

地表裂缝对青杨根际环境的影响

杜涛, 毕银丽, 张姣, 殷楠, 余海洋, 冯颜博

中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

摘要 通过野外调查确定研究区域和样本植物, 然后分别在地下煤炭开采前和开采后定点采集植物根际土壤样本, 通过实验分析研究神东矿区补连塔煤矿地下煤炭开采引起的地表采动裂缝对青杨根际环境的影响。结果表明, 青杨根际微生物区系中, 细菌数量最多, 放线菌数量次之, 真菌数量最少; 青杨根际微生物数量、酶活性、土壤含水量、pH 值呈现明显的季节分布规律。地表裂缝降低了青杨根际的微生物数量、酶活性、菌丝密度、菌根侵染率、土壤含水量和电导率。随着时间的推移, 地表裂缝对青杨根际环境的影响有逐步减弱的迹象。

关键词 根际环境; 采动裂缝; 酶活性; 菌丝密度; 青杨

中图分类号 S154, X171

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.02.005

Effects of Cracks on the Rhizospheric Environment of *Populus Cathayana*

DU Tao, BI Yinli, ZHANG Jiao, YIN Nan, YU Haiyang, FENG Yanbo

School of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

Abstract By means of the field investigation, the study area and sample plant were determined in Bulianta coal mine of Shandong Area. And then soil samples in rhizosphere were collected before and after underground coal mining. Through the analyses on experimental data, the effects of surface cracks caused by underground coal mining on the rhizospheric microhabitat of *Populus cathayana* are analyzed. The results indicate that for the rhizosphere of *Populus cathayana*, in terms of quantity, bacteria, actinomycetes, and fungi are in a descending order. There is a significant distribution precept of the microorganism amount, enzyme activity, and water content of soil and pH value in different seasons. The surface cracks reduce microorganism quantities, enzyme activities, hyphal density, mycorrhizal infection rate, soil water content, and electrical conductivity of soil in the rhizosphere of *Populus cathayana*. With the time goes by, the effects of surface cracks on the rhizospheric microhabitat of *Populus cathayana* are gradually weakening.

Keywords rhizosphere environment; mining crack; enzyme activity; hyphal density; *Populus cathayana*

0 引言

中国是一个煤炭资源生产和消费大国。2009年, 全国原煤生产占能源生产总量的 77.3%, 煤炭消费占能源消费总量的 70.4%^[1]。煤炭开采引起的地表塌陷、裂缝等次生地质灾害, 严重破坏了当地的生态环境, 使当地水资源枯竭, 土地生产力下降。目前, 相关研究主要集中在采煤沉陷对生态环境的影响, 包括对土壤理化性质改良、潜水位变化、植被恢复效应等^[2-5]方面, 还包括地表裂缝的成因、分布特征、危害以及对水分保持的影响^[6,7]。开采沉陷显著影响土壤含水量^[8], 降低塌陷区周围的潜水位^[9], 地表裂缝与新构造作用、地下水开采和复

杂地质环境均具有密切的关系^[9], 菌根等生物治理技术在采煤沉陷区生态恢复中具有良好的应用前景^[9]。采矿沉陷区地表裂缝对生态环境的影响, 特别是对根际微生境的影响则鲜有报道。根际微生境对环境变化的反应更为敏感, 能够直接揭示地质灾害对生态环境的破坏机制, 为后期的土地复垦与生态重建提供重要的理论基础。本文通过对青杨根际微生物数量及其组成结构、酶活性大小、菌丝密度、菌根侵染率、土壤含水量、电导率、pH 值和无机盐含量的比较研究, 分析了煤炭开采引发的地表裂缝对青杨根际微生境影响的时序规律, 揭示了煤炭开采对生态环境的破坏机理。

收稿日期: 2012-10-22; 修回日期: 2012-12-20

基金项目: “十二五”科技支撑计划项目(2012BAC10B03); 教育部高等学校博士学科点专项科研项目(20090023110009)

作者简介: 杜涛, 博士研究生, 研究方向为土地复垦与生态重建, 电子信箱: duguo_dutao@sina.com; 毕银丽(通信作者), 教授, 研究方向为微生物(菌根)在矿区生态重建方面的作用, 电子信箱: ylibi88@163.com

1 材料与方法

1.1 研究区概况

神东矿区补连塔煤矿处于陕北黄土高原沟壑区向毛乌素沙漠的过渡地带,属于半干旱、半沙漠的高原大陆性气候,气候干旱且蒸发量大,降水主要集中在7~9月;矿区土壤贫瘠,沙化、风蚀严重,有机质含量较低。研究区为距离补连塔煤矿12406工作面切眼约200m的100m×100m的区域,该区域植被稀疏,生态环境较为脆弱。2011年5月中旬将在该区域地下进行煤炭开采。

1.2 试验设计

试验用植物为当地人工种植的青杨(*Populus cathayana*),属杨柳科杨属。在该区域地下煤炭开采前(4月),随机选取同等大小的青杨5株(简称青杨)(表1)。然后,在研究区地下煤炭开采使地表出现许多裂缝(7月),随机选取有裂缝(开采动态裂缝,宽约1.5cm)且经过其根基部的同等大小的青杨5株(简称青杨裂)。经勘测,该区域地表已整体沉陷约2m。

表1 样本基本特征

Table 1 Basic characteristics of the samples

种类	选择标准/cm			实际结果/cm		
	株高	冠幅	胸径	株高	冠幅	胸径
青杨	250~500	120~200	10~20	377.5	137.75	14.25

1.3 取样

分别于2011年4月中旬、7月中旬、9月末3次采集青杨根样和根际土壤样本(对裂缝经过的青杨,尽量靠近裂缝采集根际土)。采集青杨根样时,轻轻剪断青杨根系末梢纤细的幼根,用于测定菌根感染率。采集土样时,先除去青杨茎基部周围的地表枯叶,采集深度0~20cm、紧贴青杨根系的根际土,即装入无菌封口塑料袋内,低温冷藏并迅速带回实验室;一部分新鲜土样过2mm筛,置于4℃冰箱保存备用,用于测定土壤微生物数量和酶活性;另一部分土样自然风干,过1mm筛备用,用于测定土壤理化性质、无机盐含量和菌丝密度,其

中测定无机盐含量的土壤需过0.149mm筛。

1.4 测定及统计分析方法

土壤微生物数量采用常规的稀释平板法^[8],菌根感染率采用Phillips和Hayman方法^[9],菌丝密度采用网格交叉法^[10]。磷酸酶活性采用改进的Tabatabai和Brimner方法^[11],脲酶活性采用苯酚-次氯酸钠比色法,蔗糖酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法^[12]。pH值、电导率采用去离子水浸泡法(水土比例为2.5:1)测定,土壤含水量采用烘干法测定,土壤无机盐含量采用王水-HClO₄消煮法,用电感耦合等离子发射光谱仪ICP-AES测定。差异显著性分析采用DPS v7.05统计软件,多元方差分析采用SPSS 13.0统计软件。

2 结果与分析

2.1 地表裂缝对青杨根际微生物种群数量的影响

青杨根际微生物区系中,细菌数量最多,约占微生物总数的88%~94%;放线菌数量次之,约占6%~11%;真菌数量最少,约0.06%~0.11%(表2)。细菌、放线菌、真菌数量随季节变化特征明显,表现为4月<7月,7月>9月,其中放线菌数量的季节差异显著,细菌数量9月与7月差异显著。

与对照青杨相比,裂缝经过的青杨根际细菌、放线菌、真菌数量7月分别减少23%、34%、10%,其中细菌、放线菌数量差异显著;9月分别减少12%、17%、26%,差异均不显著(表2)。9月细菌、放线菌数量下降的程度明显低于7月,这说明一方面地表裂缝减少了青杨根际微生物数量,特别是细菌、放线菌数量;另一方面,随着时间延长,青杨逐渐适应了变化的环境,地表裂缝对青杨根际微生物数量的影响逐步减弱。

与对照青杨相比,裂缝经过的青杨根际细菌数量占微生物总数的比重在7月、9月分别提高了1.28%、0.52%,放线菌则分别降低了1.29%、0.5%,这说明地表裂缝改变了青杨根际微生物区系结构,细菌所占比重有所提高,放线菌所占比重则有所降低。多元方差分析结果显示,季节变化对青杨根际细菌、放线菌数量均具有极显著的影响,地表裂缝对放线菌数量具有极显著的影响。

表2 裂缝对青杨根际微生物数量的影响

Table 2 Effects of cracks on soil microbe quantity in the rhizosphere of *Populus cathayana*

月份	样本	细菌		放线菌		真菌	
		数量/(10 ⁵ cfu·g ⁻¹)	比重/%	数量/(10 ⁴ cfu·g ⁻¹)	比重/%	数量/(10 ³ cfu·g ⁻¹)	比重/%
4	青杨	112±15.4 ^a	93.89	72±10.7 ^b	6.04	74±10.5 ^a	0.06
7	青杨	110±6.8 ^a	89.94	122±7.8 ^a	9.98	89±7.0 ^a	0.07
	青杨裂	84±5.0 ^b	91.22	80±7.1 ^b	8.69	81±11.0 ^a	0.09
9	青杨	63±1.1 ^{bc}	88.82	79±8.0 ^b	11.06	82±7.0 ^a	0.11
	青杨裂	56±3.3 ^c	89.34	66±5.2 ^b	10.56	60±11.0 ^a	0.10

注:(1)表中为平均值±标准误差;(2)不同字母表示在0.05水平上差异显著,相同字母表示在0.05水平上差异不显著,下表同。

Notes: The data are mean value ± standard error, and different letters mean significant difference at the level of 0.05, the same as in below.

2.2 地表裂缝对青杨根际菌丝密度和菌根侵染率的影响

丛枝菌根真菌是自然界中普遍存在的土壤微生物,其根外菌丝可促进植物根系吸收养分与水分,促进土壤团聚体的形成,改善植物生长及根际土壤特性。菌根侵染率反映了菌根真菌与宿主植物的亲合程度,菌丝密度反映了菌根在促进植物生长、营养吸收和抗逆性等方面的能力^[3]。与对照青杨相比,7月,裂缝经过的青杨根际菌丝密度降低了34%,但二者差异不显著;菌根侵染率降低了53%,差异显著(图1)。这说明地表裂缝降低了青杨根际菌丝密度和菌根侵染率。

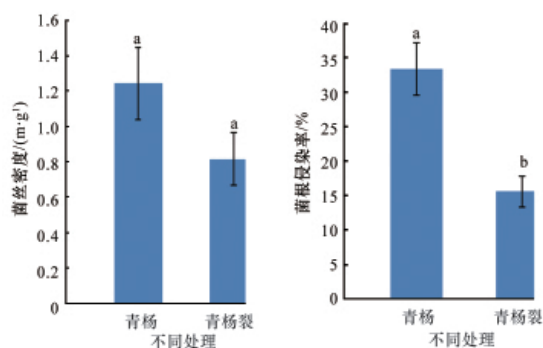


图1 地表裂缝对青杨根际菌丝密度和菌根侵染率的影响
Fig. 1 Effects of cracks on hyphal density and mycorrhizal infectivity in the rhizosphere of *Populus cathayana*

2.3 地表裂缝对青杨根际酶活性的影响

土壤酶活性是灵敏可靠的土壤生物活性指标和土壤肥力指标。蔗糖酶活性可以反映土壤呼吸强度,以37℃培养24h后1g土壤产生的葡萄糖(mg)表示;脲酶活性可以反映土壤有机氮转化状况,以37℃培养24h后1g土壤产生的NH₃-N(mg)表示;磷酸酶活性可以反映土壤有机磷转化状况,以37℃培养1h后1g土壤中释放出的酚(mg)表示。青杨根际蔗糖酶、磷酸酶、脲酶活性的季节差异明显:蔗糖酶、磷酸酶活性的季节变化为4月<7月<9月,其中蔗糖酶活性9月与7月差异显著,脲酶活性的季节变化为4月>7月,7月<9月,其中9月比7月高92%,差异显著(表3)。

与对照青杨相比,裂缝经过的青杨根际蔗糖酶活性7月、9月分别降低了51%、27%,脲酶活性分别降低了42%、47%,差异均显著($P<0.05$);磷酸酶活性分别降低了20%、7%,差异不显著;9月蔗糖酶活性、磷酸酶活性下降的程度明显低于7月(表3),这说明一方面,地表裂缝降低了青杨根际蔗糖酶、脲酶、磷酸酶的活性,其中对蔗糖酶、脲酶活性的影响十分显著;另一方面,随着时间的延长,青杨逐渐适应了变化的环境,地表裂缝对青杨根际酶活性的影响逐步减弱。多元方差分析结果显示,季节变化对蔗糖酶、磷酸酶、脲酶活性均具有极显著的影响,地表裂缝仅对蔗糖酶、脲酶活性具有极显著的影响。

表3 裂缝对青杨根际酶活性的影响

Table 3 Effects of cracks on soil enzyme activity in rhizosphere of *Populus cathayana*

月份	样本	蔗糖酶/(mg·g ⁻¹)	磷酸酶/(mg·g ⁻¹)	脲酶/(mg·g ⁻¹)
4	青杨	14.57±2.21 ^b	3.01±0.39 ^b	0.094±0.01 ^b
7	青杨	14.88±1.04 ^b	3.52±0.19 ^{ab}	0.089±0.01 ^b
	青杨裂	7.28±0.98 ^c	2.83±0.48 ^b	0.051±0.01 ^c
9	青杨	20.28±1.19 ^a	4.15±0.32 ^a	0.17±0.01 ^a
	青杨裂	14.79±1.69 ^b	3.84±0.36 ^{ab}	0.091±0.01 ^b

2.4 地表裂缝对青杨根际土壤性状的影响

2.4.1 裂缝对青杨根际土壤含水量、pH值和电导率的影响

土壤含水量、pH值的季节变化为4月<7月,7月>9月,差异均显著($P<0.05$);电导率的季节变化为4月>7月,7月<9月,差异不显著(表4)。与对照青杨相比,裂缝经过的青杨根际土壤含水量、电导率和pH值均较低,其中9月的pH值差

异显著。这说明裂缝降低了青杨根际土壤含水量、pH值和电导率,但影响不显著。多元方差分析结果显示,季节变化对土壤含水量、pH值均具有显著的影响;地表裂缝对土壤含水量、pH值、电导率的影响均不显著。

2.4.2 裂缝对青杨根际无机盐含量的影响

青杨根际无机盐含量9月>7月,其中K、Mg、Mn、P、Na、

表4 裂缝对青杨根际土壤含水量、pH和电导率的影响

Table 4 Effects of cracks on water content, pH, and electrical conductivity of soil in the rhizosphere of *Populus cathayana*

月份	样本	土壤含水量/%	电导率/($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)	pH值
4	青杨	4.32±0.41 ^{ab}	124.7±10.5 ^a	7.1±0.03 ^b
7	青杨	4.71±0.56 ^a	99.6±9.58 ^{ab}	7.67±0.03 ^a
	青杨裂	3.66±0.55 ^{abc}	78.4±9.34 ^b	7.67±0.03 ^a
9	青杨	2.87±0.40 ^{bc}	104.7±11.4 ^{ab}	6.95±0.16 ^b
	青杨裂	2.62±0.35 ^c	80.5±10.6 ^b	6.48±0.22 ^c

Zn、Cu 的含量差异显著(表 5)。与对照青杨相比,裂缝经过的青杨的 Mg、Cr 含量较低,9 月 Mg 含量差异显著;Fe、K、Mn、P、Na、Zn、Cu、Pb 含量 7 月较高,9 月较低,9 月 K、Na、

Zn 的含量差异显著。多元方差分析结果显示,季节变化对 K、Na、Zn、Cu 的含量均具有显著的影响,地表裂缝对 Mg 的含量具有显著影响。

表 5 裂缝对青杨根际无机盐含量的影响(单位:mg·kg⁻¹)

Table 5 Effects of cracks on mineral salt amounts in the rhizosphere of *Populus cathayana* (unit: mg·kg⁻¹)

种类	7 月		9 月	
	青杨	青杨裂	青杨	青杨裂
Fe	17936±1099 ^a	20009±774 ^a	19734±428 ^a	18142±381 ^a
K	5618±255 ^c	6083±335 ^{bc}	7255±118 ^a	6431±220 ^b
Mg	4568±353 ^b	4528±150 ^b	5639±140 ^a	4374±297 ^b
Mn	268±15 ^b	296±11 ^{ab}	313±2 ^a	282±8 ^{ab}
P	328±30 ^b	362±1 ^{ab}	424±13 ^a	354±34 ^{ab}
Na	124±9 ^b	142±13 ^b	188±6 ^a	136±7 ^b
Zn	23.42±2.5 ^b	24.79±1.3 ^b	35.34±3.3 ^a	25.12±1.4 ^b
Cr	23.57±2.3 ^{ab}	17.58±1.7 ^b	26.45±3.0 ^a	24.13±2.0 ^{ab}
Cu	2.17±0.10 ^b	2.76±0.11 ^{ab}	4.23±0.18 ^a	3.05±0.25 ^{ab}
Pb	5.65±0.43 ^a	5.78±0.13 ^a	7.43±0.88 ^a	6.63±0.58 ^a

2.5 相关性分析

青杨根际放线菌数量与细菌、真菌数量显著正相关,蔗糖酶活性与脲酶、磷酸酶活性显著正相关,青杨根际不同微生物之间、不同水解酶之间有一定的关联性,但土壤微生物与水解酶之间的关联性不强(表 6)。微生物数量与土壤含水量、pH 值显著正相关,说明微生物的生长繁殖受土壤含水量、

酸碱度的影响。细菌数量与土壤中 K、Cu 含量显著正相关,说明土壤中 K、Cu 含量的多少直接影响细菌的生长繁殖。脲酶活性与土壤中 K、Mg、P、Na、Zn、Cu、Pb 含量显著正相关,蔗糖酶活性与土壤中 Mg、Zn、Cr、Cu 含量显著正相关(表 6),说明土壤中 Mg、Zn、Cu 含量的多少直接影响着土壤中脲酶、蔗糖酶活性的正常发挥。

表 6 相关性分析

Table 6 Analysis on correlations

项目	细菌	真菌	放线菌	蔗糖酶	脲酶	磷酸酶	含水量	pH 值	电导率
细菌数量	1	0.560	0.855**	-0.259	-0.343	-0.329	0.692*	0.749**	0.151
真菌数量		1	0.686*	0.162	0.174	-0.411	0.450	0.590*	0.126
放线菌数量			1	0.066	-0.047	-0.267	0.720**	0.620*	0.265
蔗糖酶活性				1	0.873**	0.645*	-0.156	-0.386	0.594*
脲酶活性					1	0.554	-0.235	-0.387	0.470
磷酸酶活性						1	-0.140	-0.472	0.365

项目	Fe	K	Mg	P	Na	Zn	Cr	Cu	Pb
细菌数量	-0.103	-0.657*	-0.178	-0.372	-0.338	-0.361	-0.390	0.074	-0.699*
真菌数量	0.199	-0.147	0.288	0.053	0.328	0.064	0.267	0.396	0.033
放线菌数量	-0.214	-0.488	0.014	-0.341	-0.200	-0.328	-0.121	0.408	-0.460
蔗糖酶活性	-0.113	0.562	0.657*	0.215	0.547	0.573	0.603*	0.631*	0.585*
脲酶活性	0.102	0.671*	0.720**	0.434	0.608*	0.731**	0.755**	0.517	0.794**
磷酸酶活性	-0.302	0.323	0.231	0.011	0.078	0.431	0.139	0.172	0.320

注:**表示在 0.01 水平上相关性显著,*表示在 0.05 水平上相关性显著。

Notes: ** represents that correlation is significant at the level of 0.01, and * represents at the level of 0.05.

3 讨论

根际是土壤与根系接触仅数 mm 的区域,是土壤微生物活动特别旺盛的区域。青杨根际微生物数量和酶活性的季节差异显著,这与曹成有等^[14]的结果一致,但微生物数量和酶活性的季节变化不一致。相关性分析也表明青杨根际微生物数量与酶活性的相关性不显著,这与某些研究结果不同^[15,16],与研究对象的不同(根际土与非根际土、植物种类)有关。杨万勤等^[7]认为,土壤酶活性的变化规律与植物种类有关,植物可

通过根系分泌物、根系脱落物、植物残体和凋落物的种类、数量、质量和凋落时间等与土壤微生物的营养源有关的因素影响土壤生物多样性、土壤理化性质和生物活性^[18,19]。

根际微生物种群数量、结构和酶活性的变化与土壤性状的变化直接相关。土壤含水量、pH 值和电导率等从总体上反映了土壤的理化性状,无机盐含量则从微观上反映了土壤的营养状况。相关性分析表明微生物数量与土壤含水量、pH 值显著正相关,脲酶、蔗糖酶活性与土壤中 Mg、Zn、Cu 含量显著

正相关。地表裂缝改变了土壤的水热条件,诱发了不同层次的土壤结构的重构,导致了不同层次的土壤养分的变化,研究表明,地表裂缝降低了青杨根际土壤含水量、电导率、pH 值及 Mg、Cr 含量,提高了土壤中 Cu 含量,这造成了青杨根际土壤性状的变化。同时,地表裂缝还会对植物根系造成拉伤等伤害,迫使植物做出被动或主动的适应性反应,使根系分泌物的成分、数量发生相应变化,这也会导致青杨根际土壤性状的变化。青杨根际土壤性状的变化导致土壤微生物的数量、种类和酶的活性发生相应的变化,研究表明,地表裂缝减少了青杨根际微生物的数量,降低了酶的活性。地表裂缝的产生一般经历移动变形—裂缝产生—裂缝扩展—裂缝闭合 4 个过程,随着地表裂缝的逐渐闭合,外界环境对根际微生境的影响会逐渐减小,加之植物自身对外界变化的适应性反应,植物根际微生境会逐渐趋于稳定,研究表明,随着时间的推移,地表裂缝对青杨根际微生物数量和酶活性的影响有逐步减弱的迹象。

4 结论

本文通过对煤炭开采前后、不同季节的裂缝未经过和经过的青杨根际土壤样品成分的比较,分析了煤炭开采引起的地表裂缝对青杨根际微环境的影响,得出结论如下。

(1) 青杨根际微生物区系中,细菌数量最多,放线菌数量次之,真菌数量最少。根际微生物数量、酶活性、土壤含水量、pH 值、电导率呈现明显的季节分布规律。微生物数量夏季最多,春秋季节次之;酶活性春夏差别不大,秋季最高。微生物数量、土壤含水量、pH 值的季节变化为 4 月<7 月,7 月>9 月,蔗糖酶、磷酸酶活性的季节变化为 4 月<7 月<9 月,脲酶活性、电导率的季节变化为 4 月>7 月,7 月<9 月。

(2) 地表裂缝减少了青杨根际微生物数量,改变了根际微生物区系结构,降低了根际酶活性、菌丝密度和菌根侵染率,对放线菌数量、蔗糖酶和脲酶活性影响显著。地表裂缝降低了青杨根际土壤含水量、电导率及 pH 值。随着时间的推移,地表裂缝对青杨根际环境的影响有逐步减弱的迹象。

参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2011[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012: 128-130.
National Bureau of Statistics, PRC. China statistical yearbook 2011[M]. Beijing: China Statistics Press, 2012: 128-130.
- [2] 卞正富. 矿区开采沉降农用地质量空间变化研究[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 213-218.
Bian Zhengfu. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(2): 213-218.
- [3] 陈龙乾, 邓喀中, 赵志海, 等. 开采沉降对耕地土壤物理特性影响的空间变化规律[J]. 煤炭学报, 1999, 24(6): 586-590.
Chen Longqian, Deng Kazhong, Zhao Zhihai, et al. Journal of China Coal Society, 1999, 24(6): 586-590.
- [4] 卞正富, 张国良. 矿山开采沉降对潜水环境的影响与控制 [J]. 有色金属, 1999, 51(1): 4-7.
Bian Zhengfu, Zhang Guoliang. Nonferrous Metals, 1999, 51(1): 4-7.

- [5] 毕银丽, 吴福勇, 武玉坤. 丛枝菌根在煤矿区生态重建中的应用[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 2068-2073.
Bi Yinli, Wu Fuyong, Wu Yukun. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8): 2068-2073.
- [6] 武强, 姜振泉, 李云龙. 山西断陷盆地地裂缝灾害研究[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 151-153.
Wu Qiang, Jiang Zhenquan, Li Yunlong. Disasters of ground fissure in graben basin in Shanxi Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 151-153.
- [7] 熊东红, 周红艺, 杜长江, 等. 土壤裂缝研究进展[J]. 土壤, 2006, 38(3): 249-255.
Xiong Donghong, Zhou Hongyi, Du Changjiang, et al. Soils, 2006, 38(3): 249-255.
- [8] 沈萍, 范秀容, 李广斌. 微生物学实验 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 123-128.
Shen Ping, Fan Xiurong, Li Guangbin. Microbiology experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 123-128.
- [9] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal *fungi* for rapid assessment of infection [J]. Transactions British Mycological Society. 1970, 55(2): 158-161.
- [10] Abbott L K, Robson A D, Deboer G. The effect of phosphorus on the formation of hyphae in soil by the vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus fasciculatum*[J]. New Phytologist, 1984, 97(4): 437-446.
- [11] 赵兰坡, 姜岩. 土壤磷酸酶活性测定方法探讨[J]. 土壤通报, 1986, 17(3): 138-142.
Zhao Lanpo, Jiang Yan. Chinese Journal of Soil Science, 1986, 17(3): 138-142.
- [12] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986: 294-297.
Guan Songyin. Soil enzymes research [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986: 294-297.
- [13] 杜善周, 毕银丽, 吴王燕, 等. 丛枝菌根对矿区环境修复的生态效应[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 113-116.
Du Shanzhou, Bi Yinli, Wu wangyan, et al. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(4): 113-116.
- [14] 曹成有, 陈家模, 邵建, 等. 科尔沁沙地四种固沙植物群落土壤微生物生物量及酶活性的季节动态[J]. 生态学杂志, 2011, 30(2): 227-233.
Cao Chengyou, Chen Jiamo, Shao Jian, et al. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(2): 227-233.
- [15] Groffman P M, McDowell W H, Myerse J C et al. Soil microbial biomass and activity in tropical riparian forests [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33(3): 1339-1348.
- [16] Taylor J P, Wilson B, Mills M S, et al. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface and subsoils using various techniques[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34(6): 387-401.
- [17] 杨万勤, 钟章成, 韩玉萍. 缙云山森林土壤酶的分布特征和季节动态及其与四川大头茶的关系[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 1999, 24(3): 318-324.
Yang Wanqin, Zhong Zhangcheng, Han Yuping. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition, 1999, 24(3): 318-324.
- [18] Hooper D U, Bignell D E, Brown V K, et al. Interactions between above and belowground biodiversity in terrestrial ecosystems: Patterns, mechanisms, and feedbacks[J]. Bioscience, 2000, 50(6): 1049-1061.
- [19] Freckman D W, Blackburn T H, Brussaard L, et al. Linking biodiversity and ecosystem functioning of soils and sediments [J]. Ambio, 1997, 26(8): 555-562.

(责任编辑 张玉肖)