

网络出版时间:2013-05-02 10:56

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20130502.1056.034.html>

铅锌矿污染区不同林木根际丛枝菌根 真菌与土壤因子的关系

许 加^a, 唐 明^b

(西北农林科技大学 a 生命科学学院, b 林学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】探讨铅锌矿污染地区不同林木根际土中丛枝菌根真菌(AMF)及球囊霉素(GRSP)与土壤因子的关系及其在生态恢复中的作用。**【方法】**在陕西凤县铅硐山铅锌矿区,采集 7 种不同林木的根系和根际土壤,测定根系 AMF 侵染率、AMF 孢子密度、球囊霉素含量、土壤养分含量及土壤酶活性,研究不同林木根际 AMF 侵染率、孢子密度和球囊霉素与土壤因子之间的关系。**【结果】**AMF 侵染率和孢子密度在不同林木根际土中差异显著,平均侵染率为 44.64%,孢子密度平均 2.34 个/g,AMF 侵染率和孢子密度无显著相关性。总球囊霉素(T-GRSP)含量与速效磷和速效钾含量呈极显著正相关($P < 0.01$),与土壤阳离子交换量(CEC)呈显著正相关($P < 0.05$),说明 AMF 可以通过分泌球囊霉素促进土壤团聚体的形成,增强土壤的保肥和缓冲能力。主成分分析表明,速效钾、碱解氮、速效磷、有机碳、脲酶、全氮、碱性磷酸酶及阳离子交换量是反映铅锌矿污染区土壤营养状况的主要因子。**【结论】**AMF 孢子密度和总球囊霉素含量与土壤养分显著相关,可作为重金属污染地区生态系统环境状况检测的有效指标。

【关键词】 铅锌矿污染区;丛枝菌根;球囊霉素;土壤酶活性

【中图分类号】 S718.81;Q938.1⁺1

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2013)05-0075-06

Relationship between arbuscular mycorrhizal fungi and soil factors in the rhizosphere of different tree species in Pb-Zn polluted mine

XU Jia^a, TANG Ming^b

(a College of Life Science, b College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 The research was conducted to explore the relationship between soil factors and arbuscular mycorrhizal fungi(AMF)and glomalin. **【Method】** Seven soil samplings in the rhizosphere of different trees were collected in Qiandongshan Pb-Zn mine, Feng County, Shaanxi Province. We investigated the relationship between them. **【Result】** AMF colonization was up to 44.64% on average, the spore density averaged 2.34 per gram soil and the species difference was significant, but the rate of AMF colonization was not correlated significantly with the spore density. Glomalin was related with available P and available K($P < 0.01$), and related with cation exchange capacity($P < 0.05$), this indicated AMF can secrete glomalin to promote the formation of soil aggregates, enhancing the fertilizer retention capacity and buffering capacity of the soil. The principal component analysis shows that available K, alkali-hydrolyzable N, available P, soil organic carbon, urease, total N, alkaline phosphatase and cation exchange capacity are the main factors of indicating the soil nutritional status in Pb-Zn polluted mine. **【Conclusion】** Our results showed that AMF was strongly correlated to the soil factors and glomalin. These were useful indicators for the building and

【收稿日期】 2013-01-05

【基金项目】 国家自然科学基金项目(31270639);教育部博士点基金项目(20100204110033, 20110204130001)

【作者简介】 许 加(1988-),女,陕西杨凌人,在读硕士,主要从事微生物生态学研究。E-mail: mcjessica@nwsuaf.edu.cn

【通信作者】 唐 明(1962-),女,安徽涡阳人,教授,博士生导师,主要从事森林微生物学研究。E-mail: tangmingyl@163.com

perfecting of the index evaluation system in heavy-metal polluted areas.

Key words: Pb-Zn polluted areas; arbuscular mycorrhiza; glomalin; soil enzyme activity

丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)通过增加植物对营养元素的吸收,来提高植物的抗逆性,增强植物的竞争能力^[1-2]。在重金属污染条件下,AMF通过转化、积累、转运等作用,减轻重金属对植物的毒害^[3]。牛振川等^[4]研究了凤县铅锌矿区植物根际土中AMF丰度与土壤中的铅、锌浓度以及磷含量之间的关系。班宜辉等^[5]研究了铅锌矿区多种植物AMF和深色有隔内生真菌在不同铅浓度土壤中的侵染特征。Xu等^[6]研究发现,随着土壤铅浓度的提高,狼牙刺根际AMF的定殖率降低,总球囊霉素含量增加。

球囊霉素是一类产生于AMF孢子壁和菌丝体的糖蛋白,是菌根真菌与土壤环境相互作用的重要媒介物质^[7],其能够提高土壤结构稳定性和抗侵蚀能力,促进退化土壤的恢复。本试验在前人研究的基础上,深入分析了铅锌矿区不同林木根际AMF侵染状况与土壤酶活性、球囊霉素含量的关系,旨在探明AMF在铅锌污染矿区的生态功能及其在改善土壤方面的作用,为充分利用AMF资源促进生态恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样地概况

采样地在陕西凤县铅硐山铅锌矿区,地理位置106.39°E/33.52°N,海拔1317~1345 m,处于秦岭山脉腹地,属暖温带山地气候,年均气温11.4℃,年均降水量613.2 mm^[8]。区内主要分布有油松(*Pinus tabulaeformis* Var.)、臭椿(*Ailanthus altissima* Mill.)、圆柏(*Sabina chinensis* Linn.)、侧柏(*Platycladus orientalis* L.)、构树(*Broussonetia papyrifera* L.)、黄连木(*Pistacia chinensis* Linn.)、黄栌(*Cotinus coggygria* Scop.)、核桃(*Juglans regia* L.)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)、太白杨(*Populus purdomii* Rehd.)和水青冈(*Fagus longipetiolata* Seem.)等林木^[9]。

1.2 材料采集

2012-05,采集试验区内圆柏、侧柏、黄连木、核桃、刺槐、太白杨和水青冈7种不同林木的根际土标本。每种林木随机选取5株样树(胸径6.3~8.3 cm),每株样树按东南西北4个方位取采样点,除去样点5 cm厚的表层土后,采集5~30 cm深的须根,

轻轻抖落附在根上的土壤后,将根系和土壤装在全菌自封袋中轻轻抖动约1 min,收集抖落的土壤即为根际土^[10]。取根系和根际土一同装入无菌自封袋中,密封带回实验室,土样风干后过孔径2 mm筛,用于土壤因子和AMF孢子密度的测定;根系用于菌根侵染率的测定。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 AMF孢子密度和侵染率的测定 采用Phillips等^[11]的染色方法,对根系进行净化、软化、酸化、染色和去色等处理后,统计感染菌根的根段数,计算菌根侵染率^[12]:

$$\text{菌根侵染率} = \frac{\text{感染菌根的根段数}}{\text{被检根段总数}} \times 100\%。$$

采用湿筛倾析法分离真菌孢子,在体视显微镜下记录AMF的孢子数量,统计孢子密度^[13]。

1.3.2 土壤球囊霉素含量与酶活性的测定 采用Bedini等^[14]的方法测定易提取球囊霉素(EE-GRSP)和总球囊霉素(T-GRSP)含量。参考文献[15]的方法测定土壤酶活性,其中脲酶活性采用靛酚比色法测定,碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定,过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定。

1.3.3 土壤养分和铅含量的测定 参考文献[16]的方法,土壤有机碳含量(SOC)用重铬酸钾氧化法测定;碱解氮含量用碱解扩散法测定;速效磷含量用碳酸氢钠-钼锑抗比色法测定;速效钾含量用NH₄OAc浸提,火焰光度法测定;阳离子交换量(CEC)用1 mol/L NH₄OAc交换法测定;铅含量用三酸(HF-HClO₄-HNO₃)消煮法测定。

1.4 数据分析

采用SPSS 19.0生物统计软件对试验数据进行方差分析、Pearson法两两相关分析和主成分分析,试验数据用“平均值±标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 不同林木根际的AMF侵染状况和孢子密度

不同林木根系的AMF侵染状况见表1。由表1可见,7种林木中,在黄连木和水青冈根系没有检测到AMF,在其他5种林木根系均检测到AMF。圆柏、侧柏、核桃、刺槐和太白杨的孢囊定殖率为7.41%~42.63%,平均为19.34%,除核桃与刺槐

之间差异不显著外,其他树种间均差异显著;菌丝侵染率为 11.33%~35.27%,平均为 24.88%,5 种林木间均差异显著;AMF 总侵染率为 28.50%~56.97%,平均为 44.64%,除太白杨和圆柏之间差异不显著外,其他树种间均差异显著;核桃、刺槐和

太白杨中检测到丛枝侵染,侵染率分别为 5.84%,17.16%和27.40%,均差异显著。不同林木根际土中 AMF 孢子密度为 0.5~5.5 个/g,平均为 2.34 个/g,孢子密度由高到低的顺序为:侧柏>太白杨>刺槐>圆柏>核桃>黄连木>水青冈。

表 1 不同林木根际的 AMF 侵染状况、孢子密度
Table 1 AMF colonization and spore density of different trees

林木种类 Species	孢囊定殖率/% Vesicle	丛枝侵染率/% Arbuscule	菌丝侵染率/% Hypha	总侵染率/% Colonization	孢子密度/(个·g ⁻¹) Spore density
圆柏 <i>Sabina chinensis</i>	42.63±1.01 a	0 a	11.33±0.84 b	56.97±4.10 e	1.90±0.03 d
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	27.00±0.66 d	0 a	35.27±0.58 f	48.66±5.10 d	5.50±0.07 g
黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	0 a	0 a	0 a	0 a	0.65±0.05 b
核桃 <i>Juglans regia</i>	7.41±0.60 b	5.84±0.53 b	29.12±2.56 e	32.41±2.90 c	1.10±0.08 c
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	8.73±0.23 b	17.16±0.63 c	25.23±4.31 d	28.50±4.90 b	3.10±0.06 e
太白杨 <i>Populus purdomii</i>	11.22±0.33 c	27.40±0.73 d	23.47±4.36 c	56.66±3.70 e	3.65±0.09 f
水青冈 <i>Fagus longipetiolata</i>	0 a	0 a	0 a	0 a	0.50±0.04 a

注:同列数据后标不同小写字母者表示在 5%水平上差异显著。表 2、3 同。
Note: Different letters in the same column mean 5%significant differences. The same as table 2 and table 3.

2.2 不同林木根际土壤的球囊霉素含量和酶活性

由表 2 可见,不同林木根际土中 EE-GRSP 含量为 0.02~0.16 mg/g,平均为 0.07 mg/g; T-GRSP 含量为 0.10~0.22 mg/g,平均为 0.13 mg/g。侧柏根际土中 EE-GRSP 和 T-GRSP 含量最高,分别达 0.16 和 0.22 mg/g,与其他林木差异显著;太白杨根际土中的 EE-GRSP 含量最低(0.02 mg/g),黄连木根际土中的 T-GRSP 含量最低(0.10

mg/g);各林木间根际土的 EE-GRSP 和 T-GRSP 含量差异均达到显著水平。

由表 2 还可以看出,核桃和水青冈的脲酶活性较高;黄连木的脲酶活性最低(0.20 mg/(g·h)),显著低于其他林木。土壤碱性磷酸酶活性以刺槐和水青冈根际土最高(0.63 mg/(g·h))。过氧化氢酶活性核桃根际土最高(1.40 mL/(g·h)),黄连木根际土最低(1.08 mL/(g·h)),显著低于其他林木。

表 2 不同林木根际土壤球囊霉素含量和酶活性的比较
Table 2 Glomalin related soil proteins (GRSP) and soil enzyme activity in the rhizosphere of different trees

林木种类 Species	易提取球囊霉素/ (mg·g ⁻¹) EE-GRSP	总球囊霉素/ (mg·g ⁻¹) T-GRSP	脲酶/ (mg·g ⁻¹ ·h ⁻¹) Urease	碱性磷酸酶/ (mg·g ⁻¹ ·h ⁻¹) Alkaline phosphatase	过氧化氢酶/ (mL·g ⁻¹ ·h ⁻¹) Catalase
圆柏 <i>Sabina chinensis</i>	0.09±0.04 f	0.12±0.02 c	0.21±0.02 b	0.55±0.04 c	1.32±0.03 b
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	0.16±0.06 g	0.22±0.03 g	0.21±0.02 b	0.55±0.01 b	1.31±0.03 b
黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	0.04±0.02 b	0.10±0.05 a	0.20±0.03 a	0.51±0.01 a	1.08±0.00 a
核桃 <i>Juglans regia</i>	0.05±0.04 c	0.12±0.03 b	0.24±0.01 e	0.51±0.01 a	1.40±0.02 d
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	0.09±0.07 e	0.14±0.04 e	0.23±0.02 d	0.63±0.01 d	1.37±0.03 cd
太白杨 <i>Populus purdomii</i>	0.02±0.05 a	0.15±0.04 f	0.22±0.02 c	0.51±0.01 a	1.35±0.00 bc
水青冈 <i>Fagus longipetiolata</i>	0.07±0.04 d	0.12±0.03 d	0.26±0.00 f	0.63±0.01 d	1.38±0.02 cd

2.3 不同林木根际土壤的养分和铅含量

由表 3 可见,不同林木根际土有机碳含量以水青冈最高(3.83 g/kg),其次为刺槐和太白杨,圆柏的有机碳含量最低(2.55 g/kg)。根际土速效钾含量以水青冈最高,达 275.81 mg/kg;除刺槐与太白杨及黄连木与核桃根际土中速效钾含量差异不显著外,其他林木间差异均达到显著水平。水青冈根际土速效磷含量最高,达 0.18 mg/kg;除圆柏与黄连木及圆柏、刺槐与太白杨的根际土速效磷含量差异不显著外,其他林木间差异均达到显著水平。核桃根际土全氮含量最高,为 3.70 mg/kg;圆柏、侧柏与黄连木及核桃与水青冈的根际土全氮含量差异不显

著。碱解氮含量以水青冈根际土最高,为 2.57 mg/kg,圆柏、侧柏与黄连木及刺槐、太白杨与水青冈差异均不显著。水青冈根际土中阳离子交换量最高,为 11.95 cmol/kg;太白杨与侧柏、刺槐的根际土阳离子交换量差异不显著。

不同林木根际土中铅含量差异不显著,侧柏根际土铅含量最高(505.73 mg/kg),圆柏根际土铅含量略低于侧柏(505.17 mg/kg),而水青冈根际土铅含量最低(503.83 mg/kg)。采样地的土壤铅含量超出了国家土壤环境质量三级标准($w(\text{Pb})\leq 500$ mg/kg),属于轻度污染土壤。

表 3 不同林木根际土壤养分和铅含量的比较

Table 3 Soil nutrients and Pb content in the rhizosphere of different trees

林木种类 Species	铅含量/ (mg·kg ⁻¹) Pb Content	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹) Alkali- hydrolyzable N	全氮/ (mg·kg ⁻¹) Total N	速效磷/ (mg·kg ⁻¹) Available P	速效钾/ (mg·kg ⁻¹) Available K	阳离子交换量/ (cmol·kg ⁻¹) CEC	有机碳/ (g·kg ⁻¹) SOC
圆柏 <i>Sabina chinensis</i>	505.17±0.23 a	1.80±0.06 a	2.14±0.02 a	0.09±0.06 ab	205.46±2.17 a	10.16±0.04 a	2.55±0.03 a
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	505.73±0.52 a	1.91±0.18 a	2.36±0.02 a	0.14±0.03 c	266.22±1.87 d	11.14±0.04 b	3.47±0.07 c
黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	504.53±0.45 a	1.88±0.19 a	2.44±0.04 a	0.08±0.05 a	215.38±1.09 b	11.60±0.02 d	3.45±0.05 c
核桃 <i>Juglans regia</i>	504.03±0.67 a	2.16±0.09 b	3.70±0.15 d	0.16±0.05 c	217.15±3.19 b	10.29±0.05 a	3.10±0.01 b
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	504.10±0.55 a	2.55±0.09 c	3.28±0.09 c	0.11±0.04 b	254.42±2.08 c	11.35±0.02 c	3.57±0.05 cd
太白杨 <i>Populus purdomii</i>	505.00±0.38 a	2.47±0.06 c	2.99±0.62 b	0.11±0.05 b	251.43±0.68 c	11.20±0.05 bc	3.57±0.04 cd
水青冈 <i>Fagus longi-petiolata</i>	503.83±0.29 a	2.57±0.07 c	3.69±0.11 d	0.18±0.09 d	275.81±0.50 e	11.95±0.05 e	3.83±0.08 d

2.4 AMF 侵染率、球囊霉素含量与土壤酶活性的相关性

不同林木根际土中 AMF 侵染状况与土壤酶活性的相关性分析结果(表 4)表明,土壤脲酶活性与孢子密度、EE-GRSP 含量及 T-GRSP 含量呈显著

负相关,与 AMF 总侵染率呈极显著负相关;土壤过氧化氢酶活性与孢子密度、EE-GRSP 含量、T-GRSP 含量及 AMF 总侵染率呈显著负相关;碱性磷酸酶活性与其他各项指标未见显著相关性。

表 4 AMF 侵染率、球囊霉素含量与土壤酶活性的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between AMF,GRSP and soil enzyme activity

指标 Index	脲酶 Urease	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	过氧化氢酶 Catalase	孢子密度 Spore density	EE-GRSP	T-GRSP
脲酶 Urease	1					
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	-0.058	1				
过氧化氢酶 Catalase	0.982**	0.078	1			
孢子密度 Spore density	-0.654*	0.156	-0.645*	1		
EE-GRSP	-0.530*	-0.407	-0.660*	0.592*	1	
T-GRSP	-0.572*	0.051	-0.609*	0.965**	0.699*	1
AMF 总侵染率 Colonization	-0.808**	-0.459	-0.751*	0.285	0.048	0.217

注:“* *”表示极显著相关($P<0.01$);“*”表示显著相关($P<0.05$)。表 5 同。

Note:“* *”mean correlation is significant at the $P<0.01$ level; “*”mean correlation is significant at the $P<0.05$ level. The same as table 5.

2.5 AMF 侵染率、球囊霉素含量与土壤养分的相关性

从表 5 可以看出,菌根 AMF 总侵染率与各土壤养分含量的相关性不显著,不具有统计学意义。不同林木根际土中,AMF 孢子密度与 T-GRSP 含

量、土壤速效磷和速效钾含量呈极显著正相关,与 CEC 和 EE-GRSP 含量呈显著正相关;T-GRSP 含量与土壤速效磷、速效钾含量呈极显著正相关,与 CEC 和 EE-GRSP 含量呈显著正相关;CEC 与有机碳含量呈极显著正相关。

表 5 AMF 侵染率、球囊霉素含量与土壤养分的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between AMF,GRSP and soil nutrients

指标 Index	碱解氮 Alkali- hydrolyzable N	速效磷 Available P	速效钾 Available K	CEC	有机碳 SOC	AMF 侵染率 AMF colonization	孢子密度 Spore density	EE- GRSP
碱解氮 Alkali-hydrolyzable N	1							
速效磷 Available P	0.359	1						
速效钾 Available K	0.620*	0.813**	1					
CEC	0.880**	0.675*	0.918**	1				
有机碳 SOC	0.869**	0.413	0.741*	0.882**	1			
AMF 总侵染率 AMF Colonization	-0.521	0.381	-0.216	-0.387	-0.070	1		
孢子密度 Spore density	0.143	0.906**	0.795**	0.557*	0.202	0.326	1	
EE-GRSP	-0.447	0.219	0.318	-0.031	-0.260	0.047	0.590*	1
T-GRSP	0.062	0.842**	0.810**	0.523*	0.244	0.223	0.965**	0.699*

2.6 土壤因子、AMF 孢子密度与球囊霉素含量的主成分分析

对 11 个土壤因子进行主成分分析,根据相关矩阵特征值大于 1,方差累积贡献率大于 85%的原则,入选 3 个主成分,其主成分载荷矩阵特征值及贡献率见表 6。由表 6 可知,第 1 主成分反映信息量占总信息量的 47.42%,第 2 主成分占 23.89%,第 3 主成分占 16.67%,累计贡献率 87.98%。由于第 1

主成分所含信息量在 3 个主成分中较高,所以碱解氮、速效磷和速效钾(权重在 0.850~0.883)是主要因子,能够反映铅锌矿污染区土壤的养分状况。第 1 主成分主要综合了土壤速效钾、碱解氮、速效磷、有机碳、脲酶、全氮、碱性磷酸酶及 CEC 等指标的变异信息,第 2 主成分则综合了 AMF 孢子密度和土壤总球囊霉素的变异信息,第 1 主成分的方差贡献率最大,因此其对决定土壤生态起着主要作用。

表 6 土壤因子、AMF 孢子密度与球囊霉素含量主成分载荷矩阵、特征值及贡献率
Table 6 Principle component loading matrix,eigenvalue,and contribution rate of soil factors,AMF spore density and GRSP

项目 Item	第 1 主成分 PCA1	第 2 主成分 PCA2	第 3 主成分 PCA3
脲酶 Urease	0.757	−0.542	0.299
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	0.679	−0.051	0.008
过氧化氢酶 Catalase	0.582	−0.162	0.792
孢子密度 Spore density	0.054	0.894	0.370
T-GRSP	0.225	0.894	0.344
速效磷 Available P	0.850	0.208	0.069
碱解氮 Alkali-hydrolyzable N	0.876	−0.211	−0.017
全氮 Total N	0.730	−0.562	0.120
速效钾 Available K	0.883	0.460	−0.062
CEC	0.617	0.200	−0.760
有机碳 SOC	0.779	0.230	−0.511
特征值 Eigenvalue	5.217	2.628	1.834
贡献率/% Contribution rate	47.42	23.89	16.67

3 讨 论

在选取的 7 种林木中,水青冈和黄连木的根系中未观察到 AMF 侵染,水青冈属于壳斗科植物,一般被认为不能或不易形成丛枝菌根^[17]。班宜辉等^[5]在铅硐山铅锌矿区调查时发现,黄连木等 6 种植物根系内未见 AMF 侵染。本研究发现,不同林木根际土中 AMF 孢子密度差异明显,这可能与不同林木根际的 AMF 特性及林木的种类有关。在未 被 AMF 侵染的黄连木和水青冈根际土中发现 AMF 孢子,这可能是由于附近植物的根系蔓延到黄连木和水青冈的周边,这些植物根外菌丝极强的延伸能力导致其 AMF 孢子存在于黄连木和水青冈根际。

AMF 对植物根系的侵染会影响植物,并促使 AMF 根外菌丝分泌土壤酶^[18]。冯欣欣等^[19]研究发现,狼牙刺根际土中 AMF 孢子密度与碱性磷酸酶、过氧化氢酶活性呈极显著正相关。山宝琴等^[20]研究发现,荒漠油蒿根围 AMF 孢子密度与脲酶、酸性磷酸酶活性呈显著或极显著正相关。Khan 等^[21]研究发现,土壤脲酶和磷酸酶活性与土壤中 Cd 和 Pb 含量呈显著负相关,并认为脲酶和过氧化氢酶活性可作为土壤污染的指标。Liu 等^[22]研究显示,Cd 和 Pb 对土壤脲酶、转化酶、碱性磷酸酶和过氧化氢

酶活性有明显的抑制作用。本研究发现,土壤中脲酶和过氧化氢酶活性与 AMF 孢子密度和总侵染率呈显著或极显著负相关,这极有可能是由于土壤中 Pb 含量过高所致。

Purin 等^[23]和 Singh 等^[7]研究认为,球囊霉素是土壤有机碳库的重要组成部分,其巩固了土壤颗粒的稳定性,进而影响土壤碳储量,可有效防止有机碳的流失。本研究发现,土壤总球囊霉素含量与土壤速效磷、速效钾含量及孢子密度呈极显著正相关,与土壤有机碳相关性不显著。说明铅锌矿区土壤中的重金属污染虽然没有完全阻碍 AMF 的生长,但极有可能影响了 AMF 分泌球囊霉素,造成土壤中球囊霉素含量偏低。本研究发现,土壤总球囊霉素含量与土壤阳离子交换量呈显著正相关。土壤阳离子交换量可以直接反映土壤的保肥、供肥性能和缓冲能力^[24]。由此可见,AMF 可以通过分泌球囊霉素促进土壤团聚体的形成,进而增强土壤的保肥和缓冲能力,防止土壤养分流失和土壤退化。因此,有必要进一步对 AMF 产球囊霉素与土壤养分的动态关系进行研究,以充分认识 AMF 在重金属污染地区植被恢复、土壤退化控制中的生态作用和意义。

[参考文献]

[1] Dickson S,Smith F,Smith S. Structural differences in arbuscu-

- lar mycorrhizal symbioses; More than 100 years after Gallaud, where next? [J]. *Mycorrhiza*, 2007, 17(5): 375-393.
- [2] Facelli E, Smith S E, Facelli J M, et al. Underground friends or enemies; Model plants help to unravel direct and indirect effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant competition [J]. *New Phytologist*, 2010, 185(4): 1050-1061.
- [3] Meier S, Borie F, Bolan N, et al. Phytoremediation of metal-polluted soils by arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2012, 42(7): 741-775.
- [4] 牛振川, 唐明, 黄继川, 等. 土壤铅和锌对植物根际丛枝菌根真菌分布的影响 [J]. *西北植物学报*, 2007, 27(6): 1233-1238.
Niu Z C, Tang M, Huang J C, et al. The effects lead and zinc in the soil on the distribution of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(6): 1233-1238. (in Chinese)
- [5] 班宜辉, 徐舟影, 杨玉荣, 等. 不同程度铅锌污染区丛枝菌根真菌和深色有隔内生真菌侵染特征 [J]. *西北植物学报*, 2012, 32(11): 2336-2343.
Ban Y H, Xu Z Y, Yang Y R, et al. Colonization characteristics of arbuscular mycorrhizal fungi and dark septate endophytes in different degree Pb-Zn polluted areas [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, 32(11): 2336-2343. (in Chinese)
- [6] Xu Z Y, Tang M, Chen H, et al. Microbial community structure in the rhizosphere of *Sophora viciifolia* grown at a lead and zinc mine of northwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012(435/436): 453-464.
- [7] Singh P K, Singh M, Tripathi B N. Glomalin: An arbuscular mycorrhizal fungal soil protein [J]. *Pedobiologia*, 2012, 51(2): 123-130.
- [8] 宝鸡年鉴编纂委员会. 宝鸡年鉴 [M]. 宝鸡: 宝鸡市地方志办公室, 2004: 31-35.
Baoji Almanac Compilation Committee. *Baoji almanac* [M]. Baoji: Baoji History Office, 2004: 31-35. (in Chinese)
- [9] 牛春山. 陕西树木志 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1990: 1189-1199.
Niu C S. *Dendrology of shaggni* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1990: 1189-1199. (in Chinese)
- [10] Clegg S, Gobran G R. Rhizospheric P and K in forest soil manipulated with ammonium sulfate and water [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1997, 77(4): 515-523.
- [11] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection [J]. *Transactions of the British Mycological Society*, 1970, 55(1): 158-161.
- [12] Abbott L K, Robson A D, De Boer G. Effect phosphorus on the formation of hyphae in soil by vesicular mycorrhizal fungus, *Glomus fasciculatum* [J]. *New Phytologist*, 1984, 97: 437-446.
- [13] Ianson D C, Allen M F. The effects of soil texture on extraction of vesicular arbuscular mycorrhizal fungal spores from arid sites [J]. *Mycologia*, 1986, 78(2): 164-168.
- [14] Bedini S, Pellegrino E, Avio L, et al. Changes in soil aggregation and glomalin-related soil protein content as affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices* [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(7): 1491-1496.
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986: 260-344.
Guan S Y. *Soil enzyme and the methods about the study of soil enzyme* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986: 260-344. (in Chinese)
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 241-297.
Bao S D. *Analysis of soil agrochemistry* [M]. 3rd edition. Beijing: China Agricultural Science Press, 2000: 241-297. (in Chinese)
- [17] 张英, 郭良栋, 刘润进. 都江堰地区丛枝菌根真菌多样性与生态研究 [J]. *植物生态学报*, 2003, 27(4): 537-544.
Zhang Y, Guo L D, Liu R J. Diversity and ecology of arbuscular mycorrhizal fungi in Dujiangyan [J]. *Plant Ecology*, 2003, 27(4): 537-544. (in Chinese)
- [18] Zhu X C, Song F B, Xu H W. Influence of arbuscular mycorrhiza on lipid peroxidation and antioxidant enzyme activity of maize plants under temperature stress [J]. *Mycorrhiza*, 2010, 20: 325-332.
- [19] 冯欣欣, 唐明, 龚明贵, 等. 黄土高原狼牙刺丛枝菌根与球囊霉素的空间分布 [J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(6): 96-102.
Feng X X, Tang M, Gong M G, et al. Spatial distribution of arbuscular mycorrhiza and glomalin in the rhizosphere of *Sophora davidii* on the Loess Plateau [J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2011, 39(6): 96-102. (in Chinese)
- [20] 山宝琴, 贺学礼, 白春明, 等. 荒漠油蒿 (*Artemisia ordosica*) 根围 AM 真菌分布与土壤酶活性 [J]. *生态学报*, 2009, 29(6): 3044-3051.
Shan B Q, He X L, Bai C M, et al. Distribution of arbuscular mycorrhizal fungi and soil enzyme activities in the rhizosphere of *Artemisia ordosica* in desert [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3044-3051. (in Chinese)
- [21] Khan S, Hesham A E, Qiao M, et al. Effects on Cd and Pb on soil microbial community structure and activities [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2010, 17: 288-296.
- [22] Liu S Q, Yang Z X, Wang X M, et al. Effects of Cd and Pb pollution on soil enzymatic activities and soil macrobiotic [J]. *Frontiers of Agriculture in China*, 2007, 1(1): 85-89.
- [23] Purin S, Rillig M C. The arbuscular mycorrhizal fungal protein in glomalin: Limitations, progress, and a new hypothesis for its function [J]. *Pedobiologia*, 2007, 51: 123-130.
- [24] Vogeler I, Cichota R, Snowa V O, et al. Pedotransfer functions for estimating ammonium adsorption in soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(1): 324-331.