为5级。

从图 5 可以看出,3 种情景下土地利用程度综合空间分布情况基本一致,以较高和中等级为主,其中绿色汇增城市发展情景栅格占比最高为 72.65%,说明土地利用率较高,土地开垦减少,城市发展得到进一步的优化;在低和较低等级中,自然发展情景栅格占比最高,为 24.46%,说明依据此模式发展到 2035年合肥市土地资源没有得到有效的开发利用,仅仅使用局部区域而没有充分利用整体,可能存在资源浪费和效益降低的风险。在高等级中,农田资源保护情景栅格占比最低,为 7.30%,而其余 2 个情景差异较小分别为 7.82%,7.81%,说明土地只被限定用于特定的农产资源,而没有进行多元化的利用,这可能导致土地潜力未能最大化发挥。

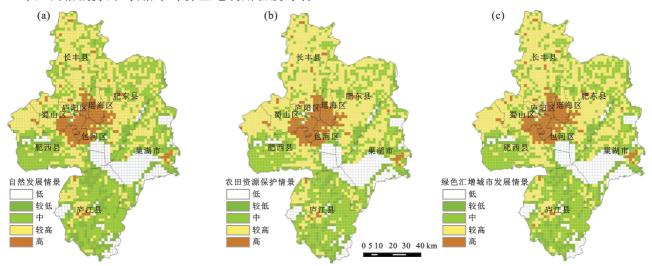


图 5 合肥市土地利用程度综合空间分布

Fig. 5 Comprehensive spatial distribution of land use in Hefei City

运用 GeoDa 软件进行合肥市双变量空间自相关分析(图 6),探究土地利用程度综合指数(自变量)对合肥市碳储量(因变量)的影响可得,3 种情景下莫兰指数值分别为一0.032,一0.012,一0.015(p < -0.01),说明土地利用程度综合指数与碳储量呈现空间负相关,土地利用程度综合指数高的区域存在碳流失的风险。

与自然保护情景相比,农田资源保护情景与绿色 汇增城市发展情景空间负相关性较低,证明2种情景 可以有效降低高土地开发利用程度对碳储量流失的 威胁,其中高一低、低一高分别占栅格总比分别为 8.53%,8.83%,说明绿色汇增城市发展情景下,碳储 量主要集中在低利用价值土地上,城市发展并没有对 高碳储量的土地进行过度开发或破坏,更倾向于开发 城市边缘地区或已经开发过的土地,确保高碳区的生 态系统得到保护。

4 讨论

本文运用 InVEST 和 PLUS 的耦合模型,对合肥市 2035 年碳储量进行多情景模拟,在 20 年间高碳储量区域主要集中在城市高海拔及市县区边缘地带,用地类型以林地、草地为主,低碳储量区域集中于城市中心、巢湖市、庐江县境内,用地类型以建设用地、耕地为主。不同土地利用类型对应不同碳密度,因此土地利用转移变化会直接影响区域碳储量,同时高碳密度向低碳密度地类转移也会导致碳损失。本研究中参考《合肥市国土空间总体规划(2021—2035年)》设置自然发展、农田资源保护、绿色汇增城市发展3种情景。自然发展情景下,较2020年碳损失达2.10×10°t,说明继续此模式发展会使区域碳快速流失;农田资源保护情景下,碳储量较自然发展情景增

加 1.16×10⁶ t,说明限制高碳密度耕地转向建设用地可大幅减缓碳流失,适用于以市郊区县区为主的碳损失剧烈区域,如巢湖市、庐江县等;绿色汇增城市发展情景下,耕地与建设用地的转移趋于平衡,同时耕地、水体、未利用地向林地的转入,使区域高碳密度的林地面积增加,说明该情景在稳定生态系统碳储存功能

的基础上可以合理进行城市建设,适用于市主城区范围内城市化水平较高的区域,如主城区、巢湖市中心区域。总体而言,合肥市应当在退耕还林的基础上使土地在高碳密度地类间进行转化,在实践过程中控制对现有农田的开发利用,并重视耕地的多元使用,最大限度地保护生态系统碳储量。

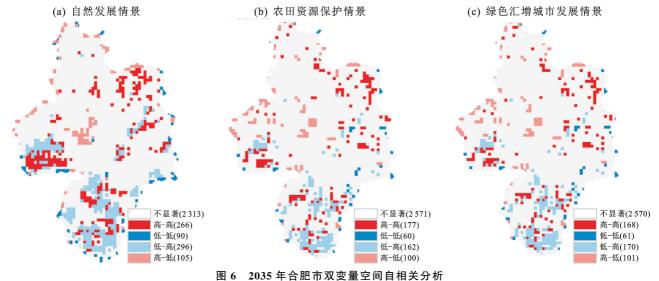


Fig. 6 Bivariate spatial autocorrelation analysis in Hefei in 2035

本文结合前人对合肥市土壤有机碳密度和 2010 年中国陆地生态系统地上碳密度的实测数据,进行了针对湿地气温、降水进行修正,但对区域碳库的现实把控仍不准确。同时 InVEST 模型本身的局限性在于假设区域各地类的碳密度在时间和空间上保持不变,忽视土地利用内部结构和植被生长对固碳能力的影响。因此,碳密度值与实际值之间可能存在一定误差,未来的研究尽可能结合实测数据进行验证。

5 结论

(1)20年间,合肥市土地利用变化特征主要表现 为耕地、林地减少,草地、水体、建设用地、未利用地增加,其中耕地为建设用地扩增主要来源,符合城市化 进程加快的趋势。绿色汇增城市发展情景下,林地相 比其余2个情景面积由减转增。

(2)20 年间,合肥市碳储量总体逐年递减,共计损失 2.63×10⁶ t,其中 2005—2010 年碳损失最为剧烈,与"十一五"安徽省城镇规划要求一致。高值区主要集中在海拔较高的区域,涵盖肥东县东侧、巢湖市东南侧、庐江县、肥西县,位于市区边缘地带,城市化速率较慢,土地利用类型以林地草地为主。碳储量显著增加的区域均以零星分布为主,但影响甚微,其中在碳损失显著的中心区域出现局部碳汇集的现象。

(3)依照自然情景模式,建设用地进一步扩张,耕地碳损失严重;农田资源保护情景下,碳储量总值最高,但明显增加区域栅格占比最低,城市发展缓慢;绿

色汇增城市发展情景下,林地由碳损失转为碳固持, 是最具固碳潜力的发展趋势。

(4)绿色汇增城市发展情景土地利用率最高,城市发展进一步优化,可有效降低土地开发利用程度对碳储量流失的威胁。

参考文献:

- [1] DUBROVINA I A, MOSHKINA E V, TUYUNEN A V, et al. Dynamics of soil properties and ecosystem carbon stocks for different types of land use (middle taiga of Karelia)[J]. Eurasian Soil Science, 2022,55(9):1209-1221.
- [2] WANG L G, ZHU R, YIN Z L, et al. Impacts of land-use change on the spatio-temporal patterns of terrestrial ecosystem carbon storage in the Gansu Province, Northwest China[J].Remote Sensing, 2022, 14(13): e3164.
- [3] 唐娇娇,余成,张委伟,等.基于 CLUE-S 和 InVEST 模型的苏州市生境质量评估及预测[J].环境工程技术学报,2023,13(1):377-385.
 - TANG J J, YU C, ZHANG W W, et al. Habitat quality assessment and prediction in Suzhou based on CLUE-S and InVEST models[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023,13(1):377-385.
- [4] 刘家福,席兰兰,张尧,等.基于 CA-Markov 与 InVEST 模型的吉林省生态系统服务价值模拟及预测[J].水土保持通报,2020,40(6):153-159.
 - LIU J F, XI L L, ZHANG Y, et al. A study on simulation and prediction of ecosystem service value in Jilin Province based on CA-markov and InVEST model[J].

- Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 153-159.
- [5] 张芳,汤国安,曹敏,等.基于 ANN-CA 模型的黄土小流域正负地形演化模拟[J].地理与地理信息科学,2013,29 (1):28-31.
 - ZHANG F, TANG GA, CAOM, et al. Simulation of positive and negative terrain evolution in small loess watershed based on ANN-CA model[J]. Geography and Geo-Information Science, 2013, 29(1):28-31.
- [6] 朱志强,马晓双,胡洪.基于耦合 FLUS-InVEST 模型的 广州市生态系统碳储量时空演变与预测[J].水土保持 通报,2021,41(2);222-229,239.
 - ZHU Z Q, MA X S, HU H. Spatio-temporal evolution and prediction of ecosystem carbon stocks in Guangzhou city by coupling FLUS-InVEST models[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2):222-229, 239.
- [7] 庄子薛,谢梦晴,张文萍,等.基于 FLUS-InVEST 模型的 碳储量时空变迁及多情景模拟预测:以成德眉资地区为 例[J].风景园林,2022,29(5);38-44.
 ZHUANG Z X, XIE M Q, ZHANG W P, et al. Tem-
 - ZHUANG Z X, XIE M Q, ZHANG W P, et al. Temporal and spatial changes and multi-scenario simulation prediction of carbon storage based on FLUS-InVEST model: A case study of Chengdu-Deyang-Meishan-Ziyang area[J]. Landscape Architecture, 2022, 29(5): 38-44.
- [8] 谢向东,林孝松,王莹,等.基于 PLUS 模型的重庆市南 川区土地利用多情景模拟[J].长江科学院院报,2023,40 (6):86-92,113.
 - XIE X D, LIN X S, WANG Y, et al. Multi-scenario simulation of land use in Nanchuan district of Chongqing based on PLUS model[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(6):86-92,113.
- [9] 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 S J, ZHANG Q, WANG D, 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.
- [10] LIANG X, GUAN Q F, CLARKE K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J].Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85:e101569.
- [11] 孙欣欣,薛建辉,董丽娜.基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的南京市生态系统碳储量时空变化与预测[J].生态与农村环境学报,2023,39(1):41-51.
 - SUN X X, XUE J H, DONG L N. Spatiotemporal change and prediction of carbon storage in Nanjing ecosystem based

- on PLUS model and InVEST model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(1):41-51.
- [12] 伍丹,朱康文,张晟,等.基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的成渝经济区碳储量演化分析[J].三峡生态环境监测,2022,7(2):85-96.
 - WU D, ZHU K W, ZHANG S, et al. Evolution analysis of carbon stock in Chengdu-Chongqing economic zone based on PLUS model and InVEST model [J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2022, 7(2):85-96.
- [13] 孙方虎,方凤满,洪炜林,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的安徽省碳储量演化分析与预测[J].水土保持学报,2023,37(1):151-158.
 - SUN F H, FANG F M, HONG W L, et al. Evolution analysis and prediction of carbon storage in Anhui Province based on PLUS and InVEST model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1):151-158.
- [14] 李文静, 吴伟成. 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的南昌市碳储量时空演变研究[J]. 江西农业学报, 2023, 35 (3):157-165.
 - LI W J, WU W C. Spatio-temporal evolution of carbon storage in Nanchang city based on PLUS model and In-VEST model [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2023, 35 (3):157-165.
- [15] 张斌,李璐,夏秋月,等"三线"约束下土地利用变化及 其对碳储量的影响:以武汉城市圈为例[J].生态学报, 2022,42(6):2265-2280.
 - ZHANG B, LIL, XIA QY, et al. Land use change and its impact on carbon storage under the constraints of "three lines": A case study of Wuhan City circle[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6): 2265-2280.
- [16] 赫晓慧,徐雅婷,范学峰,等.中原城市群区域碳储量的时空变化和预测研究[J].中国环境科学,2022,42(6): 2965-2976.
 - HE X H, XU Y T, FAN X F, et al. Temporal and spatial variation and prediction of regional carbon storage in Zhongyuan Urban agglomeration [J]. China Environmental Science, 2022, 42(6): 2965-2976.
- [17] 李克让,王绍强,曹明奎.中国植被和土壤碳贮量[J].中国科学(D辑:地球科学),2003,33(1):72-80. LIKR, WANGSQ, CAOMK. Vegetation and soil carbon storage in China[J]. Science in China, Ser D, 2003,33(1):72-80.
- [18] 解宪丽,孙波,周慧珍,等.中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J].土壤学报,2004,41(1):35-43. XIE X L, SUN B, ZHOU H Z, et al. Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis [J]. Acta Pedologica Sinica,2004,41(1):35-43.
- [19] 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):90-96.

- XU L, HE N P, YU G R. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems (2010s) [J]. China Scientific Data, 2019, 4(1):90-96.
- [20] SHI M J, WU H Q, FAN X, et al. Trade-offs and synergies of multiple ecosystem services for different land use scenarios in the Yili River valley, China[J]. Sustainability, 2021, 13(3): e1577.
- [21] DING Q L, CHEN Y, BU L T, et al. Multi-scenario analysis of habitat quality in the Yellow River Delta by coupling FLUS with InVEST model [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021,18(5):e2389.
- [22] 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.
- [23] 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 G S, YANG Y S, LIU L Z, et al. Research review on total belowground carbon allocation in forest ecosystems[J].Journal of Subtropical Resources and Environment,2007,2(1):34-42.
- [24] 曹秀凤.基于生态安全格局和 PLUS 模型的合肥市国土空间生态修复成效评价[D].长春:吉林大学,2023. CAO X F. Evaluation of ecological restoration effects of land use in Hefei City based on ecological security pattern and the PLUS Model[D].Changchun; Jilin University,2023.
- [25] 李苗, 臧淑英, 万鲁河, 等. 哈尔滨市城乡结合部土地利用时空变化[J].测绘科学,2018,43(6):52-57.

 LI M, ZANG S Y, WAN L H, et al. Spatial-temporal variation of land use in rural-urban continuum of Harbin city[J]. Science of Surveying and Mapping,2018,43(6):52-57.

(上接第 204 页)

- [32] 温慧娴,赵西宁,高飞.黄土高原不同降水量区苹果园土壤干燥化效应及生产水足迹模拟[J].应用生态学报,2022,33(7):1927-1936.
 - WEN H X, ZHAO X N, GAO F. Simulation of soil desiccation effects and production water footprint of apple orchards in different precipitation areas of the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(7):1927-1936.
- [33] YI J, ZHAO Y, SHAO M A, et al. Hydrological processes and eco-hydrological effects of farmland-forest-desert

- [26] 金浩宇, 鞠琴, 曲珍, 等.长江源区 1980—2010 年土地利用变化及影响分析研究[J].水资源与水工程学报, 2019, 30(4): 78-85.
 - JIN H Y, JU Q, QU Z, et al. Land use change and impact analysis in the source region of the Yangtze River from 1980 to 2010 [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(4):78-85.
- [27] 庄大方,刘纪远.中国土地利用程度的区域分异模型研究[J].自然资源学报,1997,12(2):105-111.

 ZHUANG D F, LIU J Y. Study on the model of regional differentiation of land use degree in China[J].

 Journal of Natrual Resources,1997,12(2):105-111.
- [28] 位贺杰,杨一鸣,吴群.多雾霾城市绿地空气净化服务与 景观格局的关系:以河南省安阳市区为例[J].水土保持 通报,2021,41(4):292-299,309. WEI H J, YANG Y M, WU Q. Relationship between air
 - WEI H J, YANG Y M, WU Q. Relationship between air purification service and landscape pattern of urban green space in city with more haze: Taking Anyang urban area of He' nan Province as an example [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4):292-299, 309.
- [29] 王永琪,马姜明.基于县域尺度珠江一西江经济带广西段土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究[J]. 生态学报,2020,40(21):7826-7839.
 - WANG Y Q, MA J M. Effects of land use change on ecosystem services value in Guangxi section of the Pearl River-West River Economic Belt at the county scale[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21):7826-7839.
- [30] 李振瑜,张建军,耿玉环.基于空间关系的长江经济带城市群生态效应扩散研究[J].中国农业大学学报,2017,22 (1):161-171.
 - LIZY, ZHANG JJ, GENG YH. Effects of ecological diffusions of cities around Yangtze River economic belt basing on spatial relation [J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(1):161-171.
 - transition zone in the middle reaches of Heihe River Basin, Gansu, China [J]. Journal of Hydrology, 2015, 529: 1690-1700.
- [34] 韩晓阳,刘文兆,程立平.黄土塬区深剖面土壤水分垂直分布特征及其时间稳定性[J].应用生态学报,2017,28(2):430-438.
 - HAN X Y, LIU W Z, CHENG L P. Vertical distribution characteristics and temporal stability of soil water in deep profile on the Loess Tableland, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28 (2):430-438.