

县域土地利用变化对碳储量的影响与评价 ——以黑龙港流域巨鹿县为例

牛志君¹, 周亚鹏², 王树涛², 郑小刚³, 郭义强^{4,5}, 薄广涛⁶

(1. 河北农业大学 资源与环境科学学院, 河北 保定 071000; 2. 河北农业大学

国土资源学院, 河北 保定 071000; 3. 河北省土地整理服务中心, 石家庄 050000; 4. 国土资源部 土地整治中心, 北京 100035; 5. 国土资源部 土地整治重点实验室, 北京 100035; 6. 河北省巨鹿县国土资源局, 河北 巨鹿 055250)

摘要:土地利用变化是影响陆地生态系统碳储量变化的重要驱动因素。引入了生态系统服务对土地利用变化脆弱性评估方法,以黑龙港流域巨鹿县为例,在分析巨鹿县2000—2015年土地利用与强度变化规律的基础上,研究区域土地利用变化对碳储量的影响。结果表明:2000—2005年这一时间段内,研究区内耕地、建设用地面积不断减少而未利用地的面积反而处于增加的态势,造成碳损失加快,致使生态系统碳储量对土地利用强度变化表现得愈加脆弱,土地利用强度指数每增加一个单位,植被、土壤、总碳储量分别减少36.66万t、1.03万t、37.67万t。在2005—2010年和2010—2015年这两个时段内,随着政府合理的进行土地利用调控,土地利用强度指数每增加一个单位,生态系统总碳储量分别增加1.24万t和1.06万t,不断表现出正向的潜在影响,碳汇也在不断增加,那么合理的调整土地利用结构、加强规划管理将会成为降低生态系统碳储量对土地利用变化脆弱性的关键。

关键词:土地利用变化; 碳储量; 生态系统服务

中图分类号: P966.9

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)03-0292-06

Influence and Evaluation of Land Use Change on Carbon Storage on County Scale —A Case Study of Julu County in Heilonggang Basin

NIU Zhijun¹, ZHOU Yapeng², WANG Shutao², ZHENG Xiaogang³, GUO Yiqiang^{4,5}, BO Guangtao⁶

(1. College of Resources and Environmental Science, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000, China; 2. College of Land and Resources Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China; 3. Land Consolidation Service Center of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050000, China; 4. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China; 5. Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China; 6. Bureau of Land and Resource of Julu County, Julu, Hebei 055250, China)

Abstract: Land use change is an important driver of carbon storage in terrestrial ecosystem. Therefore, we introduce the ecosystem services-based land use change vulnerability assessment method to study the effects of land use change on carbon storage and evaluation based on land use change and carbon storage in Heilonggang basin in Julu County, to analyze land use and intensity changes of Julu County in the period from 2000 to 2015, and to study the regional carbon storage changes in vegetation and soil. The results showed that: (1) from 2000—2005, the study area of cultivated land, construction land and unused land area decreased continuously in the area but the unused land area increased, causing the acceleration of carbon loss, and resulting in vulnerability of ecosystem carbon storage in response to land use intensity changes, every increase of land use intensity index a unit of vegetation, soil, total carbon reserves reduced by 366.6 thousand tons of C, 10.3 thousand tons of C and 376.7 thousand tons of C; (2) from 2005 to 2010 and from 2010 to 2015, with the government's rational land use regulation, each increase of land use intensity index of a unit, the total ecosystem carbon reserve increased by 12.4 thousand tons of C and 10.6 thousand tons of C, continued to show the potential positive effect, carbon sequestration is also increasing, so the reasonable adjustment of

收稿日期: 2017-06-09

修回日期: 2017-06-21

资助项目: 黑龙港流域土地整理项目碳排放及其影响机理研究(编号: 41401201)

第一作者: 牛志君(1993—), 男, 河北张家口人, 硕士生, 研究方向为土壤与土地资源持续利用。E-mail: 460590661@qq.com

通信作者: 郑小刚(1978—), 男, 山西翼城人, 国土工程高级工程师, 硕士研究生, 研究方向为土地开发整理、土地复垦等。E-mail: 18831124636@163.com

land use structure, strengthening planning and management will be reduced key vulnerability of ecosystem carbon storage to land use change.

Keywords: land use change; carbon stock; ecosystem services;

土地是人类赖以生存的重要资源之一^[1]。土地利用又是人与自然交叉最为密切的环节,区域土地利用变化的研究已成为“国际地圈生物圈计划(IGBP)”的重要组成部分^[2]。土地利用/覆被变化必然影响生态系统的结构和功能,其变化过程对维持生态系统服务功能起着决定性的作用^[3-5]。

陆地生态系统碳储量及其变化在全球碳循环和大气 CO₂ 浓度变化中起着非常重要的作用,因而是全球气候变化研究中的重要问题。作为一个巨型碳库,据估算,全球陆地生态系统碳的总储量约为 2 000 ~ 2 500 Pg(1 Pg=10¹⁵ g)。人类活动主要通过改变土地覆被或土地利用方式以及农林业活动中的经营管理措施影响着陆地生态系统的碳储量,如草地退化及其向耕地的转化都使植被生物量减少、增大土壤中碳的释放;反之,退耕还林、退耕还草将有利于碳储量的增加。土地利用变化和农牧业活动不仅对植被碳库和土壤表层碳库有着显著影响,甚至可以激发土壤深层惰性碳库的损失,土地利用变化影响下 CO₂ 的释放已不容忽视。生态系统服务是指人类直接或间接从生态系统的结构、过程和功能中得到的利益^[6]。生态服务功能是指生态系统与生态过程所形成及维持人类赖以生存的自然环境条件与效用,其在土地利用中主要表现为人们通过改变和利用土地利用的方式,以满足自身的利益,同时也对土地利用产生了干扰,使土地系统的生态价值产生剧烈变化。千年生态系统评估(MA)报告表明,在 20 世纪的后 50 a,人类活动已经引起大约 60% 的生态系统服务退化或者不可持续利用;在 21 世纪的前半叶,生态系统服务退化的状况可能显著恶化,其最重要的直接驱动力之一将是栖息地变化,特别是林地和草地转化为农业用地。为了减缓生态系统服务损失和退化的速度,IPCC, UNEP, ATEAM, SUST, GLP 已从全球气候变化和可持续发展的角度研究人类—自然耦合系统的脆弱性^[7-10];在国内,也有一些学者研究陆地生态系统净初级生产力及碳储量对气候变化的脆弱性^[11-15]。

目前学者们主要侧重于对单一陆地生态系统碳储量的计算,如土壤、森林、草地或农田生态系统之一,有机碳储量的计算没有反映一个区域陆地生态系统的整体性特征。综合性的陆地生态系统碳储量及土地利用变化的碳效应研究并不多见^[16-19]。因此,本文在研究巨鹿县 4 期土地利用变化的基础上,结合对土地利用强度

的分析和碳储量的变化,引入了生态系统服务对土地利用变化脆弱性评估方法,分析了生态系统服务对土地利用类型转变、土地管理方式变化的脆弱性响应机理,深入探究土地利用变化对碳储量的影响,为该区域提高土地利用效率和生态系统保护提供依据^[20-23]。

1 研究区概况

巨鹿县位于河北省南部,地处太行山东侧的古黄河、漳河冲积平原,位于北纬 37°25′—37°08′,东经 114°50′—115°14′。东与南宫、广宗接壤,西和隆尧、任县相连,北与宁晋、新河交界,南与平乡毗邻,地貌复杂多变,地势大平、小不平,微地貌差异较大,洼地、沙丘遍布。地势由南向北略为倾斜,平均坡降 1.25/1000,海拔 25.5~31 m。地貌类型为平原,总体地势南高北低、西高东低,海拔高度在 24.1~30.0 m。整体地势平坦开阔,相对高差较小,但作为新增耕地部分的地势略有起伏,部分新增耕地局部地势坑洼不平,起伏较大,不利于机械化耕作。该县属于华北暖温带大陆性半干旱季风气候,多年平均气温 12.9℃,年积温平均 4 950.7℃,降水分布四季不均,多年平均降水量 492 mm。全县土壤共有潮土、风砂土和盐土 3 个土类,并以潮土为主,各个乡镇均有分布,风砂土类分布在巨鹿镇、贾庄乡等地,地下水埋藏深度 5~8 m,改良后的土地可种植果树、木材林、地丁和红荆等。盐土类主要分布在观寨、何寨一带,地下水埋藏深度 2~8 m,土地利用难度大,在雨水较大年份可种植耐盐碱作物如枸杞、荆条、紫穗槐和向日葵等。

2 数据来源与处理

本文需要两类数据:一类是土地利用变化数据,选用 2000 年、2005 年、2010 年以及 2015 年的 Landsat-TM/ETM 为数据源,其成像时间均选择在秋季,轨道号均为 122/33,数据空间分辨率为 30 m×30 m,借助 ENVI 4.8 软件对遥感数据进行波段融合、几何校正和影像裁剪,采用监督分类和非监督分类相结合的方法将研究区划分为耕地、园地、林地、草地、水域、建设用地以及未利用地共 7 种土地利用类型(图 1)。另一类是植被、土壤碳密度数据,不同土地利用类型的植被碳密度的计算比较复杂,不同的土地利用类型的生物量和碳密度不同,所以本研究主要采用华北地区不同植被类型平均碳密度。本文研究区巨鹿县基本

位于该区域内,本研究采用其不同土地利用类型土壤碳密度,具体见表 1。

表 1 不同土地利用类型植被和土壤碳密度

土地利用类型	植被碳密度/ (t·hm ⁻²)	土壤碳密度/ (t·hm ⁻²)
耕地	2.59	66.27
园地	98.91	54.77
林地	65.50	44.23
牧草地	1.55	45.41
交通、工矿、居名点等建设用地	11.86	71.59
水利设施(水域)	6.64	40.64
未利用地	1.50	55.45

3 研究方法

3.1 土地利用程度指数

土地利用程度主要反映土地利用的广度和深度,

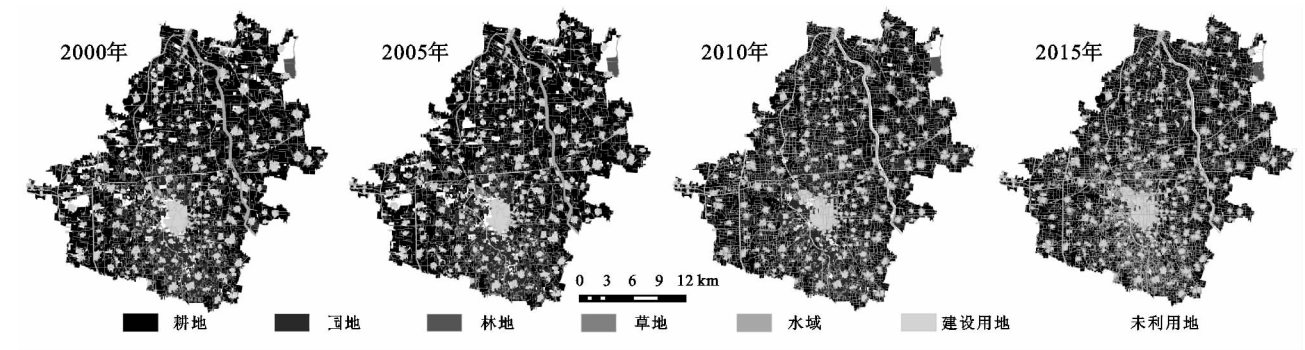


图 1 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年巨鹿县土地利用现状

3.2 碳储量估算方法

本研究所采用的的碳储量的估算公式为:

$$V_i=C_i\times S_i$$

式中: i 为土地覆被对应的植被/土壤类型; V_i 为第 i 种植被/土壤类型的碳储量; C_i 为第 i 种植被/土壤类型的碳密度; S_i 为第 i 种植被/土壤类型的面积。

3.3 脆弱性评估方法

本研究所提出的脆弱性评估方法的度量不是生态系统服务变化,而是 Metzger 等提出的潜在影响指数 (PI) 表示,但计算方法略有不同,本研究中的 PI 为研究期末与期初的碳储量和土地利用强度指数的变化量之比:

$$PI=\frac{\Delta CR}{\Delta X}$$

式中: ΔX 为对应的末期与基期土地利用强度指数变化; ΔCR 为对应的末期与基期碳储量的变化。

4 结果与分析

4.1 土地利用变化分析

由表 2 可知:在 2000—2015 年巨鹿县主要地类以耕地为主,面积占比均超过 65%,证明巨鹿县对耕

它既反映了土地利用中土地本身的自然属性,也反映了人类因素和自然环境因素的综合效应。分析土地利用程度及其变化可定量分析 1992—2012 年不同地形位区间土地利用的综合水平和变化趋势。土地利用程度综合指数的公式为:

$$L=100\times\sum_{i=1}^n(A_i\times C_i)$$

式中: L 表示怀来县的土地利用程度综合指数; A_i 表示怀来县第 i 级土地利用程度分级指数; C_i 表示怀来县第 i 级土地利用类型面积占怀来县总面积的百分比; n 为土地利用程度分级数。参考刘纪远等人的研究成果,结合研究区域浅山丘陵区实际情况,本研究将土地利用分为四级,未利用地分级指数为 1,林地、草地、水域分级指数为 2,耕地、园地分级指数为 3,建设用地分级指数为 4。

地的保护非常重视,能够保证粮食安全的基本条件。研究区内在 4 个时期总体上以水域和未利用地的面积减少,耕地、林地、园地和建设用地面积增加为主要特征。其中林地、园地以及未利用地的面积呈现先增后减的趋势,林地在 2010 年达到峰值,由于地处华北平原区,土地本质的特性较为优质,土壤有机质含量较高,所以耕地占有量远远超过林地,而园地和未利用地则在 2005 年达到最大值,说明在 2000—2005 年期间,被誉为“杏杞”之乡、银花之乡的巨鹿县,在保证基本农田保有量的前提下,注重经济效益的更高的园地开发,中小型种植园逐步成为巨鹿县重要的经济来源。相反对于未利用的开发却缺乏较高的重视程度,没有充分的利用未利用地,实现土地利用效率的最大化;由于人类生产生活对水资源需求的增加以及干旱、不合理灌溉等因素,致使水域面积 15 a 间共减少 1 250.28 hm²,而减少趋势有所降低,说明人们对于保护水资源的意识也逐步增强;在 2000—2015 年,建设用地共增加 685.87 hm²,到 2015 年达到巨鹿县土地利用总面积的 13.75%,增加的幅度保持较为稳定的状态。巨鹿县作为重要的粮食生产基地,应继续加强耕地保护措施,加大对未利用地向其他地类的开发

模式转变力度,同时应加强对林地等生态用地的数量把控,以及对经济特色园地的开发,使其在经济快速发展过程中趋于平衡,使得巨鹿县域土地利用经济、生态效率达到最大化。

表 2 2000—2015 年巨鹿县土地利用变化情况

地类	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年	
	面积/hm ²	百分比/%	面积/hm ²	百分比/%	面积/hm ²	百分比/%	面积/hm ²	百分比/%
耕地	42353.07	67.10	41698.78	66.06	43937.76	69.61	43593.04	69.06
林地	395.03	0.63	467.57	0.74	819.93	1.30	797.29	1.26
园地	4990.38	7.91	5948.15	9.42	5671.33	8.98	5538.44	8.77
草地	203.87	0.32	439.08	0.70	1706.22	2.70	1644.88	2.61
水域	2751.61	4.36	1797.29	2.85	1507.63	2.39	1501.33	2.38
建设用地	7991.95	12.66	7952.39	12.60	8049.52	12.75	8681.82	13.75
未利用地	4437.84	7.03	4820.49	7.64	1431.35	2.27	1366.94	2.17
总计	63123.74	—	63123.74	—	63123.74	—	63123.74	—

4.2 土地利用强度分析

由表 3 可知,巨鹿县 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年的土地利用强度分别为 293.29,293.04,301.04,303.18,说明巨鹿县土地利用强度整体上属于中等发展水平。4 期的土地利用程度综合指数相差不大,总体上属于缓慢上升阶段。2000—2015 年变化相对缓慢,主要是因为林地面积持续增加,这是天然的可再生的生态用地资源;其次是人为影响的耕地和园地可再生的农用地土地资源,二者面积之和均超过了 75%;而土地利用程度分级指数最高的建设用地资源占比很小,平均占比 12%。这说明怀来县的土地开发利用程度还有很大的发展空间,应加大未利用地向其他地类的转化,2005—2010 年未利用地大幅度减少使得土地利用程度综合指数有一个小幅度的提升就证明了这一点;2010—2015 年建设用地小幅度的增加也说明了巨鹿县的经济水平处于一个缓慢上升的阶段。

表 3 巨鹿县土地利用程度综合指数

项目	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年
土地利用程度指数	293.29	293.04	301.83	303.18

4.3 不同土地利用类型碳储量分析

研究结果表明(图 2),不同的土地利用类型对于植被、土壤以及总碳储量的影响较为显著,并且受土地利用转换类型碳密度差异的影响,不同土地利用类型转换对碳储量的影响存在显著差异。其中在 2000—2015 年期间,由于该研究区对于耕地保护措施以及严禁建设用地扩张政策的合理实施,耕地以及建设用地在 15 a 内只增加总面积的 1.96%和 1.09%,耕地和建设用地的碳储量变化整体较为平缓,没有出现明显的差异性变化。耕地中主要以土壤碳储量为主,而建设用地中土壤碳储量的含量同样占据较大的比重;由于 2000—2015 年巨鹿县林地、园地以及未利用地的面积呈现先增后减的趋势,导致林地

和园地的植被碳储量以及未利用地的土壤碳储量整体上也处于先增后减的趋势,但林地在 2010 年碳储量达到峰值,而园地和未利用地则是在 2005 年就已经达到最大碳储量。随着经济急速发展,工业化时代对于水资源的污染以及人类对于生活用水的不合理使用与浪费都将直接导致水域面积的减少,而水域的碳储量变化逐步呈现递减的趋势,其主要表现为土壤碳储量的急剧下降;林地和草地作为重要的生态用地则表现出先增后减的趋势,在近 15 a 内,两种地类均出现最大值,分别为 8.99 万 t 和 8.01 万 t,但草地的碳储量变化率却远大于林地。相对于林地而言,草地的土壤碳储量与植被碳储量变化趋势出现显著的差异性,土壤碳储量的变化逐步成为决定总碳储量变化的关键性因素;随着巨鹿县城市化速度的加快,对于未利用地的开发利用更加重视,以至于未利用地的碳储量逐步走向下滑的趋势,在 2000—2015 年内连续发生变化,峰值与谷值的同时出现,导致研究区内最大的碳储量差异量为 19.67 万 t;相对于其他地类,园地的变化呈现出平行分布,在 2005 年出现短暂的峰值后又迅速走向平缓,说明巨鹿县在近 15 a 内对于园地的开发利用一直处于平衡状态。

4.4 区域生态系统碳储量对土地利用变化的脆弱性评估

根据脆弱性的评估方法和区域生态系统服务对土地利用变化的脆弱性响应机理,以 2000 年为基期,评估了 2005 年、2010 年、2015 年 3 个时间段巨鹿县域陆地生态系统的碳储量对区域内土地利用变化的脆弱性。

研究结果表明,研究区内陆地生态系统扮演碳汇的角色,从 2000—2005 年、2010 年、2015 年,陆地生态系统碳储量整体呈现增加的趋势,在 2010 年出现最大增加量为 10.57 万 t,主要由于农田、林地面积的显著增加。从 2000—2005 年、2010 年、2015 年,土地

利用强度呈现先减后增的趋势,但减少的幅度仅仅为 0.25,而在 2015 年土地利用强度增加幅度达到 9.88。在 2000—2005 年内,巨鹿县域耕地、建设用地面积不断减少而未利用地的面积反而处于增加的态势,一方面大部分土地不断转化为未利用地,从而造成碳损失加快,另一方面,反映土地利用强度指数的建设用地却处减少态势,两种变化过程的综合作用致使生态系统的碳储量服务愈加脆弱。说明在这五年内该研究区没有合理的开发利用土地,土地利用强度变化对碳储量的潜在影响急剧减弱,为-37.69 万 t,表现为负

面潜在影响,对其本身的经济发展、环境保护同样存在着较大的制约;而在 2005—2015 年这十年内,随着政府合理进行土地利用的调控,以及对于未利用地开发利用的增强,耕地和建设用地逐步向平衡的态势发展,而对于碳密度较高的林地、草地以及园地也处于快速增加趋势,由于巨鹿县合理的进行土地利用规划,不断表现出正向的潜在影响,碳汇在增加,从而减少了生态系统的脆弱性。显然,人类通过提高自身规划适应能力加强对土地生态系统的规划管理以应对土地利用变化的潜力很大(表 4)。

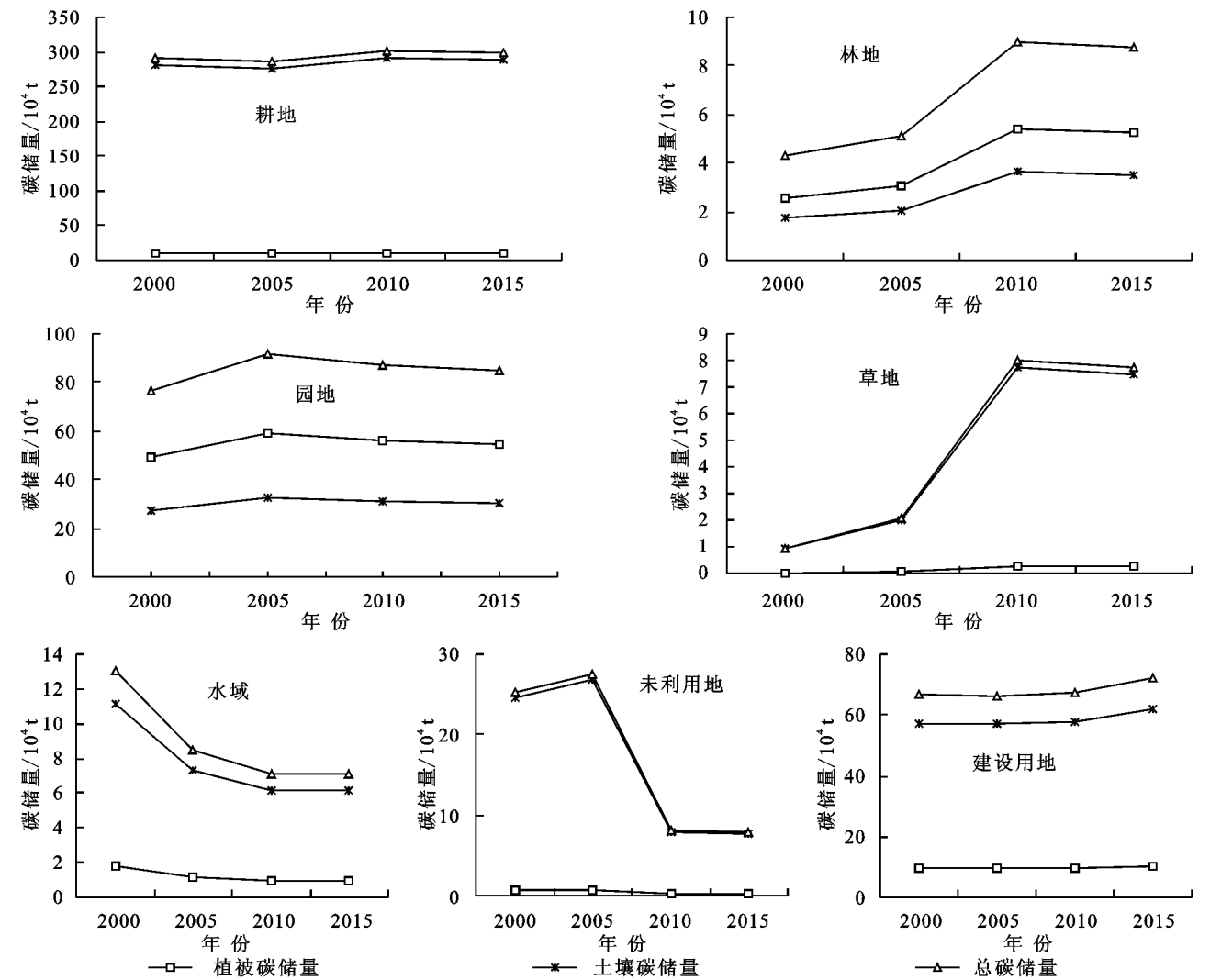


图 2 2000—2015 年巨鹿县各地类碳储量变化

表 4 土地利用变化对生态系统碳储备能力潜在影响

年份	土地利用 强度指数	植被碳储 量/10 ⁴ t	土壤碳储 量/10 ⁴ t	总碳储量/ 10 ⁴ t	碳储量变化 (—源;+汇)/10 ⁴ t			土地利用 强度变化	PI/10 ⁴ t		
					植被	土壤	总量		植被	土壤	总量
2000	293.29	74.92	403.68	478.60	—	—	—	—	—	—	—
2005	293.04	84.11	403.94	488.05	9.19	0.26	9.45	—0.25	—36.66	—1.03	—37.69
2010	301.83	83.87	405.30	489.17	8.95	1.62	10.57	8.53	1.05	0.19	1.24
2015	303.18	83.05	406.06	489.10	8.13	2.37	10.50	9.88	0.82	0.24	1.06

注:PI<0 负面潜在影响;PI=0 潜在影响为零;PI>0 正向潜在影响。

5 结论与讨论

5.1 讨论

本文通过对巨鹿县 2000—2015 年土地利用数量、土地利用强度以及植被、土壤、总碳储量的变化分析,引入了生态系统服务对土地利用变化脆弱性评估方法,分析了生态系统服务对土地利用类型转变、土地管理方式变化的脆弱性响应机理。研究发现合理调整用地结构如增加农田、林地、草地比重可以减缓土地利用强度的加深、降低生态系统碳储量的脆弱性,但是能力有限。由于耕地面积增加的可能性极小,受林地、建设用地、生态用地、生物能源用地增加的约束,农田、草地面积减少的趋势难以控制,因此,只能通过造林增加森林碳汇,同时在保增长的前提下控制建设用地规模的扩张,以降低碳储量的脆弱性。如何优化合理配置各类型土地,以降低碳储量的脆弱性为前提,更加深入研究土地利用变化与区域生态系统服务之间的耦合关系,将是有待于进一步解决的问题。

5.2 结论

(1) 通过对巨鹿县 2000—2015 年土地利用现状图进行分析,发现研究区内在 4 个时期总体上以水域和未利用地的面积减少,耕地、林地、园地和建设用地面积增加为主要特征。其中主要地类以耕地为主,面积占比均超过 65%,基本处于平衡状态,能够满足耕地保护与粮食安全的基本要求;而 2000—2015 年由于经济的发展以及人类对于水资源的浪费、污染、不合理使用,导致水域面积不断呈现减少的态势。在研究区土地利用强度整体上属于中等发展水平,对于建设用地的开发能够满足当前生态、环境的发展理念,而且这 4 期的土地利用程度综合指数相差不大,总体上属于缓慢上升阶段。

(2) 受土地利用转换类型碳密度差异的影响,不同土地利用类型转换对碳储量的影响存在显著的差异性。本文通过对耕地、园地、林地、草地、水域、建设用地以及未利用地这 7 种地类中植被碳储量、土壤碳储量和总碳储量进行数据分析,可知只有园地和林地的植被碳储量在近 15 a 内发生显著变化,其余地类植被碳储量保持稳定状态;而土壤碳储量的变化则集中在除耕地、园地以及建设用地以外的地类。

(3) 根据脆弱性的评估方法和区域生态系统服务对土地利用变化的脆弱性响应机理,本文以 2000 年为基期,评估了 2005 年、2010 年、2015 年 3 个时间段巨鹿县陆地生态系统的碳储量对区域内土地利用变化的脆弱性。得出在 2000—2005 年这一时间段

内,研究区内生态系统碳储量对土地利用强度变化的脆弱性愈加严重,土地利用强度指数每增加一个单位,植被、土壤、总碳储量分别减少 36.66 万 t、1.03 万 t、37.67 万 t;而在 2005—2010 年和 2010—2015 年这两个时段内,土地利用强度指数每增加一个单位,生态系统总碳储量分别增加 1.24 万 t 和 1.06 万 t,而且不断表现出正向的潜在影响。

参考文献:

- [1] 冯长春. 中国土地储备制度探讨[J]. 农业工程学报, 2008(S): 247-249.
- [2] 侯湖平, 张绍良, 丁忠义, 等. 煤矿区土地利用变化对生态系统植被碳储量的影响: 以徐州垓城矿为例[J]. 煤炭学报, 2013, 38(10): 1850-1855.
- [3] 张慧, 臧亮, 何东娟, 等. 基于改进的 AHP-Fuzzy 土地整治实施效果评价[J]. 土壤通报, 2016, 47(5): 1084-1089.
- [4] 郭义强, 陈朝锋, 韩赓, 等. 河北省柏乡县土地整理项目的碳排放效应研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(36): 205-210.
- [5] 郭义强, 郇文聚, 黄妮, 等. 土地整理工程对土壤碳排放的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 36-41.
- [6] 顿耀龙, 王军, 郭义强, 等. 基于 AHP-FCE 模型的大安市土地整理可持续性评价[J]. 中国土地科学, 2014, 18(8): 57-64.
- [7] Jun W, Shen C Y, Yi Q G, et al. The effects of land consolidation on the ecological connectivity based on ecosystem service value: A case study of Da'an land consolidation project in Jilin province[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(5): 603-616.
- [8] Wu Y, Guo Y, Liu L, et al. Trend analysis of variations in carbon stock using stock big data[J]. Cluster Computing, 2017, 20(2): 1-17.
- [9] Costanza R. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital[J]. Nature, 1997, 38(7): 253-260.
- [10] IPCC. A contribution of working groups I, II, and III to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Ipcc, Climate Change 2001, 2001.
- [11] 郑泽庆. 陆地生态系统有机碳储量测算及其对土地利用变化的响应研究: 以江苏省为例[D]. 南京: 南京大学, 2009.
- [12] 魏文佳, 桂智凡, 薛滨, 等. 土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响: 以太湖流域和呼伦湖流域为例[J]. 第四纪研究, 2012, 32(2): 327-336.
- [13] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域: 土地利用/土地覆被变化的国际研究动向[J]. 地理学报, 1996, 11(6): 553-558.

- [9] Boardman J, Shepherd M L, Walker E, et al. Soil erosion and risk-assessment for on-and off-farm impacts: A test case using the Midhurst area, West Sussex, UK. [J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90 (8):2578-2588.
- [10] Meng J, Zhou T, Y. Liu. Research on regional ecological risk assessment: a case study of Ordos in Inner Mongolia[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47(5):935-943.
- [11] 张志国,李锐,王国梁. 基于 GIS 的区域水土流失生态风险评价[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(5):98-101.
- [12] 梁玉华,张军以,樊云龙. 喀斯特生态系统退化诊断特征及风险评价研究:以毕节石漠化为例[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1):240-245.
- [13] 凡非得,王克林,熊鹰,等. 西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征[J]. 生态学报, 2011, 31 (21):6353-6362.
- [14] Prasannakumar V, Shiny R, Geetha N, et al. Spatial prediction of soil erosion risk by remote sensing, GIS and RUSLE approach: a case study of Siruvani river watershed in Attapady valley, Kerala, India[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(4):965-972.
- [15] 许月卿,周巧富,李双成. 贵州省降雨侵蚀力时空分布规律分析[J]. 水土保持通报, 2005, 25(4):11-14.
- [16] 张科利,彭文英,杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报, 2007, 44(1):7-13.
- [17] 秦松,范成五,孙锐锋. 贵州土壤资源的特点、问题及利用对策[J]. 贵州农业科学, 2009, 37(5):94-98.
- [18] 赵彩霞. 甘肃白龙江流域生态风险评价[D]. 兰州:兰州大学, 2013.
- [19] ArcGIS 地理信息系统空间分析试验教程. 第 2 版[M]. 北京:科学出版社, 2012.
- [20] 凡非得,王克林,宣勇,等. 西南喀斯特区域生态环境敏感性评价及其空间分布[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(11):1394-1399.
- [21] 张琦,蔡雄飞,汪发勇,等. 喀斯特石漠化与水土流失强度耦合关系分析:以六盘水市为例[J]. 亚热带水土保持, 2016, 28(3):7-11.
- [22] 陈美淇,魏欣,张科利,等. 基于 CSLE 模型的贵州省水土流失规律分析[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3):16-21.
- [23] 王娟,崔保山,刘杰,等. 云南澜沧江流域土地利用及其变化对景观生态风险的影响[J]. 环境科学学报, 2008, 28(2):269-277.
- [24] 李谢辉,李景宜. 基于 GIS 的区域景观生态风险分析:以渭河下游河流沿线区域为例[J]. 干旱区研究, 2008, 25(6):899-903.
- [25] 高宾,李小明,李志刚,等. 基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析[J]. 生态学报, 2011, 31 (12):3441-3450.
- [26] 查轩,张萍. 基于 GIS 的重要水源地东圳库区土壤侵蚀与景观格局分析[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3):43-47.
- [27] 吴健生,乔娜,彭建,等. 露天矿区景观生态风险空间分异[J]. 生态学报, 2013, 33(12):3816-3824.

~~~~~

(上接第 297 页)

- [14] 王军,顿耀龙,郭义强,等. 松嫩平原西部土地整理对盐渍化土壤的改良效果[J]. 农业工程学报, 2014, 30 (18):266-275.
- [15] 王佳丽,黄贤金,陆汝成,等. 区域生态系统服务对土地利用变化的脆弱性评估:以江苏省环太湖地区碳储量为例[J]. 自然资源学报, 2010(4):556-563.
- [16] 王广成,李中才. 基于时空尺度及利益关系的生态服务功能[J]. 生态学报, 2007, 27(11):4758-4765.
- [17] 郝慧梅,任志远. 基于生态服务价值的土地利用/覆盖变化生态效应测评[J]. 资源科学, 2007, 29(6):90-97.
- [18] 岳书平,张树文,闫业超. 东北样带土地利用变化对生态服务价值的影响[J]. 地理学报, 2007, 62(8):879-886.
- [19] Guo Y Q, Zheng J Y, Ge Q S, et al. Primary energy-related carbon dioxide emissions in China[J]. Chinese Journal of Population Resources and Environmen, 2013, 11(4):283-287.
- [20] 王思远,刘纪远,张增祥,等. 中国土地利用时空特征分析[J]. 地理学报, 2001, 56(6):631-639.
- [21] 揣小伟,黄贤金,郑泽庆,等. 江苏省土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响[J]. 资源科学, 2011, 33 (10):1932-1939.
- [22] 王军,严慎纯,白中科,等. 土地整理的景观格局与生态效应研究综述[J]. 中国土地科学, 2012, 26(9):87-94.
- [23] 罗明,郭义强,曹湘潭. 低碳土地整治:打造生态文明建设新平台:以湖南省长沙县低碳土地整治示范项目为例[J]. 中国土地, 2015(4):6-9.