

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

王 琦¹, 全占军^{1*}, 韩 煜¹, 付梦娣¹, 叶 瑶²

(1 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2 南京农业大学, 南京 210095)

摘 要:通过对神府-东胜矿区 2 种不同地貌类型下沉陷样地及对照样地地表植被进行调查, 研究不同地貌类型、不同沉陷位置的群落多样性变化及其与土壤理化性质的关系。研究结果表明: (1) 哈拉沟矿区(黄土丘陵地貌)植物种类较丰富, 大柳塔矿区(风沙地貌)植被种类较单一; 达乌里胡枝子作为风沙地貌沉陷区指示物种, 其演替机制符合忍耐作用理论, 紫翅猪毛菜作为黄土丘陵沟壑地貌沉陷区指示物种, 其演替机制是促进理论和竞争共同作用的结果。(2) 沉陷干扰 12a 后, 2 个研究区 Shannon-Wiener 指数分别增加了 54.60%, 73.85%, 风沙地貌研究区土壤含水量和脲酶活性分别增加了 8.64% 和 57.14%, 黄土丘陵沟壑地貌研究区土壤有机质增加了 47.73%。(3) 采煤塌陷后, 风沙地貌矿区坡中位置过氧化氢酶活性下降 63.50%, 土壤体积含水量降低 58.70%, 植物群落多样性显著降低; 坡底位置土壤含水量、土壤养分、植物群落多样性均显著提高, 土壤理化性质和植物群落多样性变化协同一致。(4) 风沙地貌区植物群落多样性与土壤含水量存在显著正相关关系, 黄土丘陵沟壑地貌区植物群落多样性与土壤有机质含量存在显著负相关关系。

关键词:采煤塌陷; 地貌类型区; 土壤性质; 群落多样性; 群落演替

中图分类号: Q948.113

文献标志码: A

Variation of Vegetation Diversity and Its Soil Relationship with Soil Physical and Chemical Property in Lands of Different Geomorphic Types in Coal Mining Subsidence Area

WANG Qi¹, QUAN Zhanjun^{1*}, HAN Yu¹, FU Mengdi¹, YE Yao²

(1 Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, China; 2 Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: This research focused on the investigation of the vegetations in the coal mine subsided areas of Shenfu-Dongsheng coal mine region with different landforms. Based on the data obtained from the field survey, we measured the correlations between species diversity and soil properties in different geomorphic types and slopes. The findings showed that: (1) The plant species in Halagou mine (hilly-gully region) were richer than those in Dalita mine (windy desert area). *Lespedeza davurica* could be indicator plant in windy desert area, which succession mechanism conformed to the tolerance theory. *Salsola affinis* could be indicator plant in hilly-gully region, which succession mechanism conformed to the Promotion theory and competition. (2) After 12a subsiding disturbance, Shannon-Wiener index and Simpson index increased by 54.60% and 73.85% in two areas, respectively. The soil water content and soil urease activity increased by

收稿日期: 2014-03-27; 修改稿收到日期: 2014-07-08

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2013-YSKY-14)

作者简介: 王 琦(1987-), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事生态风险评价研究。E-mail: wangqi312@126.com

* 通信作者: 全占军, 副研究员, 主要从事生态风险评价研究。E-mail: quanzzj@caes.org.cn

8.64% and 57.14% in windy desert area, and soil organic matter increased by 47.73% in hilly-gully region. (3) After coal mining subsidence, soil catalase activity and volumetric water content decreased by 63.50% and 58.70%, the species diversity reduced significantly in the middle of slope in sandstorm area ($P < 0.05$). Soil water content, soil nutrient and the species diversity increased in the bottom of slope in windy desert area ($P < 0.05$). The vegetation diversity and soil physical and chemical properties changed together. (4) Significant positive correlation was observed of species diversity with soil water content in windy desert area. The species diversity was negatively correlated with soil organic matter content in hilly-gully region.

Key words: coal mining subsidence; physiognomy type region; soil property; species diversity; species succession

植物生长主要受到生物因素和非生物因素的影响,甚至在一些情况下,非生物因素会成为影响植物生长和分布的主导因素。在山地环境中,植物生长在很大程度上受地形地貌因素的影响^[1-2],因为地形地貌的差异会导致光照、水分、土壤养分等微生物条件的显著差异^[3-5],其中土壤养分的可利用性是决定植物群落物种组成和群落多样性的主要环境因子,相反,植物又通过养分循环的反馈对土壤养分的可利用性产生影响^[6-7],即群落的空间、资源的生态位与群落多样性存在各种各样的相互作用。

土壤性质和群落多样性的响应和反馈可以作为表征区域生态环境变化的重要指标^[8-9],同时也是区域生态恢复重建的重要理论基础^[10]。水分是土壤的重要组成部分,直接参与土壤与植物内部的物质转化过程,影响植物群落的种类组成^[11];土壤中的有机质来自于植物的凋落物和根系,有机质含量的高低也反映了物种多样性的数量^[12];群落多样性中的丰富度指数和多样性指数与土壤养分也存在显著的相关关系^[13],这些研究成果对于理解土壤、植被对于生态系统的指示功能至关重要^[14-16]。

煤炭作为中国重要的能源支柱,其地位在未来相当长的一段时期内不会改变^[17]。中国煤炭多采用井工开采的方式,煤炭开采后,矿井内上层顶板断裂,导致原有地质结构发生改变,进一步诱发地表塌陷^[18]。沉陷后周边原有生态系统结构和功能遭到破坏,地质^[18]、土壤水分^[19]、养分^[9]、植被^[8]等因子相应发生变化,这些变化特征反映出采煤塌陷具有强大的生态系统干扰性,对周边群落物质循环和能量流动构成了巨大威胁,特别是在半干旱生态脆弱区,蒸发强烈,土壤贫瘠,生态系统稳定和恢复力较差,采煤塌陷一旦发生,对区内生态环境将造成重大影响。

近年来,矿区沉陷带来的区域环境变化引起了不少学者的广泛关注,采煤塌陷造成矿区土壤含水量下降^[19],养分流失^[20],土壤酶活性降低^[21],塌陷

区植被多样性发生改变^[22-23]等。但是在这些研究中,有关植被多样性变化与土壤理化性质和酶活性之间的关系以及对环境因素响应的定量化研究鲜有报道。

本研究选取神府-东胜煤田中大柳塔矿区和哈拉沟矿区的沉陷采空区为调查样地,测定研究区土壤理化性质,计算各样地植物物种的重要值、丰富度、均匀度和多样性指数,以空间序列代替时间序列,通过对比分析不同地貌类型、沉陷位置下群落多样性变化过程,以及与土壤性质的关系,研究不同地貌类型下沉陷矿区植物生态修复方式,为半干旱区生态环境恢复提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市与陕西省榆林市交界处(109°33'~110°10'E, 39°01'~39°30'N),北有毛乌素沙地,南有黄土高原,是风沙地貌向黄土丘陵地貌的过渡带。这一地区属于暖温带典型草原区,代表群系为本氏针茅草原。区内年蒸发量高达 1 753.8 mm,年平均降水量 362 mm,主要集中在 6~9 月份,年际与年内降水分配极不均匀。研究区地带性土壤为淡栗钙、栗钙土和灰钙土,由于风蚀沙化严重,沙丘、沙梁、滩地相间分布。硬梁地以针茅(*Stipa capillata* Linn.)、百里香(*Thymus mongolicus*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)以及禾本科(Poaceae)、菊科(Asteraceae)植物为主。流沙地以沙蒿(*Artemisia desertorum* Spreng)、牛心朴子(*Cynanchum komarovii* Al.)、猪毛菜(*Salsola collina* Pall.)等为建群种。

本研究选取神府-东胜煤田中的 2 个采区,大柳塔采区属于风沙地貌,地表沙质土壤疏松,无明显因沉陷作用所致的裂隙;哈拉沟采区属于黄土丘陵地貌,沉陷裂隙明显,沟壑纵横,尤其在采空区边缘裂缝较大。

1.2 植被调查与土壤样品采集

2012 年 8 月 20~29 日,在大柳塔和哈拉沟矿区井田内,分别选择海拔、坡向、坡度均相近的 2010 年沉陷(沉陷 2a)、2005 年沉陷(沉陷 7a)和 2000 年沉陷(沉陷 12a)和未沉陷区(对照区)为调查样地。对照样地选择与沉陷样地相邻的地貌植被一致的坡地。在每一样地内选择立地条件基本一致地段,大柳塔矿区针对坡底(A)、坡中(B)、坡顶(C)3 个部位,每块样地各随机设置 3 个 1 m×1 m 的样方;哈拉沟矿区针对裂缝带(I)、近裂缝带(J)和远裂缝带(K)3 个部位,每块样地各随机设置 3 个 1 m×1 m 的样方。分别记录植物种类、株数、密度、盖度、高度等。

每个调查样方根据不同土壤深度(0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm、50~60 cm)分别取样。一部分置于铝盒内,用于测定土壤含水量,另一部分置于消毒的塑料袋中,用于理化性质分析的土样常温保存,用于土壤酶分析的土样放入低温(4℃)保存。

生物多样性采用以下方法测度^[24-25]:

重要值(IV)=(相对盖度+相对密度+相对频度)/3

物种丰富度指数:

Margalef 指数 $R=(S-1)/\ln N$

物种均匀度指数:

Pielou 指数 $E=-\sum P_i \ln P_i / \ln S$

综合多样性指数:

Shannon-Wiener 指数: $H=-\sum P_i \ln P_i$

Simpson 指数: $D=1-\sum P_i^2$

式中, S 为群落中物种总数; N 为所有物种个体数; P_i 为种 i 的个体数占物种总个体数的比例。

1.3 土壤理化性质及酶活性测定方法

土壤含水量采用烘干法,土壤有机质测定采用容量法;速效氮测定采用碱解扩散法;速磷测定采用 NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法;土壤脲酶采用比色法;蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法;过氧化氢酶测定采用高锰酸钾滴定法。

1.4 统计分析

运用因素方差分析(ANOVA)方法检验各植物群落多样性不同地貌类型、不同沉陷位置、不同沉陷时间之间差异显著性;采用相关分析法研究采煤沉陷干扰后土壤理化性质和群落多样性的关系;所有统计分析利用 Excel 和 SPSS17.0 完成,显著水平设定为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 研究区植物群落特征分析

对 2 个矿区地表植被进行调查,共普查物种 65 种,分属于 20 科,49 个属,主要以一、二年生草本、豆科(Leguminosae)、禾本科(Gramineae)、藜科(Chenopodiaceae)和菊科(Asteraceae)植物为主。不同地貌类型区主要植物种类及其重要值见表 1。

在调查中大柳塔采区共出现植物 43 种,分属于 14 个科,32 个属。从表 1 重要值可见,狗尾草、褐沙蒿、硬质早熟禾、达乌里胡枝子、看麦娘、尖头叶藜、雾冰藜 7 个物种为各群落建群种。随着塌陷时间延长(沉陷 12a),达乌里胡枝子和雾冰藜在沉陷过程中逐渐占据主要位置,成为沉陷区关键种。

哈拉沟采区共出现植物 52 种,分属于 19 科,42 个属。看麦娘、达乌里胡枝子、紫翅猪毛菜、黄花蒿、隐子草、狗尾草、硬质早熟禾 7 个物种为各群落主要建群种。沉陷初期(沉陷 2a)紫翅猪毛菜在群落中

表 1 不同地貌类型沉陷区主要植物类型及其重要值

Table 1 Main vegetation types and their important values in subsidence area with different physiognomy types

地貌类型 Physiognomy type	植物名称 Species	重要值 Important value								
		沉陷 12a Subsidence 12a			沉陷 7a Subsidence 7a			沉陷 2a Subsidence 2a		
		A(I)	B(J)	C(K)	A(I)	B(J)	C(K)	A(I)	B(J)	C(K)
大柳塔矿区 Daliuta mine	达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	7.80	3.23	9.64	4.40		2.64			
	紫翅猪毛菜 <i>Salsola affinis</i>	2.29	5.51	8.87	4.18		4.59			2.35
	无芒隐子草 <i>Cleistogenes mutica</i>				3.33		—	9.85		
	褐沙蒿 <i>Artemisia halodendron</i>	2.05	13.00	12.80	6.04	25.93	16.13	25.13	14.49	22.00
	阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	5.85	1.80	5.29			2.71			
	白花草木樨 <i>Melilotus albus</i>	10.61			3.10		14.02			
	黄花蒿 <i>Artemisia annua</i> L.	1.62	5.00	2.08	8.19		3.10			2.48
	藜 <i>Chenopodium album</i>	5.48	2.53							

续表 1 Continued Table 1

大柳塔矿区 Daliuta mine	狗尾草 <i>Setaira viridis</i>	23.18	13.09	18.31	20.27		11.09	3.17	5.21	—	
	硬质早熟禾 <i>Poa sphondylodes</i> Trin.	4.99	4.67	7.94	11.34	12.29	10.64	14.82	—	8.92	
	雾冰藜 <i>Bassia dasyphylla</i>	15.38	13.54	5.69	—	3.62	0.28	—	—	—	
	看麦娘 <i>Alopecurus aequalis</i> Sobol.		18.36	12.21	2.77	36.24	—	32.79	45.82	38.44	
	尖头叶藜 <i>Chenopodium acuminatum</i>	1.62	7.00	9.73	6.61	15.60	28.29	8.86	22.17	12.60	
	地瓜哨 <i>Cynanchum the-sioides</i>	2.75	8.26	5.26	9.26						
	烛台虫实 <i>Corispermum candelabrum</i>	9.88	1.95		15.49		3.30		2.48		
哈拉沟矿区 Halagou mine	看麦娘 <i>Alopecurus aequalis</i> Sobol.		9.52	8.58	11.55	—	26.40	6.73	33.85	6.54	2.57
	达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>		9.69	8.79	1.40	11.42	6.24	3.97	5.34	8.35	2.05
	紫翅猪毛菜 <i>Salsola affinis</i>		8.94	11.98	13.85	13.19	16.59	35.59	14.70	26.25	31.59
	水芹 <i>Oenanthe javanica</i>		1.48	6.50	8.16	—	—	—	1.68	—	—
	蒙古羊茅 <i>Festuca dahurica</i>		4.43	—	10.09	—	2.40	4.81	—	3.09	1.63
	黄花蒿 <i>Artemisia annua</i> L.		11.63	12.50	12.05	8.84	8.04	—	5.64	8.82	8.65
	白花草木樨 <i>Melilotus albus</i>		—	8.89	3.75	7.07	7.35	13.58	—	2.74	5.89
	无芒隐子草 <i>Cleistogenes mutica</i>		3.31	27.00	9.48	1.87	1.92	2.19	1.60	—	3.68
	阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>		1.77	—	2.52	2.16	—	2.02	2.42	4.61	2.26
	狗尾草 <i>Setaira viridis</i>		3.27	—	1.40	—	2.14	2.68	1.18	1.42	1.32
	沙葱 <i>A. mongolicum</i> Bgl		7.18	1.99	—	—	—	—	4.65	13.19	5.06
	硬质早熟禾 <i>Poa sphondylodes</i> Trin.		1.69	—	—	3.97	16.12	2.01	1.35	—	6.93
	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i> L.		5.04	—	3.61	—	—	7.46			
赖草 <i>Leymus secalinus</i>		16.92	—	—	36.37	—	—				
艾蒿 <i>Artemisia argyi</i>		5.43	—	1.40	3.48		3.97				

注:A、B、C 分别表示大柳塔矿区坡底、坡中、坡顶 3 个部位;I、J、K 分别表示哈拉沟矿区裂缝带、近裂缝带、远裂缝带 3 个部位。
Note:A,B,C denote the bottom of slope,the middle of slope,and the top of slope in Daliuta mine, respectively;I,J,K denote fracture zone,near the fracture zone,and away from the fracture zone in Halagou mine, respectively.

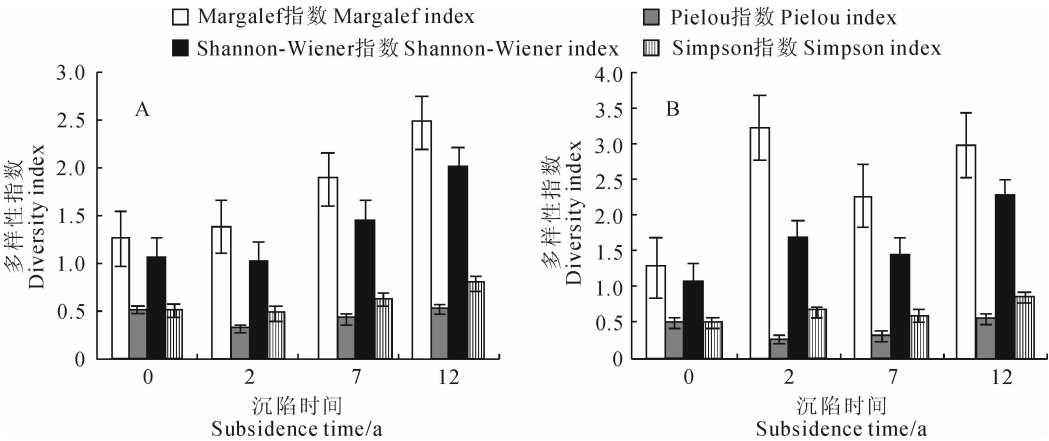


图 1 不同地貌类型矿区植被群落多样性指数变化
A. 大柳塔矿区;B. 哈拉沟矿区
Fig. 1 Changes of plant diversity index in the mine with different physiognomy types
A. Daliuta mine;B. Halagou mine

占据明显优势,随着沉陷时间延长(沉陷 12a),逐渐被黄花蒿、隐子草等草本植物取代。

2.2 不同地貌类型群落多样性变化

对不同地貌类型矿区群落综合多样性指数进行比较(图 1)。采煤塌陷后,大柳塔和哈拉沟矿区 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数均显著提高

($P<0.05$)。沉陷 12a 后,大柳塔矿区 Shannon-Wiener 指数达到 2.01,比沉陷前高出了 54.60%;哈拉沟矿区 Shannon-Wiener 指数达到 2.26,比沉陷前高出了 73.85%,表明群落多样性随着沉陷时间的延长,增长趋势明显。

在沉陷过程中,大柳塔矿区 Pielou 指数显著降

低($P<0.05$),表明群落受沉陷干扰分布极不均匀,优势种突出,伴生种分布能力较差;哈拉沟矿区 Margalef 指数显著提高($P<0.05$),表明在沉陷作用下,群落生长受到了一定的干扰,在新的生境下,各物种竞争趋势明显,丰富度提高。

2.3 不同沉陷位置群落多样性变化

对研究区不同沉陷位置的群落特征指数进行分析(图 2)。沉陷发生 2~7a 后,大柳塔矿区坡顶、坡底部位群落丰富度、均匀度、Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数与未沉陷样地相比均显著升高($P<0.05$),坡中位置植物丰富度、均匀度、多样性指数均显著降低($P<0.05$),且低于沉陷前水平。

对哈拉沟矿区群落综合多样性指数进行相关性和差异性分析(表 2),群落综合多样性指数,裂缝处(I)、近裂缝处(J)和远裂缝处(K)没有显著相关性和差异性,即哈拉沟矿区植物群落多样性不受裂缝的影响,与距离裂缝远近不相关。

2.4 不同地貌类型土壤理化性质动态变化

大柳塔和哈拉沟采区沉陷前后土壤理化性质动态变化见表 3。对未沉陷区和沉陷区土壤理化性质进行差异性分析发现,沉陷后 2a,大柳塔采区土壤含水量、养分含量、过氧化氢酶和蔗糖酶活性均显著

降低($P<0.01$),脲酶活性略有上升,有机质分解速率加快。沉陷后 12a,土壤含水量和脲酶活性分别增加了 8.64%和 57.14%。

哈拉沟采区沉陷后由于地表裂缝的存在,土壤含水量明显下降($P<0.01$);土壤有机质、速效氮和速效磷含量随塌陷时间的延长而逐渐降低;塌陷后短期内表层土壤蔗糖酶和过氧化氢酶活性显著降低($P<0.01$)。随着塌陷时间的增长(沉陷 12a),土壤有机质增加了 47.73%。

2.5 风沙区不同沉陷位置土壤理化性质动态变化

对不同坡位处土壤理化性质进行分析(表 4),与未沉陷区相比,沉陷区坡中部位土壤含水量、速效氮、速效磷、有机质、蔗糖酶和过氧化氢酶均明显降

表 2 哈拉沟矿区群落多样性指数相关性和差异性分析

Table 2 The correlation and difference of plant diversity index in Halagou mine

	R	E	H	D
相关性 Pearson correlation	0.039	-0.095	-0.018	0.351
差异性 Difference	0.943	0.729	0.695	0.278

注:R. Margalef 指数;E. Pielou 指数;H. Shannon-Wiener 指数;D. Simpson 指数;表 5 同。

Note:R. Margalef index;E. Pielou index;H. Shannon-Wiener index;D. Simpson index;The same as Table 5.

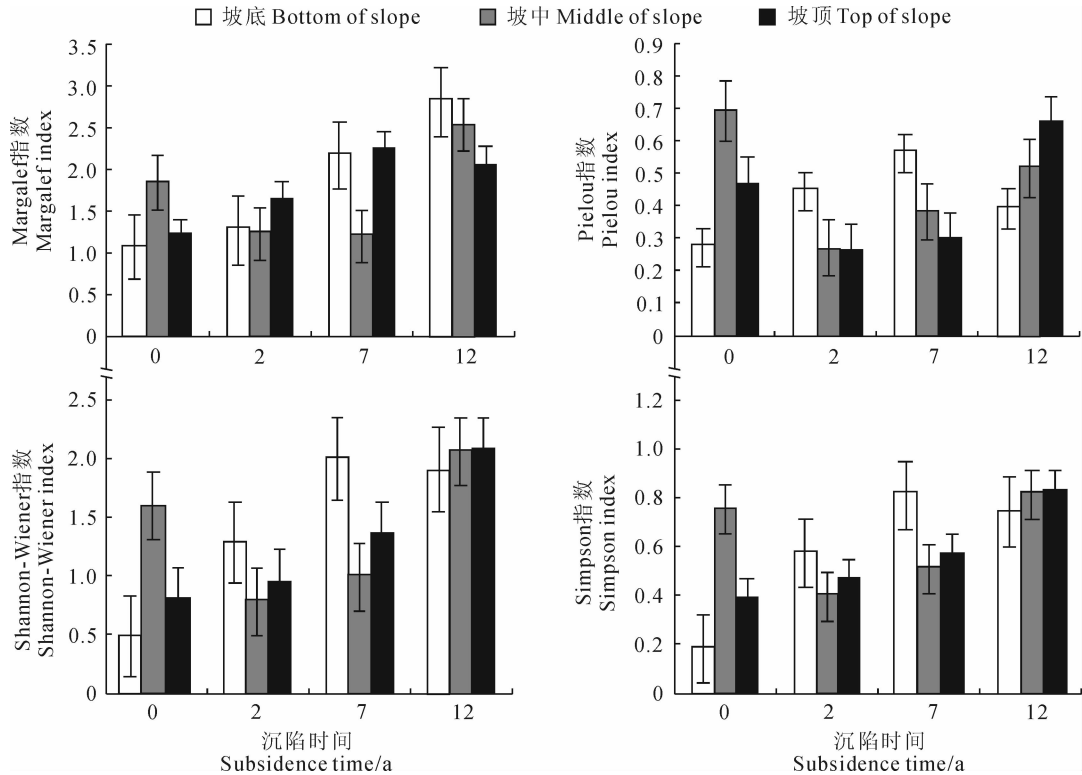


图 2 大柳塔矿区不同沉陷位置群落多样性指数变化

Fig. 2 Changes of plant diversity index in Daliuta mine with different subsidence locations

表 3 不同地貌类型土壤理化性质
Table 3 List of soil physical and chemical property with different physiognomy types

地貌类型 Physiognomy type	沉降时间 Subsidence time	取样层 Layer /cm	土壤含水量 Soil moisture /%	速效氮 Available N /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/%	脲酶 Urease /(mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹)	蔗糖酶 Sucrase /(mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹)	过氧化氢酶 Catalase /(mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹)
大柳塔矿区 Daliuta mine	未沉降 No subsidence	0~20	4.70	15.82	4.63	0.99	0.15	38.39	0.72
		20~40	5.90	18.44	1.91	0.70	0.03	18.30	0.80
		40~60	7.35	20.84	2.72	0.50	0.03	11.65	0.76
	沉降 2a Subsidence 2a	0~20	0.90	2.88	1.07	0.95	0.19	23.17	0.23
		20~40	1.70	1.43	0.64	0.45	0.07	2.70	0.24
		40~60	1.90	1.59	0.68	0.33	0.06	0.44	0.26
	沉降 7a Subsidence 7a	0~20	4.10	4.88	1.68	0.74	0.25	12.83	0.33
		20~40	4.95	1.98	0.70	0.61	0.14	2.27	0.24
		40~60	4.35	2.42	0.81	0.44	0.08	1.64	0.27
	沉降 12a Subsidence 12a	0~20	6.05	14.08	3.07	0.67	0.23	19.96	0.31
		20~40	7.25	15.21	3.00	0.41	0.06	2.77	0.32
		40~60	6.20	23.20	2.17	0.65	0.04	3.85	0.39
哈拉沟矿区 Halagou mine	未沉降 No subsidence	0~20	0.32	18.69	3.60	0.60	0.09	38.04	0.90
		20~40	0.31	16.39	2.11	0.27	0.03	33.29	0.84
		40~60	0.46	15.05	4.47	0.45	0.00	19.84	0.71
	沉降 2a Subsidence 2a	0~20	0.13	9.80	1.63	0.60	0.29	30.55	0.64
		20~40	0.15	11.09	1.22	0.53	0.12	4.44	0.69
		40~60	0.19	10.58	1.04	0.45	0.05	0.88	0.86
	沉降 7a Subsidence 7a	0~20	0.13	15.39	1.58	1.06	0.38	44.53	1.01
		20~40	0.17	11.41	1.26	0.48	0.12	5.26	0.90
		40~60	0.14	11.02	1.16	0.42	0.06	0.82	0.91
	沉降 12a Subsidence 12a	0~20	0.12	14.27	1.62	1.04	0.45	44.80	0.96
		20~40	0.12	11.30	1.25	0.58	0.28	9.02	1.01
		40~60	0.14	12.54	1.32	0.33	0.14	7.10	0.88

注:数据均为各土层平均值。
Note: The data in the table are means of different layers.

表 4 大柳塔矿区不同沉陷位置土壤理化性质

Table 4 Soil physical and chemical property of different subsidence locations in Daliuta mine

地貌类型 Physiognomy type	坡位 Slope position /cm	体积含水量 Volumetric water content/%	速效氮 Available N /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/%	脲酶 Urease /(mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹)	蔗糖酶 Sucrase /(mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹)	过氧化氢酶 Catalase /(mg·kg ⁻¹ ·h ⁻¹)
未沉陷 No subsidence	坡底 Bottom	9.10	13.25	0.96	0.72	0.11	19.07	0.67
	坡中 Middle	14.20	17.54	1.63	0.94	0.09	13.60	0.63
	坡顶 Top	8.20	24.31	0.80	0.54	0.08	20.45	0.87
沉陷区 Subsidence area	坡底 Bottom	10.53	17.94	1.10	0.62	0.13	11.83	0.35
	坡中 Middle	5.87	13.07	0.90	0.72	0.12	11.89	0.23
	坡顶 Top	8.47	17.30	0.93	0.37	0.11	10.25	0.29

表 5 群落多样性指数与土壤性质相关性分析

Table 5 The correlation of soil property and plant diversity index

地貌类型 Physiognomy type	土壤性质 Soil characteristic	多样性指数 Diversity index			
		H	D	E	R
大柳塔矿区 Daliuta mine	土壤含水量 Soil moisture	0.977 *	0.965 *	0.988 *	0.484
	脲酶 Urease	-0.331	-0.364	-0.347	0.459
	蔗糖酶 Sucrase	0.551	0.591	0.459	-0.569
	过氧化氢酶 Catalase	0.706	0.741	0.595	-0.452
	土壤速效氮含量 Soil available nitrogen content	0.877	0.880	0.927	0.225
	土壤速效磷含量 Soil available phosphorus content	0.900	0.907	0.928	0.167
	有机质 Organic matter	0.598	0.639	0.444	-0.594
哈拉沟矿区 Halagou mine	土壤含水量 Soil moisture	0.117	0.066	0.146	0.778
	脲酶 Urease	-0.789	-0.835	-0.969	0.129
	蔗糖酶 Sucrase	-0.993	-0.999 * *	-0.957	-0.403
	过氧化氢酶 Catalase	0.874	0.910	0.995	0.024
	土壤速效氮含量 Soil available nitrogen content	0.840	0.881	0.987	-0.041
	土壤速效磷含量 Soil available phosphorus content	0.803	0.848	0.975	-0.106
	有机质 Organic matter	-0.997 *	-1.000 * *	-0.943	-0.442

低($P<0.01$),其中,过氧化氢酶活性和土壤体积含水量分别下降 63.50%和 58.70%;坡底部位土壤含水量、速效氮、速效磷均显著提高($P<0.01$)。研究表明坡中部位的垂直错动严重影响了土壤的呼吸作用,土壤水分更易沿着覆岩冒落带向下渗漏。

2.6 群落多样性和土壤理化性质相关分析

对大柳塔矿区植物群落综合多样性指数和土壤物理、化学、生物性质进行比较并进行相关分析(表 5)。Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数以及 Pielou 指数与土壤含水量在 0.05 水平上存在显著正相关性,与土壤化学和生物性质无明显相关性,即大柳塔矿区土壤含水量越高,群落特征指数越高。

对哈拉沟矿区群落综合多样性指数进行分析(表 5),植被丰富度指数和均匀度指数与土壤性质没有明显的相关性,多样性指数与土壤蔗糖酶含量在 0.05 水平呈现显著负相关性,与有机质含量在 0.01 水平上呈现显著负相关性,即植被特征指数越

高,土壤有机质含量越低。

3 讨 论

本研究表明,采煤塌陷后周边植物群落发生演替,物种丰富度提高,均匀度降低,群落多样性显著提升;风沙地貌沉陷区不同坡位处土壤理化性质和植被群落多样性变化协同一致;沉陷区土壤理化性质与植被综合多样性存在显著相关性,证明在人为干扰下采煤塌陷对半干旱地区生态环境产生了重大影响。

3.1 采煤塌陷后不同地貌类型区群落演替物种取代机制

水分是半干旱风沙地貌区植被生长的主要限制因子^[26],本研究中,大柳塔矿区属于风沙地貌,矿区地表沉陷后最先出现的植物是达乌里胡枝子和雾冰藜。达乌里胡枝子在干旱胁迫下,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活

性均显著提高^[27],表现出较高的耐旱性;雾冰藜是荒漠区一年生被毛植物,在干旱条件下,其枝条水势和相对水分含量得到显著提高,这种适应性能有效提高植株在干旱条件下的净光合速率^[28]。因此,半干旱风沙地貌矿区采煤塌陷后植被演替在一定程度上符合忍耐作用理论。

哈拉沟矿区属于黄土丘陵沟壑地貌,矿区沉陷后出现的紫翅猪毛菜是一种一年生草本植物,具有很强的抗干旱和耐盐碱能力的植物,其成熟种子可以借助发达的果翅被风传送,散步范围广^[29]。在黄土丘陵沟壑地貌矿区沉陷初期,由于水肥条件限制,大多数植被生长受到抑制,紫翅猪毛菜处于一种强适应与弱竞争环境,从而得到迅速发展。随着沉陷时间延长,土壤结构、含水量逐渐恢复,紫翅猪毛菜萌发条件受到抑制^[29],同时原有的地表植株活体死亡,形成的枯枝落叶层给微生物提供了生存空间,促进了有机质的分解,从而为其它与环境相适应的物种提供了更好的生存环境。因此,黄土丘陵沟壑地貌矿区采煤塌陷后植被演替是促进作用理论与竞争共同作用的结果。可见,即使在相同的干扰下,不同的环境因子、不同的生态格局,群落演替的物种取代机制也不相同。

3.2 风沙地貌区不同干扰梯度群落多样性与土壤理化性质的动态响应

研究结果表明,沉陷干扰后,大柳塔风沙区坡顶部位所受干扰程度较轻;坡中部位由于发生垂直错动^[30],所受扰动最为强烈;坡底所受干扰仅次于坡中部位。Margalef 指数、Pielou 指数、Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数大致呈现出坡底>坡顶>坡中的格局,这与沉陷区土壤理化性质的变化趋势是一致的。

采煤塌陷对沉陷区坡中部位土壤理化性质产生了较大影响,垂直错动产生的裂隙造成土壤水分的流失,同时,土壤结构的破坏又引起酶活性的降低,酶活性的降低导致土壤呼吸作用和养分循环受到影响,从而造成坡中部位群落多样性降低。

与坡中部位的变化不同,采煤塌陷造成坡底部位群落多样性提高,这说明适度的干扰不仅对生态系统无害,而且可以促进生态系统的演化和更新,有利于生态系统的稳定和发展^[31]。Valentin 等^[32]通过总结坡面上植被条带分布特征,认为坡面植被-裸地带格局形成产流-聚流系统,有利于截获水资源;Rey^[33]也指出坡底的草本和灌丛对上坡径流泥沙有拦截作用,从而提高坡底土壤养分含量。也有

研究表明, α 多样性一般受小环境以及生物之间的相互作用的影响^[34],适度干扰在增加 α 多样性的同时,也导致了生境的异质性,从而增加了 β 多样性^[35],这有利于物种的演替、更新以及耐受种与不耐受种的混生,从而形成更大的物种多样性。

3.3 采煤塌陷后群落多样性变化与土壤理化性质的动态响应

本研究表明,在小尺度范围内,黄土丘陵地貌区可利用的土壤有机质和植物多样性呈负相关,这与Rosenzweig^[36]研究结果一致。黄土丘陵区主要以黏土为主,土壤孔隙度比风沙区土壤孔隙度小,通气透水能力较差,保水保肥能力强^[37]。采煤塌陷后,由于地表裂缝的形成,导致土壤水文汇集,这在一定程度上有利于植被特征的改善,群落特征指数的提高。沉陷初期,紫翅猪毛菜等先定居植物发生演替,群落多样性增加,随着生态系统的恢复力提高,后来物种取代先定居物种,地表植被覆盖增加,产生大量养分丰富的枯落物,植物生长产生的枯落物在土壤中积累、腐解,产生大量的养分,这些有机质又被植被吸收利用,进一步增加了地表植被覆盖,提高了群落特征指数,物种丰富度、多样性得到提高。

大柳塔风沙区沉陷后群落多样性变化主要与土壤含水量有关,这是因为在该地貌类型和气候条件下,水分成为区域的主要限制因子。风沙区土壤水分变化主要与土壤垂向裂缝发育和风力侵蚀有关,由于蒸发强烈,风沙区表层土壤含水量相对较低;同时,受沉陷作用影响,地区地下潜水位下降,沉陷过程中的土壤含水量很难得到补充^[38-39]。在水分缺失的情况下,部分植物生长受到影响,一旦超过耐受范围,植物就会死亡,只有少数耐旱植物得以保留。而生长在贫瘠风沙土中的植物只能产生少量的凋落物,这些养分更多地被具有抗逆性的植物留存,进而加剧了土壤的贫瘠^[40],群落物种分布将在一段时间内受到影响,物种均匀度降低,优势种突出并向单一方向演变。

采煤塌陷造成土壤性质变化,不同的土壤环境形成了不同的植物群落特征,进而影响地表植被物种丰富度、均匀度和多样性。本研究将塌陷区地貌类型、土壤理化性质以及群落多样性综合考虑,在系统层面上分析采煤塌陷对地表植物群落多样性的影响,使得保护半干旱生态脆弱区生态系统的工作变得更有意义。因此针对半干旱区不同地貌类型的采煤塌陷矿区采取的群落多样性恢复措施也应当因地制宜。风沙地貌区应当在塌陷坡中部位增加土壤的

保水、持水能力,生态修复以固沙植被为主;黄土丘陵沟壑区在生态修复过程中应当注重土壤养分的补充,种植固碳植物,使群落结构更加趋于稳定。

参考文献:

- [1] BELLING P J, TANNER E V J. The influence of topography on tree growth, mortality, and recruitment in a tropical montane forest[J]. *Biotropica*, 2000, **32**(3): 378—384.
- [2] RIYOU T, HINO T, NAOKI A, *et al.* Variation in tree growth, mortality and recruitment among topographic positions in a warm temperate forest[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2006, **17**(3): 281—290.
- [3] OLIVERO A M, HIX D M. Influence of aspect and stand age on ground flora of southeastern Ohio forest ecosystems[J]. *Plant Ecology*, 1998, **139**(2): 177—187.
- [4] GALE N. The relationship between canopy gaps and topography in a western Ecuadorian rain forest[J]. *Biotropica*, 2006, **32**(4a): 653—661.
- [5] DORDEL J, SEELY B, SIMARD S W. Relationships between simulated water stress and mortality and growth rates in under-planted *Toona ciliata* Roem in an Appalachian watershed[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, **222**(17): 3 226—3 235.
- [6] VILE D, SHUPLEY B, GARNIER E. A structural equation model to integrate changes in functional strategies during old-field succession[J]. *Ecology*, 2006, **87**(2): 504—517.
- [7] ORDONEZ J C, VAN BODEGOM P M, WITTE J M, *et al.* A globe study of relationships between leaf traits climate and soil measures of nutrient fertility[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2009, **18**(2): 137—149.
- [8] ZHAO G P(赵国平), FENG B(封 斌), XU L X(徐连秀), *et al.* Effects of coal mining subsidence on the changes of vegetation community in semiarid and sandstorm area[J]. *Journal of Northwest Forestry University*(西北林学院学报), 2010, **25**(1): 52—56(in Chinese).
- [9] CHEN SH CH(陈士超), ZUO H J(左合君), HU CH Y(胡春元), *et al.* Study on soil fertility characteristic of huojitu excavated coal pits of Shendong diggings[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*(内蒙古农业大学学报), 2009, **30**(2): 115—120(in Chinese).
- [10] AGUSTIN R, ADRIAN E. Small scale spatial soil plant relationship in semi-arid gypsum environments[J]. *Plant and Soil*, 2000, **220**(1): 139—150.
- [11] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 150—200.
- [12] YANG Y H(杨玉海), CHEN Y N(陈亚宁), LI W H(李卫红). Soil properties and their impacts on changes in species diversity in the lower reaches of Tarim River, Xinjiang, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2008, **28**(2): 603—616(in Chinese).
- [13] CHEN P(陈 平), GU J C(谷建才), CAO L Y(曹立颜), *et al.* Canonical correlation between species diversity and soil nutrients in forest communities in Xiaowutai Area[J]. *Journal of Northeast Forestry University*(东北林业大学学报), 2010, **38**(8): 34—35(in Chinese).
- [14] TERREBCE A S, NEAL W M, DAVID R M. Mining disturbance alters phosphorus fractions in northern Australian soils[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2000, **38**(1): 411—422.
- [15] SUDING K N, LAVOREL S, CHAPIN F S, *et al.* Scaling environmental change through the community-level: a trait-based response-and-effect framework for plants[J]. *Global Change Biology*, 2008, **14**(5): 1 125—1 140.
- [16] XIE Y M(谢一鸣), XU Y(许 月), KANG M(康 蒙), *et al.* Analysis of plant abundance-based association between community species composition and environmental properties[J]. *Biodiversity Science*(生物多样性), 2013, **21**(1): 80—89(in Chinese).
- [17] GENG D M(耿殿明), JIANG F X(姜福兴). Analysis on ecological environment of mine area in China[J]. *Coal Mine Environmental Protection*(煤矿环境保护), 2002, **16**(6): 5—10(in Chinese).
- [18] ZHANG F W(张发旺), HOU X W(侯新伟), HAN ZH T(韩占涛), *et al.* Impact of coal mining subsidence on soil quality and some protecting technique for the soil quality[J]. *Geography and Geo-Information Science*(地理与地理信息科学), 2003, **19**(3): 67—70(in Chinese).
- [19] WEI J SH(魏江生), HE X(贺 晓), HU CH Y(胡春元). Influence of ground collapse caused by coal mining activities on the water characteristics of sandy soil in arid and semi-arid area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*(干旱区资源与环境), 2006, **20**(5): 84—88(in Chinese).
- [20] WANG J(王 健), GAO Y(高 永), WEI J SH(魏江生), *et al.* Influence of mining subsidence on physical and chemical properties of soil in windy desert area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*(水土保持学报), 2006, **20**(5): 52—55(in Chinese).

- [21] LIU M Y(刘美英),GAO Y(高 永),LI Q(李 强),*et al.* Distribution and changes of soil enzyme activities in reclaimed mining land [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境),2012,**26**(1):164—168(in Chinese).
- [22] 周 莹. 半干旱区采煤沉陷对地表植被组成及多样性影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.
- [23] DENG F(邓 飞),QUAN ZH J(全占军),YU Y J(于云江). Study on the vegetation coverage change and its impact factors in Wulanmulun River Basin during the recent 20 years[J]. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究),2011,**18**(3):137—140(in Chinese).
- [24] MA K P. Methods of measure on biological community diversity I . α -diversity(part1)[J]. *Chinese Biodiversity*,1994,**2**(4):162—168.
- [25] MA K P,LIU Y M. Methods of measure on biological community diversity I . α -diversity(part2)[J]. *Chinese Biodiversity*,1994:2162—168.
- [26] CHEN L(陈 林),ZHANG Q X(张庆霞),SONG N P(宋乃平),*et al.* Analysis of spatial- temporal changes of the soil moisture in irrigated and dry lands in wind- sandy area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境),2010,**24**(1):158—162(in Chinese).
- [27] 杜润峰. 达乌里胡枝子抗氧化防御系统对于旱、UV-B 辐射及复合胁迫的动态响应[D]. 陕西杨陵:西北农林科技大学,2012.
- [28] ZHUANG Y L(庄艳丽),ZHAO W ZH(赵文智). Experimental study of effects of artificial dew on *Bassia dasyphylla* and *Agriophyllum squarrosum*[J]. *Journal of Desert Research* (中国沙漠),2010,**30**(5):1 068—1 074(in Chinese).
- [29] WANG H F(王宏飞),WEI Y(魏 岩). Seed polymorphism and fruit-set patterns of *Salsola affinis*[J]. *Biodiversity Science* (生物多样性),2007,**15**(4):419—424(in Chinese).
- [30] ZANG Y T(臧荫桐),WANG J(汪 季),DING G D(丁国栋),*et al.* Variation of physic-chemical properties of Aeolian sandy soil at coal mining subsidence and its evaluation[J]. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报),2010,**47**(2):262—269(in Chinese).
- [31] CHEN L D(陈利顶),FU B J(傅伯杰). Ecological significance,characteristics and types of disturbance[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报),2000,**20**(7):581—586(in Chinese).
- [32] VALENTIN C,D'HERBÈS J M,POESEN J. Soil and water components of banded vegetation patterns[J]. *Catena*,1999,**37**(1):1—24.
- [33] REY F. Effectiveness of vegetation barriers for marly sediment trapping[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*,2004,**29**(9):1 161—1 169.
- [34] WHITTAKER R J,WILLIS K J,FIELD R. Scale and species richness:towards a general,hierarchical theory of species diversity[J]. *Journal of Biogeography*,2001,**28**(4):453—470.
- [35] WANG G H,ZHOU G S,YANG L M,*et al.* Distribution,species diversity and life-form spectra of plant communities along an altitudinal gradient in the northern slopes of Qilianshan Mountains,Gansu,China[J]. *Plant Ecology*,2002,165:169—181.
- [36] ROSENZWEIG M L. Species diversity in space and time[M]. Cambridge:Cambridge University Press,1995.
- [37] XU M X(许明祥),LIU G B(刘国彬). The characteristics and evolution of soil nutrient in artificial black locust(*Robinia pseudoacacia*) forest land in the hilly Loess Plateau[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报),2004,**10**(1):40—46(in Chinese).
- [38] ZHANG F W(张发旺),ZHAO H M(赵红梅),SONG Y X(宋亚新),*et al.* The effect of coal mining subsidence on water environment in the Shenfu Dongsheng mining area[J]. *Acta Geoscientica Sinica* (地球学报),2007,**28**(6):521—527(in Chinese).
- [39] 宋亚新. 神府东胜采煤塌陷区包气带水分运移及生态环境效应研究[D]. 北京:中国地质科学院,2007.
- [40] AERTS R,CHAPIN III F S. The mineral nutrition of wild plants revisited:a re-evaluation of processes and patterns[J]. *Advances in Ecological Research*,2000,30:1—67.