

石油污染土壤修复植物的根-土界面微生物特征*

蔺昕¹ 李培军^{1,2} 孙铁珩^{1,2} 李晓军^{2**} 孙丽娜¹

(¹ 沈阳大学环境工程重点实验室, 沈阳 110044; ² 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016)

摘要 选取沈抚灌区的主要修复植物蓖麻为实验材料, 分析了蓖麻根区土壤、根际土壤、根面、根内4个层面上细菌和真菌的数量, 优势菌种的生理生化特征, 及细菌菌株生长营养类型, 揭示了根-土界面微生物区系特征与石油污染土壤生物修复的关系。结果发现: 修复植物根-土界面上, 细菌数量为根际 > 根面 > 根内, 真菌数量为根内 > 根面 > 根际, 根面细菌与真菌数量均处于根际与根内区域微生物数量之间; 修复植物蓖麻根面区域优势细菌种类最多, 根内区域优势真菌种类最多; 根际与根内的优势细菌具有较强的降解大分子物质的能力; 根面细菌在营养需求分类上可归为氨基酸需求菌群。

关键词 污染土壤 根际 微生物特征 植物修复

文章编号 1001-9332(2007)03-0607-06 **中图分类号** X172 **文献标识码** A

Microbiological characteristics of phytoremediation plant root-soil interface for petroleum contaminated soil. LIN Xin¹, LI Pei-jun^{1,2}, SUN Tie-heng^{1,2}, LI Xiao-jun², SUN Li-na¹(¹Key Laboratory of Environmental Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China; ²Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2007, 18(3): 607-612.

Abstract: With the petroleum-contaminated soil under *Ricinus communis* L. phytoremediation in Shenfu irrigation area of Shenyang as test material, this paper studied the quantitative variations of bacteria and fungi, physiological and biochemical characteristics of dominant microbial species, and nutritional types of bacteria in root zone, rhizosphere, root plane and root inside. The results showed that the quantity of bacteria decreased in the order of rhizosphere > root plane > root inside, while that of fungi was in the sequence of root inside > root plane > rhizosphere. The dominant species of bacteria and fungi were most abundant in root plane and root inside, respectively, and the dominant bacterial species in root plane and root inside had a stronger capability in degrading macro-molecular substances. The nutritional demand of bacteria in root plane was of amino acid type.

Key words: contaminated soil; rhizosphere; microbiological characteristics; phytoremediation.

1 引言

根际(rhizosphere)或根圈指植物根系及其影响所及的范围. 它作为土壤圈中一个重要微生态系统, 愈来愈受到重视^[19]. 由于植物根系分泌物的存在, 植物根际有着特殊的物理和化学性质, 其微生物活动和生物量与无根系的土壤有很大区别^[3]. 根际微生物一般呈梯度分布, 其数量显著超过根际以外的土壤, 产生根际效应(rhizosphere effect). 根际效应通常用根圈土壤微生物与邻近的非根圈土壤微生物数量之比(R/S)来表示^[7]. R/S值一般为20~50,

有的高达100^[2]. 这种微生物数量的增长, 可能源于根系分泌物和根际代谢降解污染化合物等因素^[1]. 根系具有独特的物理、化学和生物性质, 它能促进植物生理功能的发挥. 因此, 根际微生态研究有利于阐明根际微生物群落的变化、污染物归趋模式及污染情况下植物的生态适应机制, 从而推动石油污染土壤生物修复技术的发展与应用^[3,14,17].

石油污染土壤的微生物修复已有大量研究^[5-6,10], 但对根际微生物的生长率、优势种的来源、发育和作用, 以及根在各个发育阶段中根际微生物群所产生的生态环境变化, 及其与污染物降解的动态研究鲜有报道. 由于石油污染土壤中植物所处生境特殊, 植物种间适应污染物的方式存在很大差异, 因此往往导致根际微域的明显变化^[9,15]. 植物-

* 国家自然科学基金项目(20477029)、国家重点基础研究发展计划项目(2004CB418506)、辽宁省高校科研基金项目(05L262)和辽宁省博士后基金资助项目.

** 通讯作者. E-mail: lxj1206@163.com

2006-06-06 收稿, 2006-12-15 接受.

土壤污染生态系统研究为植物根际微生态研究提供了很好的模式,为探讨和理解植物与土壤污染的相互关系,揭示群落演替规律和土壤变化提供了新的思考角度^[4,8,18]。本文以植物根际研究方法为手段,从根区土壤、根际、根面和根内4个不同角度,测定了石油污染土壤植物根-土界面微生物群的区系变化,揭示了根-土界面微生物区系特征与石油污染土壤生物修复的关系。

2 材料与方法

2.1 供试材料

2.1.1 供试土壤 试验微区土壤类型为草甸棕壤土,土壤基本化学性质见表1。

表1 土壤基本化学性质

Tab.1 Basic chemical properties of the test soil

深度 Soil depth (cm)	pH	N (g·kg ⁻¹)	P ₂ O ₅ (g·kg ⁻¹)	K ₂ O (g·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)
0~20	5.73	1.37	0.92	18.76	24.9

2.1.2 修复植物 以沈抚灌区的蓖麻(*Ricinus communis* L.)为主要修复植物,研究修复现场农田微区植物根际土壤微生物区系的特征。

2.1.3 培养基配制 培养基类型主要有:1)基础培养基(B):葡萄糖1g, CaCl₂ 0.1g, K₂HPO₄ 1g, NaCl 0.1g, KNO₃ 0.5g, FeCl₃ 0.01g, MgSO₄·H₂O 0.2g, 蒸馏水1L, pH 7.0; 2)氨基酸培养基(A):基础培养基+干酪氨酸4g·L⁻¹; 3)生长素培养基(G):基础培养基上加入半胱氨酸50μg、硫酸素100μg、泛酸100μg、尼克酸100μg、肌醇500μg、维生素H 0.1μg、维生素B₆ 200μg、维生素B₂ 200μg、维生素B₁₂ 2μg、蒸馏水1L; 4)氨基酸-生长素培养基(AG):基础培养基+2)、3)中的氨基酸及生长素; 5)酵母膏培养基(Y):基础培养基+1g·L⁻¹酵母膏; 6)土浸液培养基(S):基础培养基(750ml)+土浸液(250ml); 7)酵母膏-土浸液培养基(YS):土浸液培养基+1g·L⁻¹酵母膏^[13]。

2.2 试验方法

2.2.1 根-土界面微生物的测定方法 根-土界面微生物采用土壤悬液稀释平板测定法^[20]。

2.2.2 样本采集 自田间采集带完整根系的土块,轻轻抖动,去掉多余土壤,尽可能不扰乱根系,从而实现根际土壤和非根际土壤的分离。将带有根系的土块用取样袋装好,带回实验室,进行样本处理和微生物分析。

2.2.3 根际微生物的分离 将采集的样本,用小刀

削去根外大部分土块,必要时以适量无菌水浸泡,软化后除去多余的土壤。然后,将根系在空气中轻轻抖动,除去根与根之间的非根际土,直至根面上保留着紧密附着而不易脱落的土壤为止。

称10g带土的根系,置于含100ml无菌水的三角瓶中,震荡15min,洗下的土为根际土的菌悬液。用无菌镊子取出根系,再用无菌滤纸吸干,称重。根系样本洗涤前后的重量差为根际土重量。

按土壤微生物分析中的稀释平板法,进行菌悬液的稀释、接种、培养、鉴定和计数。微生物数用每克干土含菌量表示。以下微生物测定操作与此相同。

2.2.4 根面微生物的分离 将上述分析过根际微生物并用无菌滤纸吸干的根系,移至另一瓶稀释用的无菌水中(这时要在加进根的前后连同容器称2次稀释无菌水重量),震荡15min。获得根面菌悬液后,以10倍稀释法稀释成一系列稀释菌悬液。用稀释平板法进行分离。根面微生物数量用每克鲜根的含菌量表示。

2.2.5 根内微生物的分离 称鲜根样本0.5g,经无菌水充分洗净,用无菌滤纸吸干表面水分,置于1g·L⁻¹ HgCl₂ 溶液中,浸3min,对根表面进行灭菌。再用无菌水冲洗3~5次,除去残留药剂。将灭菌后的根置于无菌钵中研磨,用无菌水稀释后,再用平板稀释法分离获得根内细菌。

2.2.6 根区微生物的分离 在每个样方中分别确定生长水平中等的3株植物,在植物基部挖开,顺植物根部取连在根上的粒径<1cm的土壤作为根区土壤,并将3株植物的根区土样混合成1个样品,作为该样方植物的根区土样。称10g根区土壤,置于含100ml无菌水的250ml三角瓶中,震荡15min,静置30min后取上清菌悬液测定根区微生物。

2.2.7 细菌营养类型的区分方法 将分离获得的优势菌落,移植于土浸液琼脂斜面上,28℃下培养5d。将各纯菌株分别移植于5ml上述7种液体培养基的试管里,28℃恒温培养5d。根据培养基的混浊度,判断每种培养基里细菌的生长程度。在同一培养基中把混浊度从低到最高进行等级划分。

2.3 试验设计

试验小区设在位于沈阳市东陵区深井子镇康红村沈抚灌区的生物修复试验田,试验周期为1个植物生长季(160d),微区面积为28m²(7m×4m)。

3 结果与分析

3.1 植物根-土界面微生物数量的变化

研究发现,蓖麻生长后土壤根-土界面微生物数

量发生明显变化,在根-土界面上细菌数量先上升、后下降,差异为 2~3 个数量级。细菌数量:根区为 1.48×10^9 个 $\cdot g^{-1}$ 干土,根际为 2.24×10^{11} 个 $\cdot g^{-1}$ 鲜土,根面为 3.13×10^8 个 $\cdot g^{-1}$ 鲜根,根内为 3.2×10^6 个 $\cdot g^{-1}$ 鲜根。植物根际区域细菌数量最大,比根区土壤中细菌数量多 2 个数量级,说明植物生长可以刺激微生物数量迅速增加,提高有机污染物的去除效率。

真菌数量增加 1 个数量级,具体为:根区 1.24×10^4 个 $\cdot g^{-1}$ 干土,根际 5.2×10^4 个 $\cdot g^{-1}$ 鲜土,根面 1.43×10^5 个 $\cdot g^{-1}$ 鲜根,根内 2.7×10^6 个 $\cdot g^{-1}$ 鲜根。由此可见,根际土壤中的真菌数量可以达到根区中的 4 倍;根内的真菌数量比根面的真菌数量多出一个数量级。在植物根内对污染物降解起主要作用的是真菌菌群。

由图 1 可见,在修复植物蓖麻根-土界面上,细菌数量:根际 > 根面 > 根内;真菌数量:根内 > 根面 > 根际。根际微生物是紧密附着在根表面的土壤颗粒中的微生物,其数量受植物与土壤污染物的影响。根面(rhizoplane)微生物是根系表面和直接粘附在根面上的一切可进入根系表面组织的微生物,与根部结合得比较牢固。由于根表面微生物直接生长在根上,其主要利用植物根系分泌物,所以直接影响植

表 2 根-土界面优势细菌形态与生化特征

Tab. 2 Morphological and biochemical characteristics of dominated bacteria in the root-soil interface

分区 Sub-area	数量 Amount	菌株 编号 Number	形态特征 Morphological characteristic		生化特征 Biochemical characteristic					
			颜色 Colors	形状 Shape	革兰氏染色 Gram stain	油脂降解 Lipid degrading	尿素水解 Urea hydrolyze	明胶穿刺 Gluten puncture	淀粉水解 Starch hydrolyze	吡啉变蓝 Indole degrading
根际 Rhizosphere	1	BG1	橙色 Orange	杆状 Bacillus	G ⁻	++	+	+	++	-
根面 Rhizoplane	5	BGF1	橙色 Orange	杆状 Bacillus	G ⁻	++	+	+	++	-
		BGF2	白色 White		G ⁻ /G ⁺	-	-	++	+++	-
		BGF3	浅黄色 Buff	球形 Sphericity	G ⁺	+	++	-	-	-
		BGF4	乳白色 Ivory		G ⁻	-	-	-	++	-
		BGF5	白色 White	球形 Sphericity	G ⁺	++	++	+	-	-
根内 Inside root	2	BGI1	浅黄色 Buff	球形 Sphericity	G ⁺	+	++	-	-	-
		BGI2	白色 White	杆状 Bacillus	G ⁻	+++	++	+	-	-
根区土壤 Root area soil	6	SF03B01	红色 Red	球形 Sphericity	G ⁻	+++	-	+	++	-
		SF03B02	白色 White	球形 Sphericity	G ⁻	++	+	+	+	-
		SF03B03	橙色 Orange	杆状 Bacillus	G ⁻	++	+	+	++	-
		SF03B04	白色 White	杆状 Bacillus	G ⁺	+++	-	+++	++	-
		SF03B05	浅黄色 Buff	球形 Sphericity	G ⁺	+	++	-	-	-
		SF03BF	白色 White	杆状 Bacillus	G ⁺	+++	-	-	++	-

- 无活性 No activity; + 有活性 Active; ++ 活性较强 Strongly active; +++ 活性强 Very strongly active.

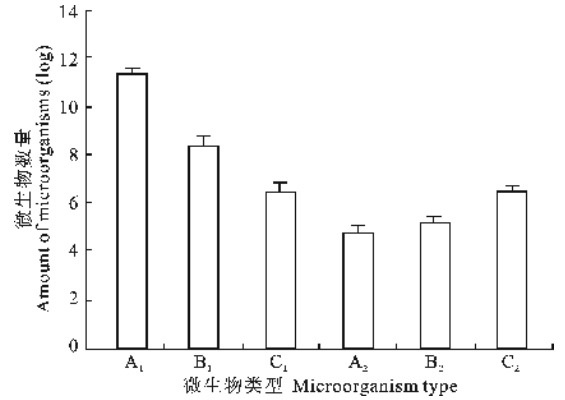


图 1 蓖麻根-土界面微生物数量

Fig. 1 Number of microorganisms in the root-soil interface of castor-oil plant.

A: 根际 Rhizosphere; B: 根面 Rhizoplane; C: 根内 Inside root. 1) 细菌 Bacteria; 2) 真菌 Fungi.

物的养分吸收,对有机污染物的生物降解起主要作用。图 1 中微生物分布趋势表明,在根-土界面的不同区域,细菌与真菌数量呈相反方向增长,根际细菌最多,真菌最少;在根内则真菌多,细菌少。这种现象与生物对土壤中污染物的降解有关,需要进一步对污染物的生物代谢中间产物进行分析^[12,16]。

3.2 优势微生物的生理生化特性

3.2.1 优势细菌的形态与生化特征 由表 2 可以看出,修复植物蓖麻根-土界面上优势细菌多为杆菌和

表3 根-土界面优势真菌鉴定

Tab.3 Identification of dominated fungi in the root-soil interface and their character

分区 Sub-area	数量 Amount	菌株编号 Number	颜色 Colors	形状 Shape	种/属 Species/genera
根际 Rhizosphere	2	FG1	正面绿色,反面黄色 Front green and back yellow	粉末状 Powder	拟青霉 <i>Penicillium</i>
		FG2	正面白色,中间呈粉红色,背面红色 Front white, pink inside and back red	绒毛状 Floss	镰刀菌 <i>Fusarium</i>
根面 Rhizoplane	3	FGF1	浅黄色,边缘乳白色 Buff and ivory brim		串珠镰刀菌 <i>F. moniliforme</i>
		FGF2	白色 White	毛绒状 Floss	镰刀菌 <i>Fusarium</i>
		FGF3	正面蓝绿色,背面黑色 Front cyan and back black	绒状 Floss	
根内 Inside root	7	FGI1	浅黄色 Buff		短帚霉 <i>Scopulariopsis brevicaulis</i>
		FGI2	正面绿色,背面黑色 Front green and back black	毛状 Hair	微小毛霉 <i>Mucor pusills</i>
		FGI3	正面白色,中间呈粉红色,背面红色 Front white, pink inside and back red	绒毛状 Floss	镰刀菌 <i>Fusarium</i>
		FGI4	黑色 Black	圆状突起 Round tuber	腊叶枝孢霉 <i>Cladosporium herbarum</i>
		FGI5	蓝色 Blue	分粒状 Grain	曲霉 <i>Aspergillus</i>
		FGI6	白色 White	绒毛放射状 Floss and radiation	具孢子,待定 With spore, indefinite
		FGI7	灰黑色 Grey		拟青霉 <i>Penicillium</i>
根区土壤 Root area soil	6	SF03F01	黑色,边缘呈黄色 Black and yellow brim		
		SF03F02	黄色 Yellow	绒状 Floss	
		SF03F03	正面棕色,背面绿色 Front brown and back green		
		SF03F04	正面绿色,背面红色 Front green and back red		
		SF03F05	白色 White	绒状 Floss	
		SF03F06	白色 White	毛状 Hair	小克银汉 <i>Cunninghamella</i>

球菌. 革兰氏染色表明,阳性菌与阴性菌各占50%. 根面的优势细菌种类较多;根面微生物通过胞外酶来分解大分子物质,把胞外酶分泌扩散到细胞外,将大分子物质分解成小分子;小分子物质能被微生物吸收和利用^[11]. 这个过程可通过底物的变化来证明. 脂类水解后产生的脂肪酸改变培养基的pH,其中的中性红指示剂使培养基从淡红色变为深红色,用红色晕圈半径大小可判断菌株对油脂的降解能力. 根内优势细菌具有较强的降解油脂的能力;根际优势细菌也有降解油脂的能力,并可以分解其它有机大分子物质(如淀粉、尿素、明胶等);在根表面,只有60%的优势细菌具有降解油脂的能力,其对其它有机大分子物质降解的能力各不相同. 吡啉变蓝反应表明,根际优势细菌没有降解多环芳烃的能力.

3.2.2 优势真菌的形态特征 由表3可以看出,植物根-土界面的优势真菌主要为镰刀菌属(*Fusarium*)和拟青霉(*Penicillium*),其中根内的优势真菌种类较多.

3.3 优势细菌的营养类型

根区细菌对植物能够提供不同的营养,据此可

以将细菌的营养类型划分成7种类型(表4). 优势细菌在不同营养类型培养基中培养5d后的观察结果见表5. 在修复植物的根区土壤,优势细菌以土浸液需求型为主,需要的营养包括氨基酸、生长素和酵母膏. 在修复植物的根际,优势细菌以A(氨基酸)、AG(氨基酸和生长素)、Y(酵母膏)需求群为主要类

表4 营养需求不同的细菌类群

Tab.4 Bacteria identified with different nutritive demands

菌群 Microflora	培养基类型 Culture type						
	B	A	G	AG	Y	S	YS
单纯营养需求 Pure culture demand	+						
氨基酸需求群 Amino Acid demand	-	+					
生长素需求群 Auxin demand	-	-	+				
氨基酸和生长素需求群 Amino acid + auxin demand	-	-	-	+			
酵母膏需求群 Yeast demand	-	-	-	-	+		
土浸液需求群 Soil steep demand	-	-	-	-	-	+	
酵母膏和土浸液需求群 Yeast + soil steep demand	-	-	-	-	-	-	+

+ 生长良好 Grow well; - 生长不良 Grow not well.

表 5 根-土界面优势细菌的营养类型

Tab.5 Nutritive type of domination bacteria in root-soil interface

分区 Sub-area	数量 Amount	菌株编号 Code	营养要求 Culture demand	培养基生长程度* Growing degree in different cultures						
				B	A	G	AG	Y	S	YS
根际 Rhizosphere	1	BG1	氨基酸 Amino acid	0	3	0	2	1	2	1
根面 Rhizoplane	5	BGF1	氨基酸 Amino acid	0	3	0	2	1	2	1
		BGF2	氨基酸 Amino acid	3	4	2	2	2	0	1
		BGF3	酵母膏 Yeast	1	1	2	1	4	0	1
		BGF4	氨基酸 Amino acid	2	4	1	4	1	1	3
		BGF5	土浸液 Soil steep	0	0	0	1	0	2	1
根内 Inside root	2	BG11	酵母膏 Yeast	1	1	2	1	4	0	1
		BG12	氨基酸和生长素 Amino acid + auxin	3	4	4	4	2	1	2
根区土壤 Root area soil	6	SF03B01	生长素 Auxin	1	1	4	0	3	1	1
		SF03B02	土浸液 Soil steep	0	1	1	2	0	2	1
		SF03B03	氨基酸 Amino acid	0	3	0	2	1	2	1
		SF03B04	土浸液 Soil steep	2	1	0	1	0	2	2
		SF03B05	酵母膏 Yeast	1	1	2	1	4	0	1
		SF03BF	氨基酸和生长素 Amino acid + auxin	2	2	3	4	1	0	2

* 将混浊度从低到高划分为 0~4 级,0~2 级为生长不良,3~4 级为生长良好 The thickness was classified into 0~4 degree. 0~2 meant grown not well, while 3~4 meant grown well.

型,同时对 B 的需求也较多.从优势细菌的营养需求可以看出,在修复植物根际中,细菌生长主要受根分泌物影响.根分泌物不仅提供优势细菌需要的各种营养,而且促使细菌发挥其降解作用.

优势细菌的营养需求类型反映出根际环境中植物与微生物相互影响的一个侧面.在植物根际,具有降解污染物能力的优势细菌需要的主要营养是植物分泌的氨基酸.

4 结 论

1)修复植物根-土界面上细菌数量:根际 > 根面 > 根内;真菌数量:根内 > 根面 > 根际.根面细菌与真菌数量均处于根际与根内区域微生物数量之间.

2)根际区域优势细菌种类最多,根内区域优势真菌种类最多.

3)在植物根-土界面上,根际与根内区域的优势细菌具有较强的降解大分子物质的能力.

4)根面细菌在营养要求上归于氨基酸需求菌群,说明这一区域菌群主要与根系分泌物有关.根系分泌物使根表面的微生物数量大于其它区域.

参考文献

[1] Anderson TA, Guthrie EA, Walton BT. 1993. Bioremediation in the rhizosphere. *Environmental Science and Technology*, **27**(13): 2630-2636

[2] Bachmann G, Kinzel H. 1992. Physiological and eco-

logical aspects of the interactions between plant roots and rhizosphere soil. *Soil Biology and Biochemistry*, **24**(6): 543-552

- [3] Chapman PM. 1999. The role of soil microbial tests in ecological risk assessment. *Human and Ecological Risk Assessment*, **5**: 657-660
- [4] Chen Y (陈 嫣), Li G-H (李广贺), Zhang X (张旭), et al. 2005. Effect of petroleum biodegradation and rhizosphere micro eco-system in phytoremediation of the polluted soil in oilfield. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)* (清华大学学报·自然科学版), **45**(6): 784-787 (in Chinese)
- [5] Ding K-Q (丁克强), Sun T-H (孙铁珩), Li P-J (李培军). 2000. Bioremediation of the soil contaminated by petroleum hydrocarbons. *Chinese Journal of Ecology (生态学杂志)*, **19**(2): 50-55 (in Chinese)
- [6] Ding K-Q (丁克强), Yin R (尹 睿), Liu S-L (刘世亮), et al. 2002. Bioremediation for petroleum-contaminated soil by composting technology. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, **13**(9): 1137-1140 (in Chinese)
- [7] Erickson LE, Banks MK, Davis LC, et al. 1994. Using vegetation to enhance in-situ bioremediation. *Environmental Progress*, **13**: 226-231
- [8] Gao Z-M (高拯民). 1986. Study on the Soil-Plant Pollutant Ecology. Beijing: China Science and Technology Press: 360-378 (in Chinese)
- [9] Hersman LE, Klein DA. 1979. Retorted oil shale effects on soil microbiological characteristics. *Journal of*

- Environmental Quality*, **8**: 520 – 524
- [10] Li X-W (李习武), Liu Z-P (刘志培). 2002. Microbial biodegradation of petroleum hydrocarbons. *Acta Microbiologica Sinica* (微生物学报), **42**(6): 764 – 767 (in Chinese)
- [11] Lin X, Li PJ, Zhou QX, *et al.* 2004. Microbial changes in rhizospheric soils contaminated with petroleum hydrocarbons after bioremediation. *Journal of Environmental Sciences*, **16**(6): 987 – 990
- [12] Lin X (蔺昕), Li P-J (李培军), Tai P-D (台培东), *et al.* 2006. Research progress in phyto-microbial remediation of petroleum-contaminated soil. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), **25**(1): 93 – 100 (in Chinese)
- [13] Liu Z-Y (刘芷宇). 1997. The Methods of Rhizosphere Study. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press: 115 – 118 (in Chinese)
- [14] Luo M (罗明), Shan N-N (单娜娜), Wen Q-K (文启凯), *et al.* 2002. Microbial characteristics of rhizospheric soil of some sand-fixing plants. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), **8**(6): 618 – 622 (in Chinese)
- [15] Radwan SS, Al-Awadhi H, Sorkhoh NA, *et al.* 1998. Rhizospheric hydrocarbon-utilizing microorganisms as potential contributors to phytoremediation for the oily Kuwait desert. *Microbiological Research*, **153**(3): 247 – 251
- [16] Sait M, Hugenholtz P, Janssen PH. 2002. Cultivation of globally distributed soil bacteria from phylogenetic lineages previously only detected in cultivation-independent surveys. *Environmental Microbiology*, **4**: 654 – 666
- [17] Walton BT, Hoylman AM, Perez MM, *et al.* 1994. Rhizosphere microbial communities as a plant defense against toxic substances in soils// Anderson TA, Coats JR. Bioremediation Through Rhizosphere Technology. Washington: American Chemical Society: 82 – 92
- [18] Wang M-E (王美娥), Zhou Q-X (周启星), Zhang L-H (张利华). 2003. Chemical behavior and ecological effects of pollutants acting on root-soil interface. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **14**(11): 2067 – 2071 (in Chinese)
- [19] Wei S-H (魏树和), Zhou Q-X (周启星), Zhang K-S (张凯松), *et al.* 2003. Roles of rhizosphere in remediation of contaminated soils and its mechanisms. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **14**(1): 143 – 147 (in Chinese)
- [20] Xiao L (肖琳), Yang L-Y (杨柳燕), Yin D-Q (尹大强), *et al.* 2004. Experiment Technology of Environmental Sciences. Beijing: China Environmental Science Press: 229 – 233 (in Chinese)

作者简介 蔺昕,女,1977年生,博士,讲师。主要从事污染土壤修复研究,已发表论文3篇。Tel: 024-62266538; E-mail: linxin@syu.edu.cn; linxincas@sohu.com

责任编辑 梁仁禄
