

不同复垦年限煤矸山土壤微生物功能菌 变化及其影响因素

张小玲, 于亚军

(山西师范大学 地理科学学院, 山西 临汾 041000)

摘要: 研究不同复垦年限煤矸山土壤微生物功能菌差异及其影响因素有助于揭示煤矸山复垦土壤质量变化情况, 为煤矸山植被复垦提供理论指导。以山西省曹村煤矿复垦 4 a (R_{4a}), 6 a (R_{6a}) 和 8 a (R_{8a}) 煤矸山为研究对象, 分析了 3 种复垦年限土壤好氧固氮菌、氨化细菌、纤维素分解菌、有机磷细菌和无机磷细菌数量变化及其与土壤理化性质的关系。结果表明: 随着复垦年限的增加, 功能菌总量呈增加趋势; 好氧固氮菌、氨化细菌、有机磷细菌、无机磷细菌均呈增加趋势, 但纤维素分解菌呈先升后降的趋势。相关分析表明, 氨化细菌和纤维素分解菌受土壤理化性质的影响最大; 主成分分析结果表明, 有效磷、碱解氮、含水量是影响微生物功能菌的主要因子。

关键词: 植被复垦; 土壤微生物功能菌; 土壤性质; 煤矸山

中图分类号: S154.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)04-0116-04

Soil Functional Microbes and the Influence Factors on Coal Waste Pile in Different Reclamation Years

ZHANG Xiaoling, YU Yajun

(College of Geography Sciences, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041000, China)

Abstract: To reveal the change of soil quality in the reclamation coal waste pile and provide theoretical guidance for coal waste pile vegetation reclamation, soil microbial functional bacteria and the influence factors on coal waste pile in different reclamation years were studied. The reclamation lands of 4 a (R_{4a}), 6 a (R_{6a}) and 8 a (R_{8a}) after reclamation on coal waste pile were taken as the case in Cao Village coal mine of Shanxi Province. The changes of soil aerobic nitrogen fixing bacteria, ammonifying bacteria, cellulose decomposing bacteria, organic phosphorus and inorganic phosphorus bacteria of 3 kinds of reclamation years and the relationship between the soil function microbe and the soil physical-chemical properties were analyzed. The results showed that the total amount of bacteria presented the rising trend with reclamation years, aerobic nitrogen fixing bacteria, ammonifying bacteria, organic phosphorus bacteria and inorganic phosphorus bacteria increased with reclamation years, but the cellulose decomposing bacteria first increased and then decreased. Correlation analysis showed that ammonifying bacteria and aerobic cellulose decomposing bacteria were significantly affected by soil properties, and the principal component analysis showed that soil available phosphorus, available nitrogen, soil moisture content were the main factors influencing soil microbial functional bacteria.

Keywords: vegetation reclamation, soil microbial functional bacteria, soil physicochemical properties, coal waste pile

土壤微生物功能菌是指执行同一种功能的相同
或不同形态的土壤微生物^[1], 能迅速对土壤微环境的

变化做出反应, 可较早地指示土壤生态系统功能的变化, 反映出土壤质量和健康状况^[2]。土壤微生物功能

收稿日期: 2017-07-27

修回日期: 2017-09-12

资助项目: 国家自然科学基金“煤矿塌陷区重构土壤性质演化及植被恢复的限制因子研究”(41301304)

第一作者: 张小玲(1992—), 女, 山西交口人, 硕士研究生, 研究方向为土壤生态恢复。E-mail: zhangxl2273@163.com

通信作者: 于亚军(1978—), 男, 甘肃灵台人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事区域环境与生态恢复方面的教学与科研工作。E-mail: yuyajun0211@126.com

菌可为土壤性质的变化趋势提供可靠的依据,是土壤环境质量评价的重要生物学指标^[3]。煤矸山是煤矸石堆存形成的,其大量堆存不仅破坏和占用土地,而且可能引发生态环境问题^[4]。所以,对煤矸山进行复垦治理是改善矿区生态环境的有效途径^[5]。目前,采用推平覆土造地后进行植被绿化是我国北方地区对早期形成的煤矸山复垦治理的主要方式^[6]。但是煤矸山推平覆土时通过碾压、铲平等工程技术措施形成的“重构土壤”改变了土壤的水、肥、气、热等特性^[7],并可能受到底层煤矸石中重金属污染的胁迫,使土壤微生物功能菌数量变化,从而影响土壤中营养物质循环和肥力释放,造成复垦重构土壤质量状况较差。当前,已有利用微生物活性反映矿区破坏土壤质量演变状况的相关研究报道^[8-9]。但利用土壤微生物功能菌揭示煤矸山复垦重构土壤质量演化状况的研究报道并不多见。因此,研究不同复垦年限煤矸山土壤微生物功能菌变化特征及其与土壤理化性质之间的关系,可以揭示不同复垦年限煤矸山土壤质量的变化情况及其主要的驱动因子,有助于指导煤矸山“因时制宜”的开展植被复垦。本文以山西省霍州曹村煤矿3种年限煤矸山复垦地为研究对象,分析不同复垦年限土壤性质和微生物功能菌数量的差异,揭示土壤理化性质对微生物功能菌数量的影响,以期为煤矸山植被复垦工作提供理论指导,也可对煤矸山复垦地土壤质量的评价提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于山西省霍州市曹村矿区,本区属温带大陆性气候,年均气温 12.2℃,年均降雨量 353~688 mm,降水年内分配不均,主要集中在 7、8、9 月共 3 个月,年日照时数 2 265.1 h,全年无霜期 170~230 d。研究样区位于该矿南下庄矸石山(36°30′47.9″N, 111°42′10.6″E),海拔(561±4) m,地貌为低山丘陵,土壤类型为褐土。该矸石山复垦时矸石堆存量约为 200 万 t,占地约 1.6 万 m²,垂直高度约 50 m。矸石山于 2008 年、2010 年和 2012 年分别对东面、南面和西面山头进行推平覆土(覆土土壤均取自煤矸山附近,覆土厚度为 100~120 cm)。覆土造地后分别栽植桃树(*Prunus persica*)、石榴树(*Punica granatum* L.)和枣树(*Ziziphus jujuba* Mill.),株行距均约为 2 m×3 m,由此形成 3 种复垦年限的果园。复垦后,果园水肥管理措施与当地普通果园一致,在每年初春施用牛、羊粪等有机肥,施肥量均约为 600 kg/hm²,果园每年初春和入冬时各浇水 1 次,浇水量均约为 5 000 m³/hm²。

2 材料与方法

2.1 土样采集

以年限为 4 a(R_{4a}),6 a(R_{6a})和 8 a(R_{8a})的复垦地为研究样地,以煤矸山附近原地貌普通果园为对照(CK),采样时间为 2016 年 10 月,采样时为了尽量消除覆土作业时造成的土壤空间异质性,每个样地随机选取 3 个样方(10 m×10 m),各样方内用 S 型在距果树基部 1~2 m 取 5 点,由此形成 3 个重复样。采样土层为 0—10 cm 和 10—20 cm,用土钻(直径 5 cm)取样。样品分 3 部分,一份装入铝盒带回实验室测定含水量,另外两份装入无菌密封袋带回实验室,一份新鲜土样过 2 mm 筛后测定土壤微生物功能菌数量,另一份自然风干过筛后测定土壤理化性质。

2.2 土样分析与处理

土壤有机质含量的测定采用重铬酸钾容量法—外加热法;土壤含水量测定用烘干法(105℃,8 h);土壤 pH 值测定采用电位法(水:土为 5:1);土壤碱解氮含量的测定采用 NaOH—H₃BO₃ 法;有效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法;速效钾用醋酸铵—火焰光度计法;土壤微生物好氧固氮菌、氨化细菌、纤维素分解菌和有机磷细菌测定用最大或然数法(MPN),无机磷细菌测定用稀释涂布平板法。

利用 Excel 2010 对数据进行整理,用 SPSS 17.0 统计软件进行单因素方差分析(Duncan 多重比较)、简单相关分析(Pearson 检验法)和主成分分析,制图采用 Origin 8.6 软件。

3 结果与分析

3.1 3 种复垦年限样地土壤理化性质的差异

表 1 是 R_{4a},R_{6a}和 R_{8a}和 CK 样地土壤理化性质差异情况。可见,在 0—10 cm 土层,随复垦年限的增加,土壤 pH 值无差异,含水量、有机质、碱解氮、有效磷含量均明显增加,但速效钾含量下降。在 10—20 cm 土层,土壤性质变化趋势与 0—10 cm 相似,也表现为土壤 pH 值无差异,含水量、有机质、碱解氮和有效磷含量随复垦年限增加呈增加趋势,速效钾呈降低趋势。此外,与 CK 相比,3 种复垦年限样地 0—10 cm 土层土壤含水量、有机质、碱解氮、有效磷含量均明显偏低,在 10—20 cm 土层,土壤有机质和有效磷含量明显偏低,而在两土层中 pH 值均偏高。

3.2 3 种复垦年限样地土壤微生物功能菌总量的差异

图 1A 是 R_{4a},R_{6a},R_{8a}和 CK 样地土壤微生物功能菌总量的差异(因无机磷细菌与其他菌群计数单位不同,所以此处仅统计除无机磷细菌外的其他功能

菌)。从中可见,在 0—10 cm 土层,与 R_{4a} 相比, R_{6a} 、 R_{8a} 样地土壤微生物功能菌的总量明显增加。在 10—20 cm 土层, R_{6a} 样地与 R_{4a} 样地相比,微生物功能菌总量明显增加,但 R_{8a} 与 R_{6a} 相比无明显差异。同时 3 种复垦年限样地 0—10、10—20 cm 土层微生物功能菌总量均低于 CK 样地。

表 1 3 种复垦样地和 CK 样地土壤理化性质

土层/ cm	样地 类型	pH 值	土壤 含水量/%	土壤有机质/ ($g \cdot kg^{-1}$)	碱解氮/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	有效磷/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	速效钾/ ($mg \cdot kg^{-1}$)
0—10	R_{4a}	$8.08 \pm 0.05a$	$8.79 \pm 0.79d$	$2.68 \pm 0.98d$	$21.38 \pm 0.21d$	$8.13 \pm 0.27c$	$208.08 \pm 0.67a$
	R_{6a}	$8.03 \pm 0.17a$	$15.51 \pm 0.67c$	$3.61 \pm 0.95c$	$49.95 \pm 0.46c$	$9.62 \pm 0.49c$	$152.82 \pm 0.59b$
	R_{8a}	$7.97 \pm 0.28a$	$19.25 \pm 0.18b$	$7.82 \pm 0.90b$	$50.21 \pm 0.17b$	$22.38 \pm 0.63b$	$132.33 \pm 0.83c$
	CK	$6.47 \pm 0.32b$	$24.39 \pm 0.53a$	$15.87 \pm 0.67a$	$71.56 \pm 0.42a$	$49.99 \pm 0.70a$	$126.61 \pm 0.73d$
10—20	R_{4a}	$8.16 \pm 0.08a$	$6.98 \pm 0.78c$	$2.23 \pm 1.01d$	$14.36 \pm 0.24c$	$2.92 \pm 0.40d$	$115.74 \pm 0.64a$
	R_{6a}	$8.10 \pm 0.17a$	$13.65 \pm 0.19b$	$3.14 \pm 0.96c$	$28.64 \pm 0.46a$	$5.03 \pm 0.17c$	$113.84 \pm 0.69a$
	R_{8a}	$8.05 \pm 0.04a$	$18.71 \pm 0.67a$	$7.06 \pm 0.93b$	$28.65 \pm 0.45a$	$7.62 \pm 0.64b$	$108.07 \pm 0.53b$
	CK	$7.17 \pm 0.10b$	$16.00 \pm 0.38a$	$15.67 \pm 0.68a$	$21.41 \pm 0.98b$	$20.77 \pm 0.77a$	$90.66 \pm 0.45c$

注:同一土层后不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

3.3 3 种复垦年限样地各土壤功能菌数量变化特征

图 1B—1F 分别是 R_{4a} 、 R_{6a} 、 R_{8a} 和 CK 样地土壤微生物好氧固氮菌、氨化细菌、纤维素分解菌、有机磷细菌、无机磷细菌数量的变化。在 0—10 cm 土层,5 种土壤微生物功能菌变化趋势不同。好氧固氮菌、氨化细菌、有机磷细菌和无机磷细菌含量均随复垦年限的增加而增加。其中,好氧固氮菌和氨化细菌增幅最明显。而纤维素分解菌数量在 R_{6a} 样地中增

加,但在 R_{8a} 样地中降低。在 10—20 cm 土层中,土壤微生物功能菌的变化趋势与 0—10 cm 土层一致,也表现为好氧固氮菌、氨化细菌、有机磷细菌和无机磷细菌含量随复垦年限的增加而增加,但纤维素分解菌数量呈先增后减的趋势。同时,与 CK 相比,3 种复垦样地除有机磷菌在 0—10 cm 土层无显著差异外,其余功能菌数量在 0—10、10—20 cm 土层均明显偏低。

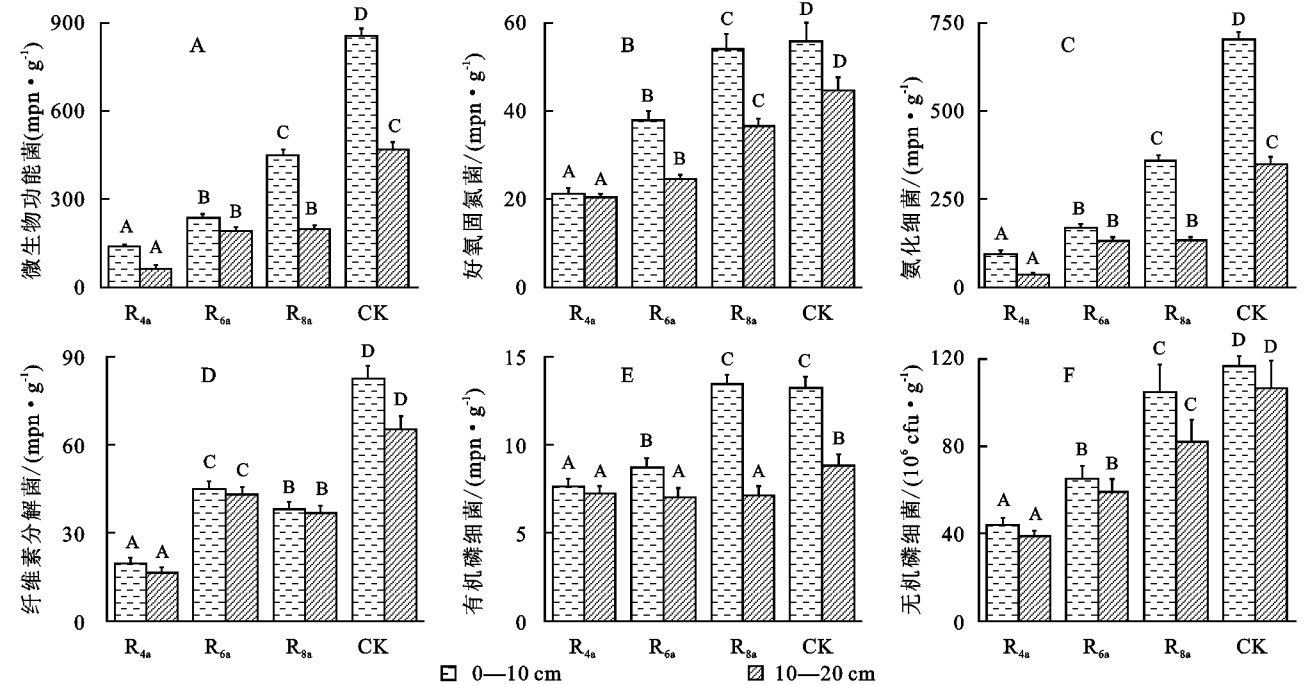


图 1 3 种复垦样地和 CK 样地土壤微生物功能菌群总量及各功能菌群量

3.4 3 种复垦年限样地土壤微生物功能菌数量与土壤理化性质之间的关系

3.4.1 土壤微生物功能菌与土壤理化性质的相关分析 表 2 是 3 种复垦样地土壤微生物功能菌数量与土壤理化性质关系。从中可见,好氧固氮菌数量与土

壤含水量和土壤有机质呈正相关,氨化细菌数量与土壤有机质和有效磷呈正相关,但与 pH 值呈负相关;纤维素分解菌数量与有机质含量呈正相关,和 pH 值呈负相关;有机磷细菌与有效磷含量呈正相关。无机磷细菌与土壤含水量、土壤有机质呈正相关。此外,

从各功能菌受土壤理化性质影响程度的差异来看,氨化细菌和纤维素分解菌数量与土壤理化性质因子相关系数的绝对值之和($\sum |r|$)最大,表明其受土壤理化性质的影响最大。

3.4.2 土壤理化性质的主成分分析 表 3 是 3 种复垦样地土壤理化性质主成分分析的结果。从中可见,由 6 个土壤理化性质指标所表征的影响因子的主成分 1 与主成分 2 的累积方差贡献率达到 87.2%,可以用来反映煤矸山土壤微生物功能菌系统内的变异情况。从贡献率和特征值来看,各主成分评价煤矸山土壤微生物功能菌的影响力依次为主成分 1(PC_1)>主成分 2(PC_2)。由第一、二主成分的系数来看,第一主成分主要由有效磷、碱解氮、含水量、pH 值、有机质决定。有效磷是影响第一主成分的主要因子。第

表 3 3 种样地土壤理化性质的主成分分析结果

主成分	pH 值	含水量	有机质	碱解氮	有效磷	速效钾	特征值	贡献率	累计贡献率
PC_1	-0.864	0.867	0.776	0.890	0.962	-0.057	4.090	68.1	68.1
PC_2	0.325	-0.224	-0.543	0.236	-0.108	0.947	1.147	19.1	87.2

4 讨论

研究表明,土壤微生物功能菌在土壤形成及养分供给中起重要作用,可用来判断土壤的熟化程度^[10]。本研究中,3 种复垦年限样地土壤微生物功能菌总量随复垦年限增加呈增加趋势,表明煤矸山植被复垦有效地改善了土壤微生物的生长环境,促进了功能菌数量的增加。同时,3 种复垦样地土壤理化性质的主成分分析结果表明,含水量、有机质、碱解氮和有效磷是影响微生物功能菌数量的重要因子。同时,3 种样地土壤性质的差异也显示随着复垦年限的增加土壤水肥状况明显变优,如与 R_{1a} 样地相比, R_{6a} 样地 0—10 cm 土层含水量、有机质、碱解氮和有效磷分别增加 76.5%,34.7%,133.6%和 18.3%, R_{8a} 样地相比 R_{6a} 样地分别增加 24.1%,116.6%,0.5%和 132.6%。由此可见,煤矸山植被复垦后,随着施肥、浇水等田间管理措施的实施,复垦果园土壤氮、磷等养分含量增加,土壤贮水能力也提高,微生物生存环境有了明显改善,使土壤微生物功能菌数量明显增加。同时,研究发现,纤维素分解菌数量与其他功能菌数量变化不同,表现为先上升后下降,造成这种现象的原因可能在于,随复垦年限增加,土壤熟化程度不断提高,因而土壤中纤维素类物质在 R_{6a} 样地含量增加,但 R_{8a} 样地相对有所降低,造成纤维素分解菌数量也有所下降,这在其他研究中也有类似发现^[11]。此外,研究也发现,虽然煤矸山复垦土壤功能菌数量随复垦年限的增加明显增加,但即使在最大复垦年限 R_{8a} 样地中,

二主成分由速效钾决定其大小。

表 2 3 种复垦年限样地土壤微生物功能菌数量与土壤性质的相关系数

项目	好氧固氮菌	氨化细菌	纤维素分解菌	有机磷细菌	无机磷细菌
pH 值	-0.686	-0.921**	-0.902**	-0.598	-0.755*
土壤含水量	0.905**	0.833*	0.812*	0.723*	0.902**
土壤有机质	0.794**	0.865**	0.877**	0.587	0.903**
碱解氮	0.781*	0.795*	0.666	0.822*	0.639
有效磷	0.821*	0.982**	0.809*	0.843**	0.804*
速效钾	-0.707*	-0.552	-0.722*	-0.385	-0.783*
$\sum r $	4.694	4.948	4.788	3.958	4.786

注:自由度为 22,* 表示在 $p<0.05$ 水平显著,** 表示 $p<0.01$ 水平显著, $\sum |r|$ 为对应列相关系数绝对值之和。

土壤微生物功能菌数量仍低于当地普通果园(CK),这说明在最大年限 8 a 内,煤矸山复垦土壤质量仍未达到与当地普通果园相当的水平。

5 结论

(1) 随着复垦年限的增加,3 种复垦年限样地 0—10 cm 和 10—20 cm 土层均表现为土壤含水量、有机质、碱解氮、有效磷含量增加,速效钾含量降低。与 CK 相比,3 种复垦年限样地 0—10 cm 土层土壤含水量、有机质、碱解氮、有效磷含量均明显偏低,在 10—20 cm 土层,土壤有机质和有效磷含量明显偏低。

(2) 3 种复垦样地土壤微生物功能菌总量随复垦年限的增加呈增加趋势,但仍低于原地貌普通果园(CK);3 种复垦年限土壤各类微生物功能菌数量的差异表现为:好氧固氮菌、氨化细菌、有机磷细菌、无机磷细菌数量随复垦年限的增加而增加,而纤维素分解菌数量呈先增后减的趋势。

(3) 3 种复垦样地土壤功能菌数量与土壤性质间的相关分析表明,氨化细菌和好氧纤维素分解菌受土壤理化性质的影响最大;主成分分析结果表明,有效磷、碱解氮、含水量是影响土壤微生物功能菌数量的主要因子。

参考文献:

[1] 姚拓,龙瑞军,师尚礼,等. 高寒草地不同扰动生境土壤微生物氮素生理群数量特征研究[J]. 土壤学报,2007,44(1):122-129.

- 局的水土流失效应研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(1):12-22.
- [5] 雷婉宁, 温仲明. 基于 TM 遥感影像的陕北黄土区结构化植被因子指数提取[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2736-2742.
- [6] Garnier E, Cortez J, Billès G, et al. Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession[J]. *Ecology*, 2004, 85(9):2630-2637.
- [7] Mokany K, Ash J, Roxburgh S. Functional identity is more important than diversity in influencing ecosystem processes in a temperate native grassland[J]. *Journal of Ecology*, 2008, 96(5):884-893.
- [8] Baets S D, Poesen J, Gyssels G, et al. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow[J]. *Geomorphology*, 2006, 76(1/2):54-67.
- [9] De Baets S, Poesen J, Gyssels G, et al. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow[J]. *Geomorphology*, 2006, 76(1):54-67.
- [10] Pohl M, Alig D, Körner C, et al. Higher plant diversity enhances soil stability in disturbed alpine ecosystems[J]. *Plant and Soil*, 2009, 324(1):91-102.
- [11] Burylo M, Rey F, Bochet E, et al. Plant functional traits and species ability for sediment retention during concentrated flow erosion[J]. *Plant and Soil*, 2012, 353(1):135-144.
- [12] Zhu H, Fu B, Wang S, et al. Reducing soil erosion by improving community functional diversity in semi-arid grasslands[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 52(4):1063-1072.
- [13] Lavorel S, Garnier E. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail [J]. *Functional Ecology*, 2002, 16(5):545-556.
- [14] 王震洪, 段昌群, 侯永平, 等. 植物多样性与生态系统土壤保持功能关系及其生态学意义[J]. 植物生态学报, 2006, 30(3):392-403.
- [15] 郑颖, 温仲明, 宋光, 等. 延河流域森林草原区不同植物功能型适应策略及功能型物种数量随退耕年限的变化[J]. 生态学报, 2015, 35(17):5834-5845.
- [16] Mason N W H, Mouillot D, Lee W G, et al. Functional richness, functional evenness and functional divergence: the primary components of functional diversity[J]. *Oikos*, 2005, 111(1):112-118.
- [17] Micheli F, Halpern B S. Low functional redundancy in coastal marine assemblages [J]. *Ecology Letters*, 2005, 8(8):391-400.
- [18] Pillar V D, Duarte L S, Sosinski E E, et al. Discriminating trait-convergence and trait-divergence assembly patterns in ecological community gradients[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2009, 20(2):334-348.
- [19] Grime J P. Trait convergence and trait divergence in herbaceous plant communities: mechanisms and consequences[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2006, 17(2):255-260.
- [20] Cadotte M W, Carscadden K, Mirotchnick N. Beyond species: functional diversity and the maintenance of ecological processes and services [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 48(5):1079-1087.



(上接第 119 页)

- [2] Wu J, Huang M, Xiao H A, et al. Dynamics in microbial immobilization and transformations of phosphorus in highly weathered subtropical soil following organic amendments[J]. *Plant & Soil*, 2007, 290(1/2):333-342.
- [3] 樊文华, 白中科, 李慧峰, 等. 不同复垦模式及复垦年限对土壤微生物的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 27(2): 330-336.
- [4] 胡振琪. 半干旱地区煤矸石山绿化技术研究[J]. 煤炭学报, 1995, 20(3):322-327.
- [5] 李智兰. 矿区复垦对土壤养分和酶活性以及微生物数量的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2):6-13.
- [6] 于亚军, 任珊珊, 郭李凯, 等. 两种利用类型煤矸山复垦重构土壤贮水特性研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2):44-48.
- [7] 毕斌, 任珊珊, 郭李凯, 等. 2 种利用类型煤矸山复垦重构土壤的微生物量碳、氮含量与酶活性[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(8):511-514.
- [8] 庞碧琳, 于亚军. 复垦煤矸山不同利用类型土壤微生物群落分析[J]. 土壤通报, 2017, 48(2):359-364.
- [9] 王继萍, 庞碧琳, 于亚军. 不同复垦年限煤矸山土壤微生物群落特征及其指示作用[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(9):140-144.
- [10] 牛世全, 杨建文, 胡磊, 等. 河西走廊春季不同盐碱土壤中微生物数量、酶活性与理化因子的关系[J]. 微生物学通报, 2012, 39(3):416-427.
- [11] 杨涛, 周慧, 张于光, 等. 云南高黎贡山土壤可培养降解纤维素真菌的多样性[J]. 生态学报, 2009, 29(4):1971-1979.