

# 矿山生态修复植物碳汇效益研究及种植优化策略

——以东明绿色矿山综合体为例

钟晓勇<sup>1,2</sup>,汪姜超<sup>3</sup>,陈俊彬<sup>1</sup>,赵荣华<sup>1</sup>,鄢 僖<sup>1</sup>,赵 巍<sup>3\*</sup>

(1. 呼伦贝尔东明矿业有限责任公司, 呼伦贝尔 021506;

2. 云南中寮矿业开发投资有限公司, 昆明 650228;

3. 哈尔滨工业大学建筑与设计学院, 寒地城乡人居环境科学与技术工业和信息化部重点实验室, 哈尔滨 150001)

**摘要:**本文运用平均生物量法和动态箱式法对东明绿色矿山综合体生态修复项目中植物碳储量与碳通量进行测算。结果表明,绿化观赏类乔木单棵碳储量远大于生态修复类乔木,生态修复类灌木的单棵碳储量和累计碳储量均远大于景观观赏类灌木,杂草的种植面积和累计碳储量均高于芍药。灌木碳汇总和远大于乔木和草本,单棵吸收量最多的植物类型是灌木,其中碳吸收量最大的植物为沙棘。依据测算结果以及2025年矿山碳汇区域规划,对矿山综合体进行碳汇分区。针对不同分区的特点及功能,选取不同的碳增汇策略,提出具体的植物种植选择及建议。

**关键词:**植物碳汇;植物碳储量;碳汇效益;矿山生态修复;东明煤矿;呼伦贝尔

**中图分类号:**X173

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-2736(2024)05-0023-8

## 0 引言

矿山生态修复作为煤炭企业的未来发展方向,是生态文明建设的一项重要内容<sup>[1]</sup>。针对矿山生态修复问题,党的二十大提出“发展绿色低碳产业,健全资源环境要素市场化配置体系,加快节能降碳先进技术研发和推广应用”<sup>[2]</sup>;自然资源部在《关于探索利用市场化方式推进矿山生态修复的意见》中明确“为加快推进矿山生态修复工作,以政策鼓励和措施促进矿山生态修复工作,通过多种渠道吸引资金投入”<sup>[3]</sup>。

目前,我国煤炭企业矿山修复进程取得了历史性成就,实施了49个历史遗留矿山修复示范工程,累计完成历史遗留废弃矿山治理面积480万亩。然而,相较于对废弃矿山的生态修复,生产矿山存在生态修复与资源开发之间的矛盾以及达到碳中和目标的挑战<sup>[4]</sup>。针对生产矿山的生态修复问题,国务院办公厅发布《关于鼓励和支持社会资本参与生态保护修复的意见》,提出

实施地质灾害隐患治理、矿山破坏土地植被修复、破坏生态单元修复、修复后生态系统重建、合理开展生态利用、参与绿色矿山建设等,提高节约集约利用矿产资源水平<sup>[5]</sup>。此外,国家发展改革委、国家能源局在《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》中提出,完善煤矸石、矿井水、煤矿井下抽采瓦斯等资源综合利用及矿区生态治理与修复支持政策,加大力度支持煤矿充填开采技术推广应用,鼓励利用废弃矿区开展新能源及储能项目开发建设<sup>[6]</sup>。作为矿山生态修复的重要目标,碳中和在促进矿山生产、优化矿山生产模式以及实现矿山环境可持续发展等方面具有引领作用<sup>[7]</sup>,所以研究碳汇效益在矿山生态修复中的作用是实现矿山可持续发展的重要内容<sup>[8]</sup>。

草原生态系统具有涵养水源、净化环境、防风固沙以及防治水土流失等重要的生态功能,同时,草原植物吸收大气中的二氧化碳(CO<sub>2</sub>)等温室气体,并将其固定在植被或土壤中,降低大气

中  $\text{CO}_2$  浓度<sup>[9]</sup>。我国西北地区,由于气候条件和土壤条件的影响,森林面积较小,草原植被对气候和土壤条件的适应能力较强,草原生态系统的功能更有利于区域自然环境的自我调节<sup>[9]</sup>。呼伦贝尔市东明矿山采用种植乔灌木和草本植物的方式开展了矿山生态修复工作,植物碳汇是其重要的碳汇核算对象,本文将对矿山植物碳储量与碳通量进行测算,并总结不同的植物碳汇效益,提出种植优化策略。

## 1 植物碳汇核算方法

### 1.1 项目区概况

呼伦贝尔东明矿山于 2013 年开展绿色矿山建设,确定了“以绿色矿山建设带动矿业转型发展,推动矿产开发与环境保护相协调”的绿色矿业发展思路,攻克了寒区露天矿山生态修复难点工作,进行了寒区本土植被遴选、寒区植被引种驯化、土壤改良等多方面的基础研究,驯化并遴选出乔木 19 种、灌木 15 种、观赏宿根花卉 12 种,形成了良好的生态修复效果。截止到 2021 年,完成生态修复的场地达 210 万平方米,到界排土场复垦率达到 100%。矿区种植樟子松、云杉、紫叶稠李、白桦、杨树、榆树 6 种乔木植物,沙棘、蒿柳、金叶榆、黄槐、榆叶梅、小叶丁香、四季玫瑰、天目琼花、金银忍冬、连翘、毛樱桃、刺榆 12 种灌木植物,芍药 1 种草本植物以及原有场地内的杂草。

植物碳储量是现有矿山中植物的碳元素的储备量,植物碳通量是一定时间内矿山植物碳储量的变化量,两者都可以用来描述植物碳汇的性质。因此本研究将分别测算矿山植物的碳储量和碳通量,并分析矿山植物碳汇效益。

### 1.2 植物碳储量实验方法

植物碳储量实验方法采用平均生物量法。对东明矿山生态修复林使用样方法进行群落因子调查<sup>[10]</sup>,并使用二元回归模型计算生态修复林的生物量。碳储量按生物量乘以转换系数 0.5 进行换算<sup>[11,12]</sup>,以此估算样地尺度和地区尺

度植物碳储量。

样地采用随机设置“米”字形布局的 5 个正方形样方,每个样方大小为  $5\text{m} \times 5\text{m}$ ,共布设样地 740 个。调查因子包括基本因子(地理坐标、海拔、坡度、坡向、坡位、土壤类型、土层厚度、盖度等)及生物因子(优势树种、平均年龄、株数或分枝数、地径、高度、冠幅等)<sup>[13]</sup>。按照生物量估算的“保守性”原则,调查在 7-8 月份开展。样地内分别选取乔木、灌木以及草本植物,测量高度、冠幅、平均地径,进行破坏性采样,分别称取根、干、枝、叶的鲜重及烘干后恒重,计算各部位含水率,并结合鲜质量测定值换算成干质量。

使用植冠面积或植冠投影体作为生物模型量计算基础<sup>[14]</sup>,植冠投影体的计算公式为:

$$V_c = A_c \times h \quad (1)$$

其中, $V_c$ ——植冠投影体积,  $\text{m}^3$ ;  $A_c$ ——植冠面积,  $\text{m}^2$ ;  $h$ ——植物高度,  $\text{m}$ 。

植冠面积的计算公式为:

$$A_c = 1/4\pi C_1 C_2 \quad (2)$$

其中, $C_1$ 、 $C_2$ ——南北和东西方向的冠幅长度,  $\text{m}$ 。

最终得到以植冠投影体积作为自变量因子建立的“生物量—植冠投影体积”的二元方程:

$$y = aV_c^2 + bV_c + C \quad (3)$$

其中, $y$ ——单位植株生物量,  $\text{g}$ 。

### 1.3 植物碳通量实验方法

选用动态箱式法对研究区域内植物进行碳通量的测算<sup>[15]</sup>。实验地点选址主要为矿山外排土场与 666 平台,其中外排土场主要种植沙棘、芍药、黄槐等植被,666 平台主要种植云杉、沙棘、毛樱桃等植被。整体实验流程包括箱体搭建、仪器放置、浓度测量、能力推算、比较分析。箱体搭建主要依靠木方作为骨架以支撑整体结构,顶部为  $1\text{m} \times 1\text{m}$  透明亚克力板,便于阳光直接照射到植物体上,以免植物的光合作用受到干扰;并且顶部留有一定坡度,避免在降雨时造成顶部积水的现象;箱体的四周运用大棚膜进行包裹,底部进行覆土隔绝空气,保证箱体整体的气



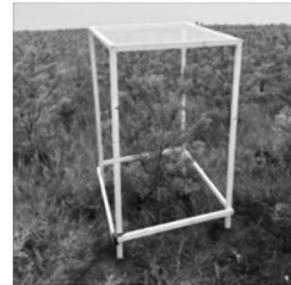

不同植物	修复时间	种植地点	基础对照
16种不同种类植物 沙棘、蒿柳、樟子松、云杉、四季玫瑰、榆叶梅、连翘、忍冬、小叶丁香、毛樱桃、天目琼花、紫叶稠李、黄槐、666平台草本、杂草、刺榆	4年沙棘与9年沙棘	沙棘种植地点：排土场平台与边坡；组合种植类型	设置以土壤与杂草为主的对照组
			

图1 实验分组

密性。实验采用仪器对于箱体内部碳浓度、温度以及湿度进行实时监测。如图1所示,整体实验分为4组。首先对16种不同品种的植物进行碳通测算,其中一组包含以土壤与杂草为主的对照组;根据场地沙棘的修复时间分类,对于4年和9年沙棘分别进行测算;针对沙棘本身种植地点的不同,对于排土场平台以及边坡两地的沙棘进行分别测算。单位植株每日碳通量计算公式为<sup>[16]</sup>:

$$F = V\Delta C/\Delta t \quad (4)$$

其中, $F$ ——碳通量, $g$ ;  $V$ ——箱体体积, $m^3$ ;  $\Delta C$ ——二氧化碳浓度差, $\mu L^{-1}$ ;  $\Delta t$ ——采样时间间隔, $min$ 。

## 2 植物碳汇测算结果

### 2.1 植物碳储量测算结果

矿山综合体21966棵乔木共提供了293.83t的碳储存量,生态修复类乔木共提供了73.6t的碳储量,绿化观赏类乔木共提供了220.17t碳储量。如表1所示,生态修复类乔木的数量远大于绿化观赏类乔木,但碳储量相对较少。就生态修复类乔木而言,云杉提供了远高于樟子松与紫叶稠李的单棵碳储量,具有较好的单位重量碳储存能力。绿化观赏类乔木因树高与胸径均较大,因而在碳储量的计算中提供了更高的碳储量,其中杨树的单棵碳储量和累计碳储量最高。

表1 矿区乔木植物碳储量

植物功能类型	植物种类	数量(棵)	单棵碳储量(g)	累计碳储量(t)
生态修复类	樟子松	8006	3708	5.67
	云杉	6794	8323	56.54
	紫叶稠李	4442	2574	11.43
绿化观赏类	杨树	2483	84500	209.81
	白桦	175	51000	8.92
	榆树	66	21880	1.44
合计		21966		293.83

表 2 矿区灌木植物碳储量

植物功能类型	植物种类	数量(棵)	单棵碳储量(g)	累计碳储量(t)
生态修复类	沙棘	302536	4542	778.72
	蒿柳	50000	2574	227.13
	黄槐	10398	3520	36.60
	小叶丁香	82078	526	43.19
	榆叶梅	23745	686	16.30
	四季玫瑰	9848	1176	11.59
景观观赏类	连翘	8176	1228	10.04
	刺榆	13600	522	7.11
	金银忍冬	2126	1370	2.91
	毛樱桃	4436	375	1.67
	天目琼花	2200	687	1.51
	金叶榆	1062	522	0.55
合计		510205		1137.33

矿山综合体 510205 棵灌木提供了 1137.33t 碳储量,生态修复类 386679 棵植物共提供 1058.76t 碳储量,景观观赏类 123526 棵灌木共提供 58.57t 碳储量。如表 2 所示,生态修复类灌木的单棵碳储量和累计碳储量都远大于景观观赏类灌木。其中,沙棘种植数量最多,提供了 778.72t 累计碳储量,超过了累计碳储量总和的 50%。此外,蒿柳、黄槐、四季玫瑰、金银忍冬与连翘均具有较高的单棵碳储量。

矿山综合体草本共具有 984.76t 碳储存。基底类的杂草共累计碳储量 841.18t,芍药累计 143.58t。如表 3 所示,芍药的单位面积碳储量

高于杂草,为 754g,但是种植面积远低于杂草,其碳存储的作用较低。

## 2.2 植物碳通量测算结果

如表 4 所示,矿山整体植物碳汇总和为 1791.86t,灌木碳汇总和远大于乔木和草本,为 1202.69t。单棵吸收量最多的植物类型是灌木,其中碳吸收量最大的植物是沙棘,其次是黄槐。乔木中紫叶稠李单棵碳吸收量最大,为 4.88g。灌木中的丛生金叶榆以及草本的芍药的单棵碳吸收量最小。

比较不同种植年份、不同种植地点的沙棘碳

表 3 矿区草本植物碳储量

植物种类	数量(m <sup>2</sup> )	单位面积碳储量(g)	累计碳储量(t)
芍药	190100	754	143.58
杂草	2100000	400	841.18
合计	2290100		984.76

表4 矿山植物碳通量

植物种类	数量(棵) (草本单位 为 m <sup>2</sup> )	单棵吸 收的碳 (g)	总吸收碳 (kg)	一年吸收 碳(t)	乔灌草单 株碳汇(g)	乔灌草碳汇 总和(t)	总计(t)
乔木	樟子松	8006	2.76	22.11	8.07		
	云杉	6794	3.26	22.16	8.09	10.90	24.07
	紫叶稠李	4442	4.88	21.67	7.91		
灌木	沙棘	302536	9.03	2731.90	997.14		
	蒿柳	50000	3.40	170.20	62.12		
	金叶榆	1062	0.74	0.79	0.29		
	黄槐	10398	7.59	78.89	28.80		
	榆叶梅	23745	3.36	79.78	29.12	32.44	1202.69
	小叶丁香	82078	2.52	207.00	75.56		
	四季玫瑰	9848	1.61	15.81	5.77		
	天目琼花	2200	1.63	3.58	1.31		
	金银忍冬	2126	1.84	3.91	1.43		
	毛樱桃	4436	0.72	3.17	1.16		
	芍药	190100	0.53	101.32	36.98		
草本	杂草	2100000	0.69	1446.90	528.12	1.22	565.10

吸收量,如图2(a、b)所示,不同种植地点的9年沙棘碳吸收量比4年沙棘碳吸收量高,说明沙棘的碳吸收量可能与其自身生长年份有正向关系。比较两个不同种植地点的沙棘,在边坡种植的沙棘碳储量大幅度高于在平台种植的沙棘,说明边坡的生长环境更加有利于植物的碳吸收,这可能与土壤成分、日照时间以及地形坡度等因素有关。综上,沙棘既是最适应场地环境的植物,也是碳吸收能力最强的植物,因此,在后期种植或者传播过程中,可注重沙棘的应用。

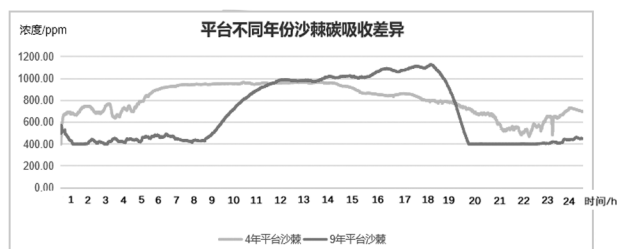
### 3 结论与建议

矿山碳储量测算中,绿化观赏类乔木数量不及生态修复类乔木,但单棵碳储量远大于生态修复类乔木。生态修复类灌木的单棵碳储量和累计碳储量都远大于景观观赏类灌木。杂草的种植面积和累计碳储量都高于芍药。碳通量测算中,灌木碳汇总和远大于乔木和草本,单棵吸收量最多的植物类型是灌木,其中碳吸收量最大的植物是沙棘。

结合碳储量和碳通量的测算,分区种植策略



(a) 边坡不同年份沙棘碳吸收差异



(b) 平台不同年份沙棘碳吸收差异

图2 沙棘碳吸收量比较

和建议可以从二方面入手:(1)东明矿山建设以灌木为主的生态修复林具有更高的碳汇潜力,通过人工抚育和管理,使其碳汇效益得到提升,同时在地理条件上,灌木作为地域优势树种更适宜生长,碳汇潜力高;(2)选用高碳汇植物替代低碳汇植物,提升整体碳汇水平,适应未来演替,对矿山规划起指导作用。

如图 3 所示,结合 2025 年矿山碳汇区域规划,将矿山综合体的碳汇分区分为碳汇林休闲体验区、水生态治理示范区、可持续建设拓展区、产学研转化试验区、边坡碳汇林保护区、平台苗圃种植区 6 个分区。针对不同地区的特点及功能,选取不同的碳增汇策略,提出具体的植物种植选择及建议。

(1)碳汇林休闲体验区功能主要以休闲、景观、生态为主,宜着重于人工林的保护及退化人工林的修复工作。可采取抚育间伐措施,并增加有发达根系、生长 2 年、有着合理高径比的沙棘等灌木植物以保持水土。推荐采用高中低的群落层次,种植以灌木为主的“乔-灌-草”植物搭配,具体可选植物有樟子松、云杉、沙棘、小叶丁香、毛樱桃、榆叶梅、四季玫瑰、天目琼花、金娃娃萱草、苜蓿。

(2)水生态治理示范区功能主要以示范、科研、生态为主,宜着重于人工林的保护及退化人工林的修复工作。可通过控制天然植被与人工植被比例并采取相关措施促进中幼林复壮,以提升人工林的碳汇能力。可选用兼具景观和碳汇双重效益的适合在水边生长的植物,发展以灌木丛为主的种植模式,植物可选择紫叶稠李、小叶丁香、金银忍冬、榆叶梅、蒿柳、芦苇。

(3)产学研转化试验区功能主要以示范及科研为主,宜着重于人工林的保护及退化人工林的修复工作。可采取抚育间伐措施,对中幼龄林进行相关复壮工作。可采用高中低的群落层次,选用景观效益较高的植物美化环境,实施以乔木为主体的“乔-草”或者“乔-灌-草”种植模式,提升整体景观效益的同时增强场地的碳汇能力,植物可选择樟子松、紫叶稠李、黄槐、金叶榆、沙棘、金银忍冬、连翘、四季玫瑰、萱草。

(4)平台苗圃种植区功能主要以景观、生态、休闲为主,考虑到苗圃成熟后移栽至规划区,为后续植物种植选择提供参考,宜着重于林分结构的优化及退化人工林的修复工作。可通过种植蒿柳、樟子松、云杉等多种树种形成混交林,混交度在 0.75 左右,树种间实现合理竞争并对中



图 3 东明矿山综合体 2025 年碳汇分区

幼林进行复壮以提升碳汇潜力。可采用高中低的群落层次,在良好碳汇能力前提下充分优化观赏效果,考虑到苗圃成熟后移栽到规划区域,该片区可选取碳汇能力较强的植物以提供后备资源,植物可选择樟子松、云杉、黄槐、沙棘、小叶丁香、金银忍冬、四季玫瑰、虞美人、金娃娃萱草、芍药。

(5)边坡碳汇林保护区功能主要以可持续发展、生态、示范为主,采取植物轮作模式,宜着重于林分结构的优化并加强当地树种选育。可通过种植混交林使树种间形成合理竞争,并通过种植苜蓿、沙棘等作物改良土壤,保持水土。可种植具有景观和碳汇双层效益的植物,实现边坡美化,以“灌-草”种植模式为主,在地势较为平坦的地区可种植樟子松等乔木预防水土流失,植物可选择樟子松、沙棘、黄槐、小叶丁香、苜蓿。

(6)可持续建设拓展区功能主要以可持续发展、生态、示范、科学研究为主,宜着重于林分结构的优化和人工林的生态保护。可通过改善砍伐方式、种植混交林使植物间形成良性竞争,以此提高碳汇水平。推荐优先种植苜蓿等修复类植物,土壤修复后选用高碳汇灌木或乔木,具体可选植物有樟子松、云杉、紫叶稠李、沙棘、苜蓿。

#### 参考文献(References):

[1] 刘向敏.生态产品价值实现视域下矿山废弃地生态修复与重建[J].中国矿业,2020,29(11):72-75+81.

[2] 习近平.高举中国特色社会主义伟大旗帜为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[J].中国人大,2022,(21):6-21.

[3] 自然资源部.关于探索利用市场化方式推进矿山生态修复的意见[J].有色冶金节能,2019,35(06):3+7.

[4] 孟文文,李鹏,李颂.我国绿色矿山建设制度规范体系及发展趋势研究[J].中国矿业,2023,32:1-9.

[5] 国务院办公厅.关于鼓励和支持社会资本参与生态保护修复的意见[J].中华人民共和国国务院公报,2021,(33):17-21.

[6] 国家发展改革委,国家能源局.关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见(发改能源[2022]206号)[A/OL].(2022-02-11).[https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/11/content\\_5673015.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/11/content_5673015.htm)

[7] 韩丹丹.碳中和目标背景下矿山生态修复的路径选择[J].世界有色金属,2024,(06):156-158.

[8] 顾清华,李学现,卢才武,等.“双碳”背景下露天矿智能化建设新模式的技术路径[J].金属矿山,2023,(05):1-13.

[9] 尉迟文思,郝伟罡,刘春林.我国草原生态系统碳储量现状浅析[J].内蒙古水利,2021,(12):12-14.

[10] 付达夫.西藏自治区灌木林碳储量估算[J].中南林业调查规划,2014,33(04):4-7.

[11] 邹佳勇.森林生态系统碳储量和固碳能力研究进展[J].中国林业经济,2017,(04):74-75.

[12] 徐天蜀.基于遥感信息的森林生物量、碳储量估测技术研究[J].林业调查规划,2008,(03):11-13.

[13] 彭泰来,刘金山,汪瑾,等.西藏人工灌木林碳储量研究[J].中南林业调查规划,2019,38(03):48-51.

[14] Ma R, Zhang Y, Ciaisi P, et al. Stepwise calibration of age-dependent biomass in the integrated biosphere simulator (IBIS) model[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2024, 16.

[15] Chendev Y G, Sauer T J, Ramirez G H, et al. History of East European Chernozem Soil Degradation; Protection and Restoration by Tree Windbreaks in the Russian Steppe [J]. Sustainability, 2015, 7: 705-724.

[16] 郭明明,陈爱军,李东升,等.一种林木微观碳汇计量同化箱装置的设计[J].湖北农业科学,2016,55(05):1291-1294.

作者简介:

第一作者:钟晓勇,1985 年生,男,甘肃陇南人,硕士,云南中寮矿业开发投资有限公司,主要研究方向为地球化学。Email:zxxyxz618@163.com;

通讯作者:赵巍,1985 年生,女,吉林人,博士,哈尔滨工业大学建筑与设计学院,副研究员,主要研究方向为建筑技术科学。Email:zhaoweila@hit.edu.cn

## Research and Planting Optimization Strategy on the Benefit of Plant Carbon Sequestration in Mine Eco – Restoration: A Case Study of Dongming Green Mine Complex

ZHONG Xiaoyong<sup>1,2</sup>, WANG Jiangchao<sup>3</sup>, CHEN Junbin<sup>1</sup>, ZHAO Ronghua<sup>1</sup>, YAN Xi<sup>1</sup>, ZHAO Wei<sup>3\*</sup>

(1, Hulunbuir Dongming Mining Co., Ltd, Hulunbuir 021506, China;

2, Yunnan Zhongliao Mining Development and Investment Co., LTD, Kunming 650228, China;

3, School of Architecture and Design, Harbin Institute of Technology,

Key Laboratory of Cold Region Urban and Rural Human Settlement Environment Science and Technology,

Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The average biomass method and dynamic box method were used to calculate the carbon storage and carbon flux of plants in the ecological restoration project of Dongming green mine complex. The results showed that the carbon storage per tree of greening ornamental trees was much larger than that of ecological restoration trees, the carbon storage per tree and cumulative carbon storage of ecological restoration shrubs were much larger than that of landscape ornamental shrubs, and the planting area and cumulative carbon storage of weeds were higher than that of *Paeonia lactiflora*. The total amount of carbon in shrub is much larger than that in arbor and herb. The plant type with the largest amount of carbon absorption per tree is shrub, and the plant with the largest amount of carbon absorption is sea – buckthorn. According to the calculation results and the 2025 mine carbon sink regional plan, the mine complex will be zoned for carbon sink. According to the characteristics and functions of different zones, different carbon sequestration strategies are selected, and specific plant planting options and suggestions are proposed.

**Key words:** plant carbon sequestration; plant carbon storage; benefits of carbon sequestration; ecological restoration of mines; Dongming Coal Mine; Hulunbuir