

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第1期

Vol.33 No.1

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

30年来中国民航运输行业的大气污染物排放	何吉成(1)
北京上甸子站气相色谱法大气 CH ₄ 和 CO 在线观测方法研究	汪巍,周凌晔,方双喜,张芳,姚波,刘立新(8)
2010年1月北京城区大气消光系数重建及其贡献因子	朱李华,陶俊,陈忠明,赵岳,张仁健,曹军骥(13)
广东东江流域多氯萘的大气沉降研究	王琰,李军,刘向,成志能,张瑞杰,张干(20)
塔克拉玛干沙尘暴源区空气微生物群落的代谢特征	段魏魏,娄恺,曾军,胡蓉,史应武,何清,刘新春,孙建,晁群芳(26)
紫外光降解对生物过滤塔去除氯苯性能的影响机制研究	王灿,席劲瑛,胡洪营,姚远(32)
春季黄渤海溶解有机碳的平面分布特征	丁雁雁,张传松,石晓勇,商荣宁(37)
春季胶州湾海水汞的形态研究	许廖奇,刘汝海,王金玉,汤爱坤,王舒(42)
丽江盆地地表-地下水的水化学特征及其控制因素	蒲焘,何元庆,朱国锋,张蔚,曹伟宏,常丽,王春风(48)
塔里木河下游输水间歇地下水埋深及化学组分的变化	陈永金,李卫红,董杰,刘加珍(55)
某危险废物填埋场地下水污染预测及控制模拟	马志飞,安达,姜永海,席北斗,李定龙,张进保,杨昱(64)
北京市城市降雨径流水质评价研究	侯培强,任玉芬,王效科,欧阳志云,周小平(71)
重庆市路面降雨径流特征及污染源解析	张千千,王效科,郝丽岭,侯培强,欧阳志云(76)
沉水植物床-固定化微生物技术在水源地修复中的应用研究	陈祈春,李正魁,王易超,吴凯,范念文(83)
Pd/TiO ₂ 对水体中2,4-二氯酚的催化加氢脱氯研究	张寅,邵芸,陈欢,万海勤,万玉秋,郑寿荣(88)
pH值对纳米零价铁吸附降解2,4-二氯苯酚的影响	冯丽,葛小鹏,王东升,汤鸿霄(94)
给水管网中耐氯性细菌的灭活特性研究	陈雨乔,段晓笛,陆品品,王茜,张晓健,陈超(104)
安徽省畜禽粪便污染耕地、水体现状及其风险评价	宋大平,庄大方,陈巍(110)
染整废水深度处理纳滤工艺膜污染成因分析	曹晓兵,李涛,周律,杨海军,王晓(117)
间歇式气水联合反冲洗生物炭池的试验研究	谢志刚,邱雪敏,赵燕玲(124)
pH及表面活性剂对诺氟沙星在海洋沉积物上吸附行为的影响	庞会玲,杨桂朋,高先池,曹晓燕(129)
硅在湖泊沉积物上的吸附特征及形态分布研究	吕昌伟,崔萌,高际玫,张细燕,万丽丽,何江,孟婷婷,白帆,杨旭(135)
农作物残体制备的生物质炭对水中亚甲基蓝的吸附作用	徐仁扣,赵安珍,肖双成,袁金华(142)
高分子固体废物基活性炭对有机染料的吸附解吸行为研究	廉菲,刘畅,李国光,刘一夫,李勇,祝凌燕(147)
活性污泥对四环素的吸附性能研究	陈瑞萍,张丽,于洁,陶芸,张忠品,李克勋,刘东方(156)
加油站油类污染物自然衰减现场试验研究	贾慧,武晓峰,胡黎明,刘培斌(163)
生物质炭对土壤中氯苯类物质生物有效性的影响及评价方法	宋洋,王芳,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,谢祖彬,蒋新(169)
利用第二缺氧段硝酸盐氮浓度作为 MUCT 工艺运行控制参数	王晓玲,尹军,高尚(175)
数学模拟好氧颗粒污泥的形成及水力剪切强度对颗粒粒径的影响	董峰,张捍民,杨凤林(181)
不同污泥停留时间对城市污泥生物沥浸推流式运行系统的影响	刘奋武,周立祥,周俊,姜峰,王电站(191)
间歇曝气生物滤池生物除磷性能研究	曾龙云,杨春平,郭俊元,罗胜联(197)
鸡粪与互花米草沼渣混合发酵产甲烷的研究	陈广银,常志州,叶小梅,杜静,徐跃定,张建英(203)
北京市生活垃圾填埋场产甲烷不确定性定量评估	陈操操,刘春兰,李铮,王海华,张妍,王璐(208)
外加酶强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性的研究	杨慧,刘志华,李小明,杨麒,方丽,黄华军,曾光明,李硕(216)
赤潮藻电致化学发光分子探针检测系统的构建	朱霞,甄毓,米铁柱,池振明,徐晓春(222)
邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻的抑制机制研究	别聪聪,李锋民,王一斐,王昊云,赵雅茜,赵薇,王震宇(228)
纳米 TiO ₂ 对短裸甲藻的毒性效应	李锋民,赵薇,李媛媛,田志佳,王震宇(233)
苏州河底泥3种内分泌干扰物的空间分布及环境风险	李洋,胡雪峰,王效举,茂木守,大塚宜寿,细野繁雄,杜艳,姜琪,李珊,冯建伟(239)
电子废物拆解区农业土壤中 PCNs 的污染水平、分布特征与来源解析	王学彤,贾金盼,李元成,孙阳昭,吴明红,盛国英,傅家谟(247)
洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险	刘德鸿,王发园,周文利,杨玉建(253)
湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价	刘春早,黄益宗,雷鸣,郝晓伟,李希,铁柏清,谢建治(260)
广西铅锡矿冶炼区土壤剖面及孔隙水中重金属污染分布规律	项萌,张国平,李玲,魏晓飞,蔡永兵(266)
缺氧条件下土壤砷的形态转化与环境行为研究	吴锡,许丽英,张雪霞,宋雨,王新,贾永锋(273)
可渗透反应复合电极法对铬(VI)污染土壤的电动修复	付融冰,刘芳,马晋,张长波,何国富(280)
胡敏酸对汞还原能力的测定和表征	江韬,魏世强,李雪梅,卢松,李梦婕,罗畅(286)
Zn(II)对生物质碳源处理酸性矿山排水中厌氧微生物活性影响	黎少杰,陈天虎,周跃飞,岳正波,金杰,刘畅(293)
油气田土壤样品中可培养丁烷氧化菌多样性研究	张莹,李宝珍,杨金水,汪双清,袁红莉(299)
利用 PCR-DGGE 分析未开发油气田地表微生物群落结构	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(305)
黄土高原六道沟流域8种植物根际细菌与 AMF 群落多样性研究	封晔,唐明,陈辉,丛伟(314)
鸡粪与猪粪所含土霉素在土壤中降解的动态变化及原因分析	张健,关连珠,颜丽(323)
杂质对废塑料裂解产物及污染物排放的影响	赵磊,王中慧,陈德珍,马晓波,栾健(329)
《环境科学》征稿简则(7)	
《环境科学》征订启事(19)	
信息(47,70,202,304)	

黄土高原六道沟流域8种植物根际细菌与AMF群落多样性研究

封晔^{1,2}, 唐明^{1*}, 陈辉¹, 丛伟³

(1. 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100; 2. 旱区作物逆境生物学重点实验室, 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

摘要: 采用末端限制性片段长度多态性 (terminal restriction fragment length polymorphism, T-RFLP) 方法, 研究了神木县六道沟流域8种植物根际细菌与丛枝菌根真菌 (arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) 群落多样性及其相互关系. 目的是获得有关植物根际细菌和AMF群落的多样性指数, 为生态环境修复提供科学依据. 结果表明, 8种植物根际细菌和AMF的种类和数量有较大差异, 其中刺槐根际细菌的Shannon指数最高(4.01), 垂柳最低(2.18), 根际AMF的Shannon指数最高为小叶杨(2.07), 最低为沙棘(1.21); 聚类分析 (cluster analysis) 和冗余分析 (redundancy analysis) 结果表明, 不同植物根际细菌和AMF的群落结构有较大差异, 但同时部分植物间也存在相似性; 8种植物根际细菌和AMF的多样性指数总体呈极显著的正相关 ($P < 0.01$); 冗余分析结果表明在根际土壤环境因子中, 对根际微生物群落多样性影响最大的环境因子为有机质含量. 植物种类和根际环境对根际微生物群落结构有较大影响, 同时, 刺槐的根际细菌和AMF群落多样性指数均较高, 故可作为六道沟流域植被恢复的先锋树种.

关键词: 六道沟流域; 根际细菌; AMF; 群落多样性; T-RFLP; 环境因子

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)01-0314-09

Community Diversity of Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi in the Rhizosphere of Eight Plants in Liudaogou Watershed on the Loess Plateau China

FENG Ye^{1,2}, TANG Ming¹, CHEN Hui¹, CONG Wei³

(1. College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Crop Stress Biology in Arid Areas, Yangling 712100, China; 3. College of Resource and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Terminal restriction fragment length polymorphism (T-RFLP) was used to examine the community diversity of bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and their interrelation in the rhizosphere of 8 plants in the Liudaogou watershed in Shenmu County. The objective was to obtain diversity indices and provide theoretical basis for ecological restoration. Results showed significant variations in the species and abundances of rhizospheric bacteria and AMF associated with 8 plants. Among these, the Shannon diversity index of rhizospheric bacteria was the highest for *Robinia pseudoacacia* (4.01) and the lowest for *Salix babylonica* (2.18), whereas the Shannon diversity index of rhizospheric AMF was the highest for *Populus simonii* (2.07) and the lowest for *Hippophae rhamnoides* (1.21). Cluster analysis and redundancy analysis indicated a significant difference in associated microbial community structure, while the similarity among community diversity of rhizospheric bacteria and AMF associated with specific plants was also found. There was a significant correlation between diversity indices of bacteria and AMF ($P < 0.01$). Associated microbial community diversity was influenced primarily by organic matter and total nitrogen content. Our work demonstrated strong impacts of plant species and rhizospheric environment on associated microbial community structure. Due to the high diversity indices of rhizospheric bacteria and AMF, *R. pseudoacacia* was considered to be a pioneer plant species for vegetation restoration in the Liudaogou watershed.

Key words: Liudaogou watershed; rhizospherebacterial; arbuscular mycorrhizal fungi (AMF); community diversity; terminal restriction fragment length polymorphism (T-RFLP); environment factor

由于对土地的不合理开发利用和天然植被的严重破坏, 导致黄土高原水土流失严重, 生态环境恶化. 特别是陕西省神木县六道沟流域, 地处黄土高原水蚀风蚀交错带的强烈侵蚀中心, 土壤侵蚀更为严重^[1]. 此外, 流域下方晋陕蒙煤田的大面积开发, 使得大气、土壤和水的重金属污染严重, 生态环境脆弱. 为此, 在黄土高原退化生态系统中开展植树造林, 改善生态环境的研究已

成为近年来众多学者研究的热点^[2]. 丛枝菌根真菌 (arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) 作为一类与植物共生的微生物, 在植被恢复中具有重要作

收稿日期: 2011-02-24; 修订日期: 2011-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(31170567); 国家长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1035)

作者简介: 封晔(1981~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为根际微生物生态, E-mail: fengye198108@163.com

* 通讯联系人, E-mail: tangm@nwsuaf.edu.cn

用. 研究表明, AMF 能够减少养分损失, 促进土壤营养物质循环和利用, 稳定和改良土壤结构, 影响种群结构和植物群落演替以及维持物种多样性^[3~9]. 目前, 针对黄土高原植物根际微生物群落多样性的研究已有报道^[10~12], 但是对于具有独特自然环境条件的六道沟流域植物根际微生物生态多样性的研究却鲜见报道. 同时, 在同一流域内自然环境相近的情况下, 植物种类和根际环境对根际微生物群落结构的影响及根际微生物之间的相互作用也亟待研究. 本研究采用末端限制性片段长度多态性 (terminal-restriction fragment length polymorphism, T-RFLP) 分析方法对神木县六道沟流域 8 种植物根际 AMF 与细菌群落进行分析, 初步揭示植物根际 AMF 与细菌多样性间的关系, 了解影响根际微生物群落结构的因素, 以期为黄土高原水蚀风蚀交错带的农业生产、植被恢复和土地合理利用等提供一定的科学依据.

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 研究地概况

采样地为陕西省神木县六道沟小流域, 地处黄

土高原半干旱草原与荒漠草原的过渡地带. 东经 110°20′~110°23′, 北纬 38°46′~48°51′, 海拔 1 081~1 274 m, 流域面积 6.89 km², 年降雨量 437.4 mm. 土壤类型为绵沙土和沙黄土, 植被类型为干旱草原, 沙棘、沙柳、柠条以及沙蒿等灌木、半灌木是该地区主要植被^[13].

1.1.2 样品采集

2008 年 5 月在神木县六道沟流域采集柠条 (*Caragana microphylla* Kom.)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia* Linn.)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides* Linn.)、紫穗槐 (*Amorpha fruticosa* Linn.)、沙柳 (*Salix psammophila* C. Wang et Chang Y. Yang)、垂柳 (*Salix babylonica* Linn.)、小叶杨 (*Populus simonii* Carr.) 和榆树 (*Ulmus pumila* Linn.) 根系及根际土, 每个树种为一个处理, 共 8 个处理. 每个处理随机选取 5 棵树, 每棵按东西南北分别取 4 份土样 (各 50 g), 将 20 份 (约 1 kg) 土样充分混合后作为该树种测定土样, 然后将每个测定土样设置 3 个重复进行测定, 土样基本性质见表 1. 取样时除去土壤表层动植物残体后, 在 0~20 cm 深的土壤中采集植物根系, 轻轻抖落附在根上的土壤, 剪取带有细根的根系, 将根系和根际土一同装入塑料袋中密封带回, -20℃ 保存待用.

表 1 采样点土壤基本性质

Table 1 Soil parameters of sampling plots

编号	宿主植物	全氮/g·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹	pH	有机质/g·kg ⁻¹
1	柠条 <i>C. microphylla</i>	0.65 ± 0.02	2.58 ± 0.04	70.13 ± 1.01	8.04 ± 0.05	8.54 ± 0.54
2	刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	1.13 ± 0.06	2.58 ± 0.05	196.97 ± 1.63	7.68 ± 0.02	11.30 ± 0.92
3	沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	0.41 ± 0.02	4.91 ± 0.10	50.61 ± 1.38	8.01 ± 0.02	8.90 ± 1.17
4	紫穗槐 <i>A. fruticosa</i>	0.50 ± 0.01	4.44 ± 0.04	89.68 ± 0.86	7.95 ± 0.04	8.11 ± 0.82
5	沙柳 <i>S. psammophila</i>	0.30 ± 0.03	2.30 ± 0.07	89.63 ± 0.38	7.64 ± 0.03	9.58 ± 0.82
6	垂柳 <i>S. babylonica</i>	0.98 ± 0.05	5.84 ± 0.05	235.38 ± 1.13	7.81 ± 0.05	8.51 ± 1.36
7	小叶杨 <i>P. simonii</i>	0.48 ± 0.02	4.17 ± 0.06	167.52 ± 0.83	7.91 ± 0.02	9.13 ± 0.66
8	榆树 <i>U. pumila</i>	1.33 ± 0.04	3.51 ± 0.04	147.99 ± 1.63	7.91 ± 0.04	8.45 ± 1.08

1.2 T-RFLP 分析

1.2.1 总 DNA 的提取和纯化

在土样中各称取 10 g 土壤样品, 采用 Zhou 等^[14]的方法提取土壤总 DNA.

总 DNA 采用北京百泰克公司的快捷型琼脂糖凝胶 DNA 回收试剂盒 (型号: DP1702) 进行纯化.

1.2.2 PCR 扩增

细菌和真菌的正向引物 5′端都用 6-FAM 荧光素标记.

细菌采用通用引物 27F (AGAGTTTGATCCTGG CTCAG) 和 1492R (GGTTACCTTGTTACGACTT) 扩

增 16S rDNA; AMF 采用设计引物 AM1 (GTTTCCCC TAAAGGCGCCGAA) 和 NS31 (TTGGAGGGCAAGT CTGGTGCC) 扩增 18S rDNA^[15], 引物均由大连宝生物公司合成.

20 μL 的混合反应体系中包括 2 μL 模板 DNA, 2 μL 10 × buffer, 1.2 μL 25 mmol·L⁻¹ MgCl₂, 1.6 μL dNTP 混合物 (各 2.5 mmol·L⁻¹), 10 pmol·μL⁻¹ 引物各 0.5 μL 和 0.2 μL *Taq* DNA 聚合酶 (5 U·μL⁻¹ 大连宝生物公司). 细菌 PCR 反应条件: 94℃ 4 min, 94℃ 30 s, 50℃ 30 s, 72℃ 2 min, 30 个循环, 72℃ 延伸 7 min. AMF PCR 反应条件: 94℃ 2 min, 94℃ 45

s, 65℃ 1 min, 72℃ 45 s, 30 个循环, 72℃ 延伸 7 min.

PCR 扩增结果用 1.0% 琼脂糖凝胶电泳检验, 并用 DNA 纯化试剂盒纯化.

1.2.3 酶切反应

纯化后的细菌 PCR 产物采用 *Hha* I 酶切; AMF 的 PCR 产物采用 *Mbo* I 酶切. 反应体系为 20 μ L, 包括 1 μ L 限制性内切酶, 2 μ L 10 $\times$ buffer, 7 μ L ddH₂O 和 10 μ L PCR 产物. 混匀后 37℃ 酶切 4 h, 然后 65℃ 15 min 使酶失活. 酶切产物的基因扫描由上海基康生物技术有限公司完成. 对样品中荧光标记的片段用 ABI 3130 型遗传分析仪 (Applied Biosystems, 美国) 进行分离, 内标为 liz500. 基因扫描结果分析软件为 ABI PRISM GeneScan Analysis Software (Version 3.7).

1.3 群落多样性分析

以图谱中每一个限制性片段 (T-RF) 为一个 OTU (operational taxonomic unit), 测定 OTU 数目即为物种丰富度指数 (S), 峰高值低于 100 荧光单位的峰不予考虑. 根据丰富度指数 (S) 和相对峰高值 (P_i) 测定 Shannon 多样性指数 (H) 和均匀度指数 (E)^[16].

相对峰高值 (P_i): $P_i = n_i / N$

Shannon 指数 (H): $H = - \sum P_i \ln P_i$

均匀度指数 (E): $E = H / \ln S$

式中, n_i 为第 i 个 T-RF 峰值, N 为该样品所有累计峰高.

数据采用 EXCEL (2003)、SPSS (V17.0) 和 DPS (7.05) 软件进行统计分析.

1.4 RDA 分析 (Redundancy Analysis)

采用 Canoco (Version 4.5) 软件对环境因子和树种与群落多样性的关系进行 RDA 分析.

2 结果与分析

2.1 8 种植物根际细菌多样性研究

经过基因扫描得到 *Hha* I 酶切的 T-RFLP 图谱 (图 1). 从图 1 可以看出, 8 种植物根际细菌的酶切图谱中有较多峰, 且峰值存在较大差异, 说明了 8 种植物根际细菌种类多但数量和大小表现出一定差异. 其中每种植物都有优势峰, 8 种植物共有的优势峰的末端限制性片段 (T-RF) 主要有 36、38、39、87 和 102 bp, 可见 8 种植物根际细菌间至少存在 5 种相同种类. 根据其末端限制性片段的数目及相对峰高值, 分别计算 8 个样品细菌的丰富度指数、Shannon 指数和均匀度指数 (表 2). 表 2 中刺槐根际细菌的丰富度指数和 Shannon 指数最高, 达到 91 和 4.01, 除沙棘的丰富度指数外, 均显著高于其他植物的多样性指数 ($P < 0.05$). 垂柳的多样性指数最低, 除了与沙柳 Shannon 的指数差异不显著以外, 多样性指数显著低于其他植物 ($P < 0.05$); 其次为垂柳, 其多样性指数与沙柳相差不大; 其他 5 种植物的多样性指数之间也存在一定的差异. 可见在六道沟流域内树种的差异对根际细菌的多样性产生一定影响.

表 2 8 种植物根际细菌多样性¹⁾

Table 2 Bacterial diversity indices in the rhizosphere of eight plants

编号	宿主植物	丰富度指数 (S)	Shannon 指数 (H)	均匀度指数 (E)
1	柠条 <i>C. microphylla</i>	73bc	2.61bc	0.61bc
2	刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	91a	4.01a	0.89a
3	沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	82ab	2.74bc	0.62bc
4	紫穗槐 <i>A. fruticosa</i>	67c	2.76bc	0.66b
5	沙柳 <i>S. psammophila</i>	56d	2.46cd	0.61bc
6	垂柳 <i>S. babylonica</i>	52d	2.18d	0.55c
7	小叶杨 <i>P. simonii</i>	72bc	2.92b	0.68b
8	榆树 <i>U. pumila</i>	80b	2.53c	0.58bc

1) 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

为了进一步研究树种对根际细菌多样性的影响, 采用 DPS 软件对 8 种植物根际细菌多样性做聚类分析, 每个不同的 T-RF 为一个变量, 采用加权聚类分析, 按照 Blackwood 等^[17] 的方法进行计算, 结果见图 2(a). 图 2(a) 可以看出, 柠条和榆树、紫穗槐和沙柳、刺槐和小叶杨根际细菌的多样性分别聚在一起, 说明以上 3 组植物根际细菌群落结构相似

度高. 柠条、榆树根际细菌群落多样性和其他植物的距离最远, 说明这 2 种植物与其他植物根际细菌群落结构差异最大; 其次为紫穗槐和沙柳, 而其他 4 种植物间差异相对较小. 表明植物种类对根际细菌的多样性有影响, 但不同植物种类的根际细菌多样性之间也存在一定相似性.

2.2 8 种植物根际 AMF 多样性研究

经过基因扫描得到 *Mbo* I 酶切的 T-RFLP 图谱 (图 3). 从中可以看出 8 种植物也存在较多峰, 但是优势峰的数量较细菌少. 其共有优势峰的 T-RF 主

要有 36、39 和 57 bp, 可见 8 种植物根际也存在相同种类的 AMF. 8 种植物之间根际 AMF 多样性指数存在差异性, 其中小叶杨的丰富度和 Shannon 指数

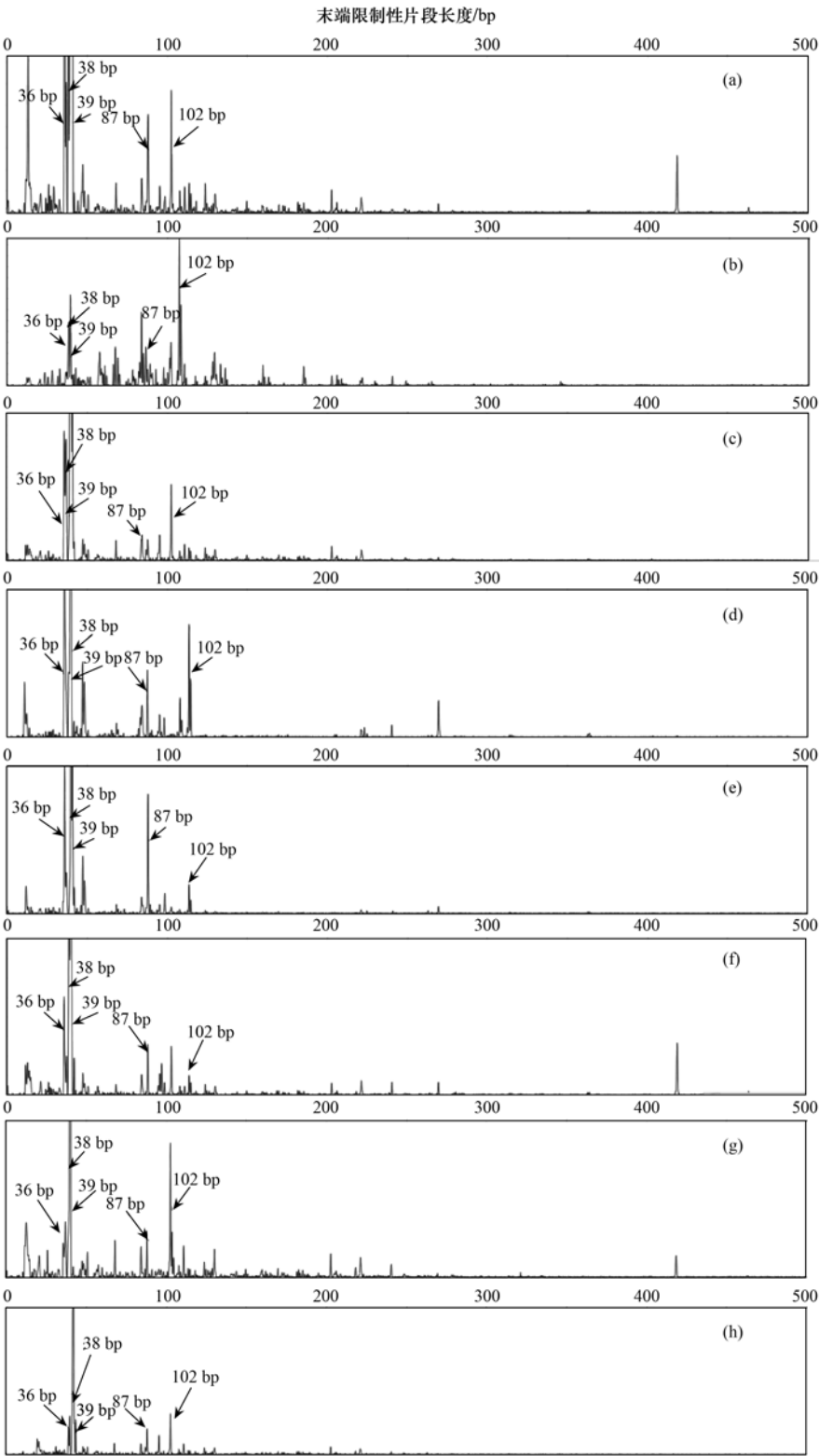
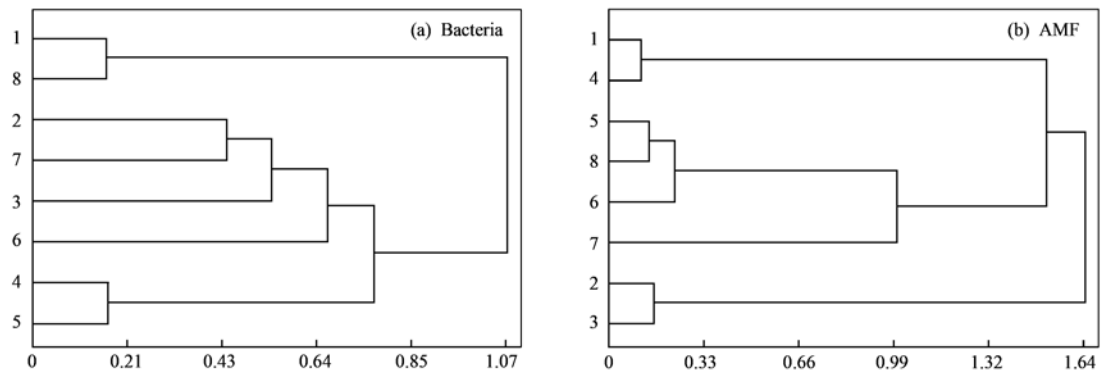


图 1 8 个样品 *Hha* I 酶切的 T-RFLP 图谱
Fig. 1 T-RFLP profile of eight samples by *Hha* I



1. 柠条; 2. 刺槐; 3. 沙棘; 4. 紫穗槐; 5. 沙柳; 6. 垂柳; 7. 小叶杨; 8. 榆树

图 2 8 个样品多样性聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of eight samples' community diversity

最高,达到 46 和 2.07 ($P < 0.05$),其次为刺槐;沙棘的丰富度和 Shannon 指数仅为 14 和 1.21 (表 3),显著低于其他 7 种植物 ($P < 0.05$),说明植物种类的差异对根际 AMF 群落多样性有影响。

表 3 8 种植物根际 AMF 多样性

Table 3 AMF diversity indices in the rhizosphere of eight plants

编号	宿主植物	丰富度指数(S)	Shannon 指数(H)	均匀度指数(E)
1	柠条 <i>C. microphylla</i>	24d	1.43de	0.46cd
2	刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	36b	1.79c	0.50cd
3	沙棘 <i>H. rhamnoides</i>	14e	1.21f	0.43d
4	紫穗槐 <i>A. fruticosa</i>	15e	1.44d	0.56ab
5	沙柳 <i>S. psammophila</i>	21de	1.38e	0.46cd
6	垂柳 <i>S. babylonica</i>	30c	1.86b	0.55ab
7	小叶杨 <i>P. simonii</i>	46a	2.07a	0.62a
8	榆树 <i>U. pumila</i>	37b	1.86b	0.52bc

图 2(b)中,聚类分析结果表明:柠条和紫穗槐、沙柳和榆树、刺槐和沙棘根际 AMF 的多样性分别聚在一起,说明以上 3 组植物根际 AMF 群落结构相似。垂柳和小叶杨与这 3 组植物距离较远且 3 组植物之间的距离都较大,说明植物种类对根际的 AMF 多样性总体影响大。

2.3 AMF 与细菌的相关性分析

根据 8 种植物的丰富度指数、Shannon 指数和均匀度指数对细菌和 AMF 的多样性做相关性分析,结果显示 8 种植物根际细菌和 AMF 的多样性指数总体呈极显著正相关($r = 0.899$, $P < 0.01$)。

2.4 环境因子和树种与群落多样性的关系

采用 RDA 方法分析了环境因子与根际微生物群落多样性系数的关系[图 4(a)]。可以看出,在所有的环境变量中,对根际微生物群落多样性影响最大的是有机质,其次是 pH、全氮,而速效磷和速效钾的影响较低。有机质和全氮含量与细菌和 AMF 的丰富度指数、Shannon 指数和均匀度指数都呈正相关,且与细菌多样性的相关性排序为:均匀度指数 >

Shannon 指数 > 丰富度指数,与 AMF 多样性的相关性排序为:丰富度指数 > 均匀度指数 $\approx$ Shannon 指数。而 pH 除了与细菌的丰富度指数呈正相关以外,与细菌均匀度指数和 Shannon 指数以及 AMF 的均匀度指数、Shannon 指数、丰富度指数都呈负相关,且相关性都低于有机质和全氮。综上所述,有机质和全氮对根际微生物群落多样性影响较大。

采用 RDA 方法分析了采样点(树种)与根际微生物群落多样性系数的关系[图 4(b)]。从中可见,沿第一轴从左到右形成了细菌和 AMF 群落多样性系数逐渐增高的趋势。其中,采样点 4、5、6(刺槐)和 22、23、24(榆树)对应的细菌均匀度系数和 Shannon 指数最高,采样点 16、17(垂柳)和 13、15(沙柳)最低,其他采样点差距不大;而采样点 1、2、3(柠条)对应的细菌丰富度指数最高,其次为采样点 22、23、24(榆树)和 4、5、6(刺槐),最低的为采样点 16、17(垂柳)。结果可见,刺槐和榆树根际细菌群落多样性较高,垂柳较差,而其他树种之间差距不大。图 4 中

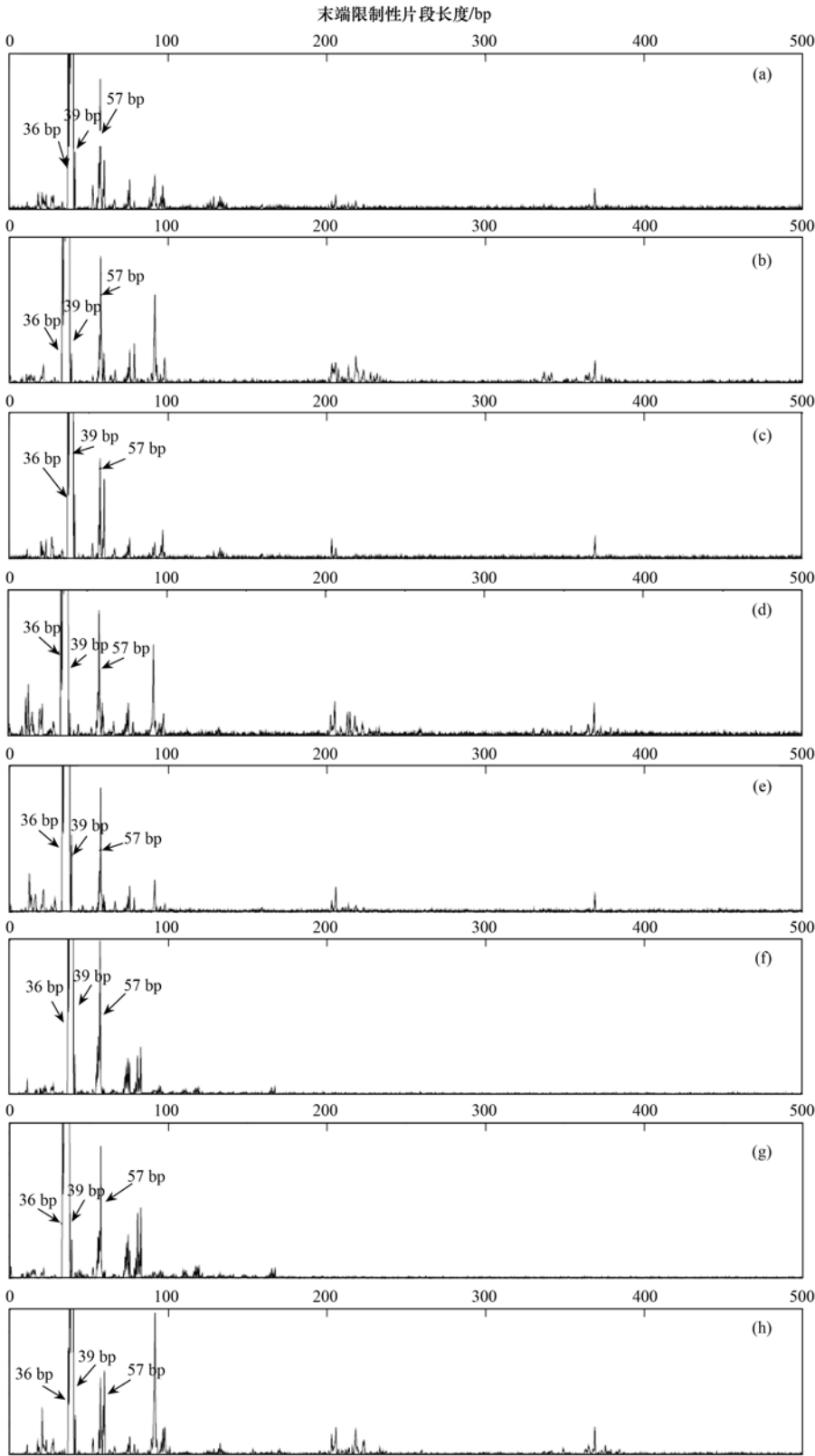
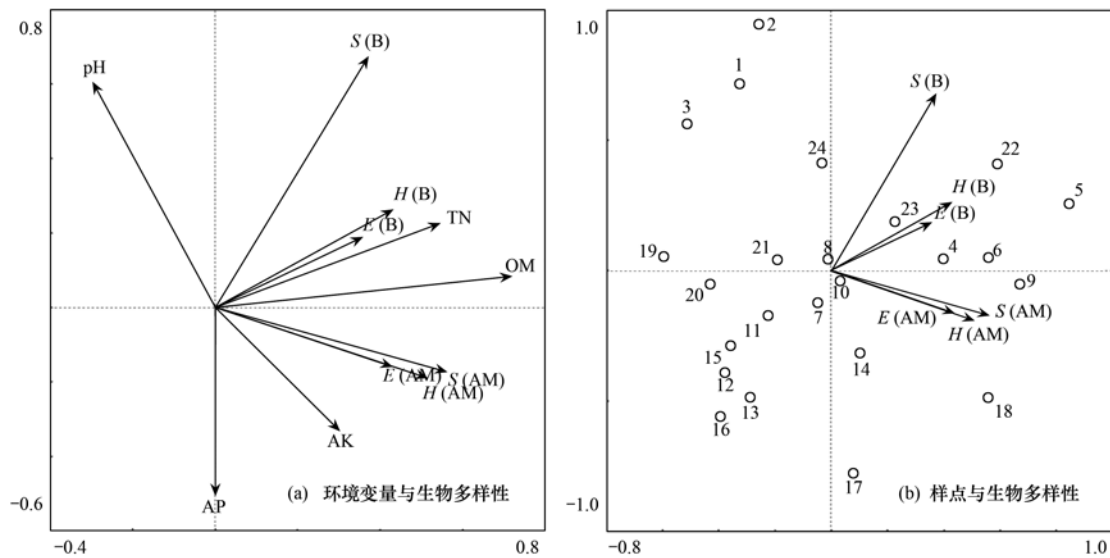


图 3 8 个样品 *Mbo* I 酶切的 T-RFLP 图谱
Fig. 3 T-RFLP profile of eight samples by *Mbo* I

采样点 4、5、6 (刺槐) 根际 AMF 均匀度系数、Shannon 指数、丰富度指数最高,其次为 17、18 (垂柳),采样点 1、2、3 (柠条) 最低,可见刺槐和垂柳根际 AMF 群落多样性较高,柠条较差. 综合



TN:全氮; AP:速效磷; AK:速效钾; OM:有机质; E:均匀度系数; H:Shannon 指数; S:丰富度指数; B:细菌; AM:真菌; 1~24 表示样点及对应树种,其中 1~3 为柠条,4~6 为刺槐,7~9 为沙棘,10~12 为紫穗槐,13~15 为为沙柳,16~18 为垂柳,19~21 为小叶杨,22~24 为榆树

图 4 RDA 分析结果

Fig. 4 Results of redundancy analysis

所述,树种不同,根际细菌和 AMF 群落多样性有较大差异。

3 讨论

根际微生物活性及群落结构的变化能够敏感地反映出植物和土壤质量,是评价土壤生态系统的重要指示因子^[18]。本研究表明,8 种植物根际细菌种类丰富,数量较大,不同植物间的根际细菌丰富度存在一定差异;该流域刺槐根际细菌的多样性系数最高,可能是因为刺槐有较强的固土作用,使土壤的结构更加稳定,从而提高根际细菌多样性。杜小刚等^[11]也认为刺槐能更好地提高根际土壤的团聚能力,降低 pH;聚类分析结果表明,植物种类对根际细菌的多样性有影响,说明其对宿主植物有一定的专一性,这与 Roesti 等^[19]的研究结果一致,但 Miniaci 等^[20]发现宿主植物并不是影响细菌群落的最主要因素。8 种植物之间根际 AMF 多样性指数存在差异性,聚类分析也表明植物种类对根际 AMF 多样性也有一定影响,但部分植物之间的根际 AMF 群落多样性相似度高,说明这些宿主植物对 AMF 群落没有严格的专一性。Börstler^[21]和 Panwar^[22]等通过实验均发现宿主植物是影响 AMF 群落的决定因素,而 Oehl^[23]和 Li^[24]等发现环境和土壤条件比起宿主植物对 AMF 群落影响更大。RDA 分析结果也表明植物物种不同,对应的细菌群落多样性和 AMF 群落

多样性有较大差异,进一步证明了宿主植物对根际微生物群落结构多样性的影响。Zak 等^[25]采用 PLFA 法研究发现植被种类数量与土壤微生物群落结构相关性显著。可见,宿主植物对根际微生物的群落结构多样性都有影响,但同时也呈现了一定的相似性。可能的原因是不同的植物物种形成了独特的根际环境,进而影响了根际微生物的多样性,使微生物多样性与宿主植物呈现一定的专一性,但是某些不同植物物种之间的根际环境是相似的,使根际微生物多样性呈现相似性。

对神木县六道沟流域 8 种植物根际细菌和 AMF 多样性的相关性分析结果表明,8 种植物根际细菌和 AMF 多样性指数总体呈极显著正相关。杜小刚等^[11]发现 AMF 能显著增强刺槐根际细菌群落的稳定性;Zhang 等^[15]实验证明了沙棘和柠条根际细菌和 AMF 呈显著正相关;Singh 等^[26]发现 AMF 是决定细菌群落的主要因素。可见根际细菌和 AMF 之间存在相互影响作用。但 Pivato 等^[27]指出仅有部分细菌对 AMF 群落的变化有响应;Cavagnaro 等^[28]发现 AMF 对氨氧化细菌群落没有影响,这可能与环境中 NH_4^+ 的浓度有关,或者是 AMF 使土壤中的氮矿化作用发生改变^[29]。说明根际细菌和 AMF 之间的相互作用可能受到细菌种类的影响。根际是一个复杂的环境,AMF 对根际细菌的影响可能是 AMF 本身分泌物的直接或间接作用,或通过影响宿主植物

的生长,改变根系分泌物的种类和数量,从而影响到根际细菌的多样性。

在各种环境因子中,有机质和全氮对群落多样性影响较大,因为养分含量增加,可以为土壤微生物提供丰富的营养物质,增加微生物活性。卜洪震等^[30]发现不同施肥处理对土壤微生物量碳和微生物多样性有着重要影响,使用肥料后能够促进土壤微生物的活性。杨鑫等^[31]也发现土壤总氮和有机质含量最高的次生林其土壤细菌多样性最高。赵金莉等^[32]发现 AMF 侵染的植物可以明显改变土壤中营养状况,特别是速效 N,其次是有有机质。可见有机质和全氮与微生物群落多样性的关系较为密切。

各种环境变化会对土壤微生物产生或多或少的的影响。通过研究土壤微生物群落动态变化,也就为了解生态系统的土壤健康状况和植被发育阶段提供了可能。本研究对六道沟流域植物根际的微生物群落多样性进行了分析,初步揭示了该地区植物根际土壤微生物的生态现状。同时,因为生物修复特别是 AMF 技术对退化地区生态恢复具有十分显著的效果^[5],也为该地区的生态修复提供了可行性的方法和理论。

4 结论

(1) 8 种植物根际细菌和 AMF 种类多但数量和大小均表现出一定差异,且细菌和 AMF 的多样性指数总体呈极显著的正相关($P < 0.01$)。

(2) 不同植物根际细菌和 AMF 的群落结构有较大差异,但同时有部分植物间也存在相似性,宿主植物对根际微生物的群落结构多样性有影响。

(3) 在各种环境因子中,有机质和全氮对群落多样性影响较大。

(4) 刺槐根际细菌和 AMF 群落多样性指数均较高,可以作为黄土高原植被恢复的先锋树种。

参考文献:

- [1] 唐克丽. 黄土高原水蚀风蚀交错带小流域治理模式探讨[J]. 水土保持研究, 1996, **3**(4): 46-55.
- [2] 王盛萍, 张志强, 张化永, 等. 黄土高原防护林建设的恢复生态学与生态水文学基础[J]. 生态学报, 2010, **30**(9): 2475-2483.
- [3] Van Der Heijden M G A, Klironomos J N, Ursic M, et al. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity [J]. Nature, 1998, **396**(5): 69-72.
- [4] Van Der Heijden M G A. Mycorrhizal fungi reduce nutrient loss from model grassland ecosystems [J]. Ecology, 2010, **91**(4): 1163-1171.
- [5] Bothe H, Turnau K, Regvar M. The potential role of arbuscular mycorrhizal fungi in protecting endangered plants and habitats [J]. Mycorrhiza, 2010, **20**(7): 445-457.
- [6] Van Der Heijden M G A, Streitwolf-Engel R, Riedl R, et al. The mycorrhizal contribution to plant productivity, plant nutrition and soil structure in experimental grassland [J]. New Phytologist, 2006, **172**(4): 739-752.
- [7] Leigh J, Hodge A, Fitter A H. Arbuscular mycorrhizal fungi can transfer substantial amounts of nitrogen to their host plant from organic material [J]. New Phytologist, 2009, **181**(1): 199-207.
- [8] 彭思利, 申鸿, 郭涛. 接种丛枝菌根真菌对土壤水稳性团聚体特征的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2010, **16**(3): 695-700.
- [9] Stevens K J, Wall C B, Janssen J A. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on seedling growth and development of two wetland plants, *Bidens frondosa* L., and *Eclipta prostrata* (L.) L., grown under three levels of water availability [J]. Mycorrhiza, 2010, **21**(4): 279-288.
- [10] 张海涵, 唐明, 陈辉. 黄土高原典型林木根际土壤微生物群落结构与功能特征及其环境指示意义 [J]. 环境科学, 2009, **30**(8): 2432-2437.
- [11] 杜小刚, 唐明, 陈辉, 等. 黄土高原不同树龄刺槐丛枝菌根与根际微生物的群落多样性 [J]. 林业科学, 2008, **44**(4): 78-82.
- [12] 刘永俊, 郑红, 何雷, 等. 柠条根系中丛枝菌根真菌的季节性变化及影响因素 [J]. 应用生态学报, 2009, **20**(5): 1085-1091.
- [13] 王云强, 张兴昌, 李顺姬, 等. 小流域土壤矿质氮与地形因子的关系及其空间变异性研究 [J]. 环境科学, 2007, **28**(7): 1567-1572.
- [14] Zhou J Z, Bruns M A, Tiedje J M. DNA recovery from soils of diverse composition [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1996, **62**(2): 316-322.
- [15] Zhang H Q, Tang M, Chen H, et al. Communities of arbuscular mycorrhizal fungi and bacteria in the rhizosphere of *Caragana korshinskii* and *Hippophae rhamnoides* in Zhifanggou watershed [J]. Plant and Soil, 2010, **326**(1-2): 415-424.
- [16] 余素林, 吴晓磊, 钱易. 环境微生物群落分析的 T-RFLP 技术及其优化措施 [J]. 应用与环境生物学报, 2006, **12**(6): 861-868.
- [17] Blackwood C B, Marsh T, Kim S H, et al. Terminal restriction fragment length polymorphism data analysis for quantitative comparison of microbial communities [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, **69**(2): 926-932.
- [18] 滕应, 黄昌勇, 骆永明, 等. 铅锌银尾矿区土壤微生物活性及其群落功能多样性研究 [J]. 土壤学报, 2004, **41**(1): 113-119.
- [19] Roesti D, Gaur R, Johri B N, et al. Plant growth stage, fertiliser management and bio-inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting rhizobacteria affect the rhizobacterial community structure in rain-fed wheat fields [J]. Soil Biology

- and Biochemistry, 2006, **38**(5): 1111-1120.
- [20] Miniaci C, Bunge M, Duc L, *et al.* Effects of pioneering plants on microbial structures and functions in a glacier forefield [J]. Biology and Fertility of Soils, 2007, **44**(2): 289-297.
- [21] Börstler B, Renker C, Kahmen A, *et al.* Species composition of arbuscular mycorrhizal fungi in two mountain meadows with differing management types and levels of plant biodiversity [J]. Biology and Fertility of Soils, 2006, **42**(4): 286-298.
- [22] Panwar J, Tarafdar J C. Arbuscular mycorrhizal fungal dynamics under *Mitragyna parvifolia* (Roxb.) Korth. in Thar Desert [J]. Applied Soil Ecology, 2006, **34**(2-3): 200-208.
- [23] Oehl F, Laczko E, Bogenrieder A, *et al.* Soil type and land use intensity determine the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, **42**(5): 724-738.
- [24] Li L F, Li T, Zhang Y, *et al.* Molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi and their distribution patterns related to host-plants and habitats in a hot and arid ecosystem, southwest China [J]. FEMS Microbial Ecology, 2010, **71**(3): 418-427.
- [25] Zak D R, Holmes W E, White D C, *et al.* Plant diversity, soil microbial communities, and ecosystem function: are there any links? [J]. Ecology, 2003, **84**(8): 2042-2050.
- [26] Singh B K, Nunan N, Ridgway K P, *et al.* Relationship between assemblages of mycorrhizal fungi and bacteria on grass roots [J]. Environmental Microbiology, 2008, **10**(2): 534-541.
- [27] Pivato B, Offre P, Marchelli S, *et al.* Bacterial effects on arbuscular mycorrhizal fungi and mycorrhiza development as influenced by the bacteria, fungi, and host plant [J]. Mycorrhiza, 2009, **19**(2): 81-90.
- [28] Cavagnaro T R, Jackson L E, Scow K M, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizas on ammonia oxidizing bacteria in an organic farm soil [J]. Microbial Ecology, 2007, **54**(4): 618-626.
- [29] Hodge A, Campbell C D, Fitter A H. An arbuscular mycorrhizal fungus accelerates decomposition and acquires nitrogen directly from organic material [J]. Nature, 2001, **413**(6853): 297-299.
- [30] 卜洪震, 王丽宏, 尤金成, 等. 长期施肥管理对红壤稻田土壤微生物量碳和微生物多样性的影响 [J]. 中国农业科学, 2010, **43**(16): 3340-3347.
- [31] 杨鑫, 曹靖, 董茂星, 等. 外来树种日本落叶松对森林土壤质量及细菌多样性的影响 [J]. 应用生态学报, 2008, **19**(10): 2109-2116.
- [32] 赵金莉, 贺学礼. 毛乌素沙地克隆植物生长对 AM 真菌多样性和菌根形成的影响 [J]. 生态学报, 2010, **30**(5): 1349-1355.

CONTENTS

Air Pollutant Emissions of Aircraft in China in Recent 30 Years	HE Ji-cheng (1)
Study on the <i>in-situ</i> Measurement of Atmospheric CH ₄ and CO by GC-FID Method at the Shangdianzi GAW Regional Station	WANG Wei, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (8)
Reconstructed Ambient Light Extinction Coefficient and Its Contribution Factors in Beijing in January, 2010	ZHU Li-hua, TAO Jun, CHEN Zhong-ming, <i>et al.</i> (13)
Atmospheric Deposition of Polychlorinated Naphthalenes in Dongjiang River Basin of Guangdong Province	WANG Yan, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (20)
Metabolic Characteristics of Air Microbial Communities from Sandstorm Source Areas of the Taklamakan Desert ...	DUAN Wei-wei, LOU Kai, ZENG Jun, <i>et al.</i> (26)
Mechanisms of UV Photodegradation on Performance of a Subsequent Biofilter Treating Gaseous Chlorobenzene ...	WANG Can, XI Jin-ying, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (32)
Distribution of Dissolved Organic Carbon in the Bohai Sea and Yellow Sea in Spring	DING Yan-yan, ZHANG Chuan-song, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (37)
Research on the Mercury Species in Jiaozhou Bay in Spring	XU Liao-qi, LIU Ru-hai, WANG Jin-yu, <i>et al.</i> (42)
Geochemistry of Surface and Ground Water in the Lijiang Basin, Northwest Yunnan	PU Tao, HE Yuan-qing, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> (48)
Variations in Depth and Chemistry of Groundwater in Interval of Water Delivery at the Lower Tarim River	CHEN Yong-jin, LI Wei-hong, DONG Jie, <i>et al.</i> (55)
Simulation on Contamination Forecast and Control of Groundwater in a Certain Hazardous Waste Landfill	MA Zhi-fei, AN Da, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i> (64)
Research on Evaluation of Water Quality of Beijing Urban Stormwater Runoff	HOU Pei-qiang, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (71)
Characterization and Source Apportionment of Pollutants in Urban Roadway Runoff in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (76)
Applied Study of the Submerged Macrophytes Bed-Immobilized Bacteria in Drinking Water Restoration	CHEN Qi-chun, LI Zheng-kui, WANG Yi-chao, <i>et al.</i> (83)
Catalytic Hydrodechlorination of 2,4-Dichlorophenol over Pd/TiO ₂	ZHANG Yin, SHAO Yun, CHEN Huan, <i>et al.</i> (88)
Effects of pH Value on the Adsorption and Degradation of 2,4-DCP by Nanoscale Zero-Valent Iron	FENG Li, GE Xiao-peng, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (94)
Inactivation of the Chlorine-resistant Bacteria Isolated from the Drinking Water Distribution System	CHEN Yu-qiao, DUAN Xiao-di, LU Pin-pin, <i>et al.</i> (104)
Risk Assessment of the Farmland and Water Contamination with the Livestock Manure in Anhui Province	SONG Da-ping, ZHUANG Da-fang, CHEN Wei (110)
Analysis of Membrane Fouling Genesis in Nanofiltration Process for Advanced Treatment of Dyeing and Finishing Wastewater	CAO Xiao-bing, LI Tao, ZHOU Lü, <i>et al.</i> (117)
Experimental Research on Combined Water and Air Backwashing Reactor Technology for Biological Activated Carbon	XIE Zhi-gang, QIU Xue-min, ZHAO Yan-ling (124)
Impacts of pH and Surfactants on Adsorption Behaviors of Norfloxacin on Marine Sediments	PANG Hui-ling, YANG Gui-peng, GAO Xian-chi, <i>et al.</i> (129)
Adsorption Characteristic and Form Distribution of Silicate in Lakes Sediments	LÜ Chang-wei, CUI Meng, GAO Ji-mei, <i>et al.</i> (135)
Adsorption of Methylene Blue from Water by the Biochars Generated from Crop Residues	XU Ren-kou, ZHAO An-zhen, XIAO Shuang-cheng, <i>et al.</i> (142)
Adsorption and Desorption of Dyes by Waste-Polymer-Derived Activated Carbons	LIAN Fei, LIU Chang, LI Guo-guang, <i>et al.</i> (147)
Study on the Sorption Behavior of Tetracycline onto Activated Sludge	CHEN Rui-ping, ZHANG Li, YU Jie, <i>et al.</i> (156)
<i>In situ</i> Experimental Research on Natural Attenuation of Oil Pollutants in a Gas Station	JIA Hui, WU Xiao-feng, HU Li-ming, <i>et al.</i> (163)
Influence and Assessment of Biochar on the Bioavailability of Chlorobenzenes in Soil	SONG Yang, WANG Fang, YANG Xing-lun, <i>et al.</i> (169)
Control for MUCT Process Operation Using Nitrate Concentration in the Secondary Anoxic Zone	WANG Xiao-ling, JIN Yun, GAO Shang (175)
Modeling Formation of Aerobic Granule and Influence of Hydrodynamic Shear Forces on Granule Diameter	DONG Feng, ZHANG Han-min, YANG Feng-lin (181)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) on Municipal Sewage Sludge Bioleaching Continuous Plug Flow Reaction System	LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (191)
Biological Phosphorus Removal in Intermittent Aerated Biological Filter	ZENG Long-yun, YANG Chun-ping, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (197)
Methane Production by Anaerobic Co-digestion of Chicken Manure and <i>Spartina alterniflora</i> Residue After Producing Methane	CHEN Guang-yin, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, <i>et al.</i> (203)
Uncertainty Analysis for Evaluating Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfill in Beijing	CHEN Cao-cao, LIU Chun-lan, LI Zheng, <i>et al.</i> (208)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cells Enhanced by Additional Enzyme	YANG Hui, LIU Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (216)
Construction of Electrochemiluminescence System for Harmful Algae Detection	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (222)
Mechanism of the Inhibitory Action of Allelochemical Dibutyl Phthalate on Algae <i>Gymnodinium breve</i>	BIE Cong-cong, LI Feng-min, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (228)
Toxic Effects of Nano-TiO ₂ on <i>Gymnodinium breve</i>	LI Feng-min, ZHAO Wei, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (233)
Spatial Distribution of Three Endocrine Disrupting Chemicals in Sediments of the Suzhou Creek and Their Environmental Risks	LI Yang, HU Xue-feng, OH Kokyo, <i>et al.</i> (239)
Level, Distribution, and Source Identification of Polychlorinated Naphthalenes in Surface Agricultural Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, JIA Jin-pan, LI Yuan-cheng, <i>et al.</i> (247)
Heavy Metal Pollution in Street Dusts from Different Functional Zones of Luoyang City and Its Potential Ecological Risk	LIU De-hong, WANG Fa-yuan, ZHOU Wen-li, <i>et al.</i> (253)
Soil Contamination and Assessment of Heavy Metals of Xiangjiang River Basin	LIU Chun-zao, HUANG Yi-zong, LEI Ming, <i>et al.</i> (260)
Characteristics of Heavy Metals in Soil Profile and Pore Water Around Hechi Antimony-Lead Smelter, Guangxi, China	XIANG Meng, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (266)
Speciation Transformation and Behavior of Arsenic in Soils Under Anoxic Conditions	WU Xi, XU Li-ying, ZHANG Xue-xia, <i>et al.</i> (273)
Remediation of Chromium(VI) Contaminated Soils Using Permeable Reactive Composite Electrodes Technology	FU Rong-bing, LIU Fang, MA Jin, <i>et al.</i> (280)
Determination and Characterization on the Capacity of Humic Acid for the Reduction of Divalent Mercury	JIANG Tao, WEI Shi-qiang, LI Xue-mei, <i>et al.</i> (286)
Effect of Zn (II) on Microbial Activity in Anaerobic Acid Mine Drainage Treatment System with Biomass as Carbon Source	LI Shao-jie, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (293)
Diversity of Culturable Butane-oxidizing Bacteria in Oil and Gas Field Soil	ZHANG Ying, LI Bao-zhen, YANG Jin-shui, <i>et al.</i> (299)
Microbial Community Structure Analysis of Unexploited Oil and Gas Fields by PCR-DGGE	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (305)
Community Diversity of Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi in the Rhizosphere of Eight Plants in Liudaogou Watershed on the Loess Plateau China	FENG Ye, TANG Ming, CHEN Hui, <i>et al.</i> (314)
Dynamics of Degradation of Oxytetracycline of Pig and Chicken Manures in Soil and Mechanism Investigation	ZHANG Jian, GUAN Lian-zhu, YAN Li (323)
Influence of Impurities on Waste Plastics Pyrolysis: Products and Emissions	ZHAO Lei, WANG Zhong-hui, CHEN De-zhen, <i>et al.</i> (329)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年1月15日 33卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 1 Jan. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street , Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian) , P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行