

采煤沉陷区林下植物多样性与土壤因子的关系

李欣颖¹, 张 萌^{1,3}, 郭洋楠², 李丹丹¹, 邓 杨¹, 陆兆华¹

(1.中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,北京 100083;2.神华神东煤炭集团有限责任公司技术研究院,陕西 榆林 719315;3.河南省矿山生态修复工程技术研究中心,郑州 450000)

摘要: 为了研究荒漠草原采煤沉陷区生态恢复效果和影响草本层物种多样性的土壤因子,采用时空替代法,选择人工恢复 5,7 年的区域作为研究样地,并将未种植样地(C)作为对照组。通过野外植物群落调查和土壤采样,研究了不同恢复年限的物种多样性及其与土壤因子间的关系。结果表明:(1)相较于对照区,人工恢复增加了菊科(Compositae)、苋科(Amaranthaceae)的数量,减少了禾本科(Gramineae)的数量;人工恢复 5 年后物种数增加,7 年后物种数减少,且多年生草本植物的比例逐渐减少;人工恢复提升了灌木层物种丰富度。(2)人工恢复 7 年后显著增加了草本层的 Shannon-Wiener 多样性指数($P < 0.05$),优势种由以华虫实(*Corispermum stauntonii*)为主的单优群落逐渐转变为以刺藜(*Dysphania aristata*)、大赖草(*Leymus racemosus*)、草木樨状黄耆(*Astragalus melilotoides*)、狗尾草(*Setaria viridis*)等为主的多优群落。(3)在采煤沉陷区进行植被的人工恢复可以提高土壤含水量和全氮含量,且对土壤全氮的影响更显著($P < 0.05$)。相关性分析表明,土壤含水量是对沉陷区草本层 Shannon-Wiener、Simpson 和 Pielou 指数影响最大的环境因子,土壤全氮对 Shannon-Wiener 指数也有影响。研究结果表明,在采煤沉陷区进行植被的人工恢复对提高土壤含水量、土壤全氮,以及改善研究区植被群落结构、提高植物物种多样性具有积极意义。

关键词: 采煤沉陷区; 荒漠草原; 半干旱区; 人工恢复; 植物多样性; 土壤理化性质; 草本层; 时空替代法
中图分类号: Q948.113 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)01-0268-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.01.035

Relationship Between Understory Plant Diversity and Soil Factors in Coal Mining Subsidence Area

LI Xinying¹, ZHANG Meng^{1,3}, GUO Yangnan², LI Dandan¹, DENG Yang¹, LU Zhaohua¹

(1.School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083; 2.Institute of Technology, Shenhua Shendong Coal Group Co. Ltd., Yulin, Shaanxi 719315; 3.Henan Mine Ecological Rehabilitation Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 450000)

Abstract: To study the ecological recovery effect and soil physical and chemical factors affecting the species diversity of herb layer after land subsidence in mining area, we adopted the space-for-time substitution, selected the area of artificial recovery for 5a and 7a as the study sample sites and a sample site without artificial planting (C) as the control group. The plant species diversity index, and its correlation with soil physical and chemical factors within different recovery years were studied based on field plant community survey and soil sampling. The results showed that: (1) Compared with the control area, the number of Compositae and Amaranthaceae increased, and the number of Gramineae decreased. The number of species increased after 5 years, decreased after 7 years of artificial recovery, and the proportion of perennial herbs decreased gradually. Artificial recovery improved the species richness of shrub layer. (2) After 7 years of artificial recovery, the species Shannon-Wiener diversity index of the herb layer increased significantly ($P < 0.05$). The dominant species changed from a single dominant species community dominated by *Corispermum Stauntonii* to a multi-dominant species community dominated by *Dysphania aristata*, *Leymus racemosus*, *Astragalus Melilotoides* and *Setaria viridis*. (3) Artificial vegetation recovery in coal mining subsidence area could improve

收稿日期:2021-07-08

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0503604,2016YFC0501108);国家能源集团科技创新项目(HT(2020)2337 号)

第一作者:李欣颖(1996—),女,硕士研究生,主要从事生态恢复生态研究。E-mail:dorisli678@163.com

通信作者:张萌(1987—),男,副教授,硕士生导师,主要从事生态恢复生态研究。E-mail:zhangmeng@cumtb.edu.cn

SWC and soil TN, and the effect on soil TN was more significant ($P < 0.05$). Correlation analysis showed that SWC was the most important environmental factor affecting Shannon-Wiener, Simpson and Pielou index of herb layer, and TN also affected Shannon Wiener index. These findings indicates that the artificial vegetation recovery in coal mining subsidence area is of positive significance to improve SWC, TN, vegetation community structure and plant species diversity.

Keywords: coal mining subsidence area; desert steppe; semi-arid area; artificial recovery; plant diversity; soil physics and chemistry properties; herb layer; space-for-time substitution

煤炭是中国最常用的能源,在中国能源生产和消费结构中占重要地位。然而煤炭的井工开采导致地表沉陷,使土壤质量受损,植物生境严重破坏,植被根系受损,植物物种多样性受到影响。而生物多样性与生态系统功能和服务的提升有关,它是评价生态系统质量的一个核心标准^[1]。物种多样性是衡量群落结构的指标,物种多样性的减少会影响生态系统稳定性^[2]和生态系统生产力^[3]。在对草原生态系统的研究^[3-4]中发现,物种多样性与生态系统生产力呈正相关。较高的物种多样性能增加人工林的稳定性,促进生态系统功能的发挥^[5]。王健^[6]研究了煤矿井工开采不同沉陷年限对植被和土壤的影响认为,植被的生长受地表沉陷影响不明显,植物群落多样性和稳定性较高。郭玉涛等^[7]对神东采煤塌陷区不同治理年限的沙棘、沙柳(*Salix psammophila*)群落进行研究发现,物种多样性随着治理年限的增加呈现先增加后减少的趋势。但是以上研究都没有涉及到采煤沉陷区人工林林下物种多样性与土壤因子关系的研究。

干旱一半干旱地区占据了全球陆地面积的30%以上,对全球生态系统多样性具有重大贡献^[8]。荒漠草原属于干旱一半干旱地区,是草原向荒漠过度的一个最干旱的草原生态系统类型,植物群落结构简单,物种组成、植被类型与分布等往往容易发生变化,对外界扰动非常敏感,长期受人为和自然干扰,引起了生境破碎化,生态系统稳定性低^[9]。但是,干旱一半干旱地区因其独特环境拥有特定的植被,其生物多样性占据全球生物多样性的20%左右^[8]。林下草本植物通过在群落中占据的生态位影响着生态系统的稳定性^[5],对草本层物种组成和群落结构的研究可以揭示草原生态系统的群落演替方向。由于荒漠草原半干旱区植被的脆弱性和敏感性,采煤沉陷加剧了植被损伤和生境破坏,使土壤质量受损、植物群落结构改变、物种多样性降低^[10],因此,对荒漠草原采煤沉陷区草本层物种多样性的研究就显得很有必要。

时空替代法(space-for-time substitution, SFT)在生态学中常用于研究变化缓慢、时间跨度较大的生态学过程^[11](如群落演替)。在研究群落演替时需要选择能代表不同演替阶段的样地作为研究对象。然

而该方法存在一定的局限性,必须假设研究区域的环境条件基本保持不变^[11]。本研究基于上述假设采用时空替代法,用某一时刻的环境状态替代不同恢复年限人工林的环境变化。

本研究通过对草本层物种多样性与土壤因子的关系的分析,采用时空替代法,按照人工恢复年限将位于荒漠草原采煤沉陷区的神东矿区作为研究区域,将野外实地调查与室内研究结合,对采煤沉陷区的人工林草本层物种多样性、土壤理化性质进行研究,以期能够在一定程度上揭示草本层物种多样性和土壤理化性质在时间尺度上的动态变化规律,为采煤沉陷区地表植被保护、生态恢复和生物多样性管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于神府—东胜矿区,地处内蒙古鄂尔多斯伊金霍洛旗与陕西榆林神木交界处,是黄土高原沟壑区与毛乌素沙漠的过渡地带。地理坐标范围为110°10′00″—110°23′00″E, 39°15′00″—39°25′00″N(图1),气候类型属于北温带半干旱大陆性气候。年均降水量348.3 mm,年均蒸发量2 506.3 mm,是降水量的7倍左右,年均气温6.2℃。地形地貌西北高,东南低,平均海拔1 200 m。神东矿区煤炭资源丰富,是我国最大的井工煤矿开采地,开采面积达 3.12×10^4 km²。矿区地质构造简单,煤炭埋深浅、富潜水,容易形成采煤沉陷区。沉陷区地表多为黄土区及覆沙梁地,地表沟壑起伏,土层薄,形成的采动裂隙明显,尤其在采空区周边形成的边缘裂缝,裂缝宽度在3~50 cm,甚至在部分区域出现台阶,落差最高达1.5 m。采煤沉陷对地表影响极为明显。研究区土壤类型以风沙土为主。植被类型主要为干草原、落叶阔叶灌丛和沙生类型植被。天然植被以灌木和多年生草本为主,主要有黑沙蒿、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、花棒等灌木,主要草本有兴安虫实(*Corispermum chinganicum*)、羊草(*Leymus chinensis*)、丛生隐子草(*Cleistogenes caespitosa*)等。研究区自2011年起进行人工恢复,人工林种植面积55.67 hm²。种植的乔木和灌木树种包括樟子松(*Pinus sylvestris*)、

火炬树(*Rhus typhina*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、沙棘、花棒、柠条锦鸡儿、紫穗槐等。2014 年调查发现,该区域人工林整体成活率 97%,其中乔木成活率为 100%,灌木成活率为 96%,林地覆盖面积增加 169.60%,植被覆盖面积增加 0.46%。

1.2 样地设置

本研究以位于神东矿区采煤沉陷区经过不同年限的人工恢复后的植被和土壤为研究对象,采用时空替代法,选取土壤类型为风沙土、海拔基本相同、坡度平缓、地形地貌相似、地表塌陷程度相同的人工种植 5 年(A)、7 年(B)和未种植(C)的原生自然样地。样地 A、B 分别于 2013 年和 2011 年种植了樟子松、火炬树、刺槐、沙棘、花棒、柠条锦鸡儿、紫穗槐等植被。样地 C 植被处于自然状态,作为未进行人工林种植的对照样地。于样地 A、B 分别选择具有代表性的 4~5 个人工林群落,样地 C 选择 1 个未种植的群落(表 1),研究采煤沉陷区人工恢复后林下草本群落的

物种多样性。每个样地群落大小均为 50 m×50 m。

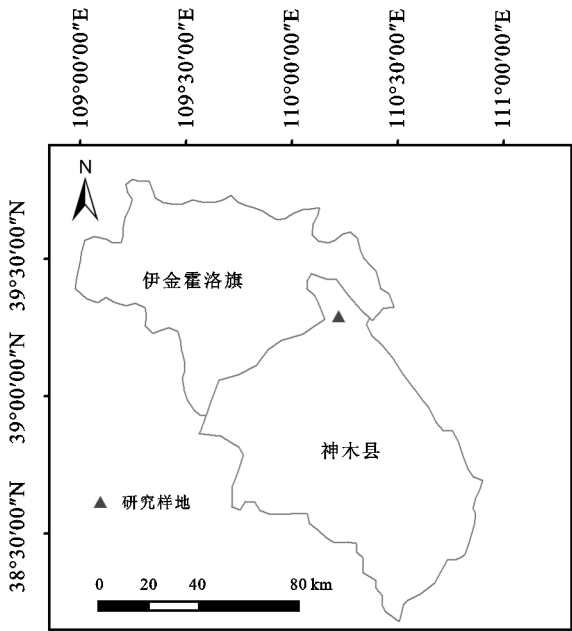


图 1 研究区位置

表 1 样地信息

样地号	群落号	纬度/ (°)	经度/ (°)	海拔/ m	乔灌木层			
					优势种	高度/cm	郁闭度/%	冠幅/cm
A	1	39.298	110.211	1175.29	樟子松(<i>Pinus sylvestris</i>)	223.0	16	95×92
	2	39.299	110.210	1176.05	火炬树(<i>Rhus typhina</i>)	157.5	10	99×115
	3	39.312	110.204	1158.85	花棒(<i>Corethroedendron scoparium</i>)	46.6	26	—
	4	39.313	110.204	1147.77	刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i>)	573.0	26	245×215
B	5	39.296	110.269	1219.18	樟子松(<i>Pinus sylvestris</i>)	346.0	21	112×106
	6	39.296	110.269	1209.17	柠条锦鸡儿(<i>Caragana korshinskii</i>)	268.0	43	540×530
	7	39.296	110.269	1203.72	紫穗槐(<i>Amorpha fruticosa</i>)	236.0	34	275×360
	8	39.296	110.269	1203.29	黑沙蒿(<i>Artemisia ordosica</i>)	87.3	72	—
	9	39.295	110.266	1223.62	沙棘(<i>Hippophae rhamnoides</i>)	212.0	88	245×255
C	10	39.302	110.212	1181.57	花棒(<i>Corethroedendron scoparium</i>)	286.0	36	375×397

1.3 调查取样

野外植被调查和取样于 2018 年 7 月底进行。用手持 GPS 记录各样地经纬度及海拔。采用对角线布点法,在每个样地的对角线设置 3 个 10 m×10 m 乔木样方或 5 m×5 m 灌木样方。进行植被群落调查,调查内容包括乔木和灌木的种类、株数(丛数)、高度、郁闭度、冠幅等,同时记录坡向、坡度等环境数据。在每个大样方对角线设置 3 个 1 m×1 m 的草本样方(距离大样方边界 20 cm 以上),调查草本层的种类、多度、高度、盖度。

土壤采样在每个 1 m×1 m 的小样方旁边采集 4 个深度(0—5,5—10,10—20,20—30 cm)的土壤剖面土样,每个深度重复 3 次,混合后装入密封袋。同时用环刀(100 cm³)进行取样,用于土壤容重和含水量的测定。土壤样品带回实验室自然风干,用于土壤理化指标的分析和测试。

1.4 土壤理化性质测定

土壤物理性质:土壤容重(BD)和含水量(SWC)采用环刀法和烘干法测定。土壤化学性质:土壤全碳(TC)和全氮(TN)用元素分析仪直接测定^[12],土壤 pH 用 pH 计测定(土水比为 1:5)。土壤碳氮比(CN)用全碳与全氮的比值表示。

1.5 数据分析

利用植被调查数据计算物种重要值和多样性指数,分析不同恢复年限草本层物种多样性与土壤因子的变化趋势。

- 1.5.1 重要值公式 物种重要值的计算方法为:
重要值=(相对密度+相对盖度+相对频度)/3
- 1.5.2 物种多样性公式 物种 α 多样性指数反映群落的物种组成、结构类型及其空间分布格局,本研究采用 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数,计算

公式^[13]为:

$$R=S$$
$$H=-\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$
$$D=1-\sum_{i=1}^S P_i^2$$
$$E=H/\ln S$$

式中: R 为 Patrick 丰富度指数; S 为物种 i 所在群落的物种数量; H 为 Shannon-Wiener 多样性指数; P_i 为物种 i 的重要值; D 为 Simpson 优势度指数; E 为 Pielou 均匀度指数; S 为物种 i 所在群落的物种数量。

1.5.3 数据处理 使用 Excel 2010 软件进行基本数据处理,使用 Origin 2018 软件和 R 语言绘图,使用 SPSS 22.0 软件对数据进行统计检验,对不同恢复年限的土壤理化性质进行单因素方差分析(one-way ANOVA),方差分析显著时使用最小显著差异法(LSD)进行多重比较,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。在方差分析之前,检查所有数据的正态性和方差齐性,必要时进行自然对数、平方根或立方根转化以满足方差分析假设,方差不齐时使用 Tamhane’s T2 法进行多重比较。以物种多样性指数为因变量,土壤理化性质为自变量,对物种多样性指数和土壤理化性质进行双变量 Spearman 秩相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同恢复年限植被群落组成和结构

2.1.1 不同恢复年限群落组成的科属特征 由表 2 可知,人工恢复样地 5,7 年共出现植物 77 种,隶属于 26 科 55 属,主要集中于豆科(Leguminosae)、菊科(Compositae)、禾本科(Gramineae)和苋科(Amaranthaceae)。对照区(C)共出现植物 31 种,隶属于 11 科 21 属。其中,禾本科植物 7 种,占总物种数的 22.58%,常见有羊草、丛生隐子草、针茅(*Stipa capillata*)等。样地 5 年共出现植物 70 种,隶属于 25 科 52 属。其中,豆科 12 种,占总物种数的 17.14%,常见有花棒、柠条锦鸡儿、紫花苜蓿、斜茎黄耆(*Astragalus laxmannii*)等;禾本科植物 10 种,占总物种数的 14.29%,常见有大赖草、狗尾草等;菊科植物 8 种。样地 7 年出现植物 30 种,隶属于 10 科 22 属。其中,菊科植物 8 种,占总物种数的 26.67%,常见有黑沙蒿、阿尔泰狗娃花、多色苦蕒(*Ixeris chinensis* subsp. *versicolor*)、青蒿(*Artemisia caruifolia*)和猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)等;豆科植物和苋科植物各 5 种;禾本科植物 4 种。

综上所述,豆科、菊科、禾本科和苋科在 3 个样地中所占比例最大。与对照区相比,在采煤沉陷区对植被进行人工恢复会导致物种数在 5 年后增加,7 年后减少;菊科、苋科植物种数增加,禾本科植物种数在 5

年后增加,7 年后减少。

表 2 不同恢复年限植物群落科和种的分布特征

序号	科	物种数		
		C	5 年	7 年
1	豆科(Leguminosae)	6	12	5
2	菊科(Compositae)	4	8	8
3	禾本科(Gramineae)	7	10	4
4	苋科(Amaranthaceae)	3	7	5
5	杨柳科(Salicaceae)	—	5	—
6	松科(Pinaceae)	1	2	—
7	蔷薇科(Rosaceae)	—	3	—
8	唇形科(Lamiaceae)	1	2	—
9	大戟科(Euphorbiaceae)	2	2	1
10	槭树科(Sapindaceae)	—	1	—
11	漆树科(Anacardiaceae)	—	1	—
12	无患子科(Sapindaceae)	—	1	—
13	卫矛科(Celastraceae)	—	1	—
14	木犀科(Oleaceae)	—	2	—
15	榆科(Ulmaceae)	—	1	—
16	胡颓子科(Elaeagnaceae)	—	1	1
17	夹竹桃科(Apocynaceae)	4	3	3
18	蒺藜科(Zygophyllaceae)	—	1	—
19	马齿苋科(Portulacaceae)	—	1	—
20	牻牛儿苗科(Geraniaceae)	—	1	—
21	旋花科(Convolvulaceae)	1	1	1
22	鸭跖草科(Commelinaceae)	—	1	—
23	紫葳科(Bignoniaceae)	1	1	1
24	十字花科(Brassicaceae)	1	—	1
25	石蒜科(Amaryllidaceae)	—	1	—
26	石竹科(Caryophyllaceae)	—	1	—

注:—表示不同恢复年限中未出现该科。下同。

2.1.2 不同恢复年限群落组成的物种特征 将草本植物按生活型划分为一二年生草本和多年生草本 2 种(图 2),对 3 个样地各自所占比例进行分析后发现,多年生草本植物种数占其草本层植物种数的比例由大到小依次为 C(84.0%)>5 年(62.5%)>7 年(54.5%),对照区的草本层植物以多年生草本为主,且显著高于人工林,随着恢复年限的增加,多年生草本(如华虫实)的比例减少,一二年生草本(如狗尾草、草木樨状黄耆(*Astragalus melilotoides*)、阿尔泰狗娃花、地锦草(*Euphorbia humifusa*)、刺藜(*Dysphania aristata*))的比例增加(表 3)。说明人工恢复 7 年后,多年生植物的比例逐渐减少。

2.1.3 不同恢复年限的物种重要值变化 由表 3 可知,3 个样地共发现植物 83 种,其中乔木 15 种,灌木 16 种,草本植物 52 种,草本植物占物种总数的 62.7%。灌木层中,黑沙蒿在样地 C、5 年和 7 年的重要值分别为 31.22%,24.14%,14.69%,花棒的重要值在 5 年后由 8.31%增加到 28.92%,沙棘的重要值在 7 年后由 4.05%增加到 26.13%。对照区灌木层物种数最

少,结构单一,优势种为黑沙蒿(31.22%)。花棒和黑沙蒿作为先锋物种在 5 年时最先占据灌木层,7 年时显著增加的沙棘(26.13%)和紫穗槐(18.73%)逐渐争夺了花棒(11.30%)的生态位,使沙棘成为样地 7 年灌木层的优势种。人工恢复使沉陷区灌木层物种丰富度得到了极大的提升,且豆科植物增加;同时,沙棘和紫穗槐的增多,表明这 2 种灌木适合在半干旱荒漠草原的采煤沉陷区生长。

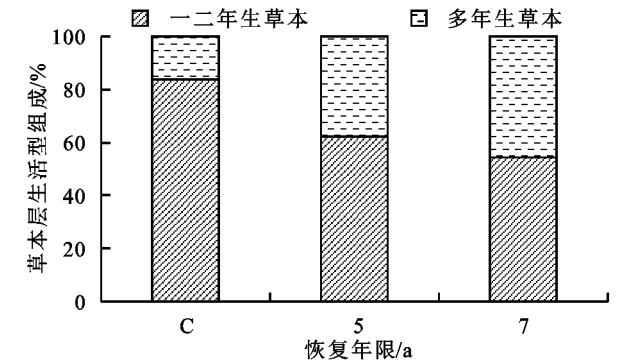


图 2 不同恢复年限草本植物生活型组成

对草本层物种重要值研究发现,不同恢复年限的草本层优势种发生了明显的改变。对照区的优势种为兴安虫实(11.79%)和羊草(11.44%),伴生种有丛生隐子草、针茅、百里香、硬质早熟禾(*Poa sphondylodes*)、阿尔泰狗娃花和华北白前(*Cynanchum hancockianum*)(表 3)。样地 5 年优势种为华虫实(38.41%),伴生种有大赖草、狗尾草和兴安虫实。样地 7 年为多优势种群落,重要值均匀分布的物种包括刺藜(9.72%)、大赖草(8.72%)、草木樨状黄耆(8.48%)、狗尾草(8.21%)、地锦草(8.00%)、阿尔泰狗娃花(7.57%)。3 个样地的草本层植物主要为苋科、禾本科和豆科。人工恢复 7 年后草本层群落均匀度增加,优势种由以华虫实(5 年)为主的单优群落逐渐转变为以刺藜、大赖草、草木樨状黄耆、狗尾草等(7 年)为主的多优群落。具体来看,与对照区相比,兴安虫实、羊草、针茅、百里香、丛生隐子草、硬质早熟禾、华北白前重要值显著减少,华虫实、大赖草、狗尾草、草木樨状黄耆、地锦草、糙隐子草重要值显著增加,刺藜的重要值先减少后增加,表明人工恢复使多年生草本比例减少,苋科植物的比例增加,禾本科植物的比例减少。

2.2 不同恢复年限草本层物种多样性

对不同恢复年限植物群落草本层物种丰富度、多样性、优势度、均匀度指数进行比较(表 4)。与对照区相比,人工恢复使 *H*、*D* 和 *E* 指数随着恢复年限逐渐增加,7 年后 *H*(1.29)、*D*(0.66)和 *E*(0.62)指数最高(表 4 和图 3),其中 Shannon—Wiener 多样性指数显著提高($P<0.05$),比对照区(0.81)高了 37%。Patrick 丰富度指数在人工恢复 5 年后增加(13.83),

7 年后下降(10.78),总体呈现出高于对照区(8.80)的状态(表 4)。

表 3 不同恢复年限植物群落物种组成及其重要值

层次	物种名	重要值/%		
		C	5 年	7 年
灌木层	花棒(<i>Corethroedendron scoparium</i>)	8.31	28.92	11.30
	黑沙蒿(<i>Artemisia ordosica</i>)	31.22	24.14	14.69
	柠条锦鸡儿(<i>Caragana korshinskii</i>)	7.29	8.98	6.90
	沙冬青(<i>Ammopiptanthus mongolicus</i>)	—	7.48	—
	沙柳(<i>Salix psammophila</i>)	—	4.76	—
	地梢瓜(<i>Cynanchum thesioides</i>)	8.93	4.47	10.31
	牛枝子(<i>Lespedeza potaninii</i>)	22.57	4.38	—
	沙棘(<i>Hippophae rhamnoides</i>)	—	4.05	26.13
	紫穗槐(<i>Amorpha fruticosa</i>)	—	4.02	18.73
	金钟花(<i>Forsythia viridissima</i>)	—	3.79	—
	尖叶铁扫帚(<i>Lespedeza juncea</i>)	—	2.73	—
	胡枝子(<i>Lespedeza bicolor</i>)	20.19	2.28	6.96
	雀瓢(<i>Cynanchum thesioides</i> var. <i>australe</i>)	1.48	—	4.97
草本层	华虫实(<i>Corispermum stauntonii</i>)	1.20	38.41	—
	大赖草(<i>Leymus racemosus</i>)	3.55	10.13	8.72
	狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)	2.77	7.53	8.21
	兴安虫实(<i>Corispermum chinganicum</i>)	11.79	5.15	5.04
	羊草(<i>Leymus chinensis</i>)	11.44	0.31	—
	紫花苜蓿(<i>Medicago sativa</i>)	—	3.39	—
	丛生隐子草(<i>Cleistogenes caespitosa</i>)	8.73	3.19	—
	硬质早熟禾(<i>Poa sphondylodes</i>)	7.85	2.90	2.19
	刺藜(<i>Dysphania aristata</i>)	4.40	2.79	9.72
	针茅(<i>Stipa capillata</i>)	8.28	—	—
	百里香(<i>Thymus mongolicus</i>)	7.93	—	—
	藜(<i>Chenopodium album</i>)	—	2.29	3.52
	草木樨状黄耆(<i>Astragalus melilotoides</i>)	2.19	1.96	8.48
	地锦草(<i>Euphorbia humifusa</i>)	2.02	1.86	8.00
	阿尔泰狗娃花(<i>Aster altaicus</i>)	6.22	1.84	7.57
	斜茎黄耆(<i>Astragalus laxmannii</i>)	—	1.58	—
	华北白前(<i>Cynanchum mongolicum</i>)	6.16	0.30	—
	猪毛蒿(<i>Artemisia scoparia</i>)	4.28	—	2.16
	长芒草(<i>Stipa bungeana</i>)	2.24	—	—
	角蒿(<i>Incarvillea sinensis</i>)	2.13	1.31	4.43
	沙蒿(<i>Artemisia desertorum</i>)	—	1.23	3.82
	披碱草(<i>Elymus dahuricus</i>)	—	1.17	—
	小藜(<i>Chenopodium ficifolium</i>)	—	1.05	5.48
	糙隐子草(<i>Cleistogenes squarrosa</i>)	—	0.80	8.09
	多色苦蕒(<i>Ixeris chinensis</i> subsp. <i>versicolor</i>)	—	—	2.98
	小花花旗杆(<i>Dontostemon micranthus</i>)	—	—	2.94
	青蒿(<i>Artemisia caruifolia</i>)	—	—	2.87
	雾冰藜(<i>Bassia dasyphylla</i>)	—	—	1.36
	山蒿(<i>Artemisia brachyloba</i>)	—	0.39	1.31
	菟丝子(<i>Cuscuta chinensis</i>)	—	—	1.04
	黄花蒿(<i>Artemisia annua</i>)	—	0.33	1.04
	砂珍棘豆(<i>Oxytropis racemosa</i>)	1.79	—	—
	多年生花旗杆(<i>Dontostemon perennis</i>)	1.69	—	—

Simpson 优势度指数的增加(0.66)说明群落优

势种变少,即优势种的优势度变小,物种分布变均匀,形成多优群落。Pielou 均匀度指数的增加(0.62)表明群落物种分布的均匀性随着恢复年限增加。人工恢复增加了物种的种间竞争,对群落的生长存在一定的干扰,这显著增加了草本层的物种丰富度、多样性、优势度和均匀度指数。人工恢复 5 年后生态系统基本稳定,不适合在此生态位生长的物种逐渐被淘汰,物种丰富度随之降低,这可以用来解释 R 指数先增加(13.83)后减少(10.78)这一现象。表明对采煤沉陷区进行人工恢复,可使草本层的物种多样性、优势度、均匀度指数随着恢复年限逐渐增加。

2.3 不同恢复年限土壤理化性质

由表 5 可知,恢复年限对土壤 pH 的影响不显著($P>0.05$),与对照区相比,土壤 pH 随着恢复年限先增加(7.06)后减少(6.90)。土壤容重在 5 年后降低(1.50 g/cm^3)并保持稳定。土壤含水量总体呈现升高的趋势,随着恢复年限先增加(8.52%)后减少(7.68%),但仍然高于对照区(7.38%),说明人工恢复可以提高沉陷区土壤含水量。由图 4 可知,土壤全氮总量(0—300 cm)在人工恢复 5 年后增长显著,增长量高达 43%,且在土壤表层(0—5 cm)积累最多,呈现随着恢复年限逐渐增加的趋势。土壤全碳和碳氮比先增加(457.20 g/kg,116.17)后减少(227.91 g/kg,33.78),恢

复年限对土壤全碳和碳氮比影响显著($P<0.05$)(表 5),土壤表层全碳含量随着恢复年限变化不大。结果表明,人工恢复使土壤全碳和碳氮比在 5 年后上升,7 年后下降,土壤含水量和土壤全氮在 7 年后上升,说明在采煤沉陷区进行植被的人工恢复可以提高土壤含水量和土壤全氮,且对土壤全氮的影响更显著($P<0.05$)。

表 4 草本层物种丰富度、多样性、优势度和均匀度指数比较

物种多样性指数	C	5 年	7 年
Patrick 丰富度指数(R)	$8.80\pm1.5a$	$13.83\pm6.8a$	$10.78\pm3.2a$
Shannon-Wiener 多样性指数(H)	$0.81\pm0.3b$	$1.10\pm0.3ab$	$1.29\pm0.3a$
Simpson 优势度指数(D)	$0.61\pm0.2a$	$0.64\pm0.1a$	$0.66\pm0.1a$
Pielou 均匀度指数(E)	$0.47\pm0.2a$	$0.53\pm0.2a$	$0.62\pm0.1a$

注:表中数据为平均值±标准差;同行不同小写字母代表恢复年限间物种多样性指数差异显著($P<0.05$)。

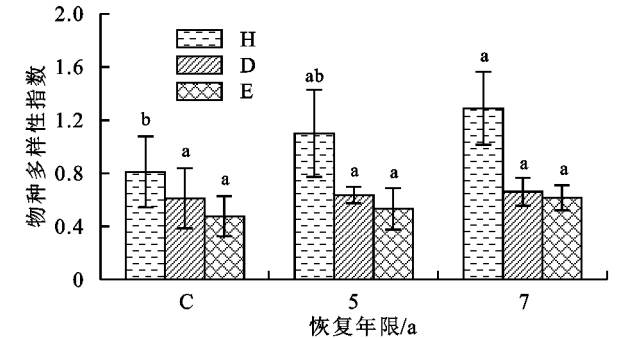


图 3 不同恢复年限草本层物种多样性指数

图 3 不同恢复年限草本层物种多样性指数

表 5 不同恢复年限的土壤理化性质

恢复年限/a	pH(H ₂ O)	容重/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水量/%	全氮/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全碳/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碳氮比
C	$6.92\pm0.02a$	$1.55\pm0.02a$	$7.38\pm0.2a$	$6.57\pm0.05b$	$329.67\pm0.14a$	$78.52\pm2.80a$
5	$7.06\pm0.02a$	$1.50\pm0.05a$	$8.52\pm0.8a$	$11.47\pm0.26a$	$457.20\pm0.08a$	$116.17\pm1.67a$
7	$6.90\pm0.03a$	$1.50\pm0.05a$	$7.68\pm0.5a$	$11.75\pm0.12a$	$227.91\pm0.20b$	$33.78\pm2.67b$

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母代表恢复年限间土壤理化性质差异显著($P<0.05$)。

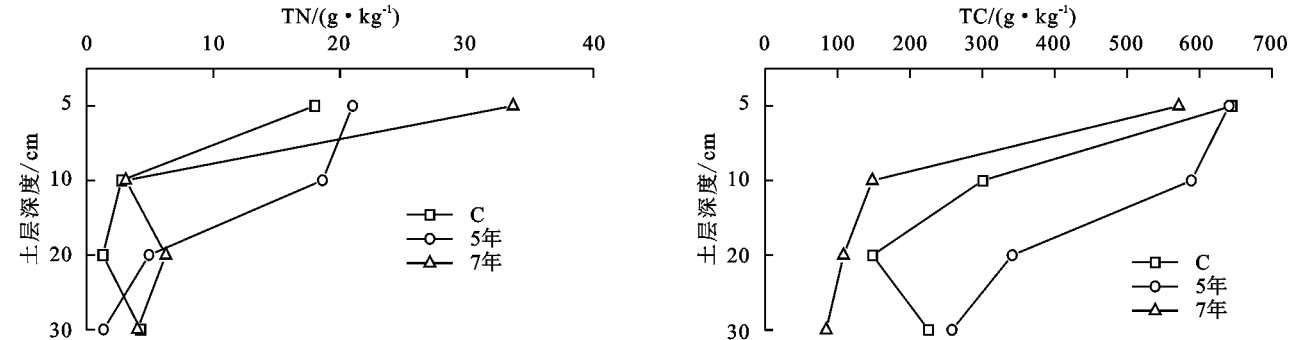


图 4 不同恢复年限土壤剖面全氮和全碳的变化

2.4 不同恢复年限林下物种多样性与土壤理化性质的关系

对草本层植物物种多样性和土壤理化因子进行双变量 Spearman 秩相关性分析(表 6 和图 5)发现,土壤 pH、容重、全碳、碳氮比与物种丰富度、多样性、优势度、均匀度指数无显著相关性;土壤含水量与 Shannon—

Wiener($r=0.733, P<0.05$)、Simpson ($r=0.867, P<0.01$)和 Pielou($r=0.733, P<0.05$)指数呈显著或极显著正相关,即土壤含水量越高,草本层 Shannon—Wiener、Simpson 和 Pielou 指数越大;土壤全氮与 Shannon—Wiener 指数($r=0.648, P<0.05$)呈显著正相关,即土壤全氮含量越高,草本层 Shannon—Wiener 指数越大。

表 6 植物物种多样性指数与土壤理化因子间的相关系数

物种多样性指数	pH	容重	含水量	全氮	全碳	碳氮比
Patrick 丰富度指数(<i>R</i>)	−0.183	−0.433	0.146	0.140	0.348	0.274
Shannon-Wiener 多样性指数(<i>H</i>)	0.139	−0.333	0.733 *	0.648 *	0.103	−0.309
Simpson 优势度指数(<i>D</i>)	−0.091	−0.042	0.867 **	0.358	−0.006	−0.236
Pielou 均匀度指数(<i>E</i>)	−0.115	0.139	0.733 *	0.503	−0.212	−0.576

注：* 和 * 分别表示显著性水平达到极显著($P<0.01$)和显著($P<0.05$)。

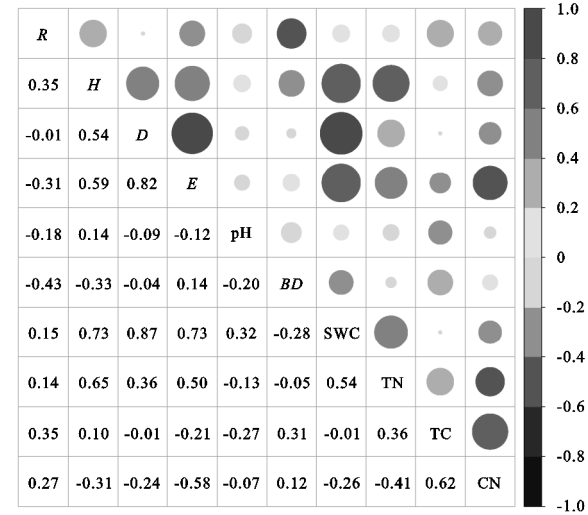


图 5 植物物种多样性指数与土壤理化因子间的相关性

3 讨论

3.1 恢复年限对荒漠草原采煤沉陷区群落物种组成的影响

研究区进行植被的人工恢复会减少多年生草本植物的比例。人工恢复破坏了生态系统稳定性^[14]，降低了多年生植物的比例。在人工恢复初期(7年后)，多年生植物比例低于对照区；随着人工种植，草本层植被的生境发生大幅度改变，在水分允许的情况下，一年生草本植物在恢复初期发育良好，随着恢复年限的增加，生态系统趋于稳定，多年生植物的比例将会逐渐增加。

对群落重要值的研究发现，灌木层的优势种有黑沙蒿、花棒和沙棘，这 3 种植物非常适应干旱少雨的环境，根系生长能力极强，叶片细小，光合能力强，水分蒸发少。菊科的黑沙蒿适合在荒漠草原风积沙区生长；花棒的根系抗拉能力极强，整株根系的垂直拔力比沙柳高出 44.92%^[15]，而且根系很深，能够在采煤塌陷这种地形下很好地存活；沙棘生长的最适宜土壤含水率为 8%^[16]，与研究区平均含水率高度一致，而且沙棘生长迅速，能提高土壤碳氮含量^[17]，降低土壤容重^[17-18]。因此黑沙蒿、花棒和沙棘在 3 个样地的灌木层占据了主要位置。此外，样地 7 年紫穗槐的重要值(18.73%)仅此于沙棘(26.13%)，可能是因为豆科植物固氮能力较强，通过人工种植沙棘和紫穗槐，

改变了灌木层的群落结构，因此人工恢复后与恢复前的群落物种组成有较大变化。这也为沙棘和紫穗槐在该地区的种植提供了依据。

研究区草本层植物主要以豆科、苋科和禾本科为主，但是随着恢复年限的增加，禾本科植物(如羊草、针茅、丛生隐子草)减少、苋科植物增加(如刺藜、华虫实)，可能是发生了轻度沙漠化^[19]。刺藜、兴安虫实、华虫实、糙隐子草、草木樨状黄耆等豆科、苋科和禾本科植物属于 C4 植物，C4 植物对于干旱胁迫有较强的抗性，在干旱的情况下会收缩气孔减少蒸腾作用，固碳效率高，光合能力强，适合在荒漠草原的生境中生存。朱国栋等^[20]研究发现，极端干旱会增加猪毛菜(苋科)的重要值。进行人工恢复后，草本层群落优势种由以华虫实(5 年)为主的单优群落逐渐转变为以刺藜、大赖草、草木樨状黄耆、狗尾草等(7 年)为主的多优群落，这说明人工恢复提高了群落物种的均匀度和优势度，同时也预示着群落稳定性逐渐提高。

3.2 恢复年限对荒漠草原采煤沉陷区物种多样性的影响

研究区自然恢复样地的草本层物种多样性低，黑沙蒿为灌木层优势种。黑沙蒿存在化感作用(allelopathy)，它会释放化学物质抑制周围草本植物(如虫实、草木樨状黄耆)根系的生长^[21]，这导致黑沙蒿种群不断扩大，草本层植物物种多样性持续降低。在采煤塌陷区进行人工种植改变了灌木林的草本层优势种，同时也改变了群落组成、结构和群落演替的方向。人工植被恢复使生境异质性增加，既抑制了优势植物种群的竞争势，又为其他物种的入侵和种群扩大创造了机会，从而使物种多样性增加。草本层物种多样性、优势度、均匀度指数随着恢复年限呈现增加的趋势。丰富度指数先增加后减少，这与郭玉涛等^[7]研究的沙棘群落的草本层丰富度指数变化趋势一致。这是因为物种多样性部分取决于生态系统稳定性，在人工恢复初期稳定性遭到破坏，加上种植的乔木林和灌木林抢夺了草本植物大量的生存空间、水分和养分，对草本植物的生存构成了威胁或竞争，草本层物种丰富度逐渐变少，一些生存能力或竞争能力弱的物种在演替的过程中逐渐被淘汰。在恢复年限增加的过程

中,群落物种多样性和优势度指数增加,草本群落由单优群落变为多优群落,种间对资源和空间的竞争增加,但随着生态位分化能更加有效地利用资源环境,维持长期较高的生产力,群落结构逐渐复杂,具有更大的稳定性,生态系统对环境波动的抵抗力和恢复力稳定性也会变强。

3.3 荒漠草原采煤沉陷区物种多样性与土壤理化因子的相关关系

人工恢复后土壤容重降低,可能是因为沙棘的种植降低了土壤容重^[18],也可能是因为人工恢复改善了研究区的土壤风蚀沙化作用。唐庄生等^[19]发现,土壤容重会随着沙漠化程度的加剧而增加,也就是说沙漠化程度的改善可以降低土壤容重,使土壤细砂粒增加,这有利于土壤对水分和养分(碳氮)的贮存。

土壤含水量是对植被生长最关键的影响因素,对植被恢复或重建起到了决定性作用^[19]。在极端干旱的情况下,荒漠草原植物群落逐渐演化为以一二年生草本为主,且物种丰富度指数和多样性指数显著降低^[20]。人工恢复 5 年后土壤含水量升高最明显,可能因为恢复初期乔木林和灌木林根系生长迅速,一年生草本植物在土壤含水量高的状态下迅速生长,因此土壤保水能力提高。

人工灌木林增加了凋落物量可以作为土壤全氮和全碳增加的部分原因。王春阳^[22]发现,灌木的凋落物中可溶性有机物的生物降解率大于乔木和草本,这有利于土壤对有机物的转换和利用以及生态系统的恢复。土壤全氮的显著增加与豆科植物的比例有关,豆科植物固氮能力强,其固氮作用是通过在植物根部形成根瘤菌实现的。土壤全碳和碳氮比在人工恢复 7 年后减少,甚至低于恢复前,这可能与煤炭开采引起的地面塌陷有关。研究区域生态系统稳定性较低,煤炭开采引发的地面塌陷、裂缝以及人工恢复的扰动破坏了生态系统稳定性,导致土壤全碳和碳氮比波动并呈现先增加后减少的状态。

相关性分析发现,草本层物种多样性的变化主要与土壤含水量和土壤全氮有关,说明土壤含水量和土壤全氮是对荒漠草原采煤沉陷区植被生长影响最大的土壤因子^[23]。研究区为半干旱风沙区,该区域降水少,土壤表层含水量较低,因此植物生长的主要限制因子是水分;同时,受到采煤沉陷的影响,沉陷区地下水潜水水位下降^[24],土壤含水量难以得到补充,更加剧了水分对植被生长的限制。王琦等^[25]对大柳塔采煤塌陷区研究发现,土壤含水量与物种多样性显著正相关;秦建蓉等^[26]认为,荒漠草原土壤含水量较高

时,物种相对丰富;王蒙等^[27]认为,土壤全氮对植物影响显著。但是 Dingaan 等^[28]认为,半干旱草原的土壤 pH 是对植物多样性影响最大的环境变量,这与本研究在采煤塌陷区得出的结论不符。这可以用塌陷区独特的地形地貌来解释。煤炭井工开采引起地面塌陷和裂缝,土体结构破坏、土壤水分和养分流失^[10, 29],在地面裂缝处的水分流失最严重^[30],土壤碳氮等养分也会随着地下径流一起流失;地面沉陷还导致裂缝处植物根系拉伤甚至断裂^[24],而且自然恢复 10 年后塌陷区的植物群落结构和土壤理化性质仍然难以恢复到塌陷前的水平^[10]。因此,在采煤沉陷区进行植被的人工恢复对提高土壤含水量、土壤全氮,以及改善研究区植被群落结构、提高植物物种多样性具有积极意义。

4 结论

(1)对不同恢复年限进行群落调查后发现,人工恢复样地共调查到植物 26 科 55 属 77 种。人工恢复与对照区相比,菊科、苋科的数量增加,禾本科的数量减少。

(2)相较于对照区,人工恢复 5 年后物种数增加,7 年后物种数减少,且多年生草本的比例逐渐减少。人工恢复提升了灌木层物种丰富度,相较于黑沙蒿和花棒,沙棘和紫穗槐更适合在半干旱荒漠草原的采煤沉陷区种植。

(3)人工恢复 7 年后显著增加了人工林草本层的 Shannon-Wiener 多样性指数($P < 0.05$),优势种由以华虫实为主的单优群落逐渐转变为以刺藜、大赖草、草木樨状黄耆、狗尾草等为主的多优群落。

(4)在采煤沉陷区进行植被的人工恢复可以提高土壤含水量和土壤全氮,且对土壤全氮的影响更显著($P < 0.05$)。

(5)相关性分析表明,土壤含水量是对沉陷区草本层 Shannon-Wiener、Simpson 和 Pielou 指数影响最大的环境因子,土壤全氮对 Shannon-Wiener 指数也有影响。

参考文献:

- [1] Prach K, Tolvanen A. How can we restore biodiversity and ecosystem services in mining and industrial sites? [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(14):13587-13590.
- [2] Pennekamp F, Pontarp M, Tabi A, et al. Biodiversity increases and decreases ecosystem stability [J]. Nature, 2018, 563(7729):109-112.
- [3] 孙小丽,康萨如拉,张庆,等.荒漠草原物种多样性、生产力与气候因子和土壤养分之间关系的研究[J].草业学

- 报,2015,24(12):10-19.
- [4] 马文静,张庆,牛建明,等.物种多样性和功能群多样性与生态系统生产力的关系:以内蒙古短花针茅草原为例[J].植物生态学报,2013,37(7):620-630.
- [5] 朱媛君,杨晓晖,时忠杰,等.林分因子对张北杨树人工林林下草本层物种多样性的影响[J].生态学杂志,2018,37(10):2869-2879.
- [6] 王健.神东煤田沉陷区生态受损特征及环境修复研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
- [7] 郭玉涛,王义,曹雪峰,等.神东矿区不同治理年限典型灌木群落调查与分析[J].中国水土保持,2019(12):52-55.
- [8] Maestre F T, Quero J L, Gotelli N J, et al. Plant species richness and ecosystem multifunctionality in global drylands [J].Science,2012,335(6065):214-218.
- [9] 陈林,辛佳宁,苏莹,等.异质生境对荒漠草原植物群落组成和种群生态位的影响[J].生态学报,2019,39(17):6187-6205.
- [10] 王双明,杜华栋,王生全.神木北部采煤塌陷区土壤与植被损害过程及机理分析[J].煤炭学报,2017,42(1):17-26.
- [11] Damgaard C. A critique of the space-for-time substitution practice in community ecology [J].Trends in Ecology and Evolution,2019,34(5):416-421.
- [12] Yan M F, Fan L N, Wang L. Restoration of soil carbon with different tree species in a post-mining land in eastern Loess Plateau, China [J].Ecological Engineering, 2020,158:e106025.
- [13] Peet R K. The measurement of species diversity [J].Annual Review of Ecology and Systematics,1974(5):285-307.
- [14] 陶利波,于双,王国会,等.封育对宁夏东部风沙区荒漠草原植物群落特征及其稳定性的影响[J].中国草地学报,2018,40(2):67-74.
- [15] 田佳,曹兵,及金楠,等.防风固沙灌木花棒沙柳根系生物力学特性[J].农业工程学报,2014,30(23):192-198.
- [16] 王浩,黄晨璐,杨方社,等.砒砂岩区沙棘根系的生境适应性[J].应用生态学报,2019,30(1):157-164.
- [17] 方瑛,马任甜,安韶山,等.黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究[J].环境科学,2016,37(3):1121-1127.
- [18] 卢立娜,赵雨兴,胡莉芳,等.沙棘(*Hippophae rhamnoides*)种植对鄂尔多斯砒砂岩地区土壤容重、孔隙度与贮水能力的影响[J].中国沙漠,2015,35(5):1171-1176.
- [19] 唐庄生,安慧,邓蕾,等.荒漠草原沙漠化植物群落及土壤物理变化[J].生态学报,2016,36(4):991-1000.
- [20] 朱国栋,郭娜,韩勇军,等.极端干旱对内蒙古荒漠草原植物群落物种多样性和土壤性质的影响[J].中国草地学报,2021,43(3):52-59.
- [21] 邓文红.黑沙蒿群落植物演替过程中的化感作用研究[D].北京:北京林业大学,2016.
- [22] 王春阳.黄土高原生态重建中植物凋落物碳氮在土壤中转化特性研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2011.
- [23] 刘英,雷少刚,陈孝杨,等.神东矿区植被覆盖度时序变化与驱动因素分析及引导恢复策略[J].煤炭学报,2021,46(10):3319-3331.
- [24] Bian Z F, Lei S G, Inyang H I, et al. Integrated method of RS and GPR for monitoring the changes in the soil moisture and groundwater environment due to underground coal mining [J]. Environmental Geology, 2009,57(1):131-142.
- [25] 王琦,全占军,韩煜,等.采煤塌陷区不同地貌类型植物群落多样性变化及其与土壤理化性质的关系[J].西北植物学报,2014,34(8):1642-1651.
- [26] 秦建蓉,马红彬,沈艳,等.宁夏东部风沙区荒漠草原植物群落物种多样性研究[J].西北植物学报,2015,35(9):1891-1898.
- [27] 王蒙,董治宝,罗万银,等.巴丹吉林沙漠南缘植被物种多样性及其与土壤特性的关系[J].西北植物学报,2015,35(2):379-388.
- [28] Dingaan M N V, Tsubo M, Walker S, et al. Soil chemical properties and plant species diversity along a rainfall gradient in semi-arid grassland of South Africa [J]. Plant Ecology and Evolution, 2017,150(1):35-44.
- [29] Wang J M, Wang P, Qin Q, et al. The effects of land subsidence and rehabilitation on soil hydraulic properties in a mining area in the Loess Plateau of China [J]. Catena,2017,159:51-59.
- [30] 张延旭,毕银丽,陈书琳,等.半干旱风沙区采煤后裂缝发育对土壤水分的影响[J].环境科学与技术,2015,38(3):11-14.