



移动扫码阅读

毕银丽,李向磊,彭苏萍,等.露天矿区植物多样性与土壤养分空间变异性特征[J].煤炭科学技术,2020,48(12):205-213. doi:10.13199/j.cnki.est.2020.12.026  
BI Yinli, LI Xianglei, PENG Suping, et al. Characteristics of spatial variability of plant diversity and soil nutrients in open-pit mining area [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48 (12): 205 - 213. doi: 10.13199/j.cnki.est.2020.12.026

# 露天矿区植物多样性与土壤养分空间变异性特征

毕银丽<sup>1</sup>,李向磊<sup>1</sup>,彭苏萍<sup>1</sup>,解琳琳<sup>1</sup>,王党朝<sup>2</sup>

(1.中国矿业大学(北京) 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083;2.神华北电胜利能源有限公司,内蒙古 锡林浩特 026000)

**摘要:**为研究煤矿露天开采对自然植物与土壤因子的影响,以内蒙古胜利矿区为研究区,采用野外生态学调查方法对采矿区周边不同距离草地进行植物群落调查,采集距矿区不同距离土壤样品进行实验室分析。结果表明:①距矿区边界100 m处,草地自然植物群落以糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、寸草苔(*Carex duriuscula*)和小画眉草(*Eragrostis minor*)为主;距离煤矿400 m处植物群落以大针茅(*Stipa grandis*)、克氏针茅(*S. krylovii*)和冰草(*Agropyron cristatum*)为主,900 m处以大针茅、小画眉草和糙隐子草为主;距离煤矿1 900 m处,以克氏针茅、糙隐子草和大针茅为主;②与对照区相比,距离矿区越近,植物多样性指数显著降低,群落相似性降低,土壤含水量、有机质(SOM)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)和速效磷(AP)均显著减少;③远离矿区的位置土壤肥力要好于矿区附近,煤矿开采对一定范围内的土壤肥力产生影响,矿区周边土壤养分的空间异质性呈不同程度的变化趋势;④冗余分析(RDA)表明,植物多样性指数与土壤含水量、有机质、硝态氮、速效磷和速效钾呈正相关。矿区周边植被群落的演替对土壤养分的需求不同,群落物种的变化明显,土壤含水量、有机质在影响矿区周边植物群落特征的土壤因子中所占比重较大。矿区周边草地出现不同程度的退化趋势,可在自然恢复为主的前提下,实施适当的人工干预调控以促进矿区周边草地的恢复。

**关键词:**胜利矿区;植物多样性;土壤因子;空间异质性;冗余分析

**中图分类号:**TD74      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2336(2020)12-0205-09

## Characteristics of spatial variability of plant diversity and soil nutrients in open-pit mining area

BI Yinli<sup>1</sup>, LI Xianglei<sup>1</sup>, PENG Suping<sup>1</sup>, XIE Linlin<sup>1</sup>, WANG Dangchao<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083;

2. Shenhua Group BEIDIAN SHENGLI Energy Corporation. Limited, Xilin Hot 026000, China)

**Abstract:** To study the effects of open-pit mining on natural plants and soil factors, We take the Inner Mongolia Nortel Shengli Mining Area as the study area. We use field ecological survey methods to carried out plant community surveys on grassland at different distances around the mining area. and collected soil samples around the mining area for laboratory analysis. The study results show that: ① the natural flora of the grassland is dominated by *Cleistogenes squarrosa*, *Carex duriuscula* and *Eragrostis minor*, at a distance of 100 m away from the coal mine which is relatively disturbed by coal mines; the plant community at a distance of 400 m from the coal mine is dominated by *Stipa grandis*, *S. krylovii* and *Agropyron cristatum*. *Stipa grandis*, *Eragrostis minor* and *Cleistogenes squarrosa* are mainly at a distance of 900 m; at a distance of 1 900 m from the coal mine, the vegetation community has stabilized with *S. krylovii*, *Cleistogenes squarrosa* and *Stipa grandis*. ② Compared with the control area, the closer to the mining area, the plant diversity index decreased significantly, the community similarity decreased, and the soil water content, organic matter, nitrate nitrogen, and available phosphorus all decreased significantly. ③ The soil fertility far from the mining area is better than that near the mining area. Coal mining has an impact on soil fertility within a certain range, and the spatial heterogeneity of soil nutrients around the mining area changes to varying degrees. ④ Redundancy analysis

收稿日期:2020-05-04;责任编辑:郭 鑫

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0501106);首都科技领军人才资助项目(Z18110006318021)

作者简介:毕银丽(1971—),女,陕西米脂人,教授,博士生导师,博士。E-mail:yibi88@126.com

shows that plant diversity index was positively correlated with soil water content, organic matter, nitrate nitrogen, available phosphorus and available potassium. The soil and plants around the coal mining area are disturbed to a certain extent, and the soil nutrients are spatially heterogeneous. The succession of vegetation communities around the mining area has different needs for soil nutrients, and the changes of community species are obvious. Soil water content and organic matter account for a larger proportion of soil factors affecting plant community characteristics around the mining area. The grassland around the mining area is degraded to varying degrees. Under the premise of natural restoration, appropriate artificial interventions can be implemented to promote the restoration of grassland around the open-pit.

**Key words:** ShengLi Mining Area; plant diversity; soil factors; spatial heterogeneity; redundancy analysis

## 0 引言

胜利矿区是西部内蒙古主要露天产煤基地,该区域曾经是以典型草原畜牧业为主体的纯牧业区。由于煤炭的开采,导致土壤肥力下降、土壤水破坏<sup>[1]</sup>、植物多样性锐减<sup>[2]</sup>,环境破坏严重。露天采煤还会选择高效的机械化工艺进行开采<sup>[3]</sup>,高效生产也会产生大量废弃物对生态造成影响<sup>[4]</sup>,剥离地表土层和植被、挖掘地下0~200 m矿石、运输以及倾倒均会对土壤理化性质产生不同影响,此外重建的矿区生态景观也会导致土壤养分小尺度空间异质性<sup>[5]</sup>,影响矿区水文状况<sup>[6]</sup>,因此分析露天采煤对植被和土壤的影响已成为矿区生态恢复的关键问题。植物多样性变化是反映群落变化进程中的一个重要指标<sup>[7]</sup>,不仅能反映群落组成、结构、功能和动态等方面异质性,也可反映不同自然地理条件与群落的相互关系<sup>[8]</sup>。国内外学者针对矿区植被变化进行了诸多研究,一般认为采煤对矿区植被具有明显且可持续影响<sup>[6,9~10]</sup>。土壤因子的变化反映出采煤对土壤理化性质的影响,一般学者认为采煤对土壤养分具有明显的负面影响,干扰区的土壤有机质、N、P等元素的含量显著低于未干扰区<sup>[11]</sup>,采煤破坏了原土壤对碳、氮等元素的“源-汇”平衡功能<sup>[12]</sup>。植物群落多样性变化是植被与土壤相互适应与改造的过程,也是不同物种在土壤养分等资源互相竞争和替代的过程<sup>[13]</sup>。研究植物群落特征与土壤因子的关系是矿区生态恢复的重要方面<sup>[14]</sup>。以往研究发现,植物多样性受速效钾、速效磷和土壤有机质等土壤因子影响<sup>[15~16]</sup>,土壤有机质是决定采煤矿区土壤质量和植物群落特征的关键因素,速效养分和酶类是影响植物群落生产力和多样性的主要因子<sup>[17]</sup>。以往关于植被与土壤因子关系的研究大多集中在高寒退化草地<sup>[18]</sup>、黄土高原地区<sup>[19]</sup>以及矿区复垦地<sup>[20]</sup>,但针对露天采煤干扰下自然植被与土壤因子关系的研究较少。

基于此,采用野外生态学调查方法对西部胜利煤矿周边不同距离自然植物群落进行调查,采集0~206

30 cm土壤进行试验测试,在定量比较距采矿区不同距离草地与对照区的植被群落特征与土壤理化因子差异基础上,分析矿区周边植被群落特征与土壤因子在采煤扰动下变化规律,运用冗余分析方法(RDA)探讨在采煤扰动下土壤与植物因子的相关关系及交互影响,揭示煤炭开采过程中周边生态环境的演变规律,为矿区生态恢复奠定理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

矿区位于内蒙古锡林浩特市,属中温带半干旱大陆性季风气候区,年平均气温0~3℃,结冰期长达5个月,寒冷期长达7个月,1月气温最低,平均-19℃。7月气温最高,平均21℃,极端最高气温可达39℃。年平均降水量不足300 mm,降雨多集中在7、8、9三个月内。每年冬季都有降雪,11月至次年3月平均降雪总量8~15 mm。研究区地带性植被为典型草原,以大针茅(*S. grandis*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)为主要建群种,伴生种有羊草(*Leymus chinensis*)、冷蒿(*Artemisia frigida* Willd.)、寸草苔(*Carex duriuscula*)等。地带性土壤为栗钙土,隐域性土壤以风沙土为主。研究区海拔970~1 212 m,总体呈山前平原地貌景观,地表坡度较缓,在研究区西南方向仅有一条沟谷穿过,暴雨时成为主要汇水排泄点。目前已探明含煤面积342 km<sup>2</sup>,地质储量224亿t,胜利煤田赋存条件好,煤层厚、埋藏浅、地质构造简单,适合集中开发。矿区在典型草原基础上,经多年露天开采影响,部分地带地表直接裸露,草场沙化程度较重。

### 1.2 野外调查与采样

围绕与矿区边界垂直的4个方向设置植被监测样带A、B、C、D(图1),由于矿区东北方向为华北油田区域,矿区东部紧邻锡林河,南部为办公生活区,所以将A、B样带布设在矿区西北方向,与排土场相邻,C分布在矿区正西方向,与排土场相邻,D分布在矿区西南方向,与露天矿采挖区相邻。在每条样

带上按照行距至矿区边界100、400、900、1 900 m水平距离进行布设。对照区(CK)选在锡林浩特市东北方向的锡林郭勒盟气象局观测站围封多年的草地内,于2017年8月至9月植被生长最茂盛时期进行野外植被调查。在每个样点左右水平距离布设2个1 m×1 m大小的植被监测的重复样方,重复样方之间距离50 m,对照区内按照同样方法布设5个样方,共85个样方。每个样方中记录植物种类组成、物种的盖度、多度、高度等数量指标。在每个样方内对土壤(0~30 cm)进行5点采样,充分混合装入封口袋,共85个土壤样品,使用TDR(Time-Domain-Reflectometry)土壤水分测定仪测定样方内土壤含水量,重复5次取平均值。

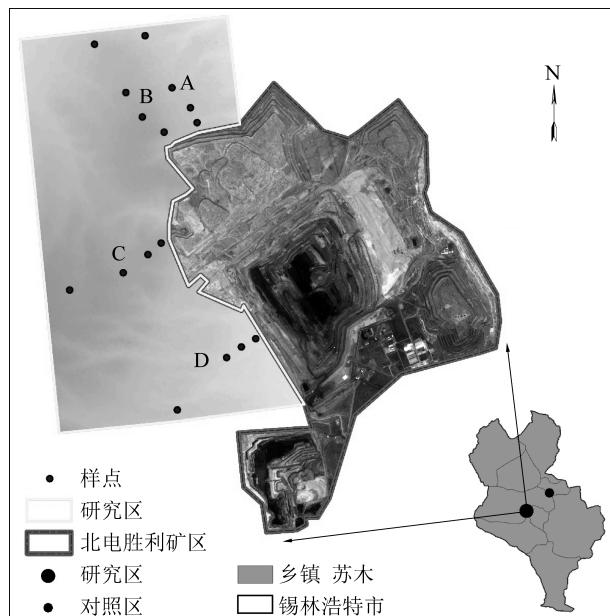


图1 研究区位置及采样点分布示意

Fig.1 Location of study area and distribution  
of sampling points

### 1.3 土壤样品处理

采集的土样在野外封袋带回实验室,风干、研磨后在室内进行试验测定。土壤pH、有机质(SOM)、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、速效磷(AP)、速效钾(AK)、酸性磷酸酶(S-ACP)、碱性磷酸酶(S-ALP)、蔗糖酶(S-UE)的指标测定均参照《土壤农化分析》<sup>[21]</sup>的方法进行测定。

### 1.4 植被多样性数据处理

植被多样性指数是丰富度和均匀性的综合指标,Sorenson群落相似性指数可以反映不同群落结构特征的相似程度。在计算过程中,首先根据每个样方中各物种的高度、盖度、频度计算每个物种的重要值( $p_i$ ),即

$$p_i = (G+H+P)/3 \quad (1)$$

式中: $G$ 为相对盖度; $H$ 为相对高度; $P$ 为相对频度。

使用重要值对某个种在群落中的地位和作用进行评价,然后根据每个样方内各物种重要值计算群落的多样性指数<sup>[22]</sup>,

$$\text{Margalef丰富度指数: } M = (S - 1) / \ln N \quad (2)$$

$$\text{Shannon-Wiener多样性指数:}$$

$$H = - \sum p_i \ln p_i \quad (3)$$

$$\text{Simpson优势度指数: } D = 1 - \sum p_i^2 \quad (4)$$

$$\text{Pielou均匀度指数: } J = \sum p_i \ln p_i / \ln S \quad (5)$$

其中, $S$ 为样方内物种数目; $N$ 为所在群落的所有物种的个体数之和。*Sorenson*相似性指数:

$$CSI = 2n_c / (n_a + n_b) \quad (6)$$

式中: $n_c$ 为A,B两群落所共有的物种数; $n_a$ 为A群落物种数量; $n_b$ 为B群落物种数量。

数据采用Excel2016进行处理,通过SPSS20.0软件对植被多样性指数和土壤理化性质进行单因素方差分析ANOVA检验。使用Arcgis10.5软件地统计分析工具克里格(Kriging)插值法预测研究区土壤养分空间分布。使用国际标准生态学软件Canoco5.0软件进行RDA数据运算,植物群落特征与土壤因子的关系应用RDA二维排序图进行表达。

## 2 结果与分析

### 2.1 群落物种组成与重要值变化

研究区草原类型为典型草原克氏针茅(*Stipa krylovii*)+糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)群落,在设置的研究样地内共调查到23个植物种类,分属12科20属,主要分布在禾本科、菊科。

不同样点群落组成物种重要值有很大差异(表1),与乌仁琪琪格<sup>[23]</sup>研究内蒙古宝日希勒矿区植物群落变化相似。优势种克氏针茅、糙隐子草、大针茅(*S. grandis*)的重要值在距离采矿区1 900 m和对照区处均最高,随着与采矿区距离的减小而降低。与对照区相比,旱生及退化草地指示种寸草苔(*Carex duriuscula*)和小画眉草(*Eragrostis minor*)重要值在距离采矿区100 m处均为最高。400~900 m范围,主要以小画眉草和糙隐子草重要值最大。说明矿区周边植物群落物种重要值存在明显差异,距离采矿区越远,植物群落接近天然草地,克氏针茅、糙隐子草、大针茅成为群落主要组成部分。随着与采矿区距离的减小,寸草苔、银灰旋花和小画眉草在植物群落中逐渐占据主要位置,杂类草在群落中逐渐占优势,草地出现退化现象,草地生产功能随之降低<sup>[24]</sup>。

表1 样点至矿区边界不同距离植被群落物种组成与重要值变化

Table 1 Changes in species composition and important values of vegetation communities at different distances from sample to boundary of mining area

植物种类		不同距离植被群落物种值				
		100 m	400 m	900 m	1 900 m	对照区
粘毛黄芩	<i>Scutellaria viscidula Bge</i>	9.21	10.09	9.64	2.07	—
克氏针茅	<i>Stipa krylovii</i>	10.26	14.20	13.69	15.88	18.53
银灰旋花	<i>Convolvulus ammannii Desr</i>	7.19	5.14	2.79	4.24	—
糙隐子草	<i>Cleistogenes squarrosa</i>	14.05	8.40	19.41	22.42	11.09
猪毛菜	<i>Salsola collina Pall</i>	2.30	3.34	1.66	1.97	—
羊草	<i>Leymus chinensis</i>	5.65	7.67	4.56	2.72	9.23
小画眉草	<i>Eragrostis minor Host</i>	13.51	—	18.29	8.46	—
大针茅	<i>Stipa grandis P. Smirn.</i>	11.06	14.54	16.19	18.75	16.77
寸草苔	<i>Carex duriuscula</i>	14.15	—	—	6.23	1.54
草麻黄	<i>Ephedra sinica Stapf</i>	1.32	—	—	—	—
细叶鸦葱	<i>Scorzonera pusilla Pall</i>	1.71	3.70	2.89	2.32	3.68
多根葱	<i>Allium polyrhizum</i>	—	—	—	4.21	2.03
棘豆	<i>Oxytropis DC</i>	2.18	3.76	—	—	—
天门冬	<i>Asparagus cochinchinensis</i>	—	—	—	1.28	—
冷蒿	<i>Artemisia frigida Willd</i>	—	4.41	—	—	—
冰草	<i>Agropyron cristatum</i>	—	13.31	5.84	3.3	3.78
阿尔泰狗娃花	<i>Heteropappus altaicus</i>	—	5.28	—	—	—
乳白花黄芪	<i>Astragalus galactites Pall.</i>	—	6.16	2.10	2.24	5.12
藜	<i>Chenopodium album L</i>	—	—	2.95	—	—
北芸香	<i>Haplophyllum dauricum</i>	—	—	—	0.83	7.70
细叶鸢尾	<i>Iris tenuifolia</i>	—	—	—	3.08	6.30
知母	<i>Anemarrhena asphodeloides Bunge</i>	—	—	—	—	1.73
无芒隐子草	<i>Cleistogenes songorica</i>	7.38	—	—	—	12.52

## 2.2 植物群落相似性变化

群落相似性系数的大小在一定程度上可以反映群落的时空结构(表2),不同样点植被群落受到干扰后群落相似性系数产生变化,与何芳兰<sup>[25]</sup>对梭梭(*Haloxylon ammodendron*)林衰败过程中植被群落相似性研究相似。距采矿区400 m处植被群落与距采矿区900 m处植被群落相似性系数最高(相似性系数为0.67);离采矿区100 m处群落相似性系数与离采矿区1 900 m处植被群落相似性系数最低(相似性系数为0.36)。距采矿区100 m和400 m处与对照区相比群落相似性系数最低(相似性系数为0.37),距离采矿区1 900 m处与对照区的群落相似性系数最高(相似性系数为0.61),说明距采矿区最近处草地与对照区草地最为相似,且与距离采矿区最近处植被群落干扰差异最大。可能原因是煤炭露天开采使整体环境发生了质的改变,导致优势物种替

代率相对较高,环境异质性相对较大,草地退化程度较快<sup>[23]</sup>。

表2 不同距离植物群落 Sorensen 相似性指数变化

Table 2 Changes in Sorensen similarity index of plant communities at different distances

项目	不同距离 Sorensen 相似性指数			
	400 m	900 m	1 900 m	对照区
100 m	0.53	0.47	0.36	0.37
400 m		0.67	0.50	0.37
900 m			0.61	0.39
1 900 m				0.61

## 2.3 植物群落多样性指数变化

*Margalef* 指数反映群落物种丰富度,*Shannon-Wiener* 指数基于物种数量反映群落种类多样性,*Simpson* 指数表示物种优势度大小,*Pielou* 指数表示群落物种分布的均匀度。对不同样点植物群落多样性指数进行比较(表3)。*Margalef* 指数、*Shannon*—

Wiener 指数与 Simpson 指数随着与采矿区距离的增大均呈现增加的趋势,这与春风<sup>[26]</sup>对内蒙古巴音华矿区植物群落多样性研究结果相似,且与对照区相比,距离采矿区 400、900、1 900 m 处的植被多样性指数无显著差异,表明植物群落在距离采矿区 400~1 900 m 范围与对照区相比多样性差异较小,群落多样性指数、丰富度指数变化较小。但内蒙古巴音华矿区植物群落 Pielou 指数随着与采矿区距离的增加降低,而研究中发现距采矿区不同距离群落 Pielou 指数并无明显差异,可能原因是北电胜利矿区位于典型草原,草地物种组成较少,群落均匀度指数变化并不明显。

表 3 不同距离植物多样性指数变化

Table 3 Changes in plant diversity index at different distances

项目	不同距离多样性指数				
	100 m	400 m	900 m	1 900 m	对照区
Margalef	1.35±0.08 <sup>a</sup>	2.56±0.66 <sup>b</sup>	3.46±0.32 <sup>b</sup>	3.07±0.49 <sup>b</sup>	2.57±0.30 <sup>b</sup>
Simpson	0.45±0.05 <sup>a</sup>	0.82±0.00 <sup>b</sup>	0.80±0.03 <sup>b</sup>	0.76±0.07 <sup>b</sup>	0.73±0.03 <sup>b</sup>
Shannon	1.34±0.06 <sup>a</sup>	1.79±0.01 <sup>b</sup>	1.84±0.15 <sup>b</sup>	1.64±0.18 <sup>a</sup>	1.89±0.40 <sup>b</sup>
Pielou	0.73±0.05 <sup>a</sup>	0.89±0.03 <sup>a</sup>	0.87±0.01 <sup>a</sup>	0.88±0.04 <sup>a</sup>	0.89±0.03 <sup>a</sup>

注:同行不同小写字母表示不同作物之间差异显著( $P<0.05$ ),下同。

表 4 不同距离土壤基本理化性质  
Table 4 Basic physical and chemical properties of soil

测量指标	不同距离理化性质				
	100 m	400 m	900 m	1 900 m	对照区
土壤酸碱度	6.91±0.06 <sup>b</sup>	6.93±0.07 <sup>b</sup>	6.69±0.02 <sup>a</sup>	6.67±0.10 <sup>a</sup>	7.30±0.04 <sup>c</sup>
水分/%	11.30±0.38 <sup>a</sup>	11.33±0.93 <sup>a</sup>	15.93±0.86 <sup>a</sup>	36.30±6.89 <sup>b</sup>	39.25±5.68 <sup>b</sup>
有机质质量分数/(g·kg <sup>-1</sup> )	20.87±2.07 <sup>a</sup>	29.54±1.09 <sup>b</sup>	27.63±1.28 <sup>b</sup>	35.20±2.18 <sup>c</sup>	34.45±3.19 <sup>c</sup>
铵态氮质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )	1.50±0.58 <sup>a</sup>	1.26±0.05 <sup>a</sup>	1.45±0.10 <sup>a</sup>	1.69±0.18 <sup>b</sup>	1.61±0.02 <sup>b</sup>
硝态氮质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )	1.45±0.51 <sup>a</sup>	1.23±0.10 <sup>a</sup>	3.99±0.36 <sup>b</sup>	1.48±0.14 <sup>a</sup>	5.61±0.27 <sup>b</sup>
速效钾质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )	7.46±1.82 <sup>b</sup>	4.64±0.13 <sup>a</sup>	7.69±1.03 <sup>b</sup>	7.72±1.95 <sup>b</sup>	4.09±0.16 <sup>a</sup>
速效磷质量分数/(mg·kg <sup>-1</sup> )	245.84±17.23 <sup>ab</sup>	200.32±34.63 <sup>a</sup>	260.86±29.68 <sup>b</sup>	307.00±37.08 <sup>c</sup>	185.32±6.79 <sup>a</sup>
碱性磷酸酶质量分数/(mg·g <sup>-1</sup> )	253.4±6.41 <sup>b</sup>	224.78±14.11 <sup>a</sup>	232.82±8.47 <sup>ab</sup>	250.69±8.89 <sup>b</sup>	313.36±5.95 <sup>c</sup>
酸性磷酸酶质量分数/(mg·g <sup>-1</sup> )	334.96±9.84 <sup>c</sup>	268.78±17.96 <sup>a</sup>	293.44±23.16 <sup>abc</sup>	284.56±20.62 <sup>ab</sup>	322.56±5.10 <sup>bc</sup>
蔗糖酶质量分数/(mg·g <sup>-1</sup> )	0.29±0.03 <sup>a</sup>	0.27±0.01 <sup>a</sup>	0.26±0.01 <sup>a</sup>	0.27±0.01 <sup>a</sup>	1.35±0.03 <sup>b</sup>

受采矿干扰的减弱,草地在 400 m 左右开始逐渐恢复。土壤中有机质来自于植物的根系和凋落物,草地逐渐恢复后植被逐渐生长茂盛,根系与凋落物增多,土壤有机质含量增加<sup>[28]</sup>,而矿区西北方向紧挨排土场,植物受采矿干扰较弱,有机质含量较多(图 2a)。而土壤氮素因子、磷素因子和钾素因子含

## 2.4 土壤基本理化性质

不同样点土壤基本理化性质见表 4,采样区土壤呈中性。在研究区范围内,土壤含水量、有机质、铵态氮、速效钾和速效磷含量均随着与采矿区距离的增大而增加,其中土壤含水量和有机质分别增加了 68.87% 和 40.71%。距离采矿区 1 900 m 处土壤含水量和有机质含量与对照区最为接近,距采矿区 900 m 处硝态氮含量与对照区最为接近且含量最高。说明距离采矿区较远土壤受到外力干扰减弱,草地的水蚀和风蚀作用降低,土壤含水量、有机质、硝态氮流失量减少<sup>[27]</sup>。土壤酸性磷酸酶含量随着与采矿区距离的增加而降低,碱性磷酸酶与蔗糖酶含量随着与采矿区距离的影响无明显变化。

## 2.5 土壤养分空间分布

通过对研究区土壤养分测试数据进行经典统计学分析,并对其进行克里格(Kriging)插值得到矿区周围土壤养分空间分布(图 2)。土壤有机质、铵态氮、硝态氮、速效磷和速效钾含量总体分布均在距离采矿区最近位置含量最低,且在空间上呈现斑块状分布,说明露天采煤直接对土壤及景观的改变,致使煤矿区周围土壤养分呈现异质性<sup>[5]</sup>。氨态氮(图 2b)、速效磷(图 2d)和速效钾(图 2e)含量在距采矿区 400 m 以外呈增多趋势,其原因可能是随着

量在距离采矿区越远处逐渐增多,分析其原因可能是距离采矿区越远,土壤持水能力越强使土壤微生物活性增强,利于土壤养分的分解和转化循环,土壤肥力升高<sup>[29]</sup>。硝态氮含量在西南方向较多,西北方向含量降低,矿区周边草地硝态氮含量同样分布不均(图 2c)。

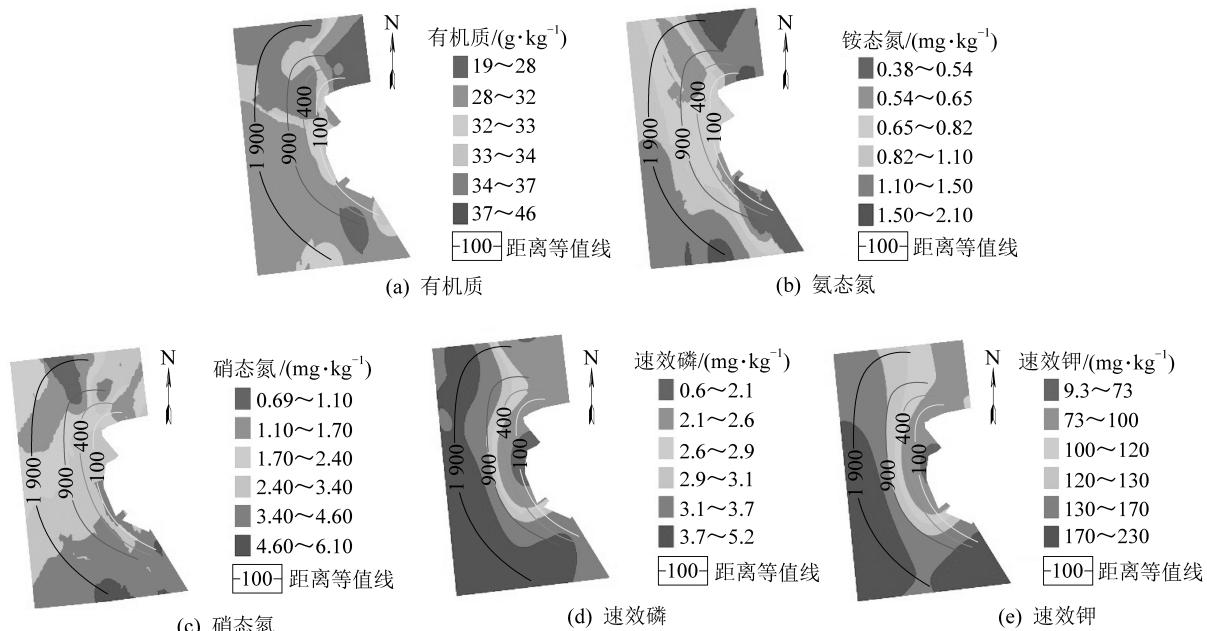


图2 研究区土壤养分空间分布

Fig.2 Spatial distribution of soil nutrients

## 2.6 植物群落特征与土壤因子的关系

样点至矿区边界不同水平距离植物多样性特征、土壤因子冗余分析结果显示(图3)。图中连线的长短表示植物群落特征与土壤因子关系的大小;箭头连线与排序轴的夹角表示该因子与排序轴相关性的大小;箭头所指的方向表示该因子的变化趋势。

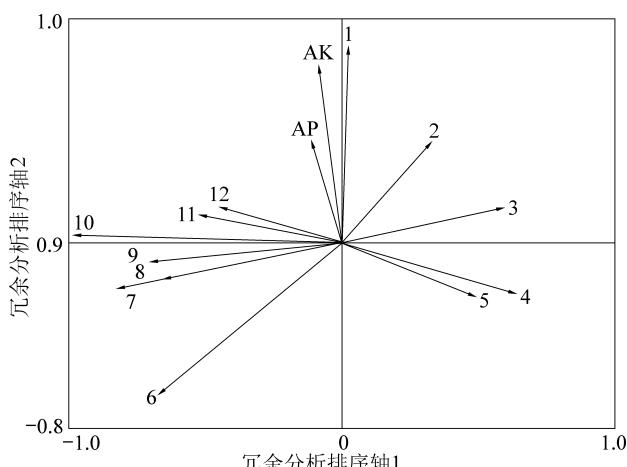


图3 植被群落特征与土壤因子关系的冗余分析排序图

Fig.3 RDA ranking of relationship between vegetation community characteristics and soil factors

冗余分析RDA1和RDA2两坐标轴能够解释97.42%的植被特征-土壤因子关系信息,说明排序结果可较好地反映植被群落特征与土壤因子之间的关系。土壤含水量、硝态氮、有机质、速效钾和速效

磷均与植被特征指标呈正相关,这与 NOUMI<sup>[16]</sup>研究结果吻合,说明土壤含水量、有机质、硝态氮、速效磷、速效钾的变化能在一定程度上反映植物多样性变化。成正相关因子以土壤含水量为中心分布在纵轴左侧,说明这些土壤因子之间具有很强的相关性。有机质与 Shannon-Wiener 指数基本重合,表明相关性最大。土壤含水量、有机质、和氮、磷、钾元素对植物反映群落生产力和物种多样性的影响非常明显,在影响植被生长的因子中比重较大<sup>[30-31]</sup>,而土壤 pH 和酶类在该矿区对植物群落特征的影响相对较小。

## 3 讨 论

近年来,随着资源持续开发,矿区优质草地面积下降了近50%<sup>[32]</sup>,造成露天矿区草地退化最直接、最严重的影响因素是煤炭露天开采<sup>[33-34]</sup>。与对照区相比,胜利矿区周边不同距离植被群落与土壤因子均存在差异,这可能是在露天采煤的扰动下,矿区周边草地出现不同程度退化,不同物种对退化草地有一定适应能力<sup>[35]</sup>。采煤过程中对植被的践踏、引起的扬尘<sup>[36]</sup>,对矿区周边一定范围植物造成干扰,由于寸草苔和小画眉草可以更好的适应这些干扰<sup>[37-38]</sup>,逐渐成为距离采矿区较近退化草地区域的优势种。露天开采产生的矿坑使矿区周边土壤水分向矿坑中心流失,草地出现沙化,增加了水分的垂直入渗深度,减小了表层土壤持水能力<sup>[39]</sup>,水分作为矿区植物生长的重要限制因子<sup>[29]</sup>,随着土壤含水量

的减少,植物生长也会受到干扰。露天采矿过程需剥离煤层上方的全部表土和岩层,不仅在采矿场损毁大量的土地,产生的排弃物也会占用大量的土地,致使区域环境生态失衡和土地资源损失<sup>[40]</sup>,此外重建的矿区生态景观导致维持土壤养分和植被空间格局的匀质化条件出现差异,煤矿区周边草地群落类型发生变化,土壤养分的空间异质性呈不同程度的变化趋势<sup>[5,41]</sup>。

冗余分析结果显示,植物多样性指数与土壤含水量、有机质、硝态氮、速效磷和速效钾呈正相关。因为土壤因子会影响植被的生长和植被生态系统的发展,表现为群落数量特征、种群动态和结构的改变<sup>[34]</sup>。植物生长是土壤因子变化最敏感的反映<sup>[42]</sup>,受采矿干扰降低,土壤因子损害减弱,植物群落逐渐稳定,植物死亡后产生大量养分丰富的枯落物,枯落物在土壤中积累、腐解,产生大量的养分,这些养分又被植物吸收利用,使群落物种丰富度、多样性得到提高。在露天采煤干扰下,矿区周边土壤和植物均遭受到一定程度破坏,恢复过程缓慢,因此可在自然恢复为主的前提下,实施适当的人工干预调控以促进北电胜利露天矿区周边草地的恢复。本文在选取影响植被群落特征的因子时,重点关注了土壤理化性质的变化,而坡向、海拔、降水量等地形、气象因素等未纳入分析,有待于进一步研究和讨论。

## 4 结 论

1)结合野外调查结果及矿区周边不同距离草地植物的群落特征,将胜利矿区植物群落划分3个类型。距矿区100~400 m 主要以糙隐子草、寸草苔和小画眉草等杂草为主;400~900 m 范围主要以小画眉草和糙隐子草为主;900~1 900 m 植被群落物种组成与对照区草地最接近,主要以大针茅、糙隐子草和克氏针茅为主。

2)距离胜利矿区较近位置植物多样性指数显著降低,群落相似性降低,土壤含水量、有机质、硝态氮和速效磷均显著减少。距离矿区1 900 m 处与对照区相比,植被群落与土壤养分最为接近。煤炭开采对一定范围内的土壤肥力产生影响,矿区周边土壤养分的空间异质性呈不同程度的变化趋势。

3)根据冗余分析,胜利矿区周边草地植物多样性指数与土壤含水量、有机质、硝态氮、速效磷和速效钾呈正相关。土壤含水量和有机质是影响群落结构的关键因子,其余土壤因子对植物群落特征的影响较小。矿区周边群落的演替对土壤养分的需求不同,群落物种的变化明显,矿区周围草地出现明显的

退化趋势,可在自然恢复为主的前提下,实施适当的人工干预调控以促进胜利矿区周边草地的恢复。

## 参考文献(References):

- [1] 王平,王金满,秦倩,等.黄土区采煤塌陷对土壤水力特性的影响[J].水土保持学报,2016,30(3):297~304.  
WANG Ping,WANG Jinman,QIN Qian,*et al.* Effects of land subsidence on soil hydraulic properties in mining area of the loess plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30 ( 3 ) : 297~304.
- [2] MALAVIVA S,MUNSI M,OINAM G,*et al.*Landscape approach for quantifying land use land cover change (1972~2006) and habitat diversity in a mining area in Central India (Bokaro, Jharkhand) [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2010, 170 ( 1/4 ) : 215~229.
- [3] SHRESTHA R K,LAL R.Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation [J]. GEODERMA, 2011, 161(3) : 168~176.
- [4] RAMANI R V.Surface mining technology: progress and prospects [J]. Procedia Engineering, 2012, 46:9~21.
- [5] FENG Yu,WANG Jinman,BAI Zhongke,*et al.* Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: a review [J]. Earth-Science Reviews, 2019, 191:12~25.
- [6] AHIRWAL J,MAITI S K. Assessment of soil properties of different land uses generated due to surface coal mining activities in tropical Sal (*Shorea robusta*) forest, India [J]. CATENA, 2016, 140:155~163.
- [7] 敖敦高娃,宝音陶格涛.不同时期放牧对典型草原群落地上生产力的影响[J].中国草地学报,2015,37(2):28~34.  
AO Dungaowa, BAO Yintaogetao. Effects of different grazing periods on aboveground community productivity of a typical steppe grassland [J]. Chinese Journal of Grassland, 2015, 37(2) : 28~34.
- [8] 吴富勤,陶晶,华朝朗,等.箐花甸国家湿地公园植物多样性调查研究[J].林业调查规划,2019,44(1):138~142,183.  
WU Fuqin, TAO Jing, HUA Chaolang, *et al.* Survey on plant diversity of qinghuadian national wetland park in lanping county of Yunnan [J]. Forest Inventory and Planning, 2019, 44 ( 1 ) : 138 ~ 142,183.
- [9] HUANG Lei,ZHANG Peng,HU Yigang,*et al.* Vegetation succession and soil infiltration characteristics under different aged refuse dumps at the Heidaigou opencast coal mine [J]. Global Ecology & Conservation, 2015(4):255~263.
- [10] MUDRÁK O,DOLEŽAL J,FROUZ J.Initial species composition predicts the progress in the spontaneous succession on post-mining sites [J]. Ecological Engineering, 2016, 95:665~670.
- [11] JING Zhaorui,WANG Jinman,ZHU Yucheng,*et al.* Effects of land subsidence resulted from coal mining on soil nutrient distributions in a loess area of China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 177:350~361.
- [12] 王琦,叶瑶,韩煜,等.半干旱采煤塌陷区植被土壤碳循环及源/汇功能转换特征[J].水土保持学报,2016,30(4):166~172.  
WANG Qi, YE Yao, HAN Yu, *et al.* The Characteristics of soil and

- vegetation carbon cycle and conversion of carbon source and sink in mining subsidence area of the semi-arid region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(4): 166–172.
- [13] 赵韵美,樊金拴,苏锐,等.阜新矿区不同植被恢复模式下煤矿废弃地土壤养分特征[J].西北农业学报, 2014, 23(8): 210–216.
- ZHAO Yunmei, FAN Jinshuan, SU Rui, et al. Soil nutrient characteristics for different vegetation restoration models in an abandoned area of fu xin coal mine [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2014, 23(8): 210–216.
- [14] HOU Xiaoyun, LIU Shiliang, CHENG Fangyan, et al. Variability of environmental factors and the effects on vegetation diversity with different restoration years in a large open-pit phosphorite mine [J]. Ecological Engineering, 2019(127): 245–253.
- [15] 赵敏,赵锐锋,张丽华,等.基于盐分梯度的黑河中游湿地植物多样性及其与土壤因子的关系[J].生态学报, 2019, 39(11): 4116–4126.
- ZHAO Min, ZHAO Ruijing, ZHANG Lihua, et al. Plant diversity and its relationship with soil factors in the middle reaches of the Heihe River based on the soil salinity gradient [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(11): 4116–4126.
- [16] NOUMI Z. Effects of exotic and endogenous shrubs on understory vegetation and soil nutrients in the south of Tunisia [J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(4): 481–487.
- [17] 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.
- WANG Shuangming, DU Huadong, WANG Shengquan. Analysis of damage process and mechanism for plant community and soil properties at northern Shenmu subsidence mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 17–26.
- [18] 刘育红,魏卫东,杨元武,等.高寒草甸退化草地植被与土壤因子关系冗余分析[J].西北农业学报, 2018, 27(4): 480–490.
- LIU Yuhong, WEI Weidong, YANG Yuanwu, et al. Redundancy analysis on relationships between grassland vegetation and soil factors on degraded alpine meadow [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2018, 27(4): 480–490.
- [19] 刘娇,付晓莉,李学章,等.黄土高原北部生长季土壤氮素矿化对植被和地形的响应[J].中国生态农业学报, 2018, 26(2): 231–241.
- LIU Jiao, FU Xiaoli, LI Xuezhang, et al. Responses of soil nitrogen mineralization during growing season to vegetation and slope position on the northern Loess Plateau of China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(2): 231–241.
- [20] 张兆彤,王金满,张佳瑞.矿区复垦土壤与植被交互影响的研究进展[J].土壤, 2018, 50(2): 239–247.
- ZHANG Zhaotong, WANG Jinman, ZHANG Jiarui. Interaction between reclaimed soil and vegetation in mining area: A Review [J]. Soils, 2018, 50(2): 239–247.
- [21] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社, 2000: 14–11.
- [22] 刘晓红,李校,彭志杰.生物多样性计算方法的探讨[J].河北林果研究, 2008, 23(2): 166–168.
- LIU Xiaohong, LI Xiao, PENG Zhijia. The discussion on calculation methods of biodiversity [J]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research, 2008, 23(2): 166–168.
- [23] 乌仁其其格,张德平,雷霆,等.呼伦贝尔草原采煤塌陷区植物群落变化分析:以内蒙古宝日希勒煤矿区为例[J].干旱区资源与环境, 2016, 30(12): 141–145.
- WU Renqiqige, ZHANG Deping, LEI Ting, et al. Analysis on the change of plant community in coal mining subsidence area of hulunbeier grassland: taking the Inner Mongolia Baori Hiller Coal Mine as an example [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(12): 141–145.
- [24] 刘育红,杨元武,张英.退化高寒草甸植物功能群与土壤因子关系的冗余分析[J].生态与农村环境学报, 2018, 34(12): 1112–1121.
- LIU Yuhong, YANG Yuanwu, ZHANG Ying. Redundancy analysis of the relationship between plant functional groups and soil factors in the degraded alpine meadow [J]. Journal of ecology and rural environment, 2018, 34(12): 1112–1121.
- [25] 何芳兰,金红喜,郭春秀,等.民勤绿洲边缘人工梭梭(Haloxylon ammodendron)林衰败过程中植被组成动态及群落相似性[J].中国沙漠, 2017, 37(6): 1135–1141.
- HE Fanglan, JIN Hongxi, GUO Chunxiu, et al. Vegetation composition and community similarity of haloxylon ammodendron plantations at different degree of degradation on the edge of the minqin oasis [J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(6): 1135–1141.
- [26] 春风,赵萌莉,张继权,等.内蒙古巴音华煤矿区自然定居植物群落物种多样性变化分析[J].生态环境学报, 2016, 25(7): 1211–1216.
- CHUN Feng, ZHAO Mengli, ZHANG Jiquan, et al. Analysis on Diversity Changes in naturally colonized plant communities of the bayinhua mining area in inner mongolia [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(7): 1211–1216.
- [27] BALESIDENT J, CHENU C, BALABANE M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage [J]. Soil and Tillage Research, 2000, 53(3): 215–230.
- [28] 杨玉海,陈亚宁,李卫红.新疆塔里木河下游土壤特性及其对物种多样性的影响[J].生态学报, 2008(2): 602–611.
- YANG Yuhai, CHEN Yaning, LI Weihong. Soil properties and their impacts on changes in species diversity in the lower reaches of Tarim River, Xinjiang, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008(2): 602–611.
- [29] 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.
- WANG Qi, QUAN Zhanjun, HAN Yu, et al. 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 [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica, 2014, 34(8): 1642–1651.
- [30] LI Yanqiang, JIANG Yinghe, LI Zhaohua, et al. Nitrogen removal from eutrophic water by terrestrial economic plants floating-bed system [J]. Environmental Science & Technology (China), 2010, 33(8): 103–107.

- [31] GARTLAN J S, NEWBERY D M, THOMAS D W, et al. The influence of topography and soil phosphorus on the vegetation of Korup Forest Reserve, Cameroun [J]. *Vegetatio*, 1986, 65(3): 131–148.
- [32] 李全生. 东部草原区煤电基地开发生态修复技术研究 [J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7049–7053.
- LI Quansheng. Research on ecological restoration technology of coal-power base in eastern steppe of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7049–7053.
- [33] 于昊辰, 牟守国, 卞正富, 等. 北方草原露天煤矿区植被退化因素分析 [J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(1): 1–8.
- YU Haochen, MU Shouguo, BIAN Zhengfu, et al. Analysis for vegetation degradation factors in opencast coal mines in Northern Grass-Land Area, China [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(1): 1–8.
- [34] 韩煜, 王琦, 赵伟, 等. 草原区露天煤矿开采对土壤性质和植物群落的影响 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(11): 3425–3433.
- HAN Yu, WANG Qi, ZHAO Wei, et al. Effects of opencast coal mining on soil properties and plant communities of grassland [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(11): 3425–3433.
- [35] 张建贵, 王理德, 姚拓, 等. 祁连山高寒草地不同退化程度植物群落结构与物种多样性研究 [J]. 草业学报, 2019, 28(5): 15–25.
- ZHANG Jiangu, WANG Lide, YAO Tuo, et al. Plant community structure and species diversity differences in alpine grassland in the Qilian Mountains with different levels of degradation [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(5): 15–25.
- [36] 彭喜曦. 露天煤矿外排土场扬尘污染与生态整治关系研究 [J]. 绿色科技, 2018(16): 50–51.
- PENG Xixi. Study on the Relationship between dust pollution and ecological renovation in the excavation field of open-pit coal mine [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2018(16): 50–51.
- [37] 陈茂庆, 萧运峰. 野生草坪植物:寸草苔的研究 [J]. 生物学杂志, 1996, 13(4): 15–17.
- CHEN Maoqing, XIAO Yunfeng. Study on Wild lawn plants: *carex duriuscula* C. A. Mey [J]. *Journal of Biology*, 1996, 13(4): 15–17.
- [38] 徐彩琳, 李自珍. 荒漠一年生植物小画眉草的种群动态调节与模拟 [J]. 西北植物学报, 2002, 22(6): 135–140.
- XU Cailin, LI Zizhen. Population regulation and dynamical simulation of annual plant *Eragrostis poaeoides* in desert region [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2002, 22(6): 135–140.
- [39] 毕银丽, 邹慧, 彭超, 等. 采煤沉陷对沙地土壤水分运移的影响 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(S2): 490–496.
- BI Yinli, ZOU Hui, PENG Chao, et al. Effects of mining subsidence on soil water movement in sandy area [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(S2): 490–496.
- [40] 蔡利平, 李钢, 史文中. 增地节地型露天矿排土场优化设计 [J]. 煤炭学报, 2013, 38(12): 2208–2214.
- CAI Liping, LI Gang, SHI Wenzhong. Optimal design for land expanding and conserving open-pit dump [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(12): 2208–2214.
- [41] 张凤杰, 乌云娜, 杨宝灵, 等. 呼伦贝尔草原土壤养分与植物群落数量特征的空间异质性 [J]. 西北农业学报, 2009, 18(2): 173–177.
- ZHANG Fengjie, WU Yunna, YANG Baoling, et al. The research on the spatial heterogeneity of the soil nutrient and the quantitative properties of plant communities in hulunbeier steppe [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2009, 18(2): 173–177.
- [42] ZHANG Hao, CHU L M. Plant community structure, soil properties and microbial characteristics in revegetated quarries [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(8): 1104–1111.