

# 基于景观格局的土地整理风险与固碳功能评价

董玉红<sup>1</sup>, 刘世梁<sup>2\*</sup>, 王 军<sup>3</sup>, 侯笑云<sup>2</sup>

(1. 中国林业科学研究院林业研究所/国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091; 2. 北京师范大学环境学院/环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875; 3. 国土资源部土地整治重点实验室, 北京 100812)

**摘 要:** 通过生态风险指数构建和碳储量服务模拟, 评价土地整理对生态风险和固碳功能的影响, 由于生态系统服务在生态风险研究中的缺乏, 利用土地整理前后生态风险变化和碳储量服务变化之间的相关关系分析, 探讨利用生态系统服务变化评价生态风险的可能。以吉林省西部重大土地整理区为研究对象, 基于景观格局变化构建生态风险指数, 利用 InVEST 模型分析碳储量服务变化, 结果表明: 土地整理使整理区的景观结构发生较大变化, 优势景观类型由盐碱地和草地转变为耕地, 耕地破碎度和分离度降低, 盐碱地和草地的分离度和破碎度增加。土地整理后, 耕地、建设用地和其他用地的景观损失度指数降低, 其他景观类型的景观损失度指数增加。土地整理前后整理区生态风险等级以较低风险区和中等风险区为主, 整理后低和较低风险区面积变化明显, 其他等级风险区的面积变化不大。InVEST 模拟结果表明, 土地整理前后整理区总碳储量分别为 990.82、1 145.22 万 t, 总碳储量增加 154.40 万 t, 土地整理导致固碳功能的增加。相关分析结果表明整理区碳储量服务变化与生态风险变化呈显著负相关关系, 表明生态系统服务变化在生态风险评价中的应用的可能。

**关键词:** 整理; 生态; 风险评价; Invest 模型; 固碳功能

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.032

中图分类号: X821

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-07-0246-08

董玉红, 刘世梁, 王 军, 侯笑云. 基于景观格局的土地整理风险与固碳功能评价[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 246—253. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.032 <http://www.tcsae.org>

Dong Yuhong, Liu Shiliang, Wang Jun, Hou Xiaoyun. Assessment of risk and carbon sequestration function of land consolidation based on landscape pattern[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(7): 246—253. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.032 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

土地整理项目通过一系列生物、工程或综合措施对土地资源进行整理, 不可避免地影响环境要素及其相关生态过程, 影响敏感生态系统及景观组分<sup>[1]</sup>。土地整理显著改变土地利用和景观格局, 土地整理项目的景观生态效应受到广泛的关注<sup>[2-6]</sup>。利用景观结构及其动态变化进行区域尺度上生态风险评价是当今学者研究的趋势<sup>[7-10]</sup>, 针对土地整理活动的生态风险评价, 一般是通过建立生态风险识别体系, 采用层次分析法进行评价并建构综合生态风险评价指数<sup>[11]</sup>。目前, 生态风险评价中, 景观生态学的研究受到重视, 如艾建超等<sup>[12]</sup>以吉林省镇赉县土地整理区为研究对象, 分析土地整理前后的景观格局变化和可能的生态风险。邓静等<sup>[13]</sup>以天津市武清区下朱庄街农村居民点整理工程为研究对象, 利用景观干扰度指

数和脆弱度指数计算生态风险指数, 分析景观生态风险变化。

近年来生态系统结构和过程变化对生态系统服务的影响已成为区域生态系统的研究热点, 生态系统服务应用最为广泛的是 Costanza 等<sup>[14]</sup>提出的价值量评价<sup>[15-17]</sup>。土地整理的生态效益可用土地整理前后生态系统服务的变化量来衡量, 一些研究通过价值量分析评价土地整理对生态系统服务的影响<sup>[18-21]</sup>。而利用生态系统服务进行生态风险评价受到关注, 国内外相关研究还很少, 大多还都处在探讨阶段, 只是将生态系统服务作为评价终点进行研究, 康鹏等<sup>[22]</sup>提出从生态服务提供者、生态系统结构、过程和功能以及生态系统服务价值进行生态风险的研究。景观格局变化后生态风险的增大直接表现为生态系统服务的降低, 进而影响人类福祉, 彭建等<sup>[23]</sup>提出可将生态系统服务价值损失作为景观生态风险对人类福祉影响的重要评判依据。

生态系统服务评价方法还可利用模型方法, 其中 InVEST 模型发展最为成熟, 利用 InVEST 模型(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs)模拟不同土地覆被情景下生态服务系统服务功能的变化, 实现生态系统服务功能定量评估的空间化。国内外学者利用该模型对碳储量、水源供给、水土保持功能、生物多样性以及生境质量等生态功能评价进行了研究<sup>[24-30]</sup>。土地整理导致土地利用发生变化, 利用 InVEST 模型可模拟土地整

收稿日期: 2016-09-16 修订日期: 2017-04-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502103); 国土资源部土地整治重点实验室开放课题(20160328)资助

作者简介: 董玉红, 女, 副研究员, 主要从事生态系统模拟研究。北京 中国林业科学研究院林业研究所/国家林业局林木培育重点实验室, 100091。

Email: yhongdong@163.com

\*通信作者: 刘世梁, 博士, 主要从事景观生态学和土地利用的研究。北京 北京师范大学环境学院/环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 100875。

Email: Shiliangliu@bnu.edu.cn

理对生态系统服务功能的影响。

国家重大土地整理工程的生态风险目前受到广泛关注,吉林西部大安市作为重要的土地储备战略资源与土地开发整理重大工程所在地,土地整理对景观格局产生了重要的影响。目前已经进行了不同空间幅度整理区土地整理前后的景观格局指数<sup>[31]</sup>、基于层次分析法—模糊综合评价模型的土地整理可持续性评价<sup>[32]</sup>以及村域、镇域和县域尺度下土地整理区的服务价值变化<sup>[33]</sup>方面的研究工作,对项目区土地整理引起的生态风险变化目前还没有研究。本文以大安市土地整理区为研究对象,通过生态风险小区划分,基于景观格局指数构建生态风险指标,将生态风险指数定量化和空间化,探讨土地整理对生态风险的影响,选择土地整理对碳储量的扰动为生态系统服务的指标,利用 InVEST 模型分析土地整理前后碳储量服务的变化,进一步分析生态风险变化和碳储量服务变化的相关关系,探讨生态系统服务变化应用于生态风险评价的可能,对于进一步深入研究土地整理的生态效应具有重要意义。

## 1 研究区与研究方法

### 1.1 研究区概况

大安市 (123°08'45"–124°21'56"E, 44°57'00"–45°45'51"N) 位于吉林省西北部,地处松嫩平原腹地,总面积 4 879 km<sup>2</sup>。气候属于半湿润、半干旱中温带大陆性季风气候,年平均降雨量为 413.7 mm,年平均蒸发量为 1 749 mm,年平均气温 4.3℃,年平均积温 2 921.3℃。大安市土壤盐碱化程度严重且分布较集中,重度盐碱地面积多<sup>[34]</sup>。大安市土地整理项目是吉林西部土地开发整理重大工程,整理区总面积约 1 201.96 km<sup>2</sup>,是吉林省西部苏打盐碱地分布的核心区,分布范围包括新平安镇、两家子镇、乐胜乡和海坨乡等 14 个乡镇,整理区地貌类型包括微起伏平地、垄间低地、沙坳、盐渍低地、湖沼洼地和漫滩,土壤主要有冲积土、沼泽土、盐土和碱土等类型<sup>[31,33]</sup>。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 数据来源

本研究景观类型数据由国土资源部土地整治重点实验室提供,数据来源于大安市项目区土地整理前(2008年)1:10 000 土地利用图和土地整理后(2014年)1:10 000 土地整理图,运用 GIS 数字化整理区的土地利用图件,获得整理区的景观类型数据<sup>[31]</sup>。依据全国土地利用现状分类,将整理区景观类型划分为 9 类,包括林地、建设用地、交通运输用地、耕地、盐碱地、湿地、草地、其他用地和园地。项目区土地整理前后的景观类型及分布如图 1 所示。

#### 1.2.2 风险小区划分

为了能够将生态风险值进行空间化,将整理区按 4 km×4 km 的采样网格进行划分,获得 146 个生态风险小区,分别计算每个生态风险小区的生态风险指数,分析土地整理前后整理区的生态风险变化情况。

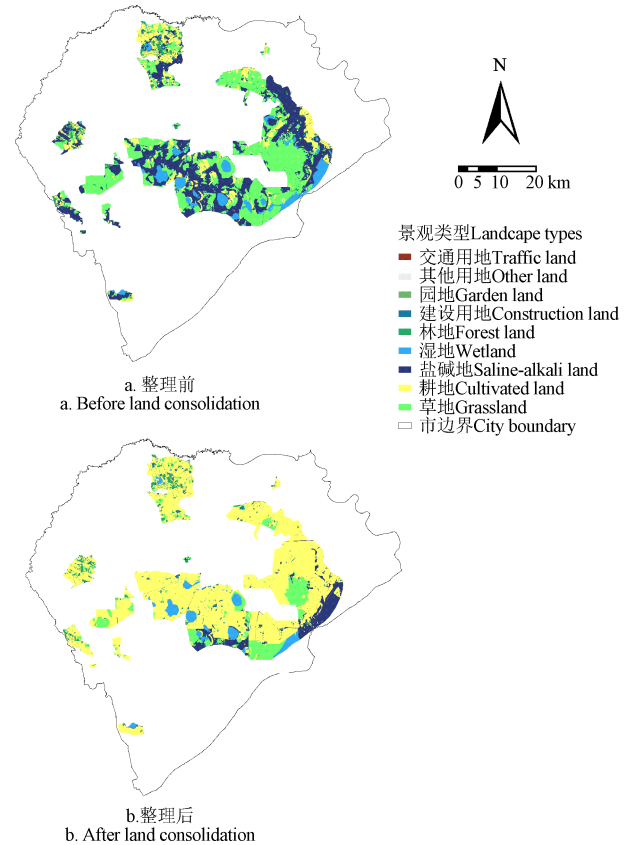


图 1 大安市土地整理前后的景观类型  
Fig.1 Landscape types before and after land consolidation in Da'an city

#### 1.2.3 景观生态风险指数构建

利用景观干扰度指数和景观脆弱度指数计算每个生态风险小区各景观类型的损失度指数,基于小区内各景观类型的面积比例和景观损失度指数计算生态风险小区的生态风险指数(ecological risk index, ERI)。

##### 1) 景观干扰度指数

景观干扰度指数( $S_i$ )用来反映生态系统受外部干扰的程度,通过景观格局分析,利用景观破碎度指数、景观分离度指数和景观优势度指数的叠加来构建景观干扰度指数<sup>[10,35]</sup>。其表达式为

$$S_i = aC_i + bN_i + cD_i \quad (1)$$

式中  $C_i$  是景观破碎度指数,  $C_i = \frac{n_i}{A}$ ,  $N_i$  是景观分离度指

数,  $N_i = \frac{A}{2A_i} \sqrt{\frac{n_i}{A}}$ ,  $D_i$  是景观优势度指数,  $C_i = 0.4L_i + 0.6P_i$ 。

$n_i$  为景观类型  $i$  的斑块数,  $A_i$  为景观类型  $i$  的总面积,  $A$  为景观总面积,  $hm^2$ ;  $L_i$  为景观  $i$  的斑块数/斑块总数,  $P_i$  为景观  $i$  的斑块面积/总面积。 $a$ 、 $b$ 、 $c$  为  $C_i$ 、 $N_i$  和  $D_i$  的权重,且  $a+b+c=1$ ,根据相关研究, $a$ 、 $b$  和  $c$  分别赋以 0.5、0.3、0.2 的权重值,由于盐碱地的生态脆弱性强,优势度更能代表其受干扰程度,因此, $a$ 、 $b$  和  $c$  分别赋以 0.3、0.2、0.5 的权重值<sup>[12,36]</sup>。

##### 2) 景观脆弱度指数

景观脆弱度指数( $F_i$ )表示受外部干扰导致的不同景

观类型所代表生态系统的易损性,采用专家打分法<sup>[8-9]</sup>,将研究区景观类型的脆弱性分为 9 级,从低到高依次为:交通运输用地、建设用地、林地、草地、园地、耕地、湿地、盐碱地、其他用地,通过归一化处理计算各景观类型的脆弱度指数  $F_i$ ,分别为 0.02、0.04、0.07、0.09、0.11、0.13、0.16、0.18 和 0.20。

3) 景观损失度指数

每一景观类型的景观损失度指数  $R_i$ ,可以表示为以下公式

$$R_i=S_i\cdot F_i$$
(2)

式中  $S_i$  是景观干扰度指数;  $F_i$  是景观脆弱度指数。

4) 生态风险指数

利用各景观类型的面积比例和景观损失度指数,建立景观结构和区域生态风险之间的联系,计算各生态风险小区的生态风险指数<sup>[8,37]</sup>

$$ERI_i=\sum_{i=1}^n\frac{A_i}{A}\cdot R_i$$
(3)

式中  $ERI_i$  是为景观生态风险指数;  $n$  为生态风险小区内景观类型的数量,  $A_i$  为第生态风险小区  $i$  类景观类型的面积;  $A$  为生态风险小区的总面积。

1.2.4 基于 InVEST 模型的碳储量服务模拟

利用 InVEST 模型中的碳储量模块对土地整理区的碳储量服务进行评估,所需要的数据包括:整理区土地整理前后的景观类型图,不同景观类型地上部分碳密度、地下部分碳密度、土壤碳密度和死亡有机碳的碳密度,碳密度数据通过查阅文献<sup>[38-41]</sup>获得(表 1)。通过模型模拟获得整理区土地整理前后的碳储量和碳储量变化,分析土地整理区的固碳功能变化。

表 1 碳密度参数  
Table 1 Carbon density index

景观类型 Landscape types	t·hm <sup>-2</sup>			
	地上部分碳 Aboveground carbon	地下部分碳 Belowground carbon	土壤碳 Soil carbon	死亡有机碳 Dead organic carbon
草地 Grassland	2.25	11.7	101.27	0.45
耕地 Cultivated land	3.59	0.68	90.56	0.72
交通用地 Traffic land	0.45	0.045	20.82	0
建设用地 Building land	0.83	0.083	43.71	0
林地 Forest land	57.48	16.09	151.10	5
其他用地 Other land	0	0	34.40	0
湿地 Wetland	4.5	0.67	87.47	0
盐碱地 Saline-alkali land	0	0	25.30	0
园地 Garden land	2	0.1	112.8	0.18

2 结果与分析

2.1 土地整理前后景观格局指数变化

大安市土地整理项目区各种景观类型的景观格局变化如表 2 所示,土地整理前后景观格局变化的总趋势是:耕地面积显著增加,盐碱地和草地面积显著减少,湿地面积减少,其他景观类型面积变化不大。土地整理后,耕地面积增加了 68 432.7 hm<sup>2</sup>,斑块数、破碎度和分离度减少,优势度增加,土地整理使得一些小斑块合并成大斑块,减少了耕地的破碎化程度。土地整理后,盐碱地和草地面积分别减少了 31 332.34 和 33 203.79 hm<sup>2</sup>,斑块数、破碎度和分离度增加,优势度减少,土地整理使得盐碱地和草地开发为耕地,分布特征由大片集中分布变为小块随机散落分布。土地整理后,湿地面积减少 3 718.1 hm<sup>2</sup>,斑块数和优势度减少,破碎度和分离度增加。

表 2 土地整理区景观格局指数  
Table 2 Landscape pattern index of land consolidation district

景观类型 Landscape types	面积 Area/hm <sup>2</sup>		斑块数 Patch number		破碎度 Fragmentation index/(个·hm <sup>-2</sup> )		分离度 Isolation index		优势度 Dominance index	
	整理前 Before land consolidation	整理后 After land consolidation	整理前 Before land consolidation	整理后 After land consolidation	整理前 Before land consolidation	整理后 After land consolidation	整理前 Before land consolidation	整理后 After land consolidation	整理前 Before land consolidation	整理后 After land consolidation
	Before land consolidation	After land consolidation	Before land consolidation	After land consolidation	Before land consolidation	After land consolidation	Before land consolidation	After land consolidation	Before land consolidation	After land consolidation
林地 Forest land	3 288.45	3 240.63	909	984	0.276	0.304	1.589	1.678	0.100	0.118
建设用地 Construction land	2 220.95	2 189.92	793	406	0.357	0.185	2.198	1.595	0.084	0.053
交通运输用地 Traffic land	325.91	230.56	288	294	0.884	1.275	9.027	12.892	0.028	0.032
耕地 Cultivated land	17 335.74	85 768.44	528	242	0.030	0.003	0.230	0.031	0.135	0.453
盐碱地 Saline-alkali land	39 714.61	8 382.27	382	469	0.010	0.056	0.085	0.448	0.233	0.090
湿地 Wetland	10 298.57	6 580.47	645	619	0.063	0.094	0.427	0.655	0.111	0.097
草地 Grassland	46 882.3	13 678.51	740	808	0.016	0.059	0.101	0.360	0.302	0.152
其他用地 Other land	96.97	96.82	42	40	0.433	0.413	11.585	11.324	0.004	0.005
园地 Garden land	33.11	29.00	10	10	0.302	0.345	16.556	18.903	0.001	0.001

土地整理后,林地、建设用地、交通运输用地、其他用地和园地面积变化不大,其中林地和交通运输用地斑块数、破碎度、分离度和优势度增加,建设用地斑块数、破碎度、分离度和优势度减少,其他用地的斑块数、破碎度和分离度减少,园地的破碎度和分离度增加。耕地、盐碱地、湿地和草地的优势度变化主要取决于面积变化,林地、建设用地和交通运输用地的变化主要取决于斑块数量变化。

2.2 土地整理前后的生态风险评价

土地整理区各景观类型的干扰度指数和损失度指数如表 3 所示,建设用地、其他用地和园地的干扰度指数最高,主要是因为建设用地、其他用地和园地的面积最少,分离度明显高于其他景观类型。土地整理后耕地、建设用地和其他用地的干扰度指数降低,主要是土地整理导致其破碎度和分离度降低所致,盐碱地、草地、林地、交通运输用地、湿地和园地的干扰度指数增加,主

要是土地整理导致其破碎度和分离度增加所致。利用干扰度指数和脆弱度指数计算景观损失度指数，土地整理后各景观类型的损失度指数的变化与干扰度指数变化一致。土地整理通过改变景观格局影响干扰度指数和损失度指数，土地整理后，耕地面积增加，破碎度和分离度的减少导致其干扰度指数和损失度指数的降低，盐碱地、草地和湿地面积减少，破碎度和分离度的增加导致其干扰度指数和损失度指数的增加，林地面积变化不大，破碎度和分离度的增加导致其干扰度指数和损失度指数的增加。

表 3 土地整理区景观生态风险指数  
Table 3 Landscape ecological risk index of land consolidation district

景观类型 Landscape types	干扰度指数 Disturbance index		损失度指数 Ecological loss index	
	整理前 Before land consolidation	整理后 After land consolidation	整理前 Before land consolidation	整理后 After land consolidation
	Before land consolidation	After land consolidation	Before land consolidation	After land consolidation
林地 Forest land	0.635	0.679	0.042	0.045
建设用地 Construction land	0.855	0.582	0.038	0.026
交通运输用地 Traffic land	3.155	4.511	0.070	0.100
耕地 Cultivated land	0.111	0.101	0.015	0.014
盐碱地 Saline-alkali land	0.137	0.152	0.024	0.027
湿地 Wetland	0.182	0.263	0.028	0.041
草地 Grass land	0.099	0.168	0.009	0.015
其他用地 Other land	3.693	3.605	0.739	0.721
园地 Garden land	5.118	5.844	0.569	0.649

利用公式（3），计算出各个生态风险小区的生态风险值（图 2），土地整理前各生态风险小区的生态风险范围为 0.014 5~0.098 6，整理区生态风险值总和为 5.57，土地整理后各生态风险小区的生态风险范围为 0.013 0~0.095 6，整理区生态风险值总和为 5.25，综合生态风险比整理前降低，各生态风险小区的生态风险变化在 -0.068 2~0.058 6 之间。生态风险值较高的小区景观类型分布以盐碱地分布为主，盐碱地面积比例越大，生态风险值越高，土地整理后盐碱地面积减少，耕地变为主要景观类型，生态风险值降低。

为了便于比较土地整理前后的生态风险的空间差异，按照等间距法的划分方法<sup>[37,42]</sup>将生态风险值划分为 5 个等级：0.01~0.02 低生态风险，>0.02~0.03 较低生态风险，>0.03~0.04 中生态风险，>0.04~0.05 较高生态风险，大于 0.05 为高生态风险，统计各等级风险区的面积（图 3）。结果表明，土地整理区生态风险等级以较低和中等生态风险为主，土地整理后较低和中等生态风险面积百分比分别减少了 8.87%、1.16%，低、较高和高生态风险面积百分比分别增加了 8.19%、1.32%和 0.51%。表明土地整理后整理区由于景观格局的改变导致部分地区的生态风险降低，生态环境有所改善，但是有部分地区生态风险增加。较高生态风险面积增加的小区景观变化主要是盐碱地减少、草地减少或草地和盐碱地共同减少，高生态风险面积增加的小区的景观变化主要是湿地面积减少、草地面积减少或湿地和草地面积共同减少，

导致较高和高生态风险面积增加的小区景观类型以耕地为主，但耕地的斑块数增加，使得其生态风险增加。

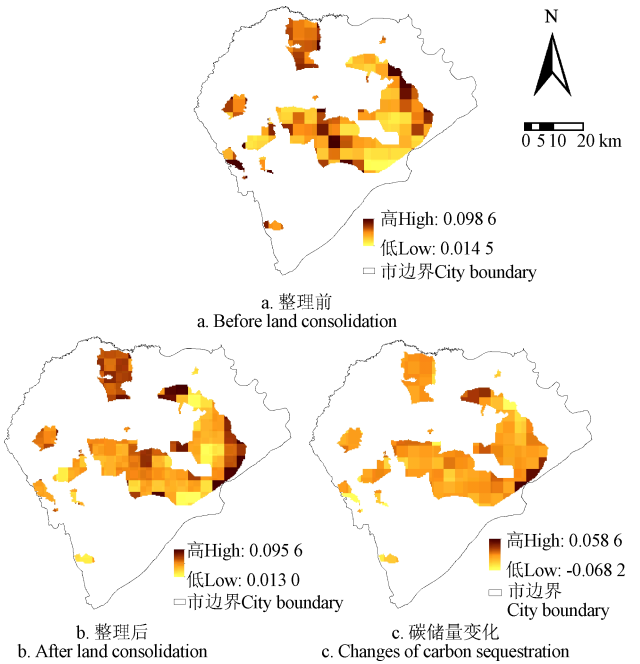


图 2 土地整理前后土地整理区各生态风险小区的生态风险  
Fig.2 Ecological risk of each ecological sub-area in land consolidation district before and after land consolidation

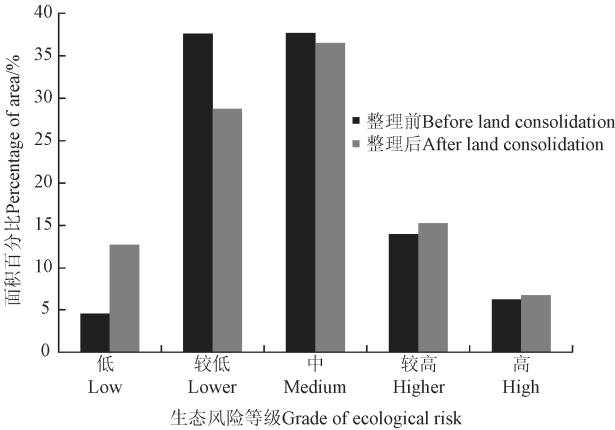


图 3 土地整理区的生态风险等级面积比例  
Fig.3 Area ratio of ecological risk grade of land consolidation district

2.3 土地整理前后碳储量变化

利用 InVEST 模型的碳储量模块模拟土地整理前后整理区的碳储量服务变化（图 4），结果表明，土地整理前的碳储量和碳密度分别为 990.82 万 t 和 82.43 t/hm<sup>2</sup>，土地整理后的碳储量和碳密度分别为 1 145.22 万 t 和 95.28 t/hm<sup>2</sup>，土地整理导致整理区的碳储量增加了 154.40 万 t，增幅达 15.58%，表明土地整理导致固碳功能的改善。总体上看，碳储量服务增加的区域分布在整理区的中部和东部，在土地整理前，这些地区集中分布着盐碱地景观类型。碳储量服务的变化主要受土地整理后景观类型化的影响，土地整理后耕地的碳储量增加，其他景观类型碳储量减少，虽然草地面积的减少导致碳储量减少，



但可通过耕地的大面积增加导致碳储量大幅增加而抵消, 碳储量服务的增加主要是由于盐碱地大面积开发为耕地, 导致整理区总碳储量增加。

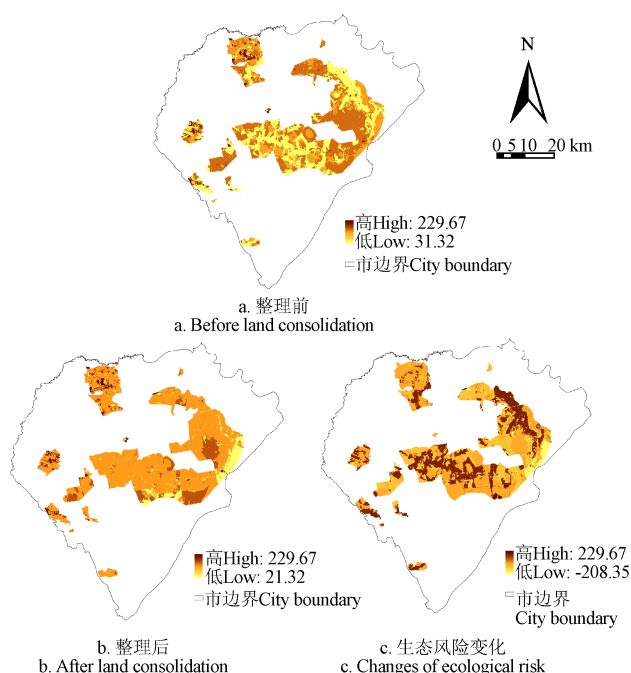


图4 土地整理前后土地整理区的碳储量

Fig.4 Carbon storage of land consolidation districts before and after land consolidation

## 2.4 碳储量变化和生态风险变化的关系

将整理区土地整理前后各生态风险小区的碳储量变化与生态风险变化进行相关性分析, 结果表明二者具有显著的相关关系, 决定系数为 0.747 ( $P < 0.01$ )。进一步回归分析表明生态风险变化和碳储量变化可用线性方程拟合 (图 5), 说明整理区碳储量服务变化与生态风险变化呈负相关关系, 随着生态风险的降低, 碳储量服务增加, 而随着生态风险增加则碳储量服务降低。

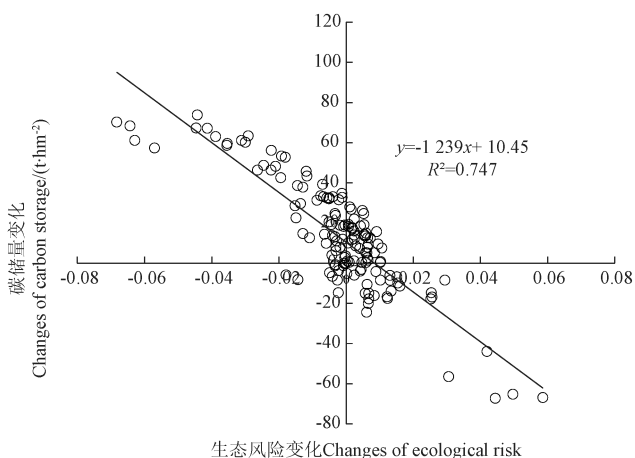


图5 土地整理前后土地整理区碳储量服务变化与生态风险变化的关系

Fig.5 Relationship between changes of carbon storage service and ecological risk in land consolidation district before and after land consolidation

图 5 的线性拟合结果表明, 土地整理引起的生态风险的增加直接表现为碳储量服务的下降, 生态风险的降低则表现为碳储量服务的增加, 可基于生态系统服务损失与不利服务进行表征区域土地整理的生态效应, 可利用生态系统服务功能变化来指示生态风险。

## 3 讨论

国内学者高宾等<sup>[8-9]</sup>、卿凤婷等<sup>[37]</sup>等基于损失度指数和景观类型的面积比例构建生态风险指数, 表明从景观格局角度来研究区域的生态风险变化是可行的、合理的。本研究利用空间采样方格划分生态风险小区, 利用景观损失度指数和景观面积比例计算生态风险指数, 也能较好地反映整理区土地整理前后的生态风险变化。但通过景观指数计算的生态风险指数只是反映了景观空间格局的变化, 没有考虑具体生态过程的影响。

土地利用变化对陆地生态系统的碳储量有着显著的影响, 关于土地利用对固碳功能的研究越来越受到重视, 现阶段的土地整理以增加耕地面积为目的, 明显改变了土地利用的格局变化, 对生态系统碳储量变化影响明显。土地整理的大部分区域都处理水土流失的不敏感区域, 并且整理区所获数据有限, 没有考虑整理后水土保持生态服务功能的变化<sup>[43]</sup>。此外, 由于土地整理区所获数据有限, 仅利用 InVEST 模型根据景观格局变化进行了碳储量服务变化的模拟, 对生态系统服务变化和生态风险变化之间的关系进行初步的探讨。目前国内外基于生态系统服务的生态风险研究并不多见, 可基于生态系统服务损失与不利服务进行表征生态风险。本研究通过生态风险变化和碳储量服务变化之间的相关性分析表明碳储量服务变化和生态风险变化具有显著的相关性, 表明生态系统服务在生态风险评价中应用, 弥补基于景观格局进行生态风险评价的不足。

## 4 结论

土地利用景观格局能够反映人类活动对生态环境的影响, 本文以吉林省大安市土地整理区为研究对象, 从景观格局角度来研究土地整理前后的生态风险变化, 并采用 InVEST 模型分析碳储量服务的变化, 得出以下结论:

1) 土地整理明显改变土地利用类型, 从景观类型格局变化来看, 大安市的土地整理以增加耕地数量为主。研究区土地整理前, 占优势的景观类型是盐碱地和草地, 而耕地受优势景观类型分割的影响, 分布比较零散。土地整理后, 大部分的草地和盐碱地转换为耕地, 形成了以耕地为主的景观格局, 耕地集中连片分布, 减少了破碎度和分离度。

2) 土地整理造成的景观格局的差异导致整理区景观生态风险的变化, 土地整理后耕地、建设用地和其他用地的景观损失度指数降低, 盐碱地、草地、林地、交通运输用地、湿地和园地景观类型的景观损失指数增加。土地整理区的生态风险以较低和中等风险为主, 土地整理后较低和中等生态风险面积降低, 低、较高和高生态风险面积增加。

3) 土地整理造成的景观格局的变化导致整理区碳储量服务的变化, InVEST 模拟结果表明, 整理区土地整理前后的土壤碳储量由 990.82 万 t 变为 1 145.22 万 t, 碳储量增加了 154.40 万 t, 表明土地整理导致固碳功能的改善, 碳储量服务的增加主要是由于盐碱地大面积开发为耕地, 导致整理区总碳储量增加。

4) 整理区碳储量服务变化与生态风险变化呈负相关关系, 随着生态风险的降低, 碳储量增加, 生态风险增加则碳储量降低, 可考虑将生态系统服务作为生态风险的评价方法。

#### 参 考 文 献

- [1] 罗明, 张惠远. 土地整理及其生态环境影响综述[J]. 资源科学, 2002, 24(2): 60—63.  
Luo Ming, Zhang Huiyuan. Land consolidation and its ecological and environmental impacts[J]. Resources Science, 2002, 24(2): 60—63. (in Chinese with English abstract)
- [2] Bonfanti P, Fregonese A, Sigura M. Landscape analysis in areas affected by land consolidation[J]. Landscape and Urban Planning, 1997, 37(1/2): 91—98.
- [3] 杨晓艳, 朱德举, 郎文聚, 等. 土地开发整理对区域景观格局的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 67—71.  
Yang Xiaoyan, Zhu Deju, Yun Wenju, et al. Analysis of the landscape spatial pattern influence caused by land development and consolidation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(9): 67—71. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘勇, 吴次芳, 岳文泽, 等. 土地整理项目区的景观格局及其生态效应[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2261—2269.  
Liu Yong, Wu Cifang, Yue Wenze, et al. Evaluation of ecological effect and landscape pattern in land consolidation project[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2261—2269. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘世梁, 杨珏婕, 安晨, 等. 基于景观连接度的土地整理生态效应评价[J]. 生态学报, 2012, 31(3): 689—695.  
Liu Shiliang, Yang Juejie, An Chen, et al. Ecological effect of land consolidation: An assessment based on landscape connectivity[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(3): 689—695. (in Chinese with English abstract)
- [6] 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.  
Wang Jun, Yan Shenchun, Bai Zhongke, et al. Review on landscape patterns of land consolidation and the ecological effects[J]. China Land Sciences, 2012, 26(9): 87—94. (in Chinese with English abstract)
- [7] 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.  
Li Xiehui, Li Jingyi. Analysis on regional landscape ecological risk based on GIS: A case study along the lower reaches of the Weihe River[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(6): 899—903. (in Chinese with English abstract)
- [8] 高宾, 李小玉, 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.  
Gao Bin, Li Xiaoyu, Li Zhigang, et al. Assessment of ecological risk of coastal economic developing zone in Jinzhou Bay based on landscape pattern[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(12): 3441—3450. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张学斌, 石培基, 罗君, 等. 基于景观格局的干旱内陆河流域生态风险分析——以石羊河流域为例[J]. 自然资源学报, 2014, 29: 410—419.  
Zhang Xuebin, Shi Peiji, Luo Jun, et al. The ecological risk assessment of arid inland river basin at the landscape scale: A case study on Shiyang River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29: 410—419. (in Chinese with English abstract)
- [10] 曾永年, 靳文甦, 王慧敏, 等. 青海高原东部土地利用变化模拟与景观生态风险评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 185—194.  
Zeng Yongnian, Jin Wenping, Wang Huimin, et al. Simulation of land-use changes and landscape ecological assessment in eastern part of Qinghai Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(4): 185—194. (in Chinese with English abstract)
- [11] 喻光明, 胡秀丽, 张敏, 等. 土地整理的生态风险评价[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(6): 83—88.  
Yu Guangming, Hu Xiuli, Zhang Min, et al. On the ecological risks assessment of the land-use rectification and reconstruction[J]. Journal of Safety and Environment, 2007, 7(6): 83—88. (in Chinese with English abstract)
- [12] 艾建超, 赵力, 程龙飞, 等. 土地整理进程中镇赉项目区景观格局变化及生态风险[J]. 东北师大学报: 自然科学版, 2013, 45(2): 146—152.  
Ai Jianchao, Zhao Li, Cheng Longfei, et al. A study on landscape pattern change and ecological risk of Zhenlai land consolidation project[J]. Journal of Northeast Normal University: Natural Science Edition, 2013, 45(2): 146—152. (in Chinese with English abstract)
- [13] 邓静, 张贞, 陈晨, 等. 农村居民点整理影响下的景观格局及其生态效应研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(5): 157—163.  
Deng Jing, Zhang Zhen, Chen Chen, et al. Research for landscape pattern and ecological effects under the influence of rural residential land consolidation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(5): 157—163. (in Chinese with English abstract)
- [14] Costanza R, Arge R, Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 386: 253—260.
- [15] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. 生态学报, 1999, 19(5): 607—613.  
Ouyang Zhiyun, Wang Xiaoke, Miao Hong. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(5): 607—613. (in Chinese with English abstract)
- [16] 汤洁, 黄璐思, 王博. 吉林省辽河流域生态系统服务价值对 LUCC 的响应分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(8): 2633—2640.  
Tang Jie, Huang Lusi, Wang Bo. Analysis of ecosystem service value based on LUCC of Liao River Basin of Jilin Province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(8): 2633—2640. (in Chinese with English abstract)
- [17] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243—1254.  
Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243—1254. (in Chinese with English abstract)
- [18] 田华文, 孟庆香, 曲晨晓, 等. 土地整理对区域生态系统服务价值的影响分析[J]. 水土保持研究, 2008, 15(6): 167—169.

- Tian Huawen, Meng Qingxiang, Qu Chenxiao, et al. Impact of regional ecosystem service value on land consolidation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(6): 167—169. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张正峰. 土地整理中的生态服务价值损益估算[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 69—72.
- Zhang Zhengfeng. Estimation of gains and losses of ecosystem services value with land consolidation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2008, 24(9): 69—72. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张贞, 高金权, 杨威, 等. 土地整理工程影响下农业生态系统服务价值的变化[J]. 应用生态学报, 2010, 21(3): 723—733.
- Zhang Zhen, Gao Jinquan, Yang Wei, et al. Changes of agroecosystem services value under effects of land consolidation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(3): 723—733. (in Chinese with English abstract)
- [21] Cao S J, Li C, Cao S H, et al. Change in ecosystem service value arising from land consolidation planning in Anhui province[J]. Asian Agricultural Research, 2013, 5(1): 13—16.
- [22] 康鹏, 陈卫平, 王美娥. 基于生态系统服务的生态风险评价研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(5): 1192—1203.
- Kang Peng, Chen Weiping, Wang Meier. Advances in ecosystem service-based ecological risk assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(5): 1192—1203. (in Chinese with English abstract)
- [23] 彭建, 党威雄, 刘焱序, 等. 景观生态风险评价研究进展与展望[J]. 地理学报, 2015, 70(4): 664—677.
- Peng Jian, Dang Weixiong, Liu Yanxu, et al. Review on landscape ecological risk assessment[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(4): 664—677. (in Chinese with English abstract)
- [24] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009, 7(1): 4—11.
- [25] Polasky S, Nelson E, Pennington D, et al. The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: A case study in the state of Minnesota[J]. Environmental and Resource Economics, 2010, 48: 219—242.
- [26] Leh M D K, Matlock M D, Cummings E C, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 165: 6—18.
- [27] Li X W, Li M D, Dong S K, et al. Temporal-spatial changes in ecosystem services and implications for the conservation of alpine rangelands on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. The Rangeland Journal, 2015, 37: 31—43.
- [28] 杨芝歌, 周彬, 余新晓, 等. 北京山区生物多样性分析与碳储量评估[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 42—46.
- Yang Zhige, Zhou Bin, Yu Xinxiao, et al. Biodiversity analysis and carbon storage assessments in Beijing mountainous areas[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(3): 42—46. (in Chinese with English abstract)
- [29] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 等. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 726—736.
- Li Yifeng, Luo Yaochu, Liu Gang, et al. Effects of Land Use change on ecosystem services: A case study in Miyun reservoir watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3): 726—736. (in Chinese with English abstract)
- [30] 张文华, 贾志斌, 卓义, 等. InVEST 模型对锡林郭勒草原碳储量研究的适用性分析[J]. 地球环境学报, 2016, 7(1): 87—96.
- Zhang Wenhua, Jia Zhibin, Zhuo Yi, et al. Applicability research on carbon storage in the Xilin Gol Grassland by InVEST Model[J]. Journal of Earth Environment, 2016, 7(1): 87—96. (in Chinese with English abstract)
- [31] 顿耀龙, 王军, 白中科, 等. 松嫩平原西部土地整理区景观格局指数的粒度效应研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(5): 65—70.
- Dun Yaolong, Wang Jun, Bai Zhongke, et al. Grain effect of landscape pattern index of land consolidation area in the west of Songnen Plain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(5): 65—70. (in Chinese with English abstract)
- [32] 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, 28(8): 57—64.
- Dun Yaolong, Wang Jun, Guo Yiqiang, et al. Sustainability evaluation of land consolidation of Da'an City based on AHP-FCE model[J]. China Land Sciences, 2014, 28(8): 57—64. (in Chinese with English abstract)
- [33] 王军, 严慎纯, 余莉, 等. 土地整理的生态系统服务价值评估与生态设计策略——以吉林省大安市土地整理项目为例[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1093—1099.
- Wang Jun, Yan Shenchun, Yu Li, et al. Evaluation of ecosystem service value and strategies for ecological design in land consolidation: A case of land consolidation project in Da'an City, Jilin Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(4): 1093—1099. (in Chinese with English abstract)
- [34] 吴会胜, 刘兆礼. 基于影像光谱特征分析的盐碱地遥感制图研究——以吉林省大安市为例[J]. 农业系统科学与综合研究, 2007, 23(2): 178—183.
- Wu Huisheng, Liu Zhaoli. Remote sensing and mapping of saline sodic land based on spectral characteristics for Da'an City[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2007, 23(2): 178—183. (in Chinese with English abstract)
- [35] 韩振华, 李建东, 殷红, 等. 基于景观格局的辽河三角洲湿地生态安全分析[J]. 生态环境学报, 2010, 19(3): 701—705.
- Han Zhenhua, Li Jiangdong, Yin Hong, et al. Analysis of ecological security of wetland in Liaohe River delta based on the landscape pattern[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(3): 701—705. (in Chinese with English abstract)
- [36] 李晓燕, 张树文. 基于景观结构的吉林西部生态安全动态分析[J]. 干旱区研究, 2005, 22(1): 57—62.
- Li Xiaoyan, Zhang Shuwen. Analysis on the dynamic trend of ecological security in the West Part of Jilin Province, China based on the landscape structure[J]. Arid Zone Research, 2005, 22(1): 57—62. (in Chinese with English abstract)
- [37] 卿凤婷, 彭羽. 基于景观结构的北京市顺义区生态风险时空特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1585—1593.
- Qing Fengting, Peng Yu. Temporal and spatial characteristics of ecological risk in Shunyi, Beijing, China based on landscape structure[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5): 1585—1593. (in Chinese with English abstract)
- [38] 黄玫, 季劲钧, 曹明奎, 等. 中国区域植被地上与地下生物量模拟[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4156—4163.
- Huang Mei, Ji Jinjun, Cao Mingui, et al. Moedling study of vegetation shoot and root biomass in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 4156—4163. (in Chinese with English abstract)
- [39] 汤洁, 毛子龙, 韩维峥, 等. 土地利用/覆被变化对土地生

- 态系统有机碳库的影响: 以吉林省通榆县为例[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 2008—2013.
- Tang Jie, Mao Zilong, Han Weizheng, et al. Impact of land use/cover changes on the organic carbon storage of land ecosystem: A case study in Tongyu county, Jilin province[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(5): 2008—2013. (in Chinese with English abstract)
- [40] 汤洁, 张楠, 李昭阳, 等. 吉林西部不同土地利用类型的土壤有机碳垂直分布和碳密度[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(4): 1151—1156.
- Tang Jie, Zhang Nan, Li Zhaoyang, et al. Vertical distribution of soil organic carbon and carbon density under different land use types in Western Jilin Province[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(4): 1151—1156. (in Chinese with English abstract)
- [41] 奚小环, 杨忠芳, 崔玉军, 等. 东北平原土壤有机碳分布与变化趋势研究[J]. 地学前沿, 2010, 17(3): 213—221.
- Xi Xiaohuan, Yang Zhongfang, Cui Yujun, et al. A study of soil carbon distribution and change in Northeast Plain[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(3): 213—221. (in Chinese with English abstract)
- [42] 胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 等. 流域景观结构的城市化影响与生态风险评价[J]. 生态学报, 2011, 31: 3432—3440.
- Hu Hebing, Liu Hongyu, Hao Jingfeng, et al. The urbanization effects on watershed landscape structure and their ecological risk assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31: 3432—3440. (in Chinese with English abstract)
- [43] 李志伟, 吴绍洪, 赵东升. 吉林省水土流失敏感性分区研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(15): 6488—6489, 6498.
- Li Zhiwei, Wu Shaohong, Zhao Dongsheng. Study on sensitive division of soil and water loss in Jilin Province[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(15): 6488—6489, 6498. (in Chinese with English abstract)

## Assessment of risk and carbon sequestration function of land consolidation based on landscape pattern

Dong Yuhong<sup>1</sup>, Liu Shiliang<sup>2\*</sup>, Wang Jun<sup>3</sup>, Hou Xiaoyun<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of State Forestry Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Key Laboratory of Land Consolidation of Land and Resources Ministry, Beijing 100812, China)

**Abstract:** Land consolidation has been regarded as an important measure to realize quantity equilibrium of cultivated land. However, the ecological environmental problem of land consolidation has received widespread concern. There may exist some ecological risks under the consolidation of the western fragile area. The objective of this paper was to evaluate the effect of land consolidation on ecological risk and carbon sequestration function by construction of ecological risk index and simulation of carbon storage services. Due to the lack of ecosystem services in ecological risk study, by analyzing the relationship between changes of ecological risk and carbon storage services in the consolidation district before and after land consolidation, the possibility of the application of ecosystem services in ecological risk assessment was discussed. Taking the great land consolidation area in western Jinlin Province as the study area, ecological risk and carbon storage services of land consolidation were assessed based on landscape pattern change. Based on 1:10 000 current landuse map (in 2008) before land consolidation and 1:10 000 land consolidation map (in 2014), the ecological risks were assessed based on landscape loss index and area ratio of landscape type, and the changes of carbon storage services were analyzed with the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs (InVEST) model. The results showed that land consolidation resulted in great change of landscape pattern, the dominant landscape types changed from saline-alkali land and grassland to cultivated land. The fragmentation index and isolation index of cultivated land decreased, while that of saline-alkali land and grassland increased. After land consolidation, the ecological loss degree of cultivated land, construction land and other land decreased, while that of other landscape types presented an increasing trend. By re-sample in the district, the ecological risk of each ecological risk sub-area was calculated. The integrated ecological risk of the land consolidation district changed from 5.57 to 5.25. After land consolidation, the ecological risk of the consolidation district decreased. According to the scope of ecological risk, 5 ecological risk grades were separated with the equal interval method. If ecological risk was less than 0.01-0.02, the ecological risk grade was low; if ecological risk was 0.02-0.03, the ecological risk grade was lower; if ecological risk was >0.03-0.04, the ecological risk grade was medium; if ecological risk was >0.04-0.05, the ecological risk grade was higher; and if ecological risk was over 0.05, the ecological risk grade was high. The ecological risk grades of the land consolidation district were mainly lower and medium. After land consolidation, the percentage of the areas with the lower and medium risk grade deceased by 8.87% and 1.16%, respectively, and that of low, higher and high grade increased by 8.19%, 1.32% and 0.51%, respectively. The simulation results of InVEST model showed that the carbon storage in the consolidation district before and after land consolidation was 990.82 and 1 145.22 million ton, respectively, and carbon storage increased by 154.40 million ton after land consolidation. Land consolidation led to an increase in carbon sequestration function. The relationship analysis showed that the change of carbon storage service in the consolidation area was significantly negatively correlated with the change of ecological risk; with the decrease of ecological risk, the carbon storage increased, and the carbon storage decreased with the increase of ecological risk. It is suggested that the ecosystem service change is possible to be applied in ecological risk assessment.

**Keywords:** consolidation; ecology; risk assessment; InVEST model; carbon sequestration function