

昆阳磷矿植被修复土壤理化与生物学性状的典型相关分析

和丽萍, 方向京, 李贵祥, 孟广涛, 邵金平, 毕波

(云南省林业科学院, 昆明 650204)

摘要:深入了解昆阳磷矿植被修复土壤理化性状指标与生物学各个性质指标之间的关系, 可为进一步筛选土壤质量评价指标提供参考依据。选择了昆阳磷矿旱冬瓜人工林 6 个不同植被恢复年限样地, 研究其土壤厚度、容重、孔隙度、毛管孔隙度、含水量、pH 值、有机质、碱解氮、全氮、有效磷、全磷、速效钾、全钾和土壤微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)、氮矿化速率、 β -葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶、脲酶的关系, 综合土壤 13 个理化性状指标和 6 个生物学性状指标的典型相关分析得到 4 对典型变量, 其典型相关系数分别为 0.997 0, 0.988 9, 0.879 9, 0.856 8, 均达到极显著水平($p \leq 0.01$), 说明土壤理化性状和生物学性状存在显著相关关系, 而这两组性状的显著相关主要是由土壤碱解氮、有机质、有效磷、全磷、pH 值和微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)、氮矿化速率、脲酶的密切相关引起的, 其中有机质与微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)、脲酶之间呈极显著相关, 有效磷、全磷与氮矿化速率、微生物生物量氮(MBN)、微生物生物量碳(MBC)也呈极显著相关, 碱解氮、pH 值与微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)、脲酶呈极显著相关, 全氮与 β -葡萄糖苷酶、氮矿化速率、微生物生物量氮(MBN)呈极显著相关。

关键词:土壤理化性状; 生物学性质; 典型相关分析; 昆阳磷矿植被修复

中图分类号: S156

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)02-0058-06

Analysis of Canonical Correlation Between Soil Physical, Chemical and Soil Biological Properties in Vegetation Restoration Area of Kunyang Phosphorite Mine

HE Liping, FANG Xiangjing, LI Guixiang, MENG Guangtao, SHAO Jinping, BI Bo

(Yunnan Academy of Forestry, Kunming, Yunnan 650204; China)

Abstract: In order to understand the relationship between soil physical and chemical properties as well as biological characteristics of the various indicators in vegetation restoration area of Kunyang phosphorite mine, apatite plantations with eight different vegetation restoration years in Kunyang were selected to examine the soil thickness, bulk density, porosity and capillary porosity, water content, pH value, organic matter, alkali-hydro nitrogen, total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, available potassium, total potassium and soil microbial biomass carbon (MBC), microbial biomass nitrogen (MBN), nitrogen mineralization rate, beta glycosidase enzymes, acid phosphatase, urease, 4 typical variables were obtained through canonical correlation analysis for the relationship between 13 soil physicochemical property indexes and 6 soil biological character indexes, and the canonical correlation coefficients were 0.997 0, 0.988 9, 0.879 9 and 0.997 0, respectively, which have reached very significant level ($p \leq 0.01$). There were significant correlation between soil physical and chemical properties and biological properties. Organic matter and MBC, MBN were very significantly correlated, urease, effective phosphorus, total phosphorus and nitrogen mineralization rate and MBN, MBC were significantly correlated, alkali solution nitrogen, pH, MBC, MBN, urease were significantly related to total nitrogen and beta glycosidase enzymes, MBN, nitrogen mineralization rate were significantly related.

Keywords: soil physical and chemical properties; biological properties; analysis of canonical correlation; vegetation restoration area of Kunyang phosphorite mine

昆阳磷矿是中国大型露天磷矿石生产基地之一,在国内磷矿生产企业中具有重要的地位,为我国的磷化工和农业生产的发展做出了重大贡献^[1]。但是多年来的开采,对地质环境造成了一定影响与破坏,诱发了一系列地质灾害和地质环境问题。项目组前期通过植被修复,在保持磷矿开采同时有效扼制了矿区生态环境的退化,并逐步恢复已退化的矿区生态系统^[2-3]。同时,植被的恢复与重建也促进了土壤的形成发育,使土壤的性质得到改善,土壤质量及肥力明显提高^[4-9],植被的恢复增加了矿山废弃地土壤的养分含量^[10]。

当环境条件发生改变时,土壤性质随之改变,各性质之间的关系也会发生相应的变化^[4]。典型相关分析是研究两组变量之间相关关系的一种统计方法,是把两组变量间的相关变为两个新的变量之间的相关,而又不抛弃原来变量的信息^[11-13]。这两个新的变量分别是由第一组变量和第二组变量的线性组合构成的。同时,相关系数的大小可以反映出变量之间所包含信息的重叠程度,这也是筛选土壤质量评价指标的参考依据^[14]。为了更深入地研究各个性质之间的关系,本文通过典型相关性分析,探讨昆阳磷矿废弃地植被恢复土壤质量之间的相互效应,以寻求它们之间的内在关系,为进一步筛选土壤质量评价指标提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

昆阳磷矿位于昆明市西南 72 km,东经 103°31'10"—103°34'48";北纬 24°12'58",滇池南端西侧 2 km 处。研究区气候属于北亚热带季风气候。雨量充沛,日照充足,年平均温度 14.5℃,历年平均降水量为 917.7 mm,降雨占全年降水量的 87%,属于气候温和雨量适中的地区。按“中国植被区划”,该区在亚热带常绿阔叶林区域之内,土壤主要为红壤及冲积土。因长期遭受人为破坏,常绿阔叶林已不存在,现有的各种植被类型都是在原有植被破坏后,经过植被恢复过程而形成的次生植被。广大的采区及排土场主要为平台覆土。矿区周围的植被大体可分为森林、灌丛、灌草丛和栽培植被四大类型。矿区附近的森林以暖温性针叶林为主,主要有云南松(*Pinus yunnanensis*)次生林和华山松(*Pinus armandii*)林,此外有以旱冬瓜为主的落叶阔叶林。灌丛主要由落叶灌木山柳(*Clethra barbinervis*)和榛子(*Corylus heterophylla*)组成,其中也有一些常绿种类如杜鹃(*Rhododendron simsii* & R. spp)、水红木(*Viburnum cylindricum*)、

杨梅(*Myrica rubra*)等,但数量较少,另外在灌丛中零星生长着云南松、华山松等乔木树种,形成稀树灌丛。灌草丛主要是由乔木科植物组成的禾草灌丛。在禾草灌丛中除草本植物外,常有少量灌木种类存在。栽培植被主要为旱地作物,在靠近村庄附近水分条件好处有小面积菜地。

1.2 试验材料

本研究所选样地都是采用平台覆土的方式进行植被恢复的,但是覆土的厚度不一致,主要成分都是以采场剥离表土—红壤为主,同白云岩、黑页岩和风华岩石混合而成,通过昆阳磷矿提供的 2005 年,2006 年,2007 年和 2008 年平台覆土化学物理性质比较,差异不明显,所以在分析时只考虑 0—20 cm 土壤层的状况。在矿区已经植被恢复的土地上根据不同年代组合恢复模式选择出 8 块旱冬瓜人工林样地(样地概况详见表 1,2,其中以平台覆土 A,B 为对照)作为研究对象,分别设定 4 个 20 m×20 m 的大样方,然后在每个大样方内,根据研究的目的不同再分别设置 2 个小样方进行试验。于 2010 年 7 月中旬至 8 月中旬采样。采样方法为 S 形 5 点取样混合四分法。对采回的土壤样品先放在无太阳直射、相对无风、清洁的房间自然风干,再取风干样品 100 g,用木锤捣碎后过 20 目尼龙筛,然后从中取 50 g 左右在玛瑙研钵中进一步磨细,充分研磨后使其全部过 100 目尼龙筛,研磨过后的样品混匀,装袋密封保存,贴标签、编号,以待测定。

1.3 试验方法

1.3.1 土壤理化性质指标测定 土壤容重、孔隙度测定采用环刀法、烘干法;土壤有机质测定采用油浴加热重铬酸钾容量法;土壤全氮、碱解性氮测定采用硫酸—高氯酸消化—碱解扩散法、碱解扩散法;土壤全磷、有效磷测定采用硫酸—高氯酸消化—钼锑抗比色法、氟化铵—盐酸提取—钼锑抗比色法;土壤全钾、速效钾测定分别采用硫酸—高氯酸消化—火焰分光光度法、乙酸铵提取—火焰分光光度法;土壤 pH 值采用电位法^[15]。

1.3.2 土壤生物学性状指标测定 土壤微生物生物量 C(MBC)和 N(MBN)根据氯仿熏蒸提取法^[16]测定;土壤矿化氮(N)采用厌氧培养法测定;土壤 β-葡萄糖苷酶采用 p-硝基苯-β-D-吡喃葡萄糖苷(PNG)作底物,37℃恒温振荡培养箱中培养 1 h,400 nm 处比色法测定^[17-18];脲酶活性按姚槐应^[16]的方法测定:称新鲜土 10 g,加入 2 ml 甲苯,10 ml 100 g/kg 尿素溶液和 20 ml pH 值为 6.8 柠檬酸—磷酸缓冲液,摇匀后于 38℃下培养 3 h。培养结束后,用 38℃水稀释至 100 ml,摇荡,过滤,测定 578 nm 处的吸光度。脲

酶活性按释放 $\text{NH}_3\text{-N}$ $\text{mg}/(\text{kg} \cdot 3 \text{ h})$ 表示; 酸性磷酸酶活性测定^[16]; 用 ρ -硝基苯基磷酸酯为底物,

加 pH 5.5, 0.1 mol/L 的 Tris 的缓冲液测定酸性磷酸酶活性。

表 1 各样地概况一览表

样地编号	恢复年限/a	经纬度	海拔/ m	面积/ m^2	林下主要灌草
VR ₆	24	103°31'11" 24°12'58"	2240	72568	马桑(<i>Coriaria sinica</i>)、喜阴悬钩子、蔷薇(<i>Rosa spp.</i>)、紫茎泽兰、井栏边(<i>Pieris multi-fida</i>)、栗柄金粉蕨(<i>Onychium lucidum</i>)、沿阶草(<i>OpHiopogon japonicus</i>)、老灌草(<i>Geranium wilfordii</i> Maxim)、蒿、粉花月见草(<i>Oenothera rosea</i>)、车前草(<i>Plantago erosa</i>)、马鞭草(<i>Verbena officinalis</i>)
VR ₅	10	103°31'29" 24°12'57"	2240	75623	紫茎泽兰、鬼针草(<i>Bidens pilosa</i>)、老灌草、猪殃殃(<i>Galium aparine</i> var. <i>tenerum</i>)、蒿、酢浆草(<i>Oxalis corniculata</i>)
VR ₄	5	103°31'18" 24°12'58"	2239	75222	野草莓(<i>Fragaria ananassa</i>)、头花蓼(<i>Polygonum capitatum</i>)、酢浆草、鬼针草、蒿、星毛繁缕(<i>Stellaria vestita</i>)、风轮菜(<i>Satureja montana</i>)、紫茎泽兰
VR ₃	3	103°31'27" 24°12'58"	2239	72222	波叶山蚂蝗、老鸦泡(<i>Gaultheria leucocarpa</i>)、紫茎泽兰、戟叶酸模(<i>Rumex hastatus</i>)、鬼针草、蒿、头花蓼、星毛繁缕、野拔子(<i>Rabdosia rugulosa</i>)、火绒草(<i>Leontopodium leontopodioides</i>)
VR ₂	2	103°32'01" 24°12'58"	2240	66678	百花三叶草(<i>Trifolium vepens</i>)、鬼针草、波斯菊(<i>Cosmos bipinnatus</i>)、蒿、紫茎泽兰、星毛繁缕、戟叶酸模、云南猪屎豆(<i>Crotalaria yunnanensis</i>)
VR ₁	1	103°31'13" 24°12'57"	2200	73333	云南猪屎豆、头花蓼、蒿、扭黄茅(<i>Heteropogon contortus</i>)、鬼针草、车前草(<i>Plantago erosa</i>)、革命菜(<i>Gynura crepidioides</i>)

1.4 土壤数据分析

典型相关分析是一种研究两组变量间相关关系的多元统计分析方法,用以找出第一组 p 个变量的线性组合,同时找出第二组 q 个变量的线性组合,使其具有最大的相关,然后又在每一变量中找出第二对线性组合,使它们具有次大的相关,将此进行下去,直到每组变量间相关系数被提取完为止,每对变量的表达式为:

$$U = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_px_p \quad (1)$$

$$V = b_1y_1 + b_2y_2 + \dots + b_qy_q \quad (2)$$

式中: a_1, a_2, \dots, a_p 和 b_1, b_2, \dots, b_q ——待定系数, U 和 V 间的相关系数,即“典型相关系数”,用来度量 2 个线性函数间的联系强度,以提示“两组”指标间的内部联系,而这两组指标的内容可以不同,研究中利用 SAS 软件,以土壤理化性状为“一组”指标,土壤生物学性质为“一组”指标进行分析。

2 结果与分析

2.1 矿区植被恢复地土壤理化性状

昆阳磷矿废弃地土壤随着恢复年限的增加,土壤物理结构在不断地改善,风化逐步增强,致使大颗粒在逐渐减少,小颗粒在逐渐增加;土壤容重均比对照 ($1.50 \text{ g}/\text{cm}^3$) 大大减少,说明经过植物的改良作用,对土壤特别是表层土壤的改良效果明显,表层土壤的容重确实减小了,土壤的抗蚀性能也提高了;植被恢复初期,土壤孔隙度和毛管孔隙度总体增大,在群落恢复至 10 a 后,表层土壤孔隙度稳定在 50% 以上,毛

管孔隙度稳定在 42% 以上;随恢复年限的增加,矿区植被修复土壤含水量和土壤 pH 值随恢复年限的增加,呈现先增后减现象,矿区恢复地表层土壤含水量 10 a 生林地达最大, pH 值趋于中性;不同恢复年限土壤全氮量和碱解氮总的变化趋势是随着恢复年代的增加先减小再增大;矿区恢复地土壤全磷和速效 P 含量、全 K 和速效 K 随植被恢复年限的增加呈增大的趋势;不同恢复年限土壤有机质随恢复年代的增加呈现递增的趋势,从植被恢复土壤与对照土壤中有有机质比较分析来看,恢复初期的有机质增长速度最快,各样地的土壤理化含量显著高于未进行植被恢复的对照样地土壤含量水平。

2.2 矿区植被恢复地土壤生物学性状

分析结果显示,土壤微生物生物量随恢复年限增加明显, MBC 和 MBN 比对照样地 CK(平台覆土)分别增长 9%~14%(见表 5)。氮矿化速率和三种酶活性也随植被恢复年限增加显著。经过 24 a 的恢复, N 矿化、 β -葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶和脲酶分别大于对照组为 2.5, 2.6, 1.3, 2.7 倍。

研究显示,磷脂脂肪酸总和及指示器磷脂脂肪酸的比率在植被恢复期间大大的增加,表示不同的官能团也发生了较大的变化(表 6)。土壤丛枝菌根真菌磷酸脂肪酸标记 16:1 ω 5c 随植被恢复年限增加逐渐增加。另一种真菌磷酸脂肪酸标记 18:2 ω 6, 9c 也随恢复年限的增加而增加。此外,观察到放线菌磷酸脂肪酸标记 17:0 10Me 和 18:0 10Me 也显著增

加。革兰氏阴性菌磷酸脂肪酸标记 18 : 1 ω 7c 和 17 : 0 cyclo 随恢复年限增加而减少; 而革兰氏阳性菌磷酸脂肪酸标记 15 : 0 iso 随恢复年限的增加而增

加, 从而导致明显高于 $G^+ : G^-$ 。植被修复后土壤比污染土壤具有较高的真菌/细菌比, 但在恢复的整个过程中没有显著差异。

表 2 不同恢复年限的土壤物理性质

恢复年限/a	土壤厚度/cm	土壤容重/($g \cdot cm^{-3}$)	土壤孔隙度/%	土壤毛管孔隙度/%	土壤含水量/%
1	0.45e	1.39b	42.56d	35.65e	6.04e
2	0.77e	1.30c	46.54c	38.17d	7.23d
3	1.09d	1.21d	47.85c	39.98cd	11.36c
5	1.91c	1.14e	50.41b	41.47bc	13.07b
10	3.56b	1.10e	51.96ab	43.26b	16.33a
24	8.46a	1.02f	53.69a	45.32a	10.72c
0	0.00f	1.50a	37.40e	31.53f	2.48f

表 3 不同恢复年限的土壤 pH 值及土壤全量养分

恢复年限/a	pH 值	全氮/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全磷/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全钾/ ($g \cdot kg^{-1}$)
1	6.02bc	0.73cd	1.97f	17.37f
2	6.11b	0.67e	2.03e	21.21e
3	5.96bc	0.63f	2.39d	23.78d
5	5.69d	0.70d	3.25c	25.55c
10	5.89c	0.75c	3.94b	26.65b
24	6.81a	1.96a	4.03a	27.79a
0	5.65d	0.79b	1.15g	14.76g

表 4 不同恢复年限的土壤有机质及土壤速效养分

恢复年限/a	有机质/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	碱解氮/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	有效磷/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	速效钾/ ($mg \cdot kg^{-1}$)
1	5.08f	27.56d	15.27f	156.81f
2	6.36e	24.43e	25.05e	177.27e
3	9.57d	22.49f	40.15d	198.06d
5	14.95c	31.46c	52.57c	236.63c
10	26.26b	45.64b	98.76b	256.48b
24	41.08a	115.14a	152.06a	275.06a
0	2.41g	31.41c	8.89g	136.00g

表 5 不同的恢复年限土壤微生物生物量和酶活性的变化

恢复年限/a	微生物生物量碳/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	微生物生物量氮/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	氮矿化速率/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	β -葡萄糖苷酶/ ($g \text{ PNP} \cdot kg^{-1}$)	酸性磷酸酶/ ($g \text{ PNFF} \cdot kg^{-1}$)	脲酶/ ($g \text{ NH}_3 \cdot kg^{-1}$)
0	350.3 \pm 35.8d	12.6 \pm 2.6c	10.3 \pm 2.1c	2.13 \pm 0.31c	22.8 \pm 5.5b	0.10 \pm 0.03b
1	503.0 \pm 21.1c	14.3 \pm 3.4c	13.3 \pm 3.1bc	2.30 \pm 0.52c	22.7 \pm 3.5b	0.12 \pm 0.03b
2	558.7 \pm 30.3c	35.3 \pm 9.8b	15.1 \pm 2.8bc	3.01 \pm 0.36bc	22.5 \pm 2.6b	0.15 \pm 0.05ab
3	723.7 \pm 43.5b	41.9 \pm 8.1ab	15.5 \pm 2.5bc	3.77 \pm 0.65b	30.3 \pm 5.3ab	0.18 \pm 0.03ab
5	718.3 \pm 16.2b	42.3 \pm 7.9ab	17.5 \pm 1.9b	3.30 \pm 0.76bc	31.9 \pm 4.9a	0.18 \pm 0.04ab
10	845.7 \pm 37.2a	50.9 \pm 2.4a	23.5 \pm 4.6a	5.13 \pm 0.96a	29.4 \pm 4.4ab	0.20 \pm 0.05ab
24	857.0 \pm 35.0a	53.7 \pm 4.7a	25.5 \pm 5.5a	5.63 \pm 0.91a	30.6 \pm 4.5a	0.27 \pm 0.06a

注: 数值为三次重复的平均值和标准差, 同一列中不同字母表示存在差异 ($p < 0.05$)。MBC: 微生物碳, MBN: 微生物氮。下同

表 6 不同恢复年限磷酸脂肪酸标记的变化

恢复年限/a	16 : 1 ω 5c	18 : 1 ω 9c	18 : 2 ω 6,9c	17 : 0 10Me	18 : 0 10Me	15 : 0 iso	18 : 1 ω 7c	17 : 0 cyclo
0	1.23 \pm 0.23de	5.40 \pm 1.6c	1.37 \pm 0.57c	0.57 \pm 0.20b	1.12 \pm 0.41b	2.65 \pm 0.62d	5.25 \pm 1.16a	1.53 \pm 0.57a
1	1.90 \pm 0.34d	8.16 \pm 3.5a	1.77 \pm 0.63c	0.66 \pm 0.21b	1.03 \pm 0.37b	2.49 \pm 0.75d	4.59 \pm 0.55ab	1.50 \pm 0.44a
2	2.34 \pm 0.33c	6.73 \pm 1.7b	1.95 \pm 0.58c	0.71 \pm 0.21b	1.41 \pm 0.64ab	3.00 \pm 0.68c	3.92 \pm 0.35b	1.32 \pm 0.23a
3	1.73 \pm 0.53d	5.52 \pm 2.3c	2.30 \pm 0.43a	1.22 \pm 0.27ab	2.37 \pm 0.27a	3.16 \pm 0.67c	3.34 \pm 0.51b	1.47 \pm 0.35a
5	2.59 \pm 0.45c	6.41 \pm 1.2c	2.57 \pm 0.35a	1.23 \pm 0.22ab	2.21 \pm 0.61a	4.06 \pm 0.61b	2.99 \pm 0.42b	1.26 \pm 0.26a
10	3.90 \pm 0.22b	4.41 \pm 1.0d	3.31 \pm 0.50ab	1.37 \pm 0.27ab	2.35 \pm 0.22a	4.69 \pm 0.40ab	3.17 \pm 0.34b	1.25 \pm 0.26a
24	4.57 \pm 0.53a	3.94 \pm 0.7d	4.16 \pm 0.52a	1.55 \pm 0.13a	2.84 \pm 0.51a	5.44 \pm 0.83a	3.31 \pm 0.54b	1.29 \pm 0.61a

2.3 矿区植被恢复地土壤理化性状与生物学性状的典型相关分析

设土壤理化性质为变量 x , 生物学特性为变量 y , 理化性状指标: 土壤厚度 (x_1)、容重 (x_2)、孔隙度 (x_3)、毛管孔隙度 (x_4)、含水量 (x_5)、pH 值 (x_6)、有机质

(x_7)、碱解氮 (x_8)、全氮 (x_9)、有效磷 (x_{10})、全磷 (x_{11})、速效钾 (x_{12})、全钾 (x_{13}); 生物学特性指标: 微生物生物量碳 (MBC) (y_1)、微生物生物量氮 (MBN) (y_2)、氮矿化速率 (y_3)、 β -葡萄糖苷酶 (y_4)、酸性磷酸酶 (y_5) 和脲酶 (y_6), 进行典型相关分析, 得到 6 组典型变量。

表7 矿区植被恢复地土壤理化性状与生物学性状的典型相关分析结果

组别	相关系数(λ)	Wilk's	卡方值(x^2)	自由度	显著水平(p)
1	0.9970**	0.0000	294.3816	78	0.0001
2	0.9889**	0.0005	176.3300	60	0.0001
3	0.8799**	0.0212	88.6527	44	0.0001
4	0.8568**	0.0938	54.4233	30	0.0041
5	0.7188	0.3530	23.9528	18	0.1566
6	0.5194	0.7303	7.2297	8	0.5121

注: **表示相关性达极显著水平($p \leq 0.01$), *表示相关性达显著水平($p \leq 0.05$)。

从表8可以看出,第1组相关系数(0.9970)、第2组相关系数(0.9889)、第3组相关系数(0.8799)

表8 典型变量和与典型变量有关形状的相关系数

性状	典型变量1 ($\lambda=0.9970^{**}$)		典型变量2 ($\lambda=0.9889^{**}$)		典型变量3 ($\lambda=0.8799^{**}$)		典型变量4 ($\lambda=0.8568^{**}$)	
	m_i	ru_i	m_i	ru_i	m_i	ru_i	m_i	ru_i
x_1	0.0618	0.5338	0.1860	-0.0132	-0.2348	0.2727	-0.2683	-0.4378
x_2	0.0546	0.8201	0.2461	0.3042	-0.4330	-0.3119	0.1392	0.0319
x_3	0.0919	-0.6199	-0.0756	-0.1101	-0.0476	0.1037	-0.9174	-0.6647
x_4	0.0598	-0.7097	0.1880	-0.0884	-0.1192	-0.0446	-0.5411	-0.4488
x_5	-0.0916	0.3158	-0.4134	-0.6349	0.4212	0.2619	0.3447	-0.3724
x_6	0.1372	-0.6644	-0.1654	0.3872	-2.2412	-0.3356	0.8831	-0.2120
x_7	-1.1795	-0.9809	-2.2626	0.1327	-6.0717	-0.0782	1.0113	-0.1021
x_8	-0.2985	-0.9078	0.8665	0.1462	6.6234	-0.1730	2.1290	-0.1921
x_9	0.3092	-0.8703	0.6544	0.1194	-1.5867	-0.3006	-2.0469	-0.2224
x_{10}	-0.1255	0.0780	-2.4677	-0.6630	-4.0176	0.1918	1.4021	0.3227
x_{11}	0.0998	-0.2897	2.0871	-0.3605	3.1081	0.4145	-0.9755	0.4463
x_{12}	-0.0171	-0.5774	0.5075	-0.1132	1.9957	-0.2041	-0.9435	-0.2198
x_{13}	-0.0249	-0.4722	-0.0702	-0.0937	0.4528	0.3325	0.5072	0.3422
性状	li	rvi	li	rvi	li	rvi	li	rvi
y_1	1.2589	0.9678	0.2163	0.1735	1.4933	-0.1691	-0.6013	-0.0013
y_2	-0.1763	0.8615	-0.8913	0.0326	-1.6028	-0.4423	-1.7453	-0.1794
y_3	-0.0401	0.7762	1.4065	0.5584	0.7868	-0.2356	-2.5739	-0.1250
y_4	-0.2996	0.8245	0.2503	0.4242	-0.5552	-0.3367	3.8294	0.0853
y_5	0.2276	0.9295	-0.5905	-0.2775	0.5740	0.1083	0.5710	-0.0412
y_6	0.0000	0.7661	-0.2491	0.2563	-0.9804	-0.4895	0.5161	0.1185

$$U_1 = 0.0618x_1 + 0.0546x_2 + 0.0919x_3 + 0.0598x_4 - 0.0916x_5 + 0.1372x_6 - 1.1795x_7 - 0.2985x_8 + 0.3092x_9 - 0.1255x_{10} + 0.0998x_{11} - 0.0171x_{12} - 0.0249x_{13}$$

$$V_1 = 1.2589y_1 - 0.1763y_2 - 0.0401y_3 - 0.2996y_4 + 0.2276y_5 + 0.0000y_6$$

第2组标准化线性组合为:

$$U_2 = 0.1860x_1 + 0.2461x_2 - 0.0756x_3 + 0.1880x_4 - 0.4134x_5 - 0.1654x_6 - 2.2626x_7 + 0.8665x_8 + 0.6544x_9 - 2.4677x_{10} + 2.0871x_{11} + 0.5075x_{12} - 0.0702x_{13}$$

$$V_2 = 0.2163y_1 - 0.8913y_2 + 1.4065y_3 + 0.2503y_4 -$$

和第4组相关系数(0.8568)达到极显著水平,第5,第6组均不显著。

2.4 典型变量和与典型变量有关形状的相关系数

提取前4组典型变量数据进行分析,其中 U 表示土壤理化性状综合含量; V 表示土壤生物学性状综合质量。

矿区植被恢复地土壤化学性状与物种多样性性状的第1组、第2组、第3组和第4组典型变量($U_1, V_1, U_2, V_2, U_3, V_3, U_4, V_4$)具有显著性意义,由于数据单位不统一,可通过换算的标准变量的典型相关换算系数来分析变量(U, V)间的相关关系,标准化线性组合由表8可知,第1组标准化线性组合为:

$$0.5905y_5 - 0.2491y_6$$

第3组标准化线性组合:

$$U_3 = -0.2348x_1 - 0.4330x_2 - 0.0476x_3 - 0.1192x_4 + 0.4212x_5 - 2.2412x_6 - 6.0717x_7 + 6.6234x_8 - 1.5867x_9 - 4.0176x_{10} + 3.1081x_{11} + 1.9957x_{12} + 0.4528x_{13}$$

$$V_3 = 1.4933y_1 - 1.6028y_2 + 0.7868y_3 - 0.5552y_4 + 0.5740y_5 - 0.9804y_6$$

第4组标准化线性组合:

$$U_4 = -0.2683x_1 + 0.1392x_2 - 0.9174x_3 - 0.5411x_4 + 0.3447x_5 + 0.8831x_6 + 1.0113x_7 + 2.1290x_8 -$$

$$2.0469x_9 + 1.4021x_{10} - 0.9755x_{11} - 0.9435x_{12} + 0.5072x_{13}$$

$$V_4 = -0.6013y_1 - 1.7453y_2 - 2.5739y_3 + 3.8294y_4 + 0.5710y_5 + 0.5161y_6$$

从以上 4 组标准化线性组合中可以看出, 达到极显著的第 1, 2, 3 和 4 组典型变量中, 在 U_1 各系数中, 土壤理化性状起主要作用的是 x_7 , 即土壤有机质, 土壤生物学性状中起主要作用的是 y_1 , 即微生物生物量碳 (MBC), 说明土壤有机质与微生物生物量碳 (MBC) 显著相关; U_2 各系数中, 土壤理化性状起主要作用的是 x_7, x_{10} 和 x_{11} , 即有机质、有效磷和全磷, 生物学性状中起主要作用的是 y_3 和 y_2 , 即氮矿化速率和微生物生物量氮 (MBN), 说明土壤有机质、有效磷和全磷与氮矿化速率和微生物生物量氮 (MBN) 显著相关; U_3 各系数中, 土壤理化性状起主要作用的是 x_8, x_7, x_{10}, x_{11} 和 x_6 , 即碱解氮、有机质、有效磷、全磷和 pH 值, 生物学性状中起主要作用的是 y_1, y_2 和 y_6 , 即微生物生物量碳 (MBC)、微生物生物量氮 (MBN) 和脲酶, 说明土壤碱解氮、有机质、有效磷、全磷和 pH 值与微生物生物量碳 (MBC)、微生物生物量氮 (MBN) 和脲酶显著相关; 在 U_4 各系数中, 土壤理化性状起主要作用的是 x_8 和 x_9 , 即碱解氮和全氮, 生物学性状中起主要作用的是 y_4, y_3, y_2 即 β -葡萄糖苷酶、氮矿化速率、微生物生物量氮 (MBN), 说明土壤碱解氮和全氮与样 β -葡萄糖苷酶、氮矿化速率、微生物生物量氮 (MBN) 关系密切。

3 结论与讨论

1) 恢复初期, 昆阳磷矿植被修复土壤孔隙度和毛管孔隙度总体增大; 随着恢复年限的增加, 土壤容重均比对照大大减少, 土壤含水量和 pH 值呈现先增后减现象; 全氮和碱解氮含量总的变化趋势是先减小再增大; 全磷和速效磷、全钾和速效钾含量呈增大趋势; 有机质呈现递增的趋势; 植被恢复促进了土壤微生物群体的生长, 也刺激了土壤 β -葡萄糖苷酶、脲酶和酸性磷酸酶活性。

2) 研究发现, 随着植被恢复年限的增加, 土壤性质随之改变, 各性质之间的关系也发生了相应的变化。研究不同植被修复土壤理化性状及生物学性状指标之间的相关关系不仅可以反映出土壤各性质之间的密切程度, 有助于合理解释植被恢复与土壤性质的变化之间的响应, 而且还可以通过土壤各个性质的直接、间接影响程度建立土壤各属性指标之间的转换函数。同时, 相关系数的大小可以反映出变量之间所包含信息的重叠程度, 这也是筛选土壤质量评

价指标的参考依据^[14]。基于较多的目标性状, 本研究借助新的多元统计方法——典型相关分析法对包含不同数量性状指标的两组变量进行相关关系研究, 并使两组变量构成彼此独立而不相关的典型变量, 而且每组变量的数目可以是不等的, 进行多个数量性状综合选择。

3) 标准化线性组合系数反映了各单个变量对典型变量这个综合指标的影响, 系数值越大影响越显著, 对应的变量即为该典型变量的主要变量。研究表明, 土壤理化性状和生物学性状存在相关关系, 而这两组性状的显著相关主要是由土壤碱解氮、有机质、有效磷、全磷和 pH 值和微生物生物量碳 (MBC)、微生物生物量氮 (MBN)、氮矿化速率、脲酶的密切相关引起的, 其中有机质与微生物生物量碳 (MBC)、微生物生物量氮 (MBN)、脲酶呈极显著相关, 有效磷、全磷与氮矿化速率、微生物生物量氮 (MBN)、微生物生物量碳 (MBC) 呈极显著相关, 碱解氮、pH 值与微生物生物量碳 (MBC)、微生物生物量氮 (MBN)、脲酶极显著相关。

4) 土壤各个性质之间相关系数的大小可作为筛选土壤质量评价指标的参考依据^[5], 通过典型相关分析, 初步筛选出土壤碱解氮、有机质、有效磷、全磷和 pH 值可作为昆阳磷矿植被修复土壤质量评价的理化特性指标, 微生物生物量碳 (MBC)、微生物生物量氮 (MBN)、氮矿化速率和脲酶可作为昆阳磷矿植被修复土壤质量评价的生物学特性指标。

5) 本研究仅对矿区修复土壤的物理和化学性质中的主要影响土壤质量的指标作了初步的研究, 土壤质地、土壤机械组成、土壤抗冲性没有研究, 这些都是土壤物理性质中较重要的参数, 下一步应对此进行深入的研究。

参考文献:

- [1] 施顺生. 昆阳磷矿采空区复垦技术及环境效益[J]. 中国工程科学, 2005(S1): 421-424.
- [2] 孟广涛, 方向京, 柴勇, 等. 矿区植被恢复措施对土壤养分及物种多样性的影响[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(3): 12-16.
- [3] 姜培曦. 昆阳磷矿矿区废弃地植被恢复研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.
- [4] 张俊华, 常庆瑞, 贾科利, 等. 黄土高原植被恢复对土壤肥力质量的影响研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 38-41.
- [5] 黄和平, 杨吉力, 毕军, 等. 皇甫川流域植被恢复对改善土壤肥力的作用研究[J]. 水土保持通报, 2005, 25(3): 37-40.

的研究中,将从自然演化和人为干预两个方面,选取较为全面的影响因子进行评价,探索红水河干流区水土流失敏感性影响因子的权重计算与评价方法。

参考文献:

- [1] 徐涵秋. 水土流失区生态变化的遥感评估[J]. 农业工程学报, 2013, 29(7): 91-97.
- [2] 葛德祥, 庞治国, 王义成, 等. 二滩库区蓄水前后水土流失变化遥感监测与分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2010, 8(1): 44-51.
- [3] 贺缠生, 傅伯杰, 陈利顶. 非点源污染的管理及控制[J]. 环境科学, 1998, 19(5): 87-91.
- [4] 胡良军, 李锐, 杨勤科. 基于 GIS 的区域水土流失评价研究[J]. 土壤学报, 2001, 38(2): 167-175.
- [5] 陈建军, 张树文, 李洪星, 等. 吉林省土壤侵蚀敏感性评价[J]. 水土保持通报, 2005, 25(3): 49-53.
- [6] 张玉娟, 刘丹丹, 王延亮. 基于 RS 和 GIS 东北农业主产区水土流失敏感性评价: 以黑龙江省宾县为例[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(8): 37-39.
- [7] 张朝琼, 郜红娟, 张帮云. 基于 GIS 的仁怀市生态敏感性评价[J]. 水土保持研究, 2013, 20(4): 179-182.
- [8] 张伟, 王家卓, 任希岩, 等. 基于 GIS 的山地城市生态敏感性分析研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3): 44-47.
- [9] 朱志玲, 吴咏梅, 张敏. 基于 GIS 的宁夏生态环境敏感性综合评价[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 101-105.
- [10] 魏兴萍. 基于 RS 和 GIS 的重庆南川区水土流失变化研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 60-65.
- [11] 李婷, 于青秀, 张世熔. 基于 RS 和 GIS 的涪江流域上游地区土壤侵蚀定量估算[J]. 四川农业大学学报, 2011, 29(1): 84-88.
- [12] 周璟, 张旭东, 何丹, 等. 基于 GIS 与 RUSLE 的武陵山区小流域土壤侵蚀评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(4): 468-474.
- [13] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 II. 方法与案例[J]. 生态学报, 2002, 22(8): 1231-1239.
- [14] 吴建国, 常学向. 荒漠生态系统健康评价的探索[J]. 中国沙漠, 2005, 25(4): 604-611.
- [15] Zhang L, Huang X. Object-oriented subspace analysis for airborne hyperspectral remote sensing imagery [J]. Neurocomputing, 2010, 73(4): 927-936.
- [16] Wu B, Xiong Z, Chen Y, et al. Classification of quick-bird image with maximal mutual information feature selection and support vector machine [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2009, 1(1): 1165-1172.
- [17] 闫利会, 周忠发, 王媛媛. 丹霞地区水土流失遥感评价及空间分异: 以贵州省赤水市为例[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(20): 4491-4495.
- [18] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报, 1996, 16(5): 1-20.
- ~~~~~
- (上接第 63 页)
- [6] 陈孙华. 衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤理化特征[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 57-60.
- [7] 龙健, 黄昌勇, 滕应, 等. 矿区重金属污染对土壤环境质量微生物学指标的影响[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(1): 60-63.
- [8] 龙健, 李娟, 滕应, 等. 贵州高原喀斯特环境退化过程土壤质量的生物学特性研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 47-50.
- [9] 李凤霞, 王学琴, 郭永忠, 等. 不同改良措施对银川平原盐碱地土壤性质及酶活性的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 13-18.
- [10] 任晓旭, 蔡体久, 王笑峰. 不同植被恢复模式对矿区废弃地土壤养分的影响[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(4): 151-154.
- [11] 李跃林, 李志辉, 彭少麟, 等. 典型相关分析在桉树人工林地土壤酶活性与营养元素关系研究中的应用[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(5): 544-549.
- [12] 蒋云贵, 杨永前. 四川引种台湾桉木立地条件与木材力学性质的典型相关分析[J]. 四川林业科技, 2012, 33(3): 84-87.
- [13] 岳中辉, 王百慧, 张兴义, 等. 农田黑土酶活性与养分的典型相关分析[J]. 中国农学通报, 2012, 28(24): 68-73.
- [14] 宋娟丽. 黄土高原草地土壤质量特征及评价研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其试验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [17] Weaver R W, Augle S, Bottomly P J, et al. Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties. No. 5 [M] // Tabatabai M A. Enzymes. Madison: Soil Science Society of America, 1994: 775-833.
- [18] Eivazi F, Tabatabai M A. Glucosidases and galactosidases in soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1988, 20(5): 601-606.