



## 矿区复垦地人工生态系统碳汇能力与生物多样性功能协同效益解析

张小平 李梓琛 王瑜 武志瑶 乌达巴拉 门聪

引用本文:

张小平, 李梓琛, 王瑜, 等. 矿区复垦地人工生态系统碳汇能力与生物多样性功能协同效益解析[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 257–266.

ZHANG Xiaoping, LI Zichen, WANG Yu. Synergistic benefit analysis of carbon sink capacity and biodiversity function of artificial ecosystems in mining reclamation sites[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 257–266.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1242>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 碳中和目标下矿区土地复垦与生态修复的机遇与挑战

Opportunities and challenges of land reclamation and ecological restoration in mining areas under carbon neutral target  
煤炭科学技术. 2023, 51(1): 474–483 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0047>

##### 黄土高原矿区生态修复固碳机制与增汇潜力及调控

Mechanism, potential and regulation of carbon sequestration and sink enhancement in ecological restoration of mining areas in the Loess Plateau  
煤炭科学技术. 2023, 51(1): 502–513 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-2250>

##### 采煤沉陷区复垦对土壤细菌群落组装及固碳功能的影响

Effects of land reclamation on soil bacterial community assembly and carbon sequestration function in coal mine subsidence area: taking Dongtan Mining Area as an example  
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 345–354 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1221>

##### 北方大型露天矿区土壤有机碳库扰动与恢复研究

Study on disturbance and restoration of soil organic carbon pool in large-scale open-pit mining areas in Northern China  
煤炭科学技术. 2023, 51(12): 100–109 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0965>

##### 露天采煤区不同复垦处理下植物多样性及其与土壤酶活性和养分的关系

Plant diversity and its relationship with soil enzyme activities and nutrients under different reclamation treatments in open-pit coal mining area  
煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 316–327 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2224>

##### 时间序列下煤矸石充填复垦耕地和林地的土壤碳动态特征

Soil carbon dynamic characteristics of coal gangue-filled reclaimed cropland and forest land under time series  
煤炭科学技术. 2023, 51(5): 260–268 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.ST21-024>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张小平, 李梓琛, 王 瑜, 等. 矿区复垦地人工生态系统碳汇能力与生物多样性功能协同效益解析[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 257–266.

ZHANG Xiaoping, LI Zichen, WANG Yu, *et al.* Synergistic benefit analysis of carbon sink capacity and biodiversity function of artificial ecosystems in mining reclamation sites[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(7): 257–266.

## 矿区复垦地人工生态系统碳汇能力与生物多样性 功能协同效益解析

张小平<sup>1</sup>, 李梓琛<sup>2</sup>, 王 瑜<sup>1</sup>, 武志瑶<sup>1</sup>, 乌达巴拉<sup>3</sup>, 门 聪<sup>4</sup>

(1. 国能准能集团有限责任公司, 内蒙古鄂尔多斯 010300; 2. 江苏省擎天工业互联网有限公司, 江苏南京 211899; 3. 内蒙古绿创环保科技有限公司, 内蒙古呼和浩特 010020; 4. 北京科技大学 能源与环境工程学院, 北京市工业典型污染物资源化处理重点实验室, 北京 100083)

**摘 要:** 矿区土地复垦是加快生物多样性恢复, 推动矿区转型发展, 实现碳源向碳汇转化的必然措施。当前关于复垦地人工生态系统碳汇能力和生物多样性恢复的定量评估以及二者协同增效作用的研究仍较少。以准格尔旗黑岱沟露天矿区的各排土场为研究区域, 结合样地调查与遥感数据, 计算复垦土地植被与土壤的碳汇量, 对不同恢复模式下各区域进行灰色关联分析, 评估复垦地人工生态系统生物多样性维护功能与碳汇能力协同效益的规律。研究表明: ①研究区域生物多样性极重要、高度重要、重要、一般和不重要区域的面积占比分别为 2.28%、8.29%、15.67%、25.27%、48.50%。复垦区人工生态系统中, 乔木+灌木+草本配级的生物多样性指数高于其他恢复模式, 主要位于内排土场、北排土场中部, 以及东沿帮排土场中部和南部。人工生态系统有林地的生物多样性维护功能的重要值较高, 多数区域位于边坡或平台边缘。②植被碳汇量排名前 9 位的区域均为乔木+灌木+草本的植被类型, 且该种植被恢复模式的平均碳汇量( $32.224 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ )高于其他植被恢复模式。乔木+草本植被恢复模式的平均土壤碳汇量最高( $18.164 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ), 其次为乔木+灌木+草本恢复模式( $16.909 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ )。草本植被恢复模式下(主要位于东排土场和北排土场)的植被碳汇量( $5.897 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ )和土壤碳汇量( $6.237 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ )均是所有恢复模式中最低的。复垦地碳汇能力整体上呈现出森林生态系统>农田生态系统>草地生态系统的规律。③植被、土壤碳汇量与生物多样性维护功能评估结果的灰色关联指数分别为 0.735 和 0.710, 均显著相关。影响因子分析结果表明, 随着物种丰富度指数和多样性指数值的增加, 植被碳汇量也逐渐增加; 随着海拔的升高和复垦年限的增加, 土壤碳汇量呈上升趋势。

**关键词:** 矿区复垦地; 植被碳汇量; 土壤碳汇量; 生物多样性; 灰色关联分析

中图分类号: X171

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)07-0257-10

## Synergistic benefit analysis of carbon sink capacity and biodiversity function of artificial ecosystems in mining reclamation sites

ZHANG Xiaoping<sup>1</sup>, LI Zichen<sup>2</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>, WU Zhiyao<sup>1</sup>, WU Dabala<sup>3</sup>, MEN Cong<sup>4</sup>

(1. Chnenergy Zhunneng Group Co., Ltd., Ordos 010300, China; 2. Jiangsu Skytech Industrial Internet Co., Ltd., Nanjing 211899, China; 3. Inner Mongolia Lüchuang Environmental Protection Technology Co., Ltd., Hohhot 010020, China; 4. School of Energy and Environmental Engineering, Beijing Key Laboratory of Resource-Oriented Treatment of Industrial Pollutants, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Land reclamation in mining areas is an inevitable measure to accelerate the restoration of biodiversity, promote the transformation and development of mining areas, and realize the transformation of carbon sources into carbon sinks. There are few studies focused on the quantitative assessment of carbon sink capacity and biodiversity restoration of artificial ecosystems and their synergistic effects in re-

收稿日期: 2023-08-31

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.12438/cst.2023-1242

作者简介: 张小平(1982—), 男, 内蒙古托克托人, 高级政工师, 硕士。E-mail: 10570363@ceic.com

通讯作者: 门 聪(1992—), 女, 吉林辽源人, 讲师, 博士。E-mail: mencong@ustb.edu.cn

claimed lands. The dumps in Heidaigou open-pit mining area of Jungar Banner was taken as the research area, and the carbon sinks of vegetation and soil of the reclaimed land were calculated by combining the sample plot survey and remote sensing data. Grey correlation analysis was carried out for each region under different restoration modes to assess the synergy between the biodiversity maintenance function and carbon sequestration capacity of artificial ecosystems of reclaimed land. The results showed that: ①The area proportions of extremely important, highly important, important, average and unimportant biodiversity in the research area were 2.28%, 8.29%, 15.67%, 25.27% and 48.50% respectively. In the artificial ecosystem of reclaimed land, the biodiversity index of trees + shrubs + herbs was higher than other vegetation restoration models, which was mainly located in the inner dump, the middle of the north dump, and the middle and south of the east side dump. The important value of biodiversity maintenance function of forest land in artificial ecosystem was higher than other land use types, and most of them were located on slope or platform edge. ②The top 9 regions in terms of vegetation carbon sink were in trees + shrubs + hers restoration mode, and the average carbon sink of this vegetation restoration model ( $32.224 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ) was higher than that of other vegetation restoration models. The average soil carbon sink of tree + herbaceous vegetation restoration mode was the highest ( $18.164 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ), followed by tree + shrub + herbaceous restoration mode ( $16.909 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ). The vegetation carbon sink ( $5.897 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ) and soil carbon sink ( $6.237 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ) under the herbaceous vegetation restoration model (mainly located in the east and north dumps) were the lowest among all restoration models. The carbon sink capacity of reclaimed land was in the trend of forest ecosystem > farmland ecosystem > grassland ecosystem. ③The grey correlation index between vegetation and soil carbon sink and the assessment results of biodiversity maintenance were 0.735 and 0.710, respectively, showing a significant correlation. The vegetation carbon sink increased with the species richness index and diversity index. The increased altitude and the reclamation period led to the greater soil carbon sink.

**Key words:** mine land reclamation; vegetation carbon sink; soil carbon sink; biodiversity; grey correlation analysis

## 0 引言

中国是煤炭生产和消费大国,在内蒙古等地区,适用于露天开采的煤炭资源占比达到 90% 以上。在开采煤炭资源的过程中,既可以有效带动当地经济发展,又可以解决当地对能源和资源的需求,但同时也会对原有自然生态系统造成一定的影响,例如破坏地形地貌、影响地表植被生长、对土地资源的占用等,造成多处土地损毁,从而使得地方的土壤和植被碳储存能力的降低乃至消失<sup>[1-2]</sup>,进而对当地的碳平衡产生重大影响。内蒙古草原区矿产资源开发总体上采用粗放型的露天开采方式,受矿区“剥离—开采—运输—排弃—造地”等工艺影响,其原始土地的生态系统受到剧烈干扰和严重退化<sup>[3]</sup>,矿区碳储存能力部分或全部丧失。

土壤重构和植被恢复是矿区生态系统修复过程中最重要的 2 个阶段,影响着矿区恢复的效果和速度<sup>[4]</sup>。张黎明等<sup>[5]</sup>建立了碳减排效果测度模型,发现将废弃土地复垦为林地或耕地可有效减少碳排放。张菁<sup>[6]</sup>研究了露天煤矿在不同生态恢复模式与土地复垦年限下土壤碳汇能力和土壤理化性质状况,结果显示经过 20 年复垦的苜蓿地表层土壤展现出更强的固碳能力。HEIJDEN 等<sup>[7]</sup>研究表明,当土壤理化性质改善时,地表植被多样性会改善,生态系统生产力会增加,土壤性质与植物间的相互作用推动着生态系统功能的变化。ALDAY 等<sup>[8]</sup>研究发现,复垦年限和土壤 pH 是影响煤矿复垦土地植被演替和植

物群落的相对丰富度的主要因素。

露天开采土地复垦和植被重建是促进该地区生态系统功能和生物多样性修复的有效措施<sup>[9]</sup>,是完成碳源向碳汇转化的重要途径。在很长的一段时间内,人工生态系统与自然生态系统有一定差别<sup>[10]</sup>,然而目前对复垦土地碳汇研究大多集中在自然生态系统方面,对复垦土地人工生态系统的生物多样性研究更多停留在样地清查阶段。矿区生物多样性调查监测技术手段和方法主要包括样地清查法<sup>[11]</sup>、3S 耦合的多因子分析<sup>[12]</sup>和遥感(RS)<sup>[13]</sup>等。评价方法包括生态机制分析法、美国生境评价程序<sup>[14]</sup>、基于 GIS 的生境模型和生态风险评价<sup>[15]</sup>等。然而,当前关于复垦地人工生态系统碳汇能力和生物多样性恢复的定量评估的研究仍较少,二者之间的协同增效规律也尚不明确。

本研究以黑岱沟露天煤矿复垦地人工生态系统为研究对象,从生物多样性恢复评估与碳汇量的角度对复地生态修复效果进行综合评价,并分析人工生态系统生物多样性对碳汇量的影响,确定其与自然生态系统之间的弹性系数,以期对矿区复垦地生态系统功能恢复提供理论支撑。

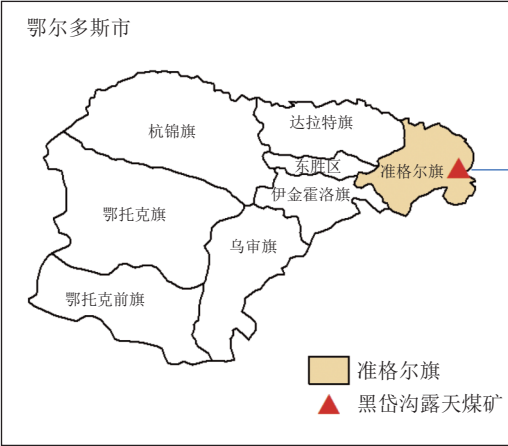
## 1 材料及方法

### 1.1 研究区域

黑岱沟露天煤矿隶属神华准格尔能源有限责任公司,是我国自行设计、自行施工的特大型露天煤矿



(图 1)。位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗东部准格尔煤田中部,属内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗薛家湾镇,地处蒙、陕、晋三省区交界处,地理坐标为东经 111°10'~111°25',北纬 39°25'~39°59'<sup>[16]</sup>。



该矿东邻黄河,接近煤层露头,东北接近煤层风化带,西北与龙王沟勘探区毗邻,南以黑岱沟中心线外推 200 米为界。黑岱沟露天煤矿海拔在+1 025~+1 302 m 之间,面积达 52.11 km<sup>2</sup>。

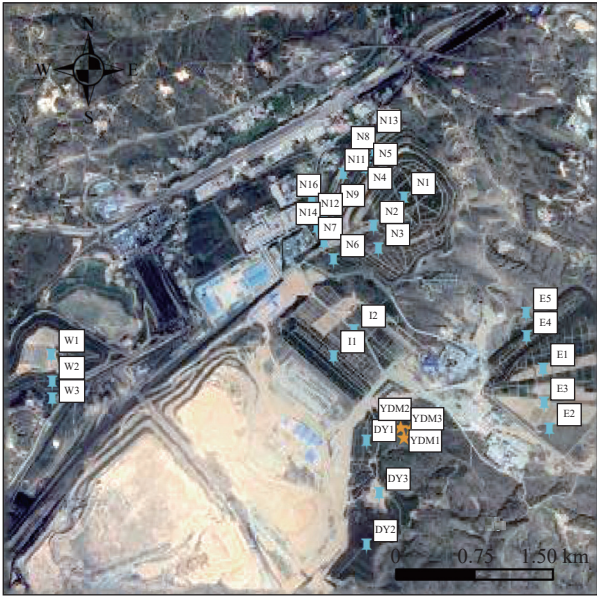


图 1 研究区域位置  
Fig.1 Location map of the research area

1.2 现场调查方法

1)植物群落调查与遥感解释。根据各排土场不同平台海拔由高至低,以及各平台内部不同的植被恢复模式和植被配置,将 5 个排土场划分为 29 个区域并编号分类,北排土场共划分 16 个区域(编号 N1 ~ N16),东排土场共划分 5 个区域(编号 E1 ~ E5),西排土场共划分 3 个区域(编号 W1 ~ W3),东沿帮排土场共划分 3 个区域(编号 DY1 ~ DY3),内排土场共划分 2 个区域(编号 I1 ~ I2),其中 N10 与 N15 区域属于农田生态系统,不开展植物群落调查。东沿帮排土场东侧为不受采矿与复垦等人为活动影响的自然生态系统,设置为原地貌对照样地。利用无人机搭载 Zenmuse L1 镜头和 Zenmuse H20N 镜头进行遥感作业,获取样地三维点云数据与多光谱信息,按照均匀布点法设置调查点位,并根据实地现状加以调整。

植被调查是获取草原生态系统特征的重要手段。植被调查采用样方法,根据优势种确定群落性质,并在充分了解矿区植物群落的基础上选择典型地段进行主观取样;在每个样地的中心点根据不同植被类型,设置 10 m×10 m 乔木样方一个,在乔木样方内设置 5 m×5 m 的灌木样方 2 个,在乔木样方的对角与中心点分别设置三个 1 m×1 m 的草本样方。本次共

设置样方共计 143 个。根据黑岱沟煤矿气候条件与植被生长情况,选择在 7—8 月份,植物群落生物量达到高峰时期开展植被调查,具体调查内容见表 1。其中,生长属性包括植被的科、属、种以及存活周期等指标。遥感解释包括遥感图像处理、计算机辅助视觉解释、矢量数据编辑和结果生成。首先,使用 Ecognition Developer8.0 和 ERDAS 软件对图像数据进行几何校正、增强、自动分类和可视化解译,提取植被主题信息,然后使用 ArcGIS 软件对矢量数据进行拓扑,对面积进行统计和测绘植被信息。

表 1 植物群落种类组成与结构观测指标  
Table 1 Species composition and structure observation index of plant community

项目	指标
乔木层	植物种、株数、胸径、高度、冠幅、生长属性
灌木层	植物种、株数/多度、平均高度、根径、盖度、生长属性
草本层	种数、优势种、高度、密度、盖度、频度、干重、生长属性

2)土壤采样调查。土壤采样与植被调查同时、同地进行,土壤依据样方对角线混合法采样,以对角线等分点为采样分点,每个样方选取 3 个采样点进行采样。在植被调查后,清理土壤表面碎石以及植被枯落物,根据研究需要,保持每个点采样深度一致,

分别于 0 ~ 30 cm、30 ~ 50cm 各层使用环刀(规格为 100 cm<sup>3</sup>)取土壤,重复 3 次,分别装入预先准备好的铝盒内。将用于测量土壤容重的铝盒带回实验室称重,然后在 105℃ 下烘干至恒重,称其干重。用于测定土壤养分的土样经风干后粉碎,挑去植物细根后分别过 20 目(0.850 mm)、80 目(0.178 mm)和 100 目(0.150 mm)筛,并分别密封贮存,供分析土壤养分。土壤有机碳用 K<sub>2</sub>CrO<sub>7</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 消毒,FeSO<sub>4</sub> 容量法测定;全氮量半微量凯氏定氮法测定。

### 1.3 生物多样性维护功能评估方法

当前,生物多样性评估关注多因素的综合影响,有关栅格水平生物多样性空间分布研究不断完善。在广泛借鉴生物多样性维护功能相关评估方法基础上<sup>[8, 17-18]</sup>,本研究开展生物多样性维护功能评估所需因子包括生物多样性指数、地形地貌因子、土地覆被因子,模型计算公式为:

$$\text{BMF}_{ij} = B_{ij}G_{ij}L_{ij} \quad (1)$$

$$B_{ij} = M + H' + D + J \quad (2)$$

$$M = (S - 1) / \ln N \quad (3)$$

$$H' = - \sum_{\mu=1}^S p_{\mu} \ln p_{\mu} \quad (4)$$

$$D = 1 - \sum_{\mu=1}^S \frac{N_{\mu}(N_{\mu} - 1)}{N(N - 1)} \quad (5)$$

$$J = H' / \ln S \quad (6)$$

$$G_i = H_i R_i \quad (7)$$

$$H = \begin{cases} \frac{H_i - H_{i,\min}}{H_{i,\max} - H_{i,\min}}, & H < a, H > b \\ 1, & a \leq H \leq b \end{cases} \quad (8)$$

式中: BMF<sub>ij</sub> 为区域生物多样性维护功能的强弱程度; *i* 为某栅格像元; *j* 为某评价因子; *B* 为生物多样性因子; *G* 为地形地貌因子; *L* 为土地覆被因子(表 2); *M* 为 Margale 丰富度指数; *H'* 为 Shannon-Wiener 多样性指数; *D* 为 Simpson 多样性指数; *J* 为 Pielou 均匀度指数; *S* 为物种数; *N* 为植物群落所有物种的个体数; *N<sub>μ</sub>* 为第 *μ* 个物种的个体数; *p<sub>μ</sub>* 为第 *μ* 个物种的频度, 即  $p_{\mu} = \frac{N_{\mu}}{N}$ ; *R* 为地形起伏度参数; *H* 为海拔参数; *H<sub>i,max</sub>* 为最大高程; *H<sub>i,min</sub>* 为最小高程。根据“中间高

度膨胀”现象<sup>[17]</sup>, 确定研究区域的中等海拔高度为 +1 215 ~ +1245 m, 即 *a*=1 215, *b*=1 245。

### 1.4 碳汇量测算方法

本研究碳汇量测算方法采用基于生物量和土壤碳储量清查的样地清查法, 基于生物量调查结果, 对于森林生态系统生物量测算采用连续因子换算函数法, 草地生态系统采用生物量法, 农田生态系统采用经净碳汇法, 土壤碳汇采用碳密度-GIS 估算法, 具体如下:

当前区域尺度森林生物量的估算方法中, 换算因子连续函数法被认为是适合地区尺度森林生物量估算的有效方法。参考已有研究<sup>[19-20]</sup>, 利用样方所得结果, 根据平均实验形数法计算乔木蓄积量<sup>[21]</sup>, 之后采用换算因子连续函数法估算研究区林地生物量, 灌木生物量则根据需要利用不同计算模型估算<sup>[22-23]</sup>, 林地碳汇量即为林地生物量与碳转换系数的乘积, 碳转换系数选用中国林业温室气体清单课程组的研究成果, 0.5<sup>[24]</sup>。计算方法如下:

$$V = F_{1.3}G(H_1 + 3) \quad (9)$$

$$\text{BEF} = \alpha + \beta/V \quad (10)$$

$$C_f = 0.5\alpha V\beta \quad (11)$$

$$C_{\text{Apricot}} = 0.5(1102.57d + 5.99) \quad (12)$$

$$C_{\text{Car/Hip}} = 0.5 \times 1.245d^{0.826} \quad (13)$$

$$C_{\text{Oleaster}} = 0.5(374.58 + 0.093d) \quad (14)$$

式中: *V* 为林地蓄积量, m<sup>3</sup>; *F<sub>1.3</sub>* 为平均实验形数此处选取 0.38<sup>[21]</sup>; *G* 为胸径断面积, m<sup>2</sup>; *H<sub>1</sub>* 为树高, m; BEF 为换算因子; *C<sub>f</sub>* 为林地碳储量, Mg; *d* 为灌木地径, cm; *α*、*β* 为参数。

根据研究区域林地类型特征, 所需参数 *α*、*β* 的值见表 3, *C<sub>Apricot</sub>*、*C<sub>Car/Hip</sub>*、*C<sub>Oleaster</sub>* 分别为山杏、柠条或沙棘、沙枣对应的碳储量。碳密度是指单位面积的碳储量, 碳汇量则为单位时间内碳储量的变化量, 在研究不同区域碳汇能力时, 为避免面积差异对碳汇量的影响, 本研究选用单位面积碳汇量作为评估

表 3 不同林分类型生物量计算参数

Table 3 Parameter table for biomass calculation of different stand types

林分类型	<i>α</i>	<i>β</i>
杨树林	0.475	30.603
油松林	0.755	5.093
针阔混交林	0.802	12.280
阔叶混交林	0.626	91.001

表 2 土地覆被因子赋值<sup>[8, 17-18]</sup>

Table 2 Assignment of land cover factors<sup>[8, 17-18]</sup>

土地类型	林地	未利用地	草地	农田	建设及其他用地
土地覆被因子	1	0.7	1	0.5	0

依据,对比分析不同林地之间碳汇能力的差异。

生物量法用于黑岱沟煤矿的草地碳储量测算,具体算法为计算各物种的生物量乘以对应的面积之和,最后乘以碳转换系数,0.5<sup>[24]</sup>。计算公式如下:

$$C_c = 0.5T = 0.5 \sum_{\gamma=1}^{27} T_{\gamma} S_{\gamma} \quad (15)$$

式中,  $C_c$  为矿区草地植被碳储量; 0.5 为碳转换系数;  $T$  为植被生物量;  $T_{\gamma}$  为第  $\gamma$  种植被恢复模式下草地植被生物量;  $S_{\gamma}$  为第  $\gamma$  种植被恢复模式对应的面积。

由于农田植被每年都会被收获,其固定的碳又返还回大气或者进入土壤中,故不考虑农田植被的固碳量。由于研究区域的农田生态系统农作物会产生变化,土壤碳汇也会受施肥、秸秆还田等为活动影响,因此为了更加直观的反映农田碳源/碳汇,选择农田生态系统中农作物全生育期过程中的碳吸收量与自然生长排放、农业投入所产生的碳排放量的差值作为农田碳汇,其计算公式为:

$$N_t = C_t - T_t = \sum_{\varepsilon=1}^u C_{\varepsilon} Y_{\varepsilon} W_{\varepsilon} / H_{\varepsilon} - \sum_{\theta=1}^v E_{\theta} \delta_{\theta} \quad (16)$$

式中:  $N_t$  为农田生态系统总碳汇量;  $C_t$  为碳吸收量;  $T_t$  为碳排放量;  $C_{\varepsilon}$  为第  $\varepsilon$  种农作物对应的碳吸收率;  $Y_{\varepsilon}$  为第  $\varepsilon$  种农作物经济产量;  $W_{\varepsilon}$  为第  $\varepsilon$  种农作物对应的干重比;  $H_{\varepsilon}$  为第  $\varepsilon$  种农作物对应的经济系数;  $E_{\theta}$  为第  $\theta$  类碳排放源;  $\delta_{\theta}$  为第  $\theta$  类碳排放源的排放系数;  $u$  和  $v$  分别为农作物种类总数和碳排放源类别总数。

利用野外实地调查数据,根据土壤样品的测试结果得到土壤碳储量、碳密度,获取研究区域 2021 年 7 月和 2022 年 8 月两个时间节点上的土壤碳库数据,测算不同生态系统土壤的碳收支速率。之后可以在 ArcGIS 中进行空间插值,从而得到土壤碳密度、碳汇量的空间分布。计算公式如下:

$$P_q = 0.58KhO_q \times 0.1 \quad (17)$$

式中:  $P_q$  为土壤有机碳密度,  $t/hm^2$ ;  $K$  为土壤容重,  $g/cm^3$ ;  $h$  为土层厚度,  $cm$ ;  $O_q$  为第  $q$  种有机质含量,  $g/kg$ ; 0.58 为有机质含量与有机碳含量的换算系数, 0.1 为单位换算系数。

### 1.5 灰色关联分析

研究采用灰色关联分析 (Grey Relational Analysis, GRA) 方法,基于植物群落和土壤采样调查结果,评估碳汇量与不同影响因子的关系。GRA 是一种多因素统计分析方法<sup>[25,26]</sup>,根据因素之间发展趋势的相似性或差异程度来衡量因素之间的相关性程度,称为“灰色相关性”,然后描述事物或系统中因素之间

关系的强度、弱点、大小和顺序。基于灰色系统的关联理论对生态系统碳汇能力与生物多样性进行灰色关联分析具有可行性。其计算公式如下:

$$\varphi_{\tau}(k) = \frac{\min_{\tau} \min_k |y(k) - x_{\tau}(k)| + \rho \max_{\tau} \max_k |y(k) - x_{\tau}(k)|}{|y(k) - x_{\tau}(k)| + \rho \max_{\tau} \max_k |y(k) - x_{\tau}(k)|} \quad (18)$$

$$r_{\tau} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varphi_{\tau}(k) \quad (19)$$

式中:  $\rho$  为分辨系数,通常取 0.5;  $\varphi_{\tau}(k)$  为第  $\tau$  个因子在第  $k$  个维度上  $x$  序列与  $y$  序列的距离  $\min_{\tau} \min_k |y(k) - x_{\tau}(k)|$  为二级最小差;  $\max_{\tau} \max_k |y(k) - x_{\tau}(k)|$  为二级最大差;  $|y(k) - x_{\tau}(k)|$  为各比较数列  $x_{\tau}$  曲线上的每个点与参考数列  $y$  曲线上每个点差的绝对值;  $n$  为研究中考考虑的总维度数;  $r_{\tau}$  为比较数列  $x_{\tau}$  对参考数列  $y$  的灰色关联度,该值越接近 1,说明相关性越好。

## 2 结果与分析

### 2.1 草原矿区复垦土地生态系统生物多样性维护功能评估

基于构建的生物多样性维护功能评估方法,对黑岱沟露天煤矿复垦地进行评估,并采用自然间断法进行重要性分级<sup>[13]</sup>,共分为为极重要、高度重要、重要、一般和不重要 5 级,如图 2 所示,研究区生物多样性极重要和高度重要区面积分别为  $15.210 \text{ hm}^2$  和  $55.352 \text{ hm}^2$ ,分别占研究区域总面积的 2.28% 和 8.29%,主要分布在内排土场中部(I2 区域),东沿帮排土场中部与南部(DY2、DY3 区域),北排土场中部偏北部(N1、N3 区域),以上区域土地覆被类型均为林地,植被恢复模式以乔木+灌木+草本为主,群落植被类型主要包括油松、杨树、沙棘、山杏、柠条等,群落总体的丰富度与多样性指数更高,该区域生物多样性维护功能重要值最高。研究区生物多样性重要和一般区域面积分别为  $104.672 \text{ hm}^2$  和  $168.844 \text{ hm}^2$ ,分别占研究区域总面积的 15.67% 和 25.27%,主要分布在北排土场中部、西部与北部,东排土场中部及北部,西排土场和东沿帮排土场的大部分区域,该区域虽然植被恢复效果较好,生物多样性指数较高,但海拔偏高或地形起伏明显,区域生物多样性维护处于重要或一般水平。研究区生物多样性不重要区域面积为  $324 \text{ hm}^2$ ,占研究区域总面积的 48.50%,主要分布在北排土场和东排土场的南部,以及各排土场边缘位置,多为边坡、裸地、道路或建设区域。

总体看来,复垦区人工生态系统中,乔木+灌木+



草本配级的生物多样性指数更高,在“中间海拔”和地形起伏度较高区域重要性更高,主要位于内排土场、北排土场中部,以及东沿帮排土场中部和南部,包括N1、N3、DY2、DY3、I2区域,以上区域均为以油松、杨树、沙棘、山杏、柠条等为主的乔灌林地。而人工恢复的草地生态系统生物多样性因子平均值明显偏低,而且多数区域位于边坡或平台边缘,地形地貌因子指数不高,除N9、N12的少部分区域外,剩余95.43%的人工草地生态系统区域,生物多样性功能重要性低于原地貌的自然生态系统。

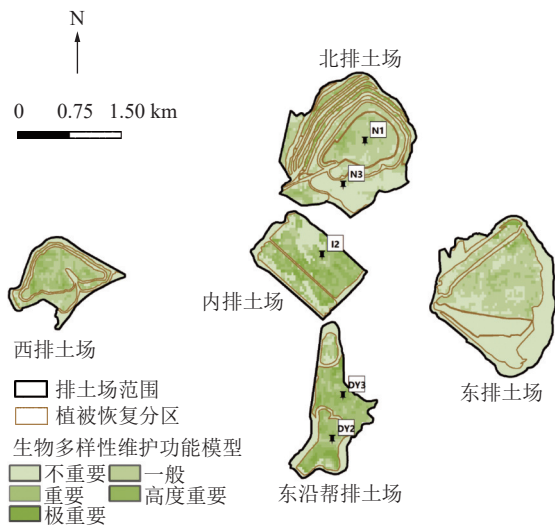


图2 研究区域生物多样性维护功能重要性

Fig.2 Functional importance of biodiversity maintenance in research area

## 2.2 不同植被恢复模式碳汇量

利用 ArcGIS 中空间插值工具,获得各植被恢复区域植被和土壤的碳汇量与碳密度空间分布情况(图3)。除农田生态系统外的植被恢复区域的植被碳汇量见图4,不同植被恢复模式之间的植被碳汇量差异显著。碳汇量排名前9位的区域均为乔木+灌木+草本的植被类型,说明该恢复模式对植被碳汇能力有着很好的提升效果。以乔木+灌木+草本为恢复模式的区域复模式的区有14个,植被碳汇量范围在10.993~41.204  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 内,不同区域之间的差异显著,平均植被碳汇量为32.224  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,在所有复垦区域中,高于其他三种植被恢复模式。N1、E1、E4、W1、W2、I2、DY2、DY3的平均植被碳汇量为39.176  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,显著高于其他区域,而N8、N13、E5的植被类型较为单一,碳汇量低于相同模式的平均水平。恢复模式为乔木+草本区域的植被碳汇量在22.696~33.143  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 范围内,E2由于植被类单一且生态恢复时间短,碳汇量较低,其他区域差异性不

大,平均碳汇量为29.100  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。灌木+草本的恢复区域植被类型较为丰富,碳汇量在21.294~25.485  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 范围内,不同区域间碳汇量差异较小,但灌木+草本恢复模式的面积较小,总体碳汇量不高。草本恢复区域的平均植被碳汇量为5.897  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ,略低于原地貌样地的碳汇量,但其中N9、N12的复垦时间开始最早,单位面积碳汇量略高于原地貌水平,说明经过长期的生态恢复,多数区域的植被碳汇能力已经达到或优于原地貌水平。

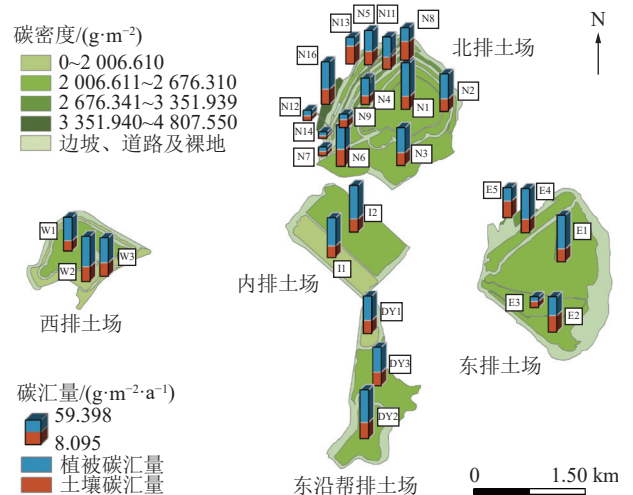


图3 研究区域碳密度与碳汇量

Fig.3 Carbon density and carbon sink in the research area

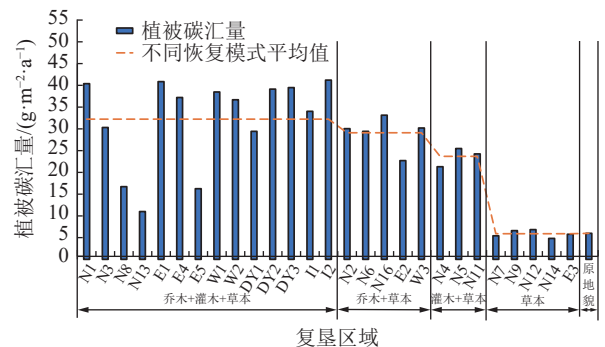


图4 不同植被恢复模式的植被碳汇量

Fig.4 Vegetation carbon sinks under different vegetation restoration models

总体而言,乔木+灌木+草本、乔木+草本、灌木+草本恢复模式的植被碳汇量远高于人工草地生态系统与原地貌,这与研究区植被碳密度的规律一致,但同种植被恢复模式下的不同区域植被碳汇量差异显著<sup>[27]</sup>,这与各区域群落生物多样性关联显著,生物多样性越高时,植被碳汇量越高<sup>[28]</sup>。所以在开展生态系统重建的进程中,构建乔、灌、草混合植被配置的同时,提高群落整体多样性可以有效提高植被碳汇能力。

各植被恢复区域的土壤碳汇量如图 5 所示。乔木+灌木+草本、乔木+草本、灌木+草本、草本四种植被恢复模式的平均土壤碳汇量分别为：16.909、18.164、13.710、6.237 g/(m<sup>2</sup>·a)，除草地生态系统外，其余 3 种恢复模式的土壤碳汇量差异不大，但各区域之间的植被碳汇量差异显著，在以乔木+灌木+草本为恢复模式的区域中，N13、E5 等区域的植被类型较少，但复垦年限长，土壤碳汇量较高，相反 W1、DY3 等区域的植被类型丰富但恢复时间短，土壤碳汇量低于其他区域，说明复垦年限是影响土壤碳汇量的重要因素之一。乔木+草本和灌木+草本的土壤碳汇量分别在 15.388 ~ 20.638 g/(m<sup>2</sup>·a) 和 10.597 ~ 15.865 g/(m<sup>2</sup>·a) 范围内，相同模式的区域间土壤差异性较小。人工恢复的草地生态系统中，N9 的草本物种更丰富，碳汇能力显著提高，经过多年的植物恢复，草地生态系统的平均土壤碳汇量(6.237 g/(m<sup>2</sup>·a))已接近原地貌样地水平(6.427 g/(m<sup>2</sup>·a))，植被恢复对土壤碳汇量的提升效果明显。

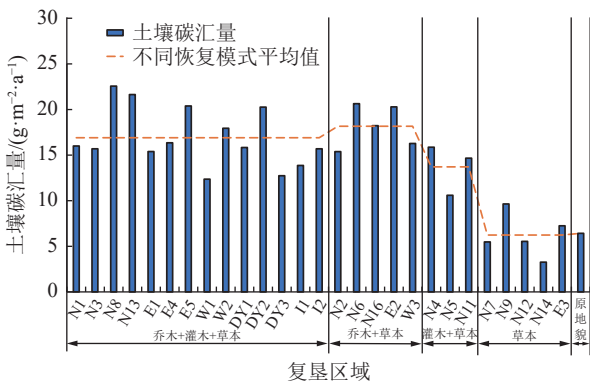


图 5 不同植被恢复模式的土壤碳汇量

Fig.5 Soil carbon sinks under different vegetation restoration models

根据上述研究，在研究区域已开展长期的生态恢复工作下，虽然复垦地人工生态系统中土壤中净积累的碳储量还未达到原地貌水平，但是乔木+灌木+草本、乔木+草本、灌木+草本植被恢复模式的土壤碳汇量已高于原地貌<sup>[29]</sup>，固碳速率明显高于人工草地生态系统与草原带自然生态系统，随着复垦年限的增长，土壤碳密度和碳储量的持续积累，复垦地人工生态系统土壤碳库将达到原地貌的平衡状态<sup>[30]</sup>。所以在植被重建中，以乔、灌、草混合配置的群落结构可以有效提高固碳速率，具有更高的碳汇量。

对于农田生态系统的碳汇量，根据准能集团露天矿区生态产品统计报告内容，研究区域主要的农作物为玉米、油料、瓜果、蔬菜，种植面积比例约为：95：1：2：1。不考虑农膜、化肥、农药等农资投入

所产生的碳排放，研究区域农田生态系统总碳汇量为 4.765 t/a，单位面积碳汇量为 514.141 g/(m<sup>2</sup>·a)，表现出较高的碳汇能力。其中，瓜果的碳汇量为-3.821 kg/a，即为碳源，而玉米是复垦区域主要的粮食作物，种植面积大，碳汇能力强，碳吸收量和碳排放量分别为 5.422 t/a 和 0.691 t/a，对碳汇量贡献最大。

不同恢复模式的总碳汇量可见表 4，森林生态系统中有着较强的固碳能力，而且恢复面积大，是复垦区域碳汇量的主要贡献者，尤其是以乔木+灌木+草本为恢复模式的区域，在植被与土壤碳汇量上显著高于其他恢复模式。相比草地生态系统，农田表现出了更强的碳汇能力，所以在草原矿区复垦地开展生态恢复的进程中，应考虑不同植物品种在短期和长期的效用，草本植物种子产量高，在矿区复垦地的土壤中萌发并定居的能力强，可以作为生态修复的先锋植被，可以有效控制土壤侵蚀等现象<sup>[31]</sup>，当草地发生退化时，发展耕地免耕、有机肥技术和秸秆适量返田技术等，严格控制化肥、农药等农业生产资料使用量<sup>[32]</sup>，当土壤中碳储量不断提高时，科学构建乔、灌、草的混级配置的群落结构，增强生态群落整体稳定性，从而提升复垦地人工生态系统的固碳能力及其持续性。

表 4 不同恢复模式总碳汇量

Table 4 Total carbon sequestration of different recovery models

恢复模式	植被碳汇量/(t·a <sup>-1</sup> )	土壤碳汇量/(t·a <sup>-1</sup> )	合计/(t·a <sup>-1</sup> )
乔+灌+草	99.868	42.211	142.079
林地 乔+草	13.008	8.540	21.549
灌+草	4.202	2.571	6.774
草地	1.293	1.594	2.887
农田	4.765	—	4.765
合计	123.136	54.917	178.053

2.3 碳汇量与不同影响因子的关系

通过对研究区域植被碳汇量、土壤碳汇量，生物多样性维护功能评估结果进行相关性分析，如图 6 和图 7 所示。根据灰色关联分析结果显示，植被碳汇量、土壤碳汇量与生物多样性维护功能评估结果的灰色关联指数分别为 0.735 和 0.710，属于显著相关。以乔木+灌木+草本、乔木+草本、灌木+草本为恢复模式的林地生态系统生物多样性维护功能重要性显著高于其他区域，其植被碳汇量、土壤碳汇量也显著高于人工草地生态系统和原地貌<sup>[29, 33]</sup>。

植被碳汇量、土壤碳汇量与各项指标的灰色关联指数见表 5，植被碳汇量与各项指数的关联度：



Margalef 指数 > Simpson 指数 > Shannon-Wiener 指数 > 海拔 > Pielou 指数 > 地形起伏度 > 复垦年限, 植被碳汇量与物种丰富度指数和多样性指数呈显著相关, 与地形起伏度与复垦年限的关联度并不高, 其中与植被丰富度指数关联度最高, 乔木+灌木+草本、乔木+草本、灌木+草本的恢复模式下, 植被类型的丰富度与多样性越高, 其碳汇量越高, 所以在提高植被数量与盖度的同时, 增加植被种类, 丰富植被群落结构可以有效增强群落植被碳汇能力。

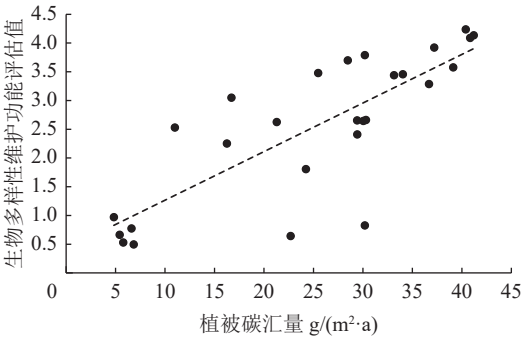


图 6 植被碳汇量与生物多样性维护功能评估值的相关性  
Fig.6 Correlation between vegetation carbon sinks and ability of biodiversity conservation

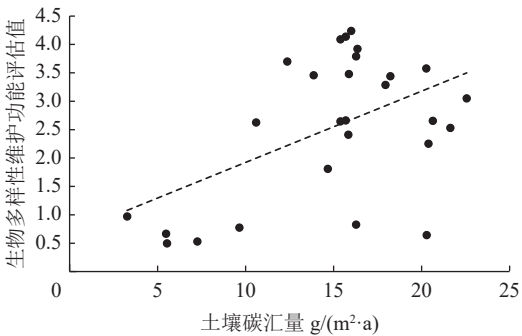


图 7 土壤碳汇量与生物多样性维护功能评估值的相关性  
Fig.7 Correlation between soil carbon sinks and ability of biodiversity conservation

表 5 碳汇量与影响因子的关联度

Table 5 The correlation between carbon sinks and impact factors

影响因子	关联度	
	植被碳汇量	土壤碳汇量
生物多样性维护功能评估结果	0.736	0.710
Margalef 指数	0.721	0.689
Shannon-Wiener 指数	0.715	0.695
Simpson 指数	0.720	0.730
Pielou 指数	0.678	0.758
海拔	0.698	0.842
地形起伏度	0.606	0.698
复垦年限	0.596	0.767

土壤碳汇量与各项指数的关联度: 海拔 > 复垦年限 > Pielou 指数 > Simpson 指数 > 地形起伏度 > Shannon-Wiener 指数 > Margalef 指数, 其中土壤碳密度与海拔、复垦年限、Pielou 指数、Simpson 指数显著相关。复垦区土地扰动明显, 排土场最大高程差约为 85 m。在复垦时间应尽早的同时, 提高植被多样性有助于增强土壤的碳汇水平, 多样的人工植被恢复能够对土壤的碳固定起到积极作用<sup>[18]</sup>。

3 结 论

1) 对于研究区域内五个主要排土场而言, 生物多样性极重要、高度重要、重要、一般和不重要区域的面积占比分别为 2.28%、8.29%、15.67%、25.27%、48.50%。复垦区人工生态系统中, 乔木+灌木+草本配级的生物多样性指数更高, 而人工生态系统有林地的生物多样性维护功能的重要值较高, 人工草地生态系统中约 95% 的区域重要值低于原地貌自然生态系统。

2) 本研究表明除农田生态系统外的植被恢复区域种不同植被恢复模式之间的植被碳汇量差异显著。研究区乔木+灌木+草本、乔木+草本、灌木+草本、草本植被恢复模式的平均植被碳汇量分别为 32.224、29.100、23.670、5.897 g/(m<sup>2</sup>·a), 平均土壤碳汇量分别为 16.909、18.164、13.710 g/(m<sup>2</sup>·a), 已远高于人工草地生态系统(5.897、6.237 g/(m<sup>2</sup>·a))与原地貌(6.427 g/(m<sup>2</sup>·a))。当复垦年限越长、海拔越高、植被丰富性与多样性指数更高时, 植被与土壤碳汇量越高。对比不同的生态修复模式, 森林生态系统有着较强的固碳能力, 尤其是以乔木+灌木+草本为恢复模式的区域, 其植被与土壤碳汇量显著高于其他恢复模式, 是复垦区域碳汇量的主要贡献者, 其次为农田生态系统, 其中, 玉米作为复垦区域主要的粮食作物, 种植面积大, 碳汇量最高, 最后为草地生态系统。

3) 植被与土壤碳汇量与生物多样性维护功能评估结果的灰色关联指数分别为 0.735 和 0.710, 属于显著相关。对比不同影响因子, 物种丰富度指数和多样性指数值越高, 植被碳汇量越大, 而影响土壤碳汇量的最重要因素均为海拔与复垦年限, 海拔越高, 复垦年限越长, 土壤碳汇量越大。在提高植被数量与盖度的同时, 增加植被种类, 丰富植被群落结构可以有效增强群落植被碳汇能力。在复垦时间应尽早的同时, 提高植被多样性有助于增强土壤的碳汇水平。

参考文献(References):

[1] BAIER C, MODERSOHN A, JALOWY F, et al. Effects of recul-

- tivation on soil organic carbon sequestration in abandoned coal mining sites: a meta-analysis[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 20090.
- [2] HUANG Y, TIAN F, WANG Y J, *et al.* Effect of coal mining on vegetation disturbance and associated carbon loss[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(5): 2329–2342.
- [3] 杨博宇, 白中科. 露天煤矿区低碳土地利用途径研究[J]. *中国矿业*, 2019, 28(6): 89–93.
- YANG Boyu, BAI Zhongke. Research on the low-carbon land use in opencast coal mine area[J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(6): 89–93.
- [4] 卞正富, 于昊辰, 韩晓彤. 碳中和目标背景下矿山生态修复的路径选择[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 449–459.
- BIAN Zhengfu, YU Haochen, HAN Xiaotong. Solutions to mine ecological restoration under the context of carbon[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 449–459.
- [5] 张黎明, 张绍良, 侯湖平, 等. 矿区土地复垦碳减排效果测度模型与实证分析[J]. *中国矿业*, 2015, 24(11): 65–70.
- ZHANG Liming, ZHANG Shaoliang, HOU Huping, *et al.* Evaluation model and empirical study of carbon emission reduction effect from mining land reclamation[J]. *China Mining Magazine*, 2015, 24(11): 65–70.
- [6] 张菁. 安太堡露天煤矿不同复垦模式土壤有机碳组分及养分、酶活性变化[D]. 太谷: 山西农业大学, 2019.
- ZHANG Jing. The effect of different reclamation mode on soil organic carbon fractions and nutrients and enzyme activity in antaibao opencast coal mine[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2019.
- [7] VAN DER HEIJDEN M G A, KLIRONOMOS J N, URSIC M, *et al.* Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity[J]. *Nature*, 1998, 396: 69–72.
- [8] ALDAY J G, MARRS R H, MARTÍNEZ-RUIZ C. Soil and vegetation development during early succession on restored coal wastes: a six-year permanent plot study[J]. *Plant and Soil*, 2012, 353(1): 305–320.
- [9] WANG S F, CAO Y G, PIETRZYKOWSKI M, *et al.* Research on the influence of vegetation restoration in loess open-pit coal mines of China: Influencing factors and mechanism[J]. *Ecological Engineering*, 2022, 177: 106549.
- [10] 胡婵娟, 郭雷. 植被恢复的生态效应研究进展[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(9): 1640–1646.
- HU Chanjuan, GUO Lei. Advances in the research of ecological effects of vegetation restoration[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(9): 1640–1646.
- [11] WANG Guangxing, ZHANG Maozhen, GERTNER George Z., *et al.* Uncertainties of mapping aboveground forest carbon due to plot locations using national forest inventory plot and remotely sensed data[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2011, 26(4): 360–373.
- [12] 王晓莉. 基于“3S”的太原西山矿区斜坡地质灾害特征分析[J]. *矿山测量*, 2016, 44(2): 38–40, 44.
- WANG Xiaoli. Characteristics analysis of slope geological hazards in Xishan mining area of Taiyuan based on “3S” [J]. *Mine Surveying*, 2016, 44(2): 38–40, 44.
- [13] QIU S, YU Q, NIU T, *et al.* Restoration and renewal of ecological spatial network in mining cities for the purpose of enhancing carbon Sinks: The case of Xuzhou, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 143: 109313.
- [14] 张益民, 钱谊. 生境评价程序在规划环境影响评价中的应用——以大东港区规划为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(3): 205–209.
- ZHANG Yimin, QIAN Yi. Application of habitat evaluation procedures to planning environment impact assessment—a case study of the planning of Dadong Port district[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(3): 205–209.
- [15] WANG J M, JIAO Z Z, BAI Z K. Changes in carbon sink value based on RS and GIS in the Heidaigou opencast coal mine[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(2): 863–871.
- [16] HUANG L, ZHANG P, HU Y G, *et al.* Vegetation succession and soil infiltration characteristics under different aged refuse dumps at the Heidaigou opencast coal mine[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2015, 4: 255–263.
- [17] 刘铭华, 陈艳梅, 邹长新, 等. 区域尺度生物多样性维护功能综合评估方法与实证研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(3): 287–294.
- LIU Minghua, CHEN Yanmei, ZOU Changxin, *et al.* Comprehensive evaluation method and empirical study of biodiversity maintenance function at regional scale[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(3): 287–294.
- [18] 关炳昌, 刘家豪, 朱宇恩, 等. 矿区恢复植被配置模式对土壤碳库与生物多样性的影响[J]. *山西大学学报(自然科学版)*, 2020, 43(1): 196–205.
- GUAN Bingchang, LIU Jiahao, ZHU Yuen, *et al.* Effect of mining area vegetation restoration types on soil carbon fixation and biodiversity[J]. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, 2020, 43(1): 196–205.
- [19] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. *生态学报*, 1996, 16(5): 497–508.
- FANG Jingyun, LIU Guohua, XU Songling. Biomass and net production of forest vegetation in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(5): 497–508.
- [20] 马琪, 刘康, 张慧. 陕西省森林植被碳储量及其空间分布[J]. *资源科学*, 2012, 34(9): 1781–1789.
- MA Qi, LIU Kang, ZHANG Hui. Carbon storage by forest vegetation and its spatial distribution in Shaanxi[J]. *Resources Science*, 2012, 34(9): 1781–1789.
- [21] 吴友贵, 许大明. 天然阔叶林蓄积量调查的误差分析与控制[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(2): 191–195.
- WU Yougui, XU Daming. Analysis and control of stand volume inventory error in natural broad-leaved forest[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, 30(2): 191–195.
- [22] 党晓宏, 高永, 虞毅, 等. 库布其沙漠北缘 8 种荒漠灌丛生物量预测模型研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(5): 168–174.
- DANG Xiaohong, GAO Yong, YU Yi, *et al.* The biomass estimation models for eight desert shrub species in northern edge of the Hobq Desert[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environ-*

- ment, 2016, 30(5): 168–174.
- [23] 赵梦颖, 孙威, 罗永开, 等. 内蒙古 26 种常见温带灌木的生物量模型[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1219–1228.  
ZHAO Mengying, SUN Wei, LUO Yongkai, *et al.* Models for estimating the biomass of 26 temperate shrub species in Inner Mongolia, China[J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(5): 1219–1228.
- [24] 郭靖, 卢明艳, 张东亚, 等. 样地清查法在森林碳汇估算中的应用进展[J]. 防护林科技, 2016(7): 102–103.  
GUO Jing, LU Mingyan, ZHANG Dongya, *et al.* Application progress of sample plot inventory method in forest carbon sink estimation[J]. *Protection Forest Science and Technology*, 2016(7): 102–103.
- [25] 张驰, 曾维忠, 龚荣发, 等. 基于灰色关联度模型的林业碳汇项目绩效影响因素分析: 以四川省 2 个 CDM 项目为例[J]. 林业经济, 2016, 38(8): 81–85.  
ZHANG Chi, ZENG Weizhong, GONG Rongfa, *et al.* Analysis on the factors influencing the performance of forestry carbon sink project based on grey relational degree model: taking CDM two projects in Sichuan Province as an example[J]. *Forestry Economics*, 2016, 38(8): 81–85.
- [26] 李云鹏, 卞正富, 雷少刚, 等. 西部风积沙区超大工作面开采土地损伤评价[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(4): 188–194.  
LI Yunpeng, BIAN Zhengfu, LEI Shaogang, *et al.* Land damage evaluation in coal mining area with super-size mining face at western aeolian sandy area[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(4): 188–194.
- [27] 高艺宁. 露天煤矿复垦地土壤与植被碳储量研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.  
GAO Yining. Soil and vegetation carbon storage in reclaimed land of opencast coal mine[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
- [28] 刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 等. 碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2237–2240, 2242–2250.  
LIU Xianghong, YAN Yongjun, LIU Wei, *et al.* System construction and the function improvement of ecological carbon sink in coal mining areas under the carbon neutral strategy[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(4): 2237–2240, 2242–2250.
- [29] SHRESTHA R K, LAL R. Carbon and nitrogen pools in reclaimed land under forest and pasture ecosystems in Ohio, USA[J]. *Geoderma*, 2010, 157(3–4): 196–205.
- [30] LAL R, AKALA V. Soil organic carbon sequestration rates in reclaimed minesoils[M]//Agriculture practices and policies for carbon sequestration in soil. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- [31] 刘春雷, 王金满, 白中科, 等. 干旱区草原露天煤矿土地复垦技术分析[J]. 金属矿山, 2011(5): 154–157.  
LIU Chunlei, WANG Jinman, BAI Zhongke, *et al.* Analysis of land reclamation technologies for surface coal mine in arid grassland[J]. *Metal Mine*, 2011(5): 154–157.
- [32] 付梅臣, 郭卫斌, 李建民, 等. 我国煤矿区低碳型土地复垦现状与展望[J]. 中国矿业, 2015, 24(5): 49–52.  
FU Meichen, GUO Weibin, LI Jianmin, *et al.* Low-carbon land reclamation in China's coal mining areas: current situation and prospects[J]. *China Mining Magazine*, 2015, 24(5): 49–52.
- [33] 胡宜刚, 张鹏, 赵洋, 等. 植被配置对黑岱沟露天煤矿区土壤养分恢复的影响[J]. 草业科学, 2015, 32(10): 1561–1568.  
HU Yigang, ZHANG Peng, ZHAO Yang, *et al.* Effects of various vegetation patterns on soil nutrients recovery in Heidaigou coal mine[J]. *Pratacultural Science*, 2015, 32(10): 1561–1568.