

# 北京典型矿区恢复过程中土壤环境因子与植物群落分布的关系

于小飞, 张亮, 贾学桦, 刘枫

北京市科学技术研究院资源环境研究所, 北京

收稿日期: 2024年3月5日; 录用日期: 2024年3月29日; 发布日期: 2024年4月30日

## 摘要

基于娄子水采石废弃地实地调查的样地物种重要值, 运用双向指示种分析将植被分为不同群落。利用典范对应分析(CCA)分析了土壤环境因子与植被分布的相关关系, 结果表明土壤阳离子交换容量、土壤有机质与草本植被分布显著相关。通过土壤环境因子与植物群落特征值的相关分析, 发现乔灌木群落盖度与速效磷含量呈显著正相关; 草本植物群落丰富度与土壤速效钾含量呈显著正相关, 均匀度与土壤碱解氮含量呈显著正相关, Shannon指数与土壤速效磷含量和有机质含量均呈显著正相关, Simpson指数与土壤速效磷含量呈显著正相关, 群落盖度与土壤全磷含量呈显著正相关而与速效钾含量呈显著负相关, 群落平均高度与土壤酸碱性呈显著负相关。研究结论将为矿区恢复提供科学支持。

## 关键词

矿山废弃地, 植物群落, 双向指示种分析, 典范对应分析, 土壤环境因子

# Relationship between Soil Environmental Factors and Plant Communities Distribution in the Process of Ecological of Beijing Typical Mining Areas

Xiaofei Yu, Liang Zhang, Xuehua Jia, Feng Liu

Institute of Resources and Environment, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing

Received: Mar. 5<sup>th</sup>, 2024; accepted: Mar. 29<sup>th</sup>, 2024; published: Apr. 30<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Based on the species importance values of the plots surveyed in Louzishu quarry abandoned land,

文章引用: 于小飞, 张亮, 贾学桦, 刘枫. 北京典型矿区恢复过程中土壤环境因子与植物群落分布的关系[J]. 环境保护前沿, 2024, 14(2): 379-387. DOI: 10.12677/aep.2024.142052

the vegetation was divided into different communities by bidirectional indicator species analysis. The correlation between soil environmental factors and plant distribution was analyzed by canonical correspondence analysis (CCA). The results showed that soil cation exchange capacity and soil organic matter were significantly correlated with herbaceous plant distribution. Through the correlation analysis of soil environmental factors and plant community characteristic values, it was found that the tree and shrub community coverage was significantly positively correlated with soil available phosphorus content; herbaceous plant community richness was significantly positively correlated with soil available potassium content, and evenness was significantly positively correlated with soil alkaline hydrolyzed nitrogen content. The Shannon index was significantly positively correlated with soil available phosphorus content and organic matter content, and Simpson index was significantly positively correlated with soil available phosphorus content. The community coverage was significantly positively correlated with soil total phosphorus content and significantly negatively correlated with soil available potassium content. The average height of the community was significantly negatively correlated with soil acidity. The results of this study would provide scientific support for mine restoration.

## Keywords

Mine Wasteland, Plant Community, Two-Way Indicator Species Analysis, Canonical Correspondence Analysis, Soil Environmental Factors

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

北京市现有各种矿山 300 多处, 多数分布在山区, 由于管理和采矿行业性质, 使北京附近山区生态环境和自然景观遭到了严重破坏[1] [2]。近年来北京市在矿区生态恢复方面已经做了很多的工作, 物种材料应用较丰富、工程措施类型较多、恢复效果差异性明显。因此, 对矿区生态状况的长期、客观、准确的监测和评价, 不仅是衡量矿区生态修复工作成效、总结提炼修复成果、发现问题及提升矿区生态修复理论的关键环节, 也是下一步矿区生态修复、生态建设工作的必要前提[3]。

当前, 国内对于矿区修复效果缺乏较为系统、全面和科学的生态监测和评价方法。土壤环境因子与植被分布的相关关系已经被广泛讨论[4] [5] [6]。一些矿山废弃地的具体研究也证明了土壤化学因子在影响植被的分布上起着关键作用[7]。

本文采用国内通用方法对娄子水采石废弃地生态恢复过程中的土壤环境因子与植物群落进行监测, 分析二者的关系, 为政府决策提供科学依据。

## 2. 研究区概况

研究区域娄子水采石废弃地位于北京市房山区, 属温带大陆性气候, 年平均气温为 11.6℃, 最高气温曾达 43.5℃ (1961 年 6 月 10 日), 最低气温曾至 -26℃ (1966 年 2 月 22 日); 年平均降水量 687 mm, 最大降水量 1322 mm (1954 年), 最小降水量 277 mm (1975 年); 年平均无霜期 185 天。

## 3. 实验设计与数据处理

### 3.1. 实验设计

根据娄子水采石废弃地恢复方式、地形地貌特征、土壤状况、植被类型分布状况、生境类型等生态

环境因子, 采取网格布点法与典型抽样相结合的办法进行植被、土壤综合采样布点调查。

共调查样地 15 个, 选择不同坡位, 不同海拔和恢复方式进行植被调查, 合计共 41 个样方。样地大小为 5 m × 5 m, 每个样地内植被分乔灌木层和草本层分别进行统计, 乔灌木层选取整个样地进行统计, 草本层选取样地内对角的两个 1 m × 1 m 小样方进行统计[8]。

### 3.2. 数据采集

植被调查: 主要记录海拔、GPS 坐标、微地貌, 并记录样方内所有植物的名称、生长型、分盖度、高度、株数等, 其中物种高度、盖度、多度均由目测法测定。

土壤调查: 首先设置采样分区, 在分区内“S”型设置采样点, 采集多点混合样, 减少分析量, 得到平均值。并分上下两层采集(0~10 cm 和 10~20 cm)土壤样品, 分别测定土壤理化性质(机械组成、容重、有机质、pH、电导率、阳离子交换量、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾), 设置 14 个土壤采样点。土壤机械组成采用吸管法; 容重采用烘干称重法; 全氮采用半微量开氏法测定; 有机质的测定采用重铬酸钾容量法; 全磷的测定采用熔融-比色法; 全钾采用熔融-火焰光度法; 碱解氮采用碱解扩散法; 速效磷采用浸提-比色法; 速效钾采用浸提-火焰光度法; 电导率采用电导法; pH 值采用酸度计测定法; 阳离子交换量采用一次性平衡法。

### 3.3. 数据分析

#### (1) 群落数量分类

群落数量分类方法采用的是多元分划方法中的 TWINSpan 分类法, 多元分划法是以整个数据矩阵为基础的, 包括三种方法: 一是平方和减量法; 二是 TWINSpan 分类; 三是排序轴分类法, TWINSpan 分类方法是目前最常用的一种群落数量分类方法。TWINSpan 是在承认样方分类和种类分类的过程一致的基础上进行的, 首先对数据进行 CA/RA 排序, 同时得到样方和种类第一排序轴, 分别用于样方分类和种类分类[9]。

#### (2) 环境因子与植被分布的相关关系: CCA 排序

典范对应分析是由对应分析 CA/RA 修改而产生的新方法。它是把 CA/RA 和多元回归结合起来, 每一步计算结果都与环境因子进行回归, 而详细地研究植被与环境的关系。Braak 把这一方法用于多元直接梯度分析, 以区别前面简单的直接梯度分析。CCA 要求两个数据矩阵。一个是植被数据矩阵; 一个是环境数据矩阵。不同于以前的直接梯度分析, CCA 可以结合多个环境因子一起分析从而更好地反映群落与环境的关系。在种类和环境因子不特别多的情况下, CCA 可以将样方排序, 种类排序及环境因子排序表示在一个图上, 可以直观地看出它们之间的关系。CCA 的基本思路是在 CA/RA 迭代过程中, 每次得到的样方坐标都要与环境因子相结合, 其结合方式为多元线性回归[10]。

#### (3) 环境因子与植物群落的相关关系: 逐步线性回归。

(4) 其他: 数据的初步整理、计算与分析使用 Microsoft Excel2007 进行; 相关分析使用 SPSS17.0 进行; 采用 SURFER8.0 进行土壤肥力异质性分析。

## 4. 实验结果与分析

### 4.1. 植物群落数量分类

#### 4.1.1. 乔灌木植被的数量分类

利用物种的重要值矩阵对娄子水采石场废弃地植物群落进行双向指示种分析。将娄子水采石场废弃地的乔灌木样方、物种排列成 TWINSpan 双向分类矩阵。矩阵上方是样方编号(沿垂直方向的数字),

左侧是物种编号，下方是样方的分类结果，右侧是对物种的分类结果，中间为每个物种在各个样方中的丰富度等级。TWINSpan 分类结果见图 1，结合实际生态意义，最终采取第二级水平的划分。

		1 1 11 1 1	
		347852016249351	
5 E	1111--111-----1	00	
7 G	11-----	010	
8 H	-1-----1---	010	
9 I	-1-----	010	
2 B	1--11111111---	011	
3 C	---111-11-111--	011	
6 F	-----11-----	011	
12 L	--111-----1---	011	
1 A	11----111111111	1	
4 D	-----1-----1-	1	
10 J	-----11	1	
11 K	-----1-1---1	1	
	000000000000011		
	00111111111111		
	000111111111		
	00000011		
	001111		

Figure 1. TWINSpan classification for tree and shrub  
图 1. 乔灌木 TWINSpan 分类结果

对各群落类型依据其优势种和 TWINSpan 划分的指示种进行命名。

I 火炬树——平基槭群落

该群落平均盖度约为 34.29%，优势种为火炬树，重要值为 0.3655，特征种平基槭的重要值为 0.2192。

II 火炬树——榆树群落

该群落类型在本矿区的分布最广，其群落平均盖度约为 36.00%，优势种为火炬树，重要值为 0.2371；特征种为榆树，重要值为 0.1823。

III 荆条——禾朔荂花群落

该群落平均盖度约为 34.00%，优势种为荆条，重要值为 0.6955，特征种为禾朔荂花，其重要值为 0.0502。

4.1.2. 草本植被的数量分类

草本植被的 TWINSpan 分类结果见图 2，结合实际生态意义，最终采取第二级水平的划分。

I 铁杆蒿——马唐群落

该群落平均盖度约为 34.29%，优势种为铁杆蒿，重要值为 0.4263，特征种马唐的重要值为 0.2576。

II 苜蓿群落

该群落平均盖度约为 36.00%，优势种和特征种均为苜蓿，重要值为 0.2996。

III 小甘菊——鬼见愁锦鸡儿群落

该群落平均盖度约为 34.00%，优势种为小甘菊，重要值为 0.8880，特征种为鬼见愁锦鸡儿，其重要值为 0.0136。

IV 小甘菊——波斯菊群落

该群落平均盖度约为 10.00%，优势种为小甘菊，重要值为 0.6893，特征种为波斯菊，其重要值为 0.3107。

```

1 11 12 221112111222
32356145670489351246978012

3 C ----1----- 00000
4 D ----1----- 00000
9 I ----1----- 00000
6 F -11-1-1-1----- 00001
8 H -1111-1----- 00001
1 A 111111-1-1-1----- 0001
14 N -----11----- 00100
15 O -----11----- 00100
16 P -----1----- 00100
22 V -----1----- 00100
12 L -----1-111-1----- 00101
11 K 1-----1111-1----- 00110
13 M -----1----- 001110
19 S -----1----- 001110
20 T -----1----- 001110
21 U -----1----- 001110
10 J -----111111-1----- 001111
2 B ----11-1-11----- 01
5 E -1-11-1-1-11111-1- 01
7 G ----111111-11-1-11----- 01
17 Q -----111111 1
18 R -----1- 1

00000000000000000000011111
0000000011111111111000001
0111111100000000111101111
000011100001111

```

Figure 2. TWINSpan classification for herbaceous  
图 2. 草本 TWINSpan 分类结果

## 4.2. 土壤环境因子与植被分布的相关关系

### 4.2.1. 乔灌木植物群落与土壤环境因子的关系

利用 CCA 分析了 11 个土壤因子与娄子水矿区乔灌木植被分布的相关关系。CCA 排序的前两个轴只保留了物种数据总方差的 48.9%，因此分析中可能丢失了很大一部分的物种信息。但前两轴的物种与环境相关系数相当高，共解释了物种 - 环境关系总方差的 52.5% (表 1)。只保留 CCA 的前两轴，就能很好地反映娄子水矿区乔灌木植被与土壤理化因子之间的关系。

Table 1. Statistical results of CCA (tree and shrub)  
表 1. CCA 排序统计结果(乔灌木)

	排序轴			
	1	2	3	4
特征值	0.541	0.438	0.348	0.193
物种 - 环境相关性	0.973	0.984	0.972	0.927
	累计百分比			
物种数据	27.0	48.9	66.2	75.9
物种 - 环境数据	29.0	52.5	71.2	81.6

土壤环境因子及其代码见表 2。土壤化学因子与排序轴相关系数见表 3，两排序轴与土壤因子相关性均不显著。

Table 2. CCA soil environment factors and their codes  
表 2. CCA 土壤环境因子及其代码

代码	环境因子	代码	环境因子
AN	土壤碱解氮	CEC	土壤阳离子交换量
TN	土壤总氮	EC	土壤电导率
TP	土壤总磷	PH	土壤 pH 值

续表

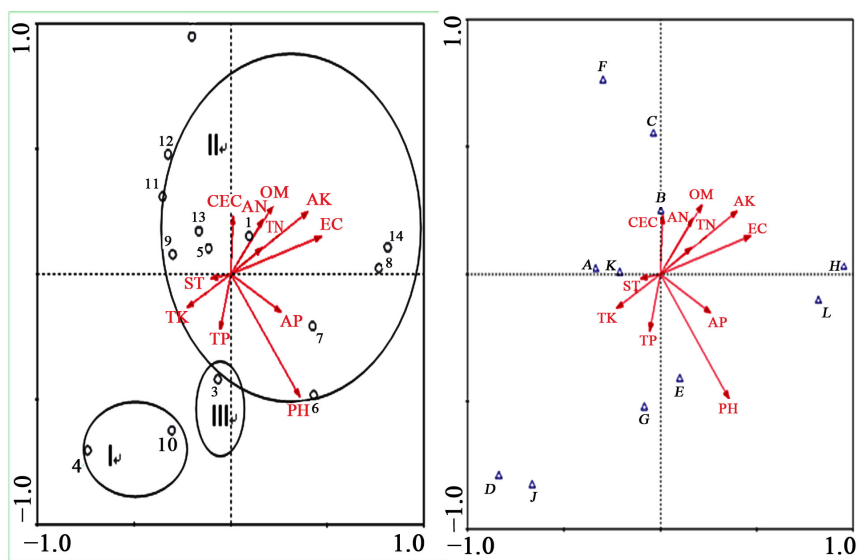
AP	土壤速效磷	SWC	土壤含水率
TK	土壤总钾	SBD	土壤容重
AK	土壤速效钾	ST	土壤质地
OM	土壤有机质		

Table 3. The relative coefficients of the soil environmental factors with the compositor axis of CCA (tree and shrub)

表 3. 土壤环境因子与 CCA 排序轴相关系数(乔灌木)

土壤因子	CCA1	CCA2
PH	0.3473	-0.4822
AN	0.1628	0.2162
AP	0.2552	-0.1499
AK	0.3887	0.2449
OM	0.2120	0.2701
TN	0.1578	0.1029
TP	-0.0545	-0.2216
TK	-0.2214	-0.1318
EC	0.4568	0.1481
CEC	0.0116	0.2293
ST	-0.1004	-0.0166

由 TWINSpan 划分而得到矿区各个群落类型在排序图上虽然有交叉重叠,但它们的相对位置仍然可以从排序图中看出(图 3)。群落 I 位于排序图的左下方, 各样地与较高土壤总钾、总磷对应。群落 II 位于排序图的中部, 与环境因子的关系并不明显。群落 III 位于排序图的上方, 与较高的 pH 对应。



A: 火炬树; B: 侧柏; C: 榆树; D: 山杨; E: 荆条; F: 杠柳; G: 禾蒴茺花; H: 臭椿; I: 三裂绣线菊; E: 平基槭; K: 鬼见愁锦鸡儿; L: 紫穗槐

Figure 3. Double sequence plot of CCA for tree and shrub

图 3. 乔灌木 CCA 双序图

从各物种的 CCA 排序来看, 臭椿、紫穗槐位于排序图的右侧, 这显然与其生境土壤电导率, 速效钾等的高含量有关, 但土壤总钾含量并不高。荆条和禾蒴茺花位于排序图的下方, 与较高的土壤 pH, 土壤总磷

对应。山杨和平基槭位于排序图的左下方，这与较高的土壤总钾、总磷和 pH 有关，与土壤有机质、电导率和速效钾负相关。杠柳和榆树位于排序图的上方，这与较高的土壤阳离子交换容量等有关，与土壤总磷和 pH 负相关。排序图中部的物种火炬树、鬼见愁锦鸡儿和侧柏则属于土壤因子梯度上的过渡类型。

#### 4.2.2. 草本植物群落与土壤环境因子的关系

利用 CCA 分析了 11 个土壤因子与姜子水矿区草本植被分布的相关关系。CCA 排序的前两个轴只保留了物种数据总方差的 28.5%，因此分析中可能丢失了很大一部分的物种信息。但前两轴的物种与环境相关系数相当高，共解释了物种 - 环境关系总方差的 51.1% (表 4)。

**Table 4.** Statistical results of CCA (herbaceous)

**表 4.** CCA 排序统计结果(草本)

	排序轴			
	1	2	3	4
特征值	0.694	0.597	0.356	0.292
物种 - 环境相关性	0.927	0.919	0.853	0.795
	累计百分比			
物种数据	15.3	28.5	36.3	42.8
物种 - 环境数据	27.5	51.1	65.1	76.7

土壤化学因子与排序轴相关系数见表 5，第一排序轴与土壤因子相关性均不显著，土壤有机质与第二排序轴相关关系显著( $r = 0.4140$ ,  $P < 0.05$ )，土壤阳离子交换容量与第二排序轴相关关系极显著( $r = 0.5052$ ,  $P < 0.001$ )。

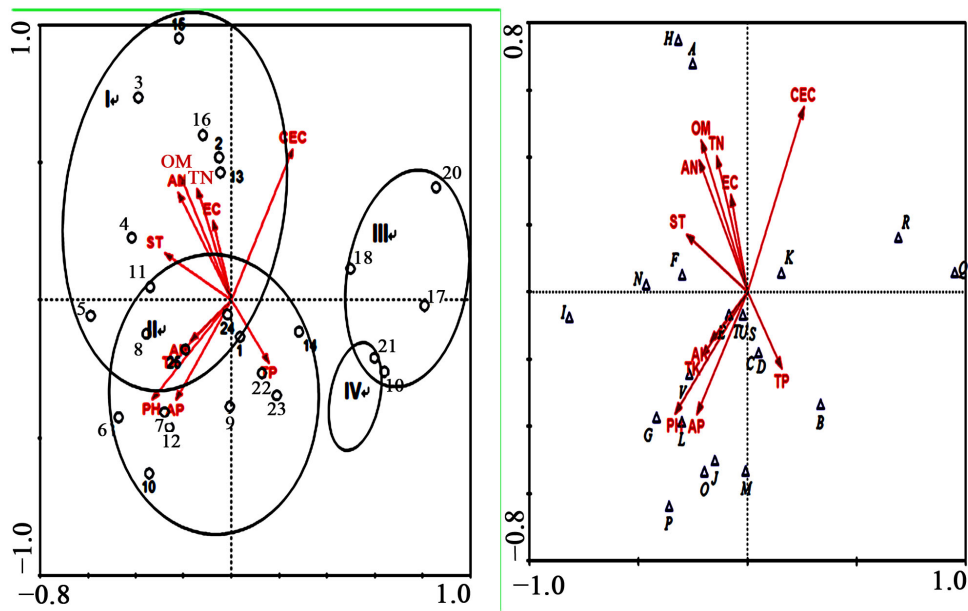
**Table 5.** The relative coefficients of the soil environmental factors with the compositor axis of CCA (herbaceous)

**表 5.** 土壤环境因子与 CCA 排序轴相关系数(草本)

土壤因子	CCA1	CCA2
PH	-0.3083	-0.3335
AN	-0.2066	0.3598
AP	-0.2154	-0.3351
AK	-0.1593	-0.1376
OM	-0.1976	0.4140*
TN	-0.1323	0.3714
TP	0.1458	-0.2102
TK	-0.1943	-0.1757
EC	-0.0714	0.2656
CEC	0.2390	0.5052**
ST	-0.2595	0.1563

\*\* :  $P < 0.001$ ; \* :  $P < 0.05$ .

由 TWINSpan 划分而得到的各群落类型在排序图上虽然有交叉重叠，但它们的相对位置仍然可以从排序图中看出(图 4)。群落 I 位于排序图的左上方，各样地与较高土壤有机质、总氮、碱解氮河阳离子交换容量对应。群落 II 位于排序图的中部，与环境因子的关系并不明显。群落 III 位于排序图的右上方，与较高的土壤阳离子交换容量对应。群落 IV 位于排序图的右下方，与较高的土壤总磷对应。



A: 铁杆蒿; B: 波斯菊; C: 地锦; D: 针茅; E: 狗尾草; F: 苦菜; G: 苅草; H: 马唐; I: 草木樨; E: 苜蓿; K: 鬼针草; L: 猪毛蒿; M: 黄花蒿; N: 沙打旺; O: 小红菊; P: 灰菜; Q: 小甘菊; R: 鬼见愁锦鸡儿; S: 圆叶牵牛; T: 小白酒菊; U: 通奶草; V: 苦苣菜

**Figure 4.** Double sequence plot of CCA for herbaceous  
**图 4.** 草本 CCA 双序图

从各物种的 CCA 排序来看，铁杆蒿、马唐位于排序图的上方，这显然与其生境土壤有机质，速效钾等的高含量有关，但土壤总钾含量并不高。荆条和禾朔茺花位于排序图的下方，与较高的土壤 pH，土壤总磷对应。山杨和平基槭位于排序图的左下方，这与较高的土壤总钾、总磷和 pH 有关，与土壤有机质、电导率和速效钾负相关。杠柳和榆树位于排序图的上方，这与较高的土壤阳离子交换容量等有关，与土壤总磷和 pH 负相关。排序图中部的物种火炬树、鬼见愁锦鸡儿和侧柏则属于土壤因子梯度上的过渡类型。

### 4.3. 土壤环境因子与植物群落特征值的相关关系

采用多元逐步回归方法分析  $\alpha$  多样性指数及植被高度、盖度与环境因子进行相关性分析。分别计算  $\alpha$  多样性指数及植被高度、盖度与环境因子的相关系数，以及与进入回归方程因子的偏相关系数，并计算出多元回归方程。

#### 4.3.1. 环境因子与乔灌木植物群落特征值的相关关系

乔灌木植物群落与环境因子相关关系见表 6，总体来说只有群落盖度的回归方程有一定显著性，群落盖度与速效磷含量呈极显著正相关，说明在增加土壤速效磷含量可以增加植被覆盖度。

**Table 6.** Interrelationships with plant community and soil environmental factors for tree and shrub  
**表 6.** 乔灌木植物群落与土壤环境因子相关关系

代码	项目	$r^2$	显著度	回归方程
C	盖度	0.443	**	$C = 3.365AP - 3.313$ $r(C, AP) = 0.697, P = 0.006$

备注: \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ , 样方数为 14。



### 4.3.2. 环境因子与草本植物群落特征值的相关关系

草本植物群落与环境因子相关关系见表 7，总体来说群落多样性指数、盖度高度均与环境因子成一定显著性，但回归方程普遍拟合较差( $r^2$  最大只有 0.356)。群落丰富度与土壤速效钾含量呈显著正相关，均匀度与土壤碱解氮含量呈显著正相关，Shannon 指数与土壤速效磷含量和有机质含量均呈极显著正相关，Simpson 指数仅与土壤速效磷含量呈显著正相关，群落盖度与土壤全磷含量呈极显著正相关，而与速效钾含量呈极显著负相关；群落平均高度与土壤酸碱性呈显著负相关。

**Table 7.** Interrelationships with plant community and soil environmental factors for herbaceous  
**表 7.** 草本植物群落与环境因子相关关系

代码	项目	$r^2$	显著度	回归方程
R	丰富度	0.161	*	$R = 2.364AK + 3.240$ $r(R, AK) = 0.442, P = 0.027$
E	均匀度	0.220	*	$E = 2.789AN + 2.444$ $R(E, AN) = 0.503, P = 0.01$
H'	shannon	0.356	**	$H' = 2.713AP + 2.292OM + 2.572$ $r(H', AP) = 0.501, r(H', OM) = 0.439, P = 0.003$
S	simpson	0.219	*	$S = 2.781AP + 4.619$ $r(S, AP) = 0.502, P = 0.011$
C	盖度	0.312	**	$C = 3.456TP - 2.461AK - 0.149,$ $r(C, TP) = 0.593, r(C, AK) = -0.465, P = 0.006$
H	高度	0.187	*	$H = -2.550PH + 2.772$ $r(H, PH) = -0.469, P = 0.018$

备注\* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ , 样方数为 25。

## 5. 结论

本文的研究表明土壤阳离子交换容量、土壤有机质与蒺子水采石废弃地草本植被分布显著相关。土壤环境因子与植物群落特征值的相关关系表明：乔灌木群落盖度与速效磷含量呈显著正相关，说明增加土壤速效磷含量可以增加乔灌木植被覆盖度；草本植物群落丰富度与土壤速效钾含量呈显著正相关，均匀度与土壤碱解氮含量呈显著正相关，Shannon 指数与土壤速效磷含量和有机质含量均呈显著正相关，Simpson 指数与土壤速效磷含量呈显著正相关，群落盖度与土壤全磷含量呈显著正相关，而与速效钾含量呈显著负相关；群落平均高度与土壤酸碱性呈显著负相关。

## 参考文献

- [1] 程小琴, 赵方莹. 门头沟区煤矿废弃地自然恢复植被数量分类与排序[J]. 东北林业大学学报, 2010(11): 75-79.
- [2] 李一为. 矿业废弃地植被恢复研究[J]. 中国矿业, 2010(1): 58-60.
- [3] 赵方莹, 徐邦敬, 周连兄, 等. 采石边坡生态修复技术组合模式研究[J]. 中国水土保持, 2006(5): 24-26.
- [4] 贺强. 黄河河口盐沼植被分布、多样性与土壤化学因子的相关关系[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 676-687.
- [5] 郭祥云, 李道亮. 阜新海州露天煤矿排土场植被与土壤环境关系[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2009, 28(5): 823-826.
- [6] 郭道宇. 安太堡矿区复垦地植被种间关系及土壤因子分析[J]. 生物多样性, 2007, 15(1): 46-52.
- [7] 黄树煮. 矿区污染场地尾矿基质改良和能源植物稳定化修复[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2009.
- [8] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 唐志尧, 贺金生, 于丹, 江源, 王志恒, 郑成洋, 朱江玲, 郭兆迪. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 533-548.
- [9] Carlo, R. (2005) Additive Partitioning of Rao's Quadratic Diversity: A Hierarchical Approach. *Ecological Modelling*, **183**, 365-371. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.08.020>
- [10] 宋创业, 郭柯. 浑善达克沙地中部丘间低地植物群落分布与土壤环境关系[J]. 植物生态学报, 2007, 31(1): 40-49.