

# 复垦矿区土地利用类型变化对植被碳储量的影响\*

吴国伟 赵艳玲 付艳华 倪巍 张艳 余建新

(中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所 北京 100083)

**摘要** 分析气候变化和人为因素对煤矿区生态环境的影响,可为复垦矿区的生态效益评价提供重要指导作用。本文以济宁某矿区为例,采用改进的CASA(Carnegie Ames Stanford Approach, CASA)模型估算矿区的碳储量,然后将碳储量作为衡量气候变化、采矿活动和土地复垦对矿区生态环境损失的指标,通过该指标实现气候变化、采矿活动和土地复垦的可比性。结果表明:1)研究区碳储量以2003年为节点,1987—2003年呈增长趋势,2003—2010年呈衰减趋势,2010—2014年呈增长趋势;2003年碳储量最高,为4 645.738 t,2014年碳储量为3 764.621 t;2)矿区植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)的变化是气候因素和人为因素共同作用的结果,气候变化对碳密度的扰动范围为2.832~9.465 g·m<sup>-2</sup>,采矿活动对碳密度的扰动范围为9.897~13.435 g·m<sup>-2</sup>,采矿活动和土地复垦共同作用对碳密度的扰动范围为11.132~12.839 g·m<sup>-2</sup>,人为因素对碳密度的扰动大于气候因素;3)采煤活动破坏了矿区的耕地和生态环境,碳储量大量流失,1987—1995年碳损失量为30.503 t,1995—2003年碳损失量为38.963 t,2003—2014年碳损失量为189.709 t;4)矿区碳储量受采矿活动影响较明显,但土地复垦可以有效恢复部分流失的碳量,矿区碳损失量最大恢复4.731%,一定程度上抑制采煤活动对矿区生态的破坏。因此,土地复垦可以缓解采矿造成的生态破坏,提高土地的生产力。

**关键词** 煤矿区 气候变化 采矿活动 土地复垦 植被碳储量

**中图分类号:** TD88 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2015)11-1437-08

## Impact of reclamation-driven land use change on vegetation carbon store in mining areas\*

WU Guowei, ZHAO Yanling, FU Yanhua, NI Wei, ZHANG Yan, YU Jianxin

(Institute of Land Reclamation and Ecological Restoration, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract** Mining activities and climate change severely impact eco-environment of the mining areas. However, land reclamation effectively reclaimed the mining area and restored the environment. It is important for ecological benefit evaluation in restoration of mining area to analyze the effect of climate change and human factors on ecological environment of mining areas. The researches concerning carbon storage of soil and vegetation in the mining area have gained a lot of results and provide us an effective tool for further evaluating the effect of climate and human activity on environment in the areas. In this study, we estimated vegetation carbon storage using a modified CASA (Carnegie Ames Stanford Approach, CASA) model in Ji'ning where the environment had been highly disturbed by mining and reclamation activities. Then Chikug' model was used to evaluate the effects of both climate change on carbon storage of the mining area. The results suggested that: 1) with year 2003 as a key point, the carbon storage in the research area increased from 1987 to 2003, and then decreased till 2010, and increased again during 2010—2014. The carbon storage of the study area in 2003 was the highest point (4 645.738 t) during the study period, and in 2010 was the lowest point (3 687.741 t). 2) The net primary productivity (NPP) of vegetation in the mining area was changed by comprehensive effect of both climate and human activity. The range of disturbance of

\* 国家自然科学基金项目(41371502)和教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0964)资助

吴国伟,主要从事遥感与GIS科学及其应用、土地复垦与生态重建方面的研究。E-mail: guowei.wu@foxmail.com

收稿日期:2015-05-04 接受日期:2015-08-03

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China (41371502) and the New Century Excellent Talents in University (No. NCET-12-0964)

Corresponding author, WU Guowei, E-mail: guowei.wu@foxmail.com

Received May 4, 2015; accepted Aug. 3, 2015

climate change on carbon density was 2.832–9.465  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ , the range of disturbance of mining activities on carbon density was 9.897–13.435  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ , and the range of disturbance of combined mining activities and land reclamation on carbon density was 11.132–12.839  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ . The amplitude of carbon density was 2.832–9.465  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  influenced by climate change, 9.897–13.435  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  influenced by mining activities, and 11.132–12.839  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  influenced by combined effect of coal mining and mining land restoration. Although the change of carbon density in the mining area was influenced by both climate change and anthropic factors, the influence of anthropic activity was stronger than climate change on the change of carbon density. 3) Coal mining destroyed cultivated lands and ecological environment, which led to a severe loss of carbon store. The carbon storage loss was 30.503 t in 1987–1995, 38.963 t in 1995–2003, and 189.709 t in 2003–2014. 4) Coal mining activity obviously increased the loss of vegetation carbon storage in this area, but land reclamation recovered the loss, and the maximum recovery was 4.731%. This, to a certain extent, alleviated the destruction of ecological environment due to coal mining activities. Therefore, land reclamation was a powerful strategy for alleviating ecological damage due to mining activities, and improving soil productivity.

**Keywords** Coal mining area; Climate change; Coal mining activity; Land reclamation; Vegetation carbon store

据估算, 1989—2010 年因煤矿开采损毁的土地面积达  $100.01 \times 10^4 \text{ hm}^2$ <sup>[1]</sup>, 导致矿区生态环境受到严重破坏。土地复垦作为恢复土地利用和补充耕地的有效措施<sup>[2]</sup>, 已得到社会的广泛关注。近年来, 国际上已有学者在复垦矿区的碳汇变化方面做了诸多研究。Ussiri 等<sup>[3]</sup>、Stahl 等<sup>[4]</sup>、Amichev 等<sup>[5]</sup>和 Jacinthe 等<sup>[6]</sup>分别研究了美国俄亥俄州、怀俄明州、中西部阿巴拉契亚、印第安纳煤矿区复垦土壤的碳汇, 包括土壤碳库、碳通量计算以及不同复垦管理模式下碳汇的变化; Asensio 等<sup>[7]</sup>研究了矿区不同部分土壤复垦方法对碳汇的影响。国内研究也取得了一定进展, 余建<sup>[8]</sup>以徐州市柳新镇煤矿区为例, 研究了高潜水位矿区不同复垦及利用方式的土壤有机碳、无机碳的构成与变化特征; 张召等<sup>[9]</sup>通过遥感影像解译和各土地利用类型的经验值, 对平朔露天矿区 1976—2009 年 33 年期间的土地利用类型与碳汇量变化进行了研究。矿区土地复垦的重要内容是土壤重构, 但其最终目的是提高土地生产力, 恢复矿区的生态平衡<sup>[10]</sup>。而以上学者多是从复垦土壤碳汇的角度开展研究, 对复垦矿区的植被碳储量的分析却很少。植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)是绿色植物进行光合作用时单位时间和单位面积上产生的有机干物质总量<sup>[11]</sup>, 能直接反映生态系统中植被物质交换和能量流动<sup>[12]</sup>, 被认为是最好的生态信息指标。

基于以上研究的基础, 本文以山东省济宁市某一煤矿区为研究区, 采用改进的 CASA(Carnegie Ames Stanford Approach, CASA)模型<sup>[13]</sup>估算 1987 年、1995 年、2003 年、2010 年、2014 年共计 5 年的矿区 NPP, 进而分析土地复垦对该区域生态系统植被碳储量的影响。同时, 也为矿区生态修复和环境治理评价提供一种新方法、新思路。

## 1 研究区概况与数据来源

研究区位于山东省济宁市中部, 地跨山东省邹城市、兖州区和曲阜市, 面积  $258 \text{ km}^2$ , 是国家重点建设的鲁西能源基地的核心区域之一。研究区地下水位多在 1~4 m, 属于典型的高潜水位煤-粮复合区<sup>[14-15]</sup>(图 1)。研究区内农作物以小麦、玉米为主, 大豆等其他作物为辅, 零星分布少量的人工杨树林。该研究区从 1973 年开始采煤, 1999 年开始土地复垦工作, 主要将损毁土地复垦成耕地, 截至 2014 年共复垦面积  $858.96 \text{ hm}^2$ 。目前, 复垦区上的作物长势良好, 小麦和玉米的平均产量均达  $8\ 250 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  以上。

研究数据选择冬小麦生长量最大、干物质积累增长最快的拔节期(3、4 月份), 即 1987 年 4 月 28 日、1995 年 3 月 17 日、2003 年 4 月 16 日的 Landsat5 TM 数据和 2010 年 4 月 22 日、2014 年 4 月 14 日的 Landsat7 ETM 数据, 空间分辨率为 30 m。影像数据进行波段修复、辐射校正和大气校正等预处理, 然后进行土地植被覆盖类型的监督分类。根据研究区的土地利用情况, 将土地植被覆盖分为水体、农业用地、建设用地和未利用土地, 如表 1 所示。

气象数据来源于济宁市气象科技服务中心, 数据内容为位于兖州区、邹城市、曲阜市和任城区 4 个气象站 1987 年、1995 年、2003 年、2010 年、2014 年的月平均降水量、月平均气温和总太阳辐射, 以及 4 个气象站的地理坐标。利用 Kriging 插值法对以上气象数据插值, 获取空间分辨率为 30 m、投影与遥感影像一致的栅格图, 并分别与遥感影像相匹配。

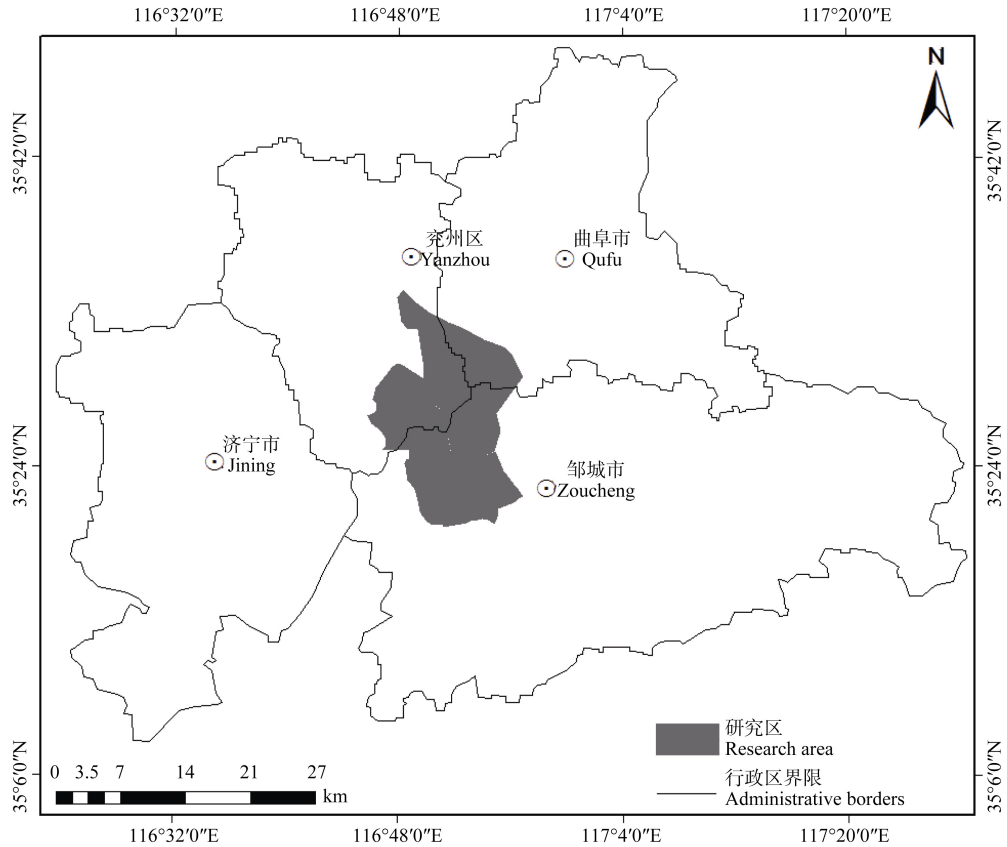


图 1 研究区地理位置示意图  
Fig. 1 Location of the research area

表 1 研究区不同年份土地覆盖类型的面积  
Table 1 Areas of different land cover types in different years in the study area

年份 Year	面积 Area (hm <sup>2</sup> )				Kappa 系数 Kappa coefficient	总体分类精度 Overall classification accuracy (%)
	水域 Water area	建设用地 Construction land	未利用土地 Unutilized land	农业用地 Agricultural land		
1987	73.53	4 559.11	5 342.33	14 513.58	0.95	96.35
1995	504.54	4 107.60	5 265.53	14 610.88	0.99	99.55
2003	755.21	4 213.36	5 261.14	14 658.84	0.93	94.58
2010	2 288.33	4 949.67	4 961.06	12 589.49	0.97	97.91
2014	3 256.86	6 302.90	5 479.84	10 048.95	0.99	99.27

## 2 研究方法

徐占军等<sup>[16]</sup>研究了气候变化和采矿活动因素对徐州九里矿区碳储量的影响。针对复垦矿区, 土地复垦对矿区的碳储量变化也不容忽视。因此本文假设影响该研究区碳储量的扰动因素为气候因素和人为因素, 其中人为因素主要包括采矿活动和土地复垦。

### 2.1 矿区生态碳储量的估算

NPP 估算采用改进的 CASA 模型, 该模型结合遥感影像数据, 以温度、降水、太阳辐射等作为影响因子, 由植被吸收光合有效辐射(absorbed photosynthetically active radiation, APAR)和光能利

用率( $\epsilon$ )表示, 其表示方式如下:

$$NPP_{(x,t)} = APAR_{(x,t)} \times \epsilon_{(x,t)} \quad (1)$$

式中:  $APAR_{(x,t)}$  表示像元  $x$  处在  $t$  时间的的光合有效辐射量,  $MJ \cdot m^{-2}$ ;  $\epsilon_{(x,t)}$  表示像元  $x$  处在  $t$  时间的的光能利用率,  $g \cdot MJ^{-1}$ 。

而 APAR 受太阳总辐射和植被类型的影响, 如式(2)所示;  $\epsilon$  受水分和温度胁迫的影响, 如式(3)所示。

$$APAR(x,t) = SOL(x,t) \times 0.5 \times FPAR(x,t) \quad (2)$$

$$\epsilon_{(x,t)} = T_{\epsilon 1(x,t)} \times T_{\epsilon 2(x,t)} \times W_{\epsilon(x,t)} \times \epsilon_{max} \quad (3)$$

式中:  $SOL(x,t)$  表示像元  $x$  处在  $t$  时间的太阳总辐射量,  $MJ \cdot m^{-2}$ ;  $FPAR(x,t)$  表示像元  $x$  处在  $t$  时间的的植被光合有效辐射的吸收比例; 常数 0.5 表示植被利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例;  $T_{\epsilon 1(x,t)}$  和  $T_{\epsilon 2(x,t)}$

分别表示低温和高温对光能利用率的胁迫因子;  $W_{e(x,t)}$  表示水分胁迫因子, 反映水分条件的影响;  $\varepsilon_{\max}$  表示理想条件的最大光能利用率<sup>[12]</sup>。

由于植被净初级生产力表示植被通过光合作用产生有机质的同化量, 因此 NPP 转化成植被碳含量时必须乘以有机质中碳含量的比重, 即含碳率。国内外诸多学者计算植被碳含量时含碳率多取 0.45<sup>[17]</sup>, 因此本文同样采用 0.45 计算。

$$W_{(x,t)} = 0.45 \times \text{NPP}_{(x,t)} \quad (4)$$

式中:  $W_{(x,t)}$  表示像元  $x$  处在  $t$  时间含碳量,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $\text{NPP}_{(x,t)}$  表示像元  $x$  处在  $t$  时间 NPP 值,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

## 2.2 气候因素对矿区碳储量影响的估算

由于 Chikug 模型<sup>[18]</sup>计算 NPP 时只考虑植被的气候因子, 因此该模型可用于估算气候变化对矿区碳储量的影响值, 即潜在 NPP:

$$\text{NPP}_{(x,t)} = 0.29 \times e^{-0.216 \times \text{RDI}_{(x,t)}} \times R_{n(x,t)} \times 0.45 \times 0.0917 \quad (5)$$

$$\text{RDI}_{(x,t)} = R_{n(x,t)} / (L \times P_{(x,t)}) \quad (6)$$

式中:  $\text{RDI}_{(x,t)}$  表示像元  $x$  处在  $t$  时间的月平均辐射干燥度;  $R_{n(x,t)}$  表示像元  $x$  处在  $t$  时间的月平均净辐射值,  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $P_{(x,t)}$  表示像元  $x$  处在  $t$  时间的月平均降水量,  $\text{mm}$ ;  $L$  表示蒸发潜热, 其值取  $2.5 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

将计算的潜在 NPP 代入式(4), 即可估算气候变化对矿区碳储量的影响值。

## 2.3 人为因素对矿区碳储量影响的估算

人为因素, 即忽略温度、降水、太阳辐射等气候变化对 NPP 影响的其他因素。因此估算人为因素影响的矿区碳储量值  $W''_{(x,t)}$ , 只需计算气候变化影响的矿区碳储量  $W'_{(x,t)}$  和矿区实际生态碳储量  $W_{(x,t)}$  即可:

$$W''_{(x,t)} = W_{(x,t)} - W'_{(x,t)} \quad (7)$$

式中:  $W''_{(x,t)}$  表示像元  $x$  处在  $t$  时间人为因素影响的碳储量值,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $W_{(x,t)}$  表示像元  $x$  处在  $t$  时间矿区实际碳储量,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 见公式(1)、(4);  $W'_{(x,t)}$  表示像元  $x$  处在  $t$  时间因气候变化影响的碳储量值,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 见公式(4)、(5)。

# 3 结果与分析

## 3.1 矿区生态碳储量分析

采用改进的 CASA 模型估算该研究区实际的 NPP, 估算结果如图 2 所示。根据图 2 对研究区 5 年的实际 NPP 变化进行空间分析, 发现矿区的实际 NPP 以 2003 年为节点, 1987—2003 年矿区的实际 NPP 呈增长趋势; 2003—2010 年呈衰减趋势; 2010—2014 年较 2003—2010 年呈增长趋势, 但整体上仍然呈衰减趋势。实际 NPP 平均值的波动范围 1987—

1995 年为  $34.708 \sim 37.645 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ , 1995—2003 年为  $37.645 \sim 42.364 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ , 2003—2010 年为  $33.584 \sim 42.364 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ , 2010—2014 年为  $33.584 \sim 38.884 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ 。

随后将矿区实际 NPP 转化成碳储量(表 2), 随着时间的推移, 水域的碳储量逐年增加, 建设用地和未利用土地的碳储量总体呈增长趋势, 但在 2010 年波动明显; 而农业用地的碳储量先增加后减少, 在 2003 年时达到最大值。进一步分析 1987—2014 年研究区总碳储量的年平均变化量, 如图 3 所示, 1987—2003 年碳储量逐年增长; 2003—2010 年, 碳储量年平均变化量为  $-136.86 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ , 呈递减趋势; 2010—2014 年, 矿区碳储量逐渐增长。

## 3.2 气候因素对矿区碳储量的影响

利用 ENVI 软件中的波段运算, 将插值得到的月平均太阳总辐射和月平均降水量的栅格图代入公式(5)、(6), 计算得到该研究区潜在 NPP, 然后计算其碳密度和碳储量, 结果如表 2 所示。

随后利用 SPSS 软件, 将计算得到的矿区碳储量与月平均降水量、月平均温度进行相关性分析, 发现潜在碳储量变化与降水量呈正相关( $r=0.761$ ,  $P=0.01$ ), 与温度的相关性不大( $r=0.486$ ,  $P=0.40$ ), 表明该研究区 4 月份的碳储量主要受降水量的影响, 与平均温度关系不密切。2003 年 4 月份降水量为  $83.4 \text{ mm}$ , 是其余年份 4 月时降水量的 3~6 倍, 而 2003 年的碳储量(表 3)也相应比其他年份高, 说明降水是影响该研究区碳储量变化的主要因素。研究时间内, 研究区碳密度的扰动范围为  $2.832 \sim 9.465 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。从地理学角度分析, 该研究区属暖温带季风气候, 春季易旱多风, 因此充足的降水有利于植被的生长。

## 3.3 人为因素对矿区碳储量的影响分析

由于该矿区为高潜水位地区, 采矿活动导致大部分损毁土地转化为水域, 土地复垦使大部分水域转化成耕地和鱼塘, 所以结合采掘工程平面图和遥感影像图, 统计出研究区因采矿活动和土地复垦导致地类变化的面积见表 4。

通过对矿区生态碳储量和气候因素对矿区碳储量影响分析中可以看出, 矿区生态碳密度扰动范围 1987—1995 年为  $15.619 \sim 16.940 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 1995—2003 年为  $16.940 \sim 19.064 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 2003—2010 年为  $15.112 \sim 19.064 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 2010—2014 年为  $15.112 \sim 17.498 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。结合气候因素对矿区碳密度扰动范围(见表 2)可计算出, 人为因素导致矿区碳密度扰动范围 1987—1995 年为  $10.338 \sim 13.435 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 1995—2003 年为  $9.897 \sim$

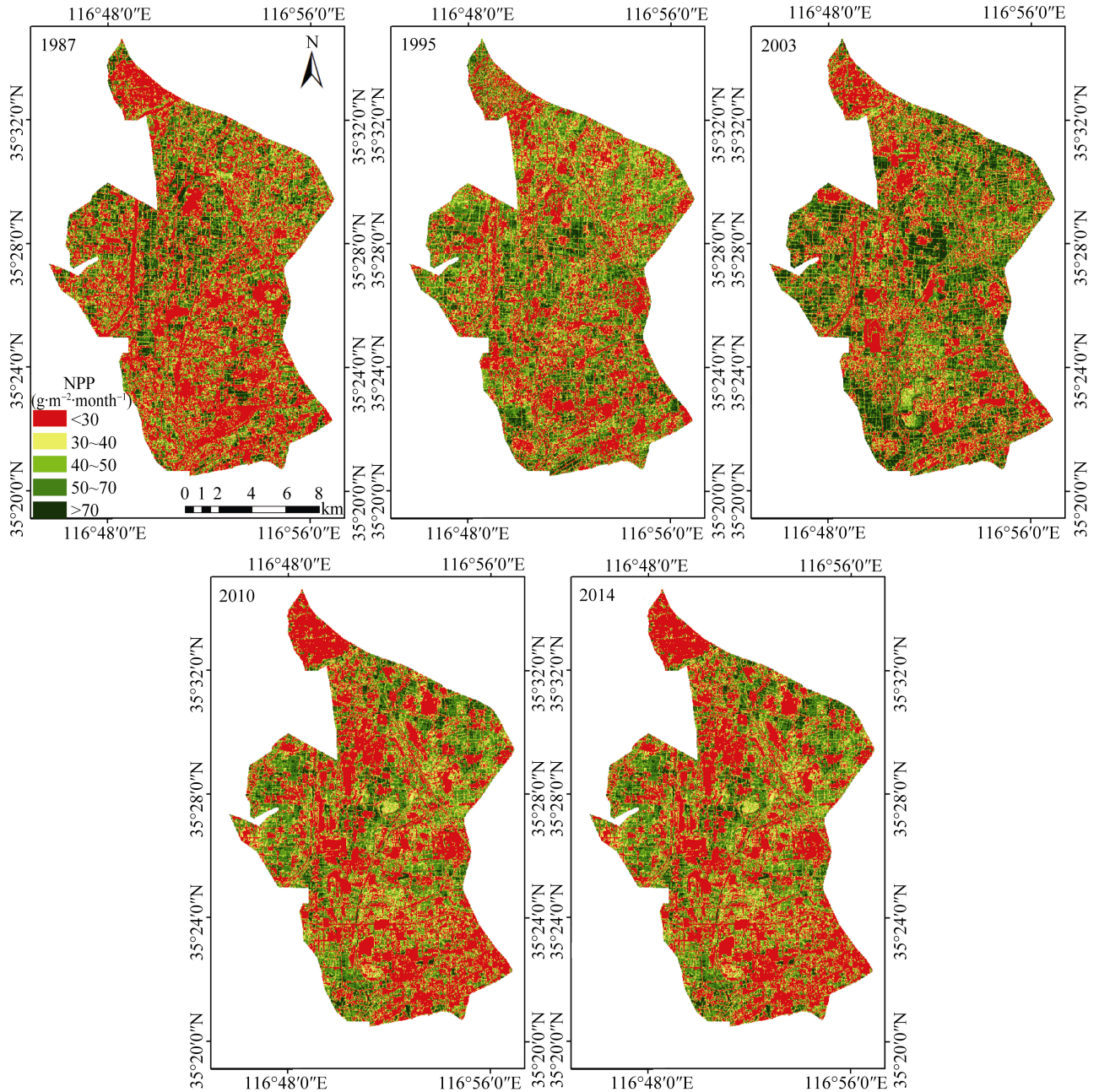


图 2 不同年份矿区植被净初级生产力(NPP)的分布

Fig. 2 Distribution of the NPP in the studied mining area in different years

表 2 研究区不同年份不同土地覆盖类型的植被碳储量

Table 2 Vegetation carbon storage of different land cover types in research area in different years

土地覆盖类型 Land cover type	碳储量 Carbon storage (t)				
	1987	1995	2003	2010	2014
水域 Water area	20.133	60.858	118.432	331.886	485.321
建设用地 Construction land	468.681	462.237	538.748	510.148	753.599
未利用土地 Unutilized land	614.997	810.251	817.329	593.941	754.378
农业用地 Agricultural land	2 692.824	2 796.398	3 171.230	2 251.766	1 771.322
总计 Total	3 796.636	4 129.744	4 645.738	3 687.741	3 764.621

13.435  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ , 2003—2010 年为 9.897~11.132  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ , 2010—2014 年为 11.132~12.839  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。因此, 矿区碳储量的扰动对人为因素较敏感, 由于截至 2014 年

研究区内采矿活动破坏区面积 2 985.03  $\text{hm}^2$ , 占研究区面积的 11.57%, 所以人为因素对矿区碳密度的扰动有限。为了消除非采矿活动增加水域和非土地

复垦增加耕地的影响, 将研究区范围缩小至采矿活动破坏区, 分别计算采矿活动和土地复垦对该区域碳储量的扰动值。由于相邻区域同种地物碳密度差别不大, 仅在计算采矿活动扰动区域(即土地损毁后复垦前的区域)的碳储量时, 存在两个假设: 1) 假设土地未破坏, 通过测算破坏区附近同种地类的碳密度和破坏区的面积, 估算该破坏区域未被破坏时的碳储量; 2) 假设土地破坏后未复垦, 通过测算已复垦区域附近的损毁但尚未复垦区的碳密度来估算采煤活动扰动下的区域碳储量。计算土地复垦扰动下的区域碳储量, 可以根据土地未损毁区、土地损毁未复垦区和已复垦区面积和碳密度统计(表 5), 其中碳

密度可以根据各地类碳储量和面积求得。

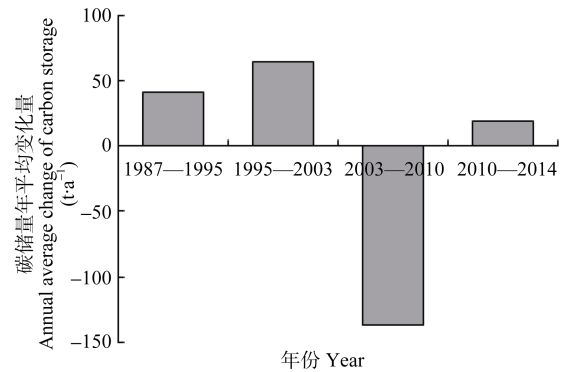


图 3 不同年份矿区碳储量年平均变化量  
Fig. 3 Annual average change of carbon storage in the studied mining area in different years

表 3 不同年份气候变化对矿区植被碳密度和碳储量的影响

Table 3 Impact of climate change on vegetation carbon storage and carbon density in the studied mining area in different years

年份 Year	碳密度 Carbon density (g·m <sup>-2</sup> )			碳储量 Carbon storage (t)
	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	
1987	5.749	4.937	5.281	1 992.824
1995	3.690	3.343	3.505	1 807.273
2003	9.465	8.983	9.167	2 117.513
2010	4.153	2.832	3.981	1 834.125
2014	4.699	3.579	4.659	1 842.398

表 4 不同年份研究区损毁和复垦土地的面积

Table 4 Areas of damaged land and reclaimed land in the studied mining area in different years hm<sup>2</sup>

土地类型 Land type	1987	1995	2003	2010	2014
土地损毁面积 Damaged land	0	431.01	654.66	2 806.47	2 985.03
土地损毁未复垦面积 Undamaged land	0	431.01	320.58	2 059.83	2 126.07
土地已复垦面积 Reclaimed land	0	0	334.08	746.64	858.96

表 5 不同年份人为因素对研究区植被碳储量和碳失率的影响

Table 5 Effect of human factor on vegetation carbon storage and carbon loss rate in the studied mining area in different years

年份 Year	碳储量 Carbon storage (t)			碳失率 Carbon loss rate (%)	
	无人为扰动 Non-human disturbance	采矿活动扰动 Mining activities disturbance	土地复垦扰动 Land reclamation disturbance	采矿活动影响 Mining activities	土地复垦影响 Land reclamation
1987	553.837	—	—	—	—
1995	571.309	540.806	—	5.339	—
2003	645.768	606.806	626.689	6.034	2.955
2010	533.905	438.971	464.228	17.781	13.050
2014	526.169	431.403	452.360	18.011	14.028

从表 5 可以看出, 采矿活动导致研究区碳储量的灭失, 1995 年、2003 年、2010 年、2014 年矿区碳储量分别损失了 30.503 t、38.963 t、94.933 t、94.776 t。由于研究区煤炭产量从 1987 年的 1 375 万 t·a<sup>-1</sup> 提高到 2006 年的 2 700 万 t·a<sup>-1</sup>, 采煤设计产量增大, 导致研究区内受损面积迅猛增加, 截至 2014 年已有 2 985.03 hm<sup>2</sup> 的土地受损, 可见煤炭产量和土地损毁会导致矿区碳储量的流失。总体上看, 1987—2014

年碳损失量逐年增加, 主要原因是随着采煤速度的增加, 采煤活动对矿区生态环境影响增强, 大面积的农业用地受到破坏, 造成矿区碳储量的不断降低。

研究区从 1996 年开始采用挖深垫浅、土地平整、煤矸石充填等复垦措施将大部分受损土地复垦成耕地、少量复垦成鱼塘等, 共复垦面积 858.96 hm<sup>2</sup>, 占损毁土地面积的 28.78%。从表 5 可以看出, 矿区碳储量降低的速度得到明显控制, 碳损失量明显降

低, 2003 年、2010 年、2014 年矿区碳储量分别损失了 19.080 t、69.677 t、73.809 t, 较采矿活动的影响, 碳损失量最大恢复 4.731%。总体上看, 随着复垦土地面积的逐年增加, 2003—2014 年间虽然矿区碳储量整体不断降低, 但降低的幅度比采矿活动的低, 主要原因是土地复垦将采煤塌陷地形成的水域大部分修复成耕地, 提高了土地的生产力。因此, 土地复垦可以缓解采煤活动对生态系统碳储量的破坏, 为矿区带来一定的经济和生态效益。

#### 4 讨论与结论

本文从土地利用类型变化的角度对矿区碳储量进行定量研究, 通过借助改进的 CASA 模型计算植被净初级生产力, 进而直观地反映矿区 1987 年、1995 年、2003 年、2010 年、2014 年碳储量的变化情况。本文将影响矿区碳储量扰动变化的因素分成 3 类, 即气候变化因素、采矿活动因素和土地复垦因素。首先只考虑气候变化因素, 计算出该部分的碳含量, 并分析降水量、温度与碳储量的相关性; 然后, 假设仅考虑采矿活动和土地复垦为影响矿区碳储量的人为因素, 结合矿区采掘平面图和遥感影像监督分类图以及各地类的碳密度, 分别计算出采矿活动和土地复垦导致矿区的碳损失量, 得出了以下结论:

1) 矿区 NPP 的变化是气候因素和人为因素共同作用的结果。气候变化对矿区碳密度的扰动范围为 2.832~9.465  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ; 由于该研究区从 1999 年开始复垦工作, 因此 1987—2003 年人为因素主要以采矿活动为主, 即其对碳密度的扰动范围为 9.897~13.435  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ; 自 2003 年以后该区主要以采矿活动和土地复垦共同作用为主, 即其对碳密度的扰动范围为 11.132~12.839  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。因此, 矿区碳储量的扰动对采煤活动和土地复垦更敏感, 并且土地复垦一定程度上可以抑制矿区植被碳储量的扰动。

2) 采煤活动导致大面积耕地受到破坏, 碳储量大量流失。1987—1995 年的碳损失量为 30.503 t, 1995—2003 年的为 38.963 t; 由于矿区设计产量的提高, 土地损毁面积由 2003 年的 654.66  $\text{hm}^2$  迅速增加至 2014 年的 2 985.03  $\text{hm}^2$ , 导致大面积的农业用地受到破坏, 造成矿区碳储量的不断降低, 2003—2014 年碳损失量总和为 189.709 t。由此可见, 采矿活动导致矿区碳储量的大量流失。

3) 土地复垦对矿区碳储量影响的分析表明: 矿区碳储量受采矿活动影响较明显, 但土地复垦可以有效恢复部分流失的碳量, 一定程度上抑制采煤活

动对矿区生态的破坏。

研究表明, 土地复垦可以缓解采矿造成的生态破坏, 提高土地的生产力。同时, 利用遥感技术估算复垦矿区的碳储量, 可以高效、大范围动态监测矿区的生态环境和土地复垦后的生态效益, 为今后矿区的资源开发利用以及矿区土地复垦方案的选择提供一种技术手段。但生态系统模型还包括 CENTURY<sup>[19]</sup>和 BIOME<sup>[20]</sup>模型等, 而本文仅使用 CASA 模型测算研究区内的植被碳储量, 没有比较这类模型对于矿区生态碳储量估算的适用性。因此, 在今后的研究中, 可以在比较模型适用性的基础上估算相应研究区的碳储量, 可以提高估算精度, 更好地服务于矿区的生态研究。

#### 参考文献

- [1] 周伟, 曹银贵, 白中科, 等. 煤炭矿区土地复垦监测指标探讨[J]. 中国土地科学, 2012, 26(11): 68-73  
Zhou W, Cao Y G, Bai Z K, et al. Indicators for monitoring land reclamation in coal mining area[J]. China Land Sciences, 2012, 26(11): 68-73
- [2] 李新举, 胡振琪, 李晶, 等. 采煤塌陷地复垦土壤质量研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 276-280  
Li X J, Hu Z Q, Li J, et al. Research progress of reclaimed soil quality in mining subsidence area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(6): 276-280
- [3] Ussiri D A N, Lal R, Jacinthe P A. Soil properties and carbon sequestration of afforested pastures in reclaimed mine soils of Ohio[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(5): 1797-1806
- [4] Stahl P D, Anderson J D, Ingram L J, et al. Accumulation of organic carbon in reclaimed coal mine soils of Wyoming[C]. 2003 National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation and The 9th Billings Land Reclamation Symposium, Billings, 2003: 41
- [5] Amichev B Y, Burger J A, Rodrigue J A. Carbon sequestration by forests and soils on mined land in the Midwestern and Appalachian coal fields of the U. S.[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 256(11): 1949-1959
- [6] Jacinthe P A, Lal R. Tillage effects on carbon sequestration and microbial biomass in reclaimed farmland soils of southwestern Indiana[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(2): 605-613
- [7] Asensio V, Vega F A, Covelo E F. Effect of soil reclamation process on soil C fractions[J]. Chemosphere, 2014, 95: 511-518
- [8] 余健. 高潜水位区采煤塌陷地复垦土壤碳库特征[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014  
Yu J. The carbon pool properties of reclaimed soil in coal mining subsidence area with high groundwater level[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014

- [9] 张召, 白中科, 贺振伟, 等. 基于 RS 与 GIS 的平朔露天矿区土地利用类型与碳汇量的动态变化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 230–236  
Zhang Z, Bai Z K, He Z W, et al. Dynamic changes of land use type and carbon sinks based RS and GIS in Pingshuo opencast coal mine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(3): 230–236
- [10] 乔亮, 王丹, 高明, 等. 三峡库区农村宅基地复垦耕地地力评价——以重庆市涪陵区为例[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(3): 365–372  
Qiao L, Wang D, Gao M, et al. Evaluation of farmland productivity after rural homestead reclamation in the Three Gorges Reservoir Area — A case study of Fuling District, Chongqing City[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(3): 365–372
- [11] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components[J]. Science, 1998, 281(5374): 237–240
- [12] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413–424  
Zhu W Q, Pan Y Z, Zhang J S. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. Journal of Plant Ecology (Chinese Version), 2007, 31(3): 413–424
- [13] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 等. 基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算——以中国内蒙古为例[J]. 遥感学报, 2005, 9(3): 300–307  
Zhu W Q, Pan Y Z, Long Z H, et al. Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation based on GIS and RS: A case study in Inner Mongolia, China[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(3): 300–307
- [14] 李晶, 刘喜韬, 胡振琪, 等. 高潜水位平原采煤沉陷区耕地损毁程度评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 209–216  
Li J, Liu X T, Hu Z Q, et al. Evaluation on farmland damage by underground coal-mining in plain area with high ground-water level[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(10): 209–216
- [15] 李晶, 杨成兵, 李新举. 典型煤粮复合主产区生态足迹分析——以济宁市为例[J]. 资源与产业, 2008, 10(6): 46–50  
Li J, Yang C B, Li X J. A case study on Ji'ning City: Analysis on eco-footprint in a typical coal-crop composite production area[J]. Resources & Industries, 2008, 10(6): 46–50
- [16] 徐占军, 侯湖平, 张绍良, 等. 采矿活动和气候变化对煤矿区生态环境损失的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 232–240  
Xu Z J, Hou H P, Zhang S L, et al. Effects of mining activity and climatic change on ecological losses in coal mining areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5): 232–240
- [17] 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  
Hou H P, Zhang S L, Ding Z Y, et al. Impact on vegetation carbon storage in ecosystem from land use change in coal mine area: A case study at Chacheng Mine in Xuzhou Mining Area[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(10): 1850–1855
- [18] 侯光良, 游松才. 用筑后模型估算我国植物气候生产力[J]. 自然资源学报, 1990, 5(1): 60–65  
Hou G L, You S C. To calculate China's plant-climate productive potentialities by "Chikuzo Model"[J]. Journal of Natural Resources, 1990, 5(1): 60–65
- [19] Parton W J. The century model[M]. Powlson D S, Smith P, Smith J U. Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-Term Datasets. Berlin: Springer-Verlag, 1996
- [20] Ni J. Biome models: main principles and applications[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2002, 26(4): 481–488