

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源	梁林林, Guenter Engling, 段凤魁, 马永亮, 程远, 杜祯宇, 贺克斌 (3935)
北京大气 PM _{2.5} 与惰性 SiO ₂ 的生物毒性比较	刘梦娇, 黄艺, 文航, 邱国玉 (3943)
APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析	高庆先, 刘俊蓉, 王宁, 李文涛, 高文康, 苏布达 (3952)
2000 ~ 2014 年北京市 SO ₂ 时空分布及一次污染过程分析	程念亮, 张大伟, 李云婷, 陈添, 李金香, 董欣, 孙瑞雯, 孟凡 (3961)
利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因	周静博, 任毅斌, 洪纲, 路娜, 李治国, 李雷, 李会来, 靳伟 (3972)
长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟	张亮, 朱彬, 高晋徽, 康汉青, 杨鹏, 王红磊, 李月娥, 邵平 (3981)
珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征	刘建, 吴兑, 范绍佳 (3989)
春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成	李志林, 石晓勇, 张传松 (3999)
洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究	庞燕, 项颂, 储昭升, 薛力强, 叶碧碧 (4005)
大辽河主要污染源营养盐输入特征	马迎群, 张雷, 赵艳民, 秦延文, 潘晓雪, 曹伟, 刘志超, 杨晨晨 (4013)
三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析	张永生, 李海英, 任家盈, 卢佳 (4021)
不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究	李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 袁道先, 刘文, 张陶, 莫雪 (4032)
周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联	王逢武, 刘玮, 万娟娟, 杨嘉利, 刘雪梅, 向速林, 吴永红 (4043)
华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例	孔晓乐, 王仕琴, 赵焕, 袁瑞强 (4051)
某市典型地段地表水及地下水中氟喹诺酮类抗生素分布特征	崔亚丰, 何江涛, 苏思慧, 杨蕾, 乔肖刚 (4060)
乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征	贺惠, 甄毓, 米铁柱, 张玉, 付璐璐, 于志刚 (4068)
青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征	梁作兵, 沈立成, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 张媚, 廖昱, 谢正兰, 张远瞩 (4074)
多环芳烃在岩溶地下表层沉积物-水相的分配	蓝家程, 孙玉川, 肖时珍 (4081)
降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析	江泽利, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 任坤, 谢正兰, 张媚, 廖昱 (4088)
重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力	任坤, 梁作兵, 于正良, 张宇, 王蓉, 袁道先 (4095)
三峡水库消落带植物汞的分布特征	梁丽, 王永敏, 李先源, 唐振亚, 张翔, 张成, 王定勇 (4103)
物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响	王忍, 李大鹏, 黄勇, 刘焱见, 陈俊 (4112)
超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果	魏红, 史京转, 李佳霖, 李克斌, 赵琳, 韩凯 (4121)
载银活性炭活化过硫酸钠降解酸性橙 7	王忠明, 黄天寅, 陈家斌, 李文卫, 张黎明 (4127)
TiO ₂ 降解迪美唑的动力学及活性物质分析	陈冬梅, 喻泽斌, 孙蕾, 黄俊, 高丽红, 李明洁 (4135)
单宁酸铁吸附去除水中无机氮的性能与机制研究	张瑞娜, 李琳, 刘俊新 (4141)
间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 宋小燕, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (4148)
单级和两级串联臭氧-生物活性炭深度处理垃圾渗滤液比较研究	杜安静, 范举红, 刘锐, 邱松凯, 文晓刚, 陈吕军 (4154)
水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响	王会芳, 付昆明, 左早荣, 仇付国 (4161)
氨氮对 AOB 抑制的形态及规律	崔剑虹, 李祥, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵 (4168)
厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水	张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 沈耀良, 张婷 (4174)
同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征	冷璐, 信欣, 鲁航, 唐雅男, 万利华, 郭俊元, 程庆锋 (4180)
HCO ₃ ⁻ 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响	李祥, 陈宗姮, 黄勇, 袁怡, 刘忻, 张大林 (4189)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究	巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 李月寒, 王建芳, 徐乐中 (4195)
活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响	徐鑫, 濮文虹, 时亚飞, 虞文波, 张诗楠, 宋健, 张昊, 何姝, 杨昌柱, 杨家宽 (4202)
温度分化对 APBR 反应器性能及产甲烷菌群落的影响	谢海迎, 汪鑫, 李牧原, 阎叙西, 五十岚泰夫, 罗锋 (4208)
污染场地修复技术筛选方法及应用	白利平, 罗云, 刘俐, 周友亚, 颜增光, 李发生 (4218)
基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属综合风险评价与案例分析	杨阳, 代丹, 蔡怡敏, 陈卫平, 侯瑜, 杨锋 (4225)
大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价	张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝 (4232)
缙云山不同土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳氮的影响	李增全, 江长胜, 郝庆菊 (4241)
不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响	兰木岭, 高明 (4252)
生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征	杜毅飞, 方凯凯, 王志康, 李会科, 毛鹏娟, 张向旭, 王婧 (4260)
不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响	姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱 (4268)
组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究	朱维, 刘丽, 吴燕明, 周航, 邓贵友, 杨文骏, 彭佩钦, 曾敏, 廖柏寒 (4277)
水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响	王美娥, 彭驰, 陈卫平 (4283)
大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估	王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 王凡, 杨兴, 左一龙 (4291)
覆盖层甲烷氧化动力学和甲烷氧化菌群落结构	邢志林, 赵天涛, 高艳辉, 何芝, 杨旭, 彭绪亚 (4302)
阳极内添加阳离子交换树脂提升铝压“三合一”膜电极 MFC 性能	梅卓, 张哲, 王鑫 (4311)
应用基于单克隆抗体的免疫传感器检测环境中的茚和苯并茚	李鑫, 乔琰, 钟国祯 (4319)
《环境科学》征订启事 (4224) 《环境科学》征稿简则 (4318) 信息 (4080, 4173, 4290, 4301)	

生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征

杜毅飞¹, 方凯凯¹, 王志康¹, 李会科^{1,2*}, 毛鹏娟¹, 张向旭¹, 王婧¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 农业部西北植物与肥料及农业环境重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 传统的清耕果园土壤肥力持续下降, 而果园生草作为一种新兴的果园管理模式, 对改善果园土壤状况具有重要的作用。本试验利用 Biolog 微平板技术, 对苹果园清耕、苹果/白三叶间作、苹果/小冠花间作、苹果/鸡脚草间作这4种管理模式下土壤微生物群落功能多样性进行了研究, 探讨了果园不同生草条件下土壤微生物群落的碳源利用特征, 为揭示生草果园土壤生态学过程的驱动机制提供参考。结果表明, 不同处理的微生物群落功能多样性差异显著, 总体趋势为白三叶 > 小冠花 > 鸡脚草 > 清耕。相关性分析表明, 4个处理土壤微生物的平均颜色变化率 (average well color development, AWCD)、Shannon 指数、丰富度指数、McIntosh 指数与土壤有机碳、全氮、微生物量碳呈极显著正相关, Shannon 指数与 pH 呈显著正相关。主成分分析与碳代谢图谱分析表明: 生草处理提高了土壤微生物对碳源的利用能力, 其中豆科牧草白三叶与小冠花土壤微生物对糖类 (N-乙酰-D-葡萄糖胺、D-甘露醇、 β -甲基-D-葡萄糖苷)、氨基酸类 (甘氨酸-L-谷氨酸、L-丝氨酸、L-苏氨酸)、多聚物类 (吐温 40、肝糖) 的利用代谢能力显著高于清耕处理。可见, 生草处理与清耕处理土壤微生物群落形成了各自独特的群落结构与特点。

关键词: Biolog; 土壤微生物群落; 功能多样性; 生草果园

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-4260-08 DOI: 10.13227/j.hjx.2015.11.042

Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage

DU Yi-fei¹, FANG Kai-kai¹, WANG Zhi-kang¹, LI Hui-ke^{1,2*}, MAO Peng-juan¹, ZHANG Xiang-xu¹, WANG Jing¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agro-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: As soil fertility in apple orchard with clean tillage is declined continuously, interplanting herbage in orchard, which is a new orchard management model, plays an important role in improving orchard soil conditions. By using biolog micro-plate technique, this paper studied the functional diversity of soil microbial community under four species of management model in apple orchards, including clear tillage model, interplanting white clover model, interplanting small crown flower model and interplanting cocksfoot model, and the carbon source utilization characteristics of microbial community were explored, which could provide a reference for revealing driving mechanism of ecological process of orchard soil. The results showed that the functional diversity of microbial community had a significant difference among different treatments and in the order of white clover > small crown flower > cocksfoot > clear tillage. The correlation analysis showed that the average well color development (AWCD), Shannon index, Richness index and McIntosh index were all highly significantly positively correlated with soil organic carbon, total nitrogen, microbial biomass carbon, and Shannon index was significantly positively correlated with soil pH. The principal component analysis and the fingerprints of the physiological carbon metabolism of the microbial community demonstrated that grass treatments improved carbon source metabolic ability of soil microbial community, and the soil microbes with perennial legumes (White Clover and small crown flower) had a significantly higher utilization rate in carbohydrates (N-Acetyl-D-Glucosamine, D-Mannitol, β -Methyl-D-Glucoside), amino acids (Glycyl-L-Glutamic acid, L-Serine, L-Threonine) and polymers (Tween 40, Glycogen) than the soil microbes with clear tillage. It was considered that different treatments had the unique microbial community structure and peculiar carbon source utilization characteristics.

Key words: biolog; soil microbial community; functional diversity; orchard with interplanting herbage

果园生草栽培是欧美等果树生产发达国家普遍采用的果园可持续发展的土壤管理模式^[1], 我国于1998年将果园生草栽培作为绿色果品生产主要技术措施在全国进行推广^[2]。但实践中清耕果园面积占果园总面积的90%以上, 果园生草在我国尚处于试验与小面积应用阶段。对渭北黄土高原苹果园生草栽培研究发现^[3~6], 生草能降低土壤容重、增加土壤孔隙度、提高田间贮水量, 提高土壤养分与有

机碳的含量, 改善了土壤有机碳的质量, 改变了土壤有机碳各组分的含量与分布。而土壤有机碳与养分

收稿日期: 2015-04-13; 修订日期: 2015-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(31570623); 公益性行业(农业)科研专项(201103005-9, 201303104); 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-28); 陕西省农业专项(K332021313)

作者简介: 杜毅飞(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态环境工程, E-mail: duyifei007@126.com

* 通讯联系人, E-mail: lihuike@nwsuaf.edu.cn

可通过土壤微生物的代谢、降解及利用进行转化和循环^[7], 因此从土壤微生物生态学角度分析果园生草条件下土壤微生物的种类组成和数量变化, 及土壤微生物对碳源的利用情况不仅有助于探讨生草果园土壤碳转化的机制, 而且有助于揭示生草果园土壤的生态学过程。

Biolog 方法是利用微生物对碳源的利用程度来反映微生物生理活动的轮廓以及指示微生物群落的总体活性和代谢功能的分析方法^[8]。自 Garland 等^[9]首次将这种方法用来描述微生物的群落特征后, Biolog 技术已经广泛应用于不同生态环境所引起的土壤微生物群落变化的研究与评价, 如比较不同土地利用方式^[10]、不同植被类型^[11,12]、污染土壤^[13,14]、不同气候类型^[15]的微生物群落的功能多样性。然而, 采用 Biolog 技术对生草果园土壤微生物功能多样性进行研究的报道还很少见。因此, 本研究以渭北生草果园为对象, 利用 Biolog 微平板检测技术, 对生草果园土壤微生物代谢功能多样性的变化规律进行分析, 初步阐明果园生草条件下土壤微生物群落的碳源利用特征, 通过揭示生草果园土壤生态学过程的驱动机制, 以期为生草果园的科学管理和果园生草的推广提供新的理论依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区是白水縣中部杜康鎮塬面西北农林科技大学苹果试验站果园, 位于渭北黄土高原苹果代表产区白水縣, 地处东经 109°16' ~ 109°45', 北纬 35°4' ~ 35°27', 属暖温带大陆性季风气候, 平均海拔 850 m 左右, 土壤为黄绵土, 土层深厚, 剖面质地均匀, 多年平均气温 11.4℃, 多年平均降水量 577.8 mm, 降水年际变化大, 年内分配不均, 日照充足, 光热资源丰富, 无霜期 207 d。苹果品种为 13 a 生乔化红富士 (富士/新疆野苹果 *Malus demestica* Borkh), 栽植密度 3 m × 8 m。

1.2 试验设计与土壤样品采集

选取苹果园清耕 (clear tillage)、苹果 / 白三叶

(*Trifolium repens*) 间作、苹果 / 小冠花 (*Coronilla varia* L.) 间作、苹果 / 鸡脚草 (*Dactylis glomerata* L.) 间作这 4 种管理模式 (下文分别称清耕、白三叶、小冠花和鸡脚草), 每个模式重复 3 次, 共 12 个小区, 每小区面积是 30 m² (6 棵苹果树), 2005 年 3 月进行间生草播种, 现已持续生草 8 a, 播前深翻整地, 开沟条播, 播种密度为 0.75 g·m⁻², 每年刈割 2 ~ 3 次, 覆盖于苹果树行间, 各处理区的生态条件和田间管理措施保持一致。

2013 年 10 月, 在各处理区随机布设 5 个采样点, 清除表层凋落物, 用直径为 3.5 cm 土钻采集 5 ~ 20 cm 深度土样, 同一小区土样混匀作为 1 个样品, 共 12 个样, 土样去除根系、枯落物, 装入无菌塑料袋, 放入冰盒, 运回实验室后分成 2 份, 一份过 2 mm 筛后放在 4℃ 冰箱保存, 用于土壤微生物功能多样性和微生物量碳的测定, 另一份自然风干后过筛, 用于土壤理化性质测定。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤微生物功能多样性的测定

称取相当于 5 g 烘干土重的新鲜土样加入装有 45 mL 无菌水的三角瓶中, 加无菌棉花塞, 振荡 30 min 后, 按逐步稀释依次稀释为 10⁻²、10⁻³ 梯度液。用 10⁻³ 稀释液接种 Biolog-ECO 生态测试板, 接种量为 150 μL, 每样 1 板, 每板 3 次重复。将接种好的测试板加盖, 在 (25 ± 1)℃ 下连续培养 10 d, 每隔 24 h 用 BIOLOG 自动读数装置在 590 nm 下读数。

1.3.2 土壤理化性质及微生物量碳的测定

土壤有机碳用重铬酸钾容量法 (外加热) 测定; 土壤 pH 值直接用 pH 计进行测定, 水土比 2.5:1; 土壤全氮用凯氏法消解, 凯氏定氮仪测定; 土壤含水量测定采用烘干法, 105℃ 烘 12 h 后称重得到质量含水量; 微生物量碳用氯仿熏蒸浸提, TOC 自动分析仪测定。各处理土壤的基本性质见表 1。

1.4 数据处理

土壤微生物群落利用碳源的整体能力用平均颜色变化率 (average well color development, AWCD) 表示, 采用 Biolog 微平板培养 120 h 的数据进行统计

表 1 不同处理的土壤理化性质及微生物量碳¹⁾

Table 1 Soil physico-chemical properties and microbial biomass carbon of different treatments

处理	pH	含水量 /%	全氮 /g·kg ⁻¹	有机碳 /g·kg ⁻¹	微生物量碳 /mg·kg ⁻¹
白三叶	8.21 ± 0.03a	16.71 ± 2.05a	0.58 ± 0.01a	10.02 ± 0.05a	295.21 ± 5.96a
小冠花	8.20 ± 0.05a	16.29 ± 1.11a	0.52 ± 0.02b	9.75 ± 0.13a	263.21 ± 20.65b
鸡脚草	8.18 ± 0.02a	16.24 ± 0.63a	0.47 ± 0.02c	8.66 ± 0.09b	205.78 ± 19.32c
清耕	8.16 ± 0.02a	15.43 ± 0.60a	0.36 ± 0.02d	7.74 ± 0.32c	194.28 ± 3.07c

1) 同列中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同

分析,土壤微生物群落功能多样性指数分析采用 Shannon 指数、丰富度指数和 McIntosh 指数^[16]表征.

$$AWCD = \sum_{i=1}^n (C_i - R)/n$$

式中, C_i 为所测定的 31 个碳源孔吸光值; R 为对照孔吸光值; n 为碳源数目.

群落 Shannon 指数(H):

$$H = - \sum P_i \times \ln P_i$$

式中, P_i 为第 i 孔相对吸光值与整板平均相对吸光值总和的比,即:

$$P_i = (C_i - R) / \sum (C_i - R)$$

群落丰富度指数(S) = 碳源代谢孔的总数目(微孔的光密度值 ≥ 0.25 ,则认为该孔碳源被利用,即为碳源代谢孔).

群落 McIntosh 指数(U):

$$U = \sqrt{\sum n_i^2}$$

式中, n_i 为第 i 孔的相对吸光度,即 $n_i = C_i - R$.

采用 Excel 2007 软件对数据进行统计分析,采用 SPSS 17.0 软件对数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA),并用最小显著差数(least significant difference, LSD)法进行差异显著性检验,利用 Pearson 相关系数评价 AWCD 值、Shannon 指数、丰富度指数、McIntosh 指数与土壤理化性质(pH、含水量、有机碳、全氮)及微生物量碳的相关关系,主成分分析是采用降维的方法将不同样本的多元向量变换为互不相关的主元向量,在降维后的主元向量空间中可以用点的位置直观地反映出不同微生物群落的代谢特征^[17],利用培养 120 h 的吸光值对微平板中的 31 种碳源进行主成分分析.

2 结果与分析

2.1 土壤微生物利用全部碳源变化特征

平均颜色变化率(AWCD)是表征土壤微生物活性的重要指标,AWCD 值的变化速率和最终能达到的 AWCD 值反映了土壤微生物利用某一碳源物质的能力,在一定程度上反映了土壤微生物种群的数量和结构特征. AWCD 值越大,表明土壤中微生物活性越高^[18,19]. 从图 1 可以看出,各处理土壤微生物呈现明显的特征:随着培养时间的延长,其利用碳源量逐渐增加. 在 0~24 h 培养时期,各处理的 AWCD 均很小,说明在 24 h 之内碳源基本未被微生物群落利用;24~120 h 内 AWCD 快速增加,反映

出微生物群落活性明显增强,碳源被大幅度利用;120 h 以后,各处理的 AWCD 增长速率有所降低且趋于稳定. 这表明 AWCD 在 120 h 时处于“拐点”处,采用 120 h 的吸光值进行分析能更真实地反映实际情况^[20].

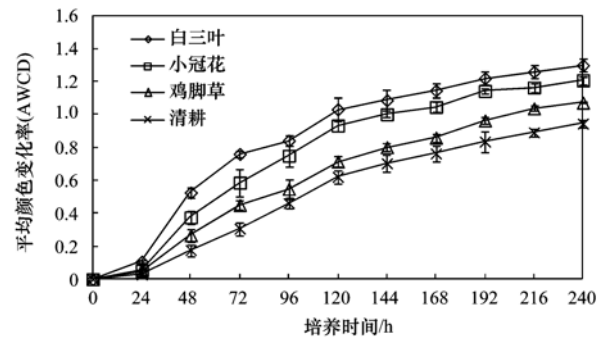


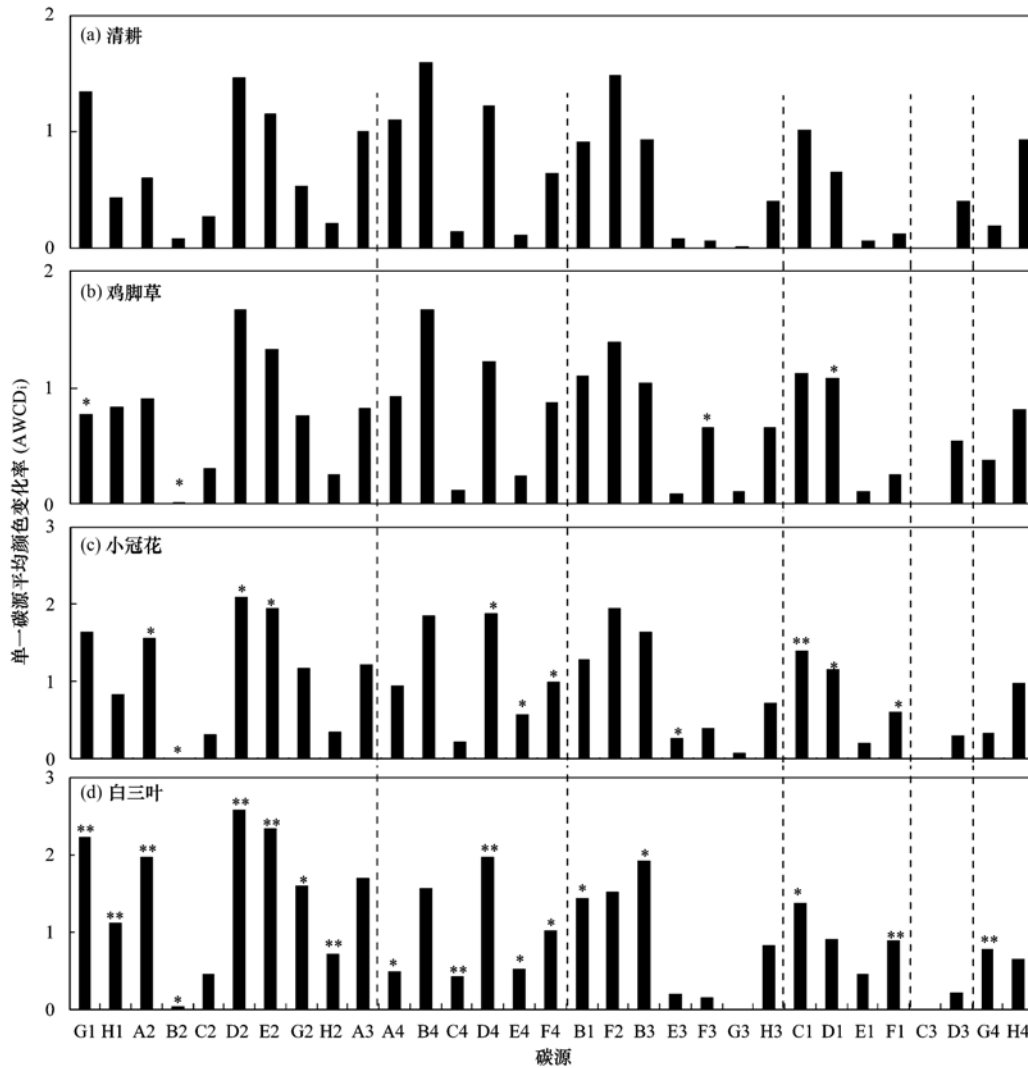
图 1 不同处理土壤微生物群落平均颜色变化率

Fig. 1 Average well color development of soil microbial community in different treatments

在整个培养过程中,各处理土壤微生物群落的 AWCD 存在明显差异,大小顺序依次为:白三叶 > 小冠花 > 鸡脚草 > 清耕,即豆科牧草白三叶处理的土壤微生物活性最大,小冠花、鸡脚草处理次之,清耕处理最小. 对 120 h 的 AWCD 进行方差分析(表 2),白三叶与小冠花处理差异不显著,清耕处理与这 2 个生草处理差异显著,而与鸡脚草处理无显著差异. 说明生草能提高土壤微生物的活性,且豆科牧草优于禾本科牧草.

2.2 土壤微生物生理碳代谢指纹图谱分析

研究土壤微生物对微平板上不同碳源利用能力,即 Biolog 代谢指纹图谱,有助于较为全面地了解微生物群落代谢功能特征^[21]. 从图 2 可以看出,生草处理土壤微生物对 31 种碳源的利用能力大于清耕处理,白三叶土壤代谢指纹图谱中 $AWCD_i \geq 0.8$ 的碳源有 17 种(糖类 7 种,氨基酸类 3 种,羧酸类 4 种,多聚物类 3 种),占总碳源的 54.8%;小冠花土壤也有 17 种(糖类 7 种,氨基酸类 4 种,羧酸类 3 种,多聚物类 2 种,胺类 1 种),占总碳源的 54.8%;鸡脚草土壤有 15 种(糖类 5 种,氨基酸类 4 种,羧酸类 3 种,多聚物类 2 种,胺类 1 种),占总碳源的 48.4%;清耕土壤有 12 种(糖类 4 种,氨基酸类 3 种,羧酸类 3 种,多聚物类 1 种,胺类 1 种),占总碳源的 38.7%. 生草处理土壤微生物碳源利用代谢功能与清耕相比,差异显著的碳源分别为:白三叶处理 18 种,小冠花 11 种,鸡脚草 4 种,说明生草使土壤微生物对单一碳源的利用能力发生改变,微生物



G1 ~ A3: 糖类; A4 ~ F4: 氨基酸类; B1 ~ H3: 羧酸类; C1 ~ F1: 多聚物类; C3 ~ D3: 芳香类; G4 ~ H4: 胺类;
AWCD_i 值为 Biolog 板上 3 次重复的平均值; * 表示 $P < 0.05$; * * 表示 $P < 0.01$

图 2 土壤微生物生理碳代谢指纹图谱

Fig. 2 Metabolic fingerprint of carbon physiological profiles of soil microbial community

活性改变. 豆科牧草白三叶和小冠花对碳源的种类影响较大,微生物对碳源的利用能力较强,土壤微生物对 *N*-乙酰-D-葡萄糖胺、D-甘露醇、甘氨酸-L-谷氨酸、吐温 40、 β -甲基-D-葡萄糖苷、肝糖、L-丝氨酸、L-苏氨酸的代谢能力显著高于清耕处理的土壤微生物. 此外,各处理土壤微生物对 2-羟基苯甲酸基本不利用.

2.3 土壤微生物群落功能多样性指数分析

群落多样性指数可以反映土壤微生物群落利用碳源类型的差异. Shannon 指数反映土壤微生物群落物种变化度和差异度,指数值越大,表示微生物种类多且分布均匀. 丰富度指数表示被利用碳源的总数目. McIntosh 指数反映了碳源利用种类数的不同,能以此区分不同的碳源利用程度^[22,23]. 由表 2

可以看出,与 AWCD 相似,白三叶处理的 Shannon 指数、丰富度指数、McIntosh 指数均最大,表明白三叶处理土壤微生物种类最多、分布较均匀且对碳源利用程度最高. 白三叶处理与小冠花处理土壤微生物功能多样性指数差异不显著,但均显著高于清耕处理,说明豆科牧草显著提高土壤微生物的种类数与均匀度以及增加土壤微生物的碳源利用能力. 小冠花处理土壤微生物丰富度指数比鸡脚草大,但是其 Shannon 指数却小于鸡脚草,这是因为微生物 Shannon 指数不仅取决于微生物碳代谢数目,而且与每个孔中微生物代谢活性有密切的关系,这种情况与毕江涛等^[24]在研究白沙蒿群落土壤微生物丰富度指数比沙米群落大,但 Shannon 指数小于沙米群落情况相同. 鸡脚草处理

的 Shannon 指数与丰富度指数显著高于清耕处理,但 McIntosh 指数差异不显著,说明鸡脚草处理虽能显著提高土壤微生物的种类数,但土壤微生物的碳源利用能力没有显著增强,因此对土壤微生物的整体代谢活性影响较小,这也是两种处理的 AWCD 值差异不显著的原因。

表 2 120 h 土壤微生物群落 AWCD 值及多样性指数
Table 2 AWCD and diversity indices in soil microbial community at incubation time of 120 h

处理	AWCD	Shannon 指数	丰富度指数	McIntosh 指数
白三叶	1.03 ± 0.07a	3.08 ± 0.15a	24.33 ± 0.50a	7.29 ± 0.45a
小冠花	0.93 ± 0.05a	3.04 ± 0.67a	23.67 ± 0.58ab	6.69 ± 0.35a
鸡脚草	0.71 ± 0.03b	3.06 ± 0.27a	22.00 ± 1.61b	5.10 ± 0.19b
清耕	0.62 ± 0.06b	2.88 ± 0.53b	18.33 ± 0.50c	4.90 ± 0.30b

2.4 土壤微生物群落代谢功能主成分分析

应用主成分分析,在 31 个因子中共提取了 8 个主成分因子,累积方差贡献率达到了 94.3%,从中选取累积方差贡献率达到 56.1% 的前两个主成分 PC1 和 PC2(特征根分别为 13.94 和 3.46)来分析微生物群落功能多样性。从图 3 可以看出,不同处理在 PC 轴出现了明显的分异,整体可分为 4 大类:白三叶、小冠花、鸡脚草、清耕各为一类,可见 PC1 和 PC2 能区分不同处理土壤微生物的群落特征。在 PC1 轴上,白三叶、小冠花处理分布在正方向上,得分系数为 0.23 ~ 1.82;鸡脚草、清耕处理分布在负方向上,得分系数为 -1.28 ~ -0.35。在 PC2 轴上,小冠花、鸡脚草处理分布在正方向上,得分系数为 0.40 ~ 1.37;白三叶、清耕处理分布在负方向上,得分系数为 -1.35 ~ -0.46。对主成分进行方差分析可知,不同处理在 PC1 和 PC2 上得分系数出现显著差异(表 3),在 PC1 轴上,白三叶处理与其他处理均差异显著;在 PC2 轴上,小冠花、鸡脚草处理与白三叶、清耕处理差异达到显著水平。考虑到 2 个主成分所反映的变异,计算得到各处理的综合得分系数(表 3),豆科牧草(白三叶和小冠花)、禾本科牧草鸡脚草与清耕三组处理有显著性的差异,而豆科

牧草白三叶与小冠花处理之间差异不显著,说明这 2 种生草处理土壤微生物群落具有相似的碳源利用模式,土壤微生物群落代谢功能相似。

表 3 不同处理下主成分得分系数
Table 3 Principal component scores in different treatments

处理	第一主成分	第二主成分	综合主成分
白三叶	1.28 ± 0.50a	-0.77 ± 0.28b	0.49 ± 0.23a
小冠花	0.42 ± 0.26b	0.97 ± 0.46a	0.29 ± 0.16a
鸡脚草	-0.61 ± 0.24c	0.85 ± 0.39a	-0.18 ± 0.07b
清耕	-1.09 ± 0.22c	-1.04 ± 0.27b	-0.61 ± 0.07c

考察 PCA 的相关性矩阵,对前 3 个主成分贡献的特征向量系数大于 0.50 的碳源类型进行分析(见表 4)。对 PC1 贡献大的碳源有 21 种,其中糖类占 33.3%,氨基酸类占 23.8%,多聚物类与羧酸类均占 14.3%,可见对 PC1 起分异作用的碳源主要是糖类和氨基酸类,其次是多聚物类和羧酸类。对 PC2 和 PC3 贡献大的碳源分别有 4 种和 2 种,其中对 PC2 贡献最大的碳源是羧酸类,占 50%。

2.5 土壤理化性质及微生物量碳与微生物群落功能多样性的相关性分析

由表 5 可知,土壤微生物群落功能多样性各指标与土壤有机碳、全氮、微生物量碳呈极显著正相关,Shannon 指数与 pH 呈显著正相关,可见土壤养分及有机碳组分与微生物群落功能多样性密切相关,是造成各处理土壤微生物多样性差异的重要原因。

3 讨论

土壤微生物多样性敏感地反映土壤环境的微小变化,可作为衡量土壤质量和评价土壤生态系统稳定的重要生物学指标^[25~28]。本试验中不同处理土壤微生物利用碳源的代谢活性随着培养时间的延长呈逐渐增加的趋势,即 AWCD 随着培养时间的延续呈现出微生物常规生长曲线^[8]。AWCD 的值越

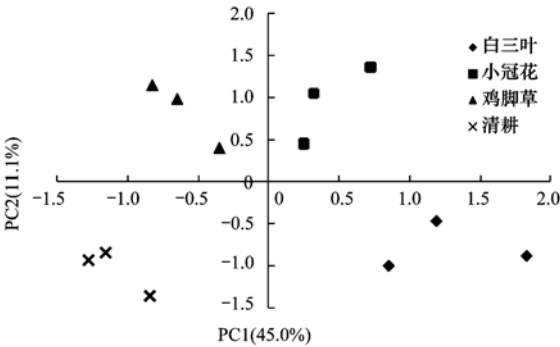


图 3 不同处理土壤微生物群落代谢主成分分析
Fig. 3 Principal component analysis for carbon utilization of soil microbial community in different treatments

酸类(甘氨酸-L-谷氨酸、L-丝氨酸、L-苏氨酸)、多聚物类(吐温 40、肝糖)的利用代谢能力显著高于清耕处理。由此可知,生草处理与清耕处理土壤微生物群落形成了各自独特的代谢功能特征,且白三叶与小冠花处理土壤微生物比较偏好的碳源类型为糖类、氨基酸类和多聚物类,说明这 2 种生草土壤中利用糖类、氨基酸类和多聚物类的微生物的代谢活动和数量显著多于清耕处理。这是因为果园生草后,凋落物的分解与根系的分泌为土壤微生物提供了大量糖类、氨基酸、多聚物等碳源物质^[37],促进了碳源利用类型相对应的微生物的生长与繁殖,从而对土壤微生物的群落结构产生影响。有研究表明^[38,39],根系分泌物为土壤微生物提供了有效的碳源与氮源,且其种类与数量决定了土壤微生物的种类与数量,并对微生物的生长繁殖及代谢过程产生影响。

综上所述,生草栽培为果园土壤输入了大量凋落物及其根系分泌物,以及生草通过改变果园小气候^[29]、土壤理化性质^[4,5]、土壤团聚体^[6]等土壤环境,引起了土壤微生物群落组成发生变化,反之土壤微生物群落结构的变化也会对土壤的物理化学过程产生影响,进而影响生草的生长发育。Biolog 技术能够快速测定土壤微生物群落的功能多样性,但该方法是利用微生物生长代谢来作为衡量微生物多样性的基础,只能对环境微生物群落活性与功能进行分析,无法直接获取微生物群落结构的详细信息,因此接下来的工作将是研究产生其代谢差异的微生物的种类组成,以及运用分子生物学的方法对生草果园土壤微生物多样性进行研究,以期进一步揭示生草果园土壤的生态学过程。

4 结论

(1)4 个处理土壤微生物对碳源的利用差异很大,其中白三叶土壤微生物对碳源的利用程度最大,其次是小冠花和鸡脚草,清耕土壤微生物对碳源的利用程度最低。

(2)4 个处理土壤微生物群落代谢功能特征不同,主要体现在糖类上,其次是氨基酸类与多聚物类。

(3)4 个处理土壤微生物的 AWCD、Shannon 指数、丰富度指数、McIntosh 指数与土壤有机碳、全氮、微生物量碳呈极显著正相关,Shannon 指数与 pH 呈显著正相关,表明微生物功能多样性能较真实地反映生草果园土壤的质量状况。

参考文献:

- [1] Greenham D W P. The environment of the fruit tree: Managing fruit soils [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1995, **12**: 25-31.
- [2] 何庆. 推广全国绿色食品果园生草技术 [J]. 中国食物与营养, 1998, (6): 40.
- [3] 贾曼莉, 郭宏, 李会科. 渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系 [J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2777-2774.
- [4] 李会科, 张广军, 赵政阳, 等. 生草对黄土高原旱地苹果园土壤性状的影响 [J]. 草业学报, 2007, **16**(2): 32-39.
- [5] 张玉岱, 李同川, 张道勇, 等. 间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤总有机碳及轻组有机碳的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(4): 810-818.
- [6] 王英俊, 李同川, 张道勇, 等. 间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤团聚体及团聚体碳含量的影响 [J]. 草地学报, 2013, **21**(3): 485-493.
- [7] 靳振江, 汤华峰, 李敏, 等. 典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义 [J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4284-4290.
- [8] Garland J L. Analytical approaches to the characterization of samples of microbial communities using patterns of potential C source utilization [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, **28**(2): 213-221.
- [9] Garland J L, Mills A L. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbon-source utilization [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1991, **57**(8): 2351-2359.
- [10] 宋敏, 邹冬生, 杜虎, 等. 不同土地利用方式下喀斯特峰丛洼地土壤微生物群落特征 [J]. 应用生态学报, 2013, **24**(9): 2471-2478.
- [11] 黄元元, 曲来叶, 曲秀春, 等. 镜泊湖岩溶台地不同植被类型土壤微生物群落特征 [J]. 生态学报, 2012, **32**(9): 2827-2836.
- [12] 郑华, 陈法霖, 欧阳志云, 等. 不同森林土壤微生物群落对 Biolog-GN 板碳源的利用 [J]. 环境科学, 2007, **28**(5): 1126-1130.
- [13] 彭芳芳, 罗学刚, 王丽超, 等. 铀尾矿周边污染土壤微生物群落结构与功能研究 [J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(11): 2192-2198.
- [14] 郑丽萍, 龙涛, 林玉锁, 等. Biolog-ECO 解析有机氯农药污染场地土壤微生物群落功能多样性特征 [J]. 应用与环境生物学报, 2013, **19**(5): 759-765.
- [15] 张广帅, 林勇明, 马瑞丰, 等. 汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性 [J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 669-677.
- [16] 杨玖, 谷洁, 张友旺, 等. 磺胺甲噁唑对堆肥过程中酶活性及微生物群落功能多样性的影响 [J]. 环境科学学报, 2014, **34**(4): 965-972.
- [17] 席劲瑛, 胡洪营, 钱易. Biolog 方法在环境微生物群落研究中的应用 [J]. 微生物学报, 2003, **43**(1): 138-141.
- [18] 程存刚, 赵德英, 吕德国, 等. 植物源有机物料对果园土壤

- 微生物群落多样性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, **20**(4): 913-922.
- [19] 田雅楠, 王红旗. Biolog 法在环境微生物功能多样性研究中的应用 [J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(3): 50-57.
- [20] 范瑞英, 杨小燕, 王恩姮, 等. 黑土区不同林龄落叶松人工林土壤微生物群落功能多样性的对比研究 [J]. 北京林业大学学报, 2013, **35**(2): 63-68.
- [21] 李鑫, 张景云, 张萌萌, 等. 化学除草剂不同施用方法对紫花苜蓿根际土壤微生物群落碳源利用的影响 [J]. 草地学报, 2014, **22**(1): 57-64.
- [22] 邵元元, 王志英, 邹莉, 等. 百菌清对落叶松人工防护林土壤微生物群落的影响 [J]. 生态学报, 2011, **31**(3): 819-829.
- [23] 吴则焰, 林文雄, 陈志芳, 等. 武夷山自然保护区不同植被类型土壤微生物群落特征 [J]. 应用生态学报, 2013, **24**(8): 2301-2309.
- [24] 毕江涛, 贺达汉, 沙月霞, 等. 荒漠草原不同植被类型土壤微生物群落功能多样性 [J]. 干旱地区农业研究, 2009, **27**(5): 149-155.
- [25] Gans J, Wolinsky M, Dunbar J. Computational improvements reveal great bacterial diversity and high metal toxicity in soil [J]. Science, 2005, **309**(5739): 1387-1390.
- [26] Brussaard L, de Ruiter P C, Brown G G. Soil biodiversity for agricultural sustainability [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2007, **121**(3): 233-244.
- [27] Van der Heijden M G A, Wagg C. Soil microbial diversity and agro-ecosystem functioning [J]. Plant and Soil, 2013, **363**(1-2): 1-5.
- [28] 林先贵, 胡君利. 土壤微生物多样性的科学内涵及其生态服务功能 [J]. 土壤学报, 2008, **45**(5): 892-900.
- [29] 李会科, 梅立新, 高华. 黄土高原旱地苹果园生草对果园小气候的影响 [J]. 草地学报, 2009, **17**(5): 615-620.
- [30] 钱进芳, 吴家森, 黄坚钦. 生草栽培对山核桃林地土壤养分及微生物多样性的影响 [J]. 生态学报, 2014, **34**(15): 4324-4332.
- [31] 毕江涛, 贺达汉. 植物对土壤微生物多样性的影响研究进展 [J]. 中国农学通报, 2009, **25**(9): 244-250.
- [32] Waid J S. Does soil biodiversity depend upon metabiotic activity and influences? [J]. Applied Soil Ecology, 1999, **13**(2): 151-158.
- [33] Garbeva P, van Veen J A, van Elsas J D. Microbial diversity in soil: Selection microbial populations by plant and soil type and implications for disease suppressiveness [J]. Annual Review of Phytopathology, 2004, **42**: 243-270.
- [34] 张杰, 余潮, 王自海, 等. 不同植被群落表层土壤中细菌群落多样性 [J]. 环境科学研究, 2013, **26**(8): 866-872.
- [35] Grayston S J, Wang S Q, Campbell C D, *et al.* Selective influence of plant species on microbial diversity in the rhizosphere [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, **30**(3): 369-378.
- [36] 侯晓杰, 汪景宽, 李世朋. 不同施肥处理与地膜覆盖对土壤微生物群落功能多样性的影响 [J]. 生态学报, 2007, **27**(2): 655-661.
- [37] 吴林坤, 林向民, 林文雄. 根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望 [J]. 植物生态学报, 2014, **38**(3): 298-310.
- [38] Singh G, Mukerji K G. Root exudates as determinant of rhizospheric microbial biodiversity [A]. In: Mukerji K G, Manoharachary C, Singh J, (eds.). Microbial Activity in the Rhizosphere[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2006. 39-53.
- [39] Nayyar A, Hamel C, Lafond G, *et al.* Soil microbial quality associated with yield reduction in continuous-pea [J]. Applied Soil Ecology, 2009, **43**(1): 115-121.

CONTENTS

Composition and Source Apportionments of Saccharides in Atmospheric Particulate Matter in Beijing	LIANG Lin-lin, Guenter Engling, DUAN Feng-kui, <i>et al.</i> (3935)
Comparing Cell Toxicity of <i>Schizosaccharomyces pombe</i> Exposure to Airborne PM _{2.5} from Beijing and Inert Particle SiO ₂	LIU Meng-jiao, HUANG Yi, WEN Hang, <i>et al.</i> (3943)
Analysis on Regional Characteristics of Air Quality Index and Weather Situation in Beijing and Its Surrounding Cities During the APEC ...	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, WANG Ning, <i>et al.</i> (3952)
Analysis About Spatial and Temporal Distribution of SO ₂ and An Ambient SO ₂ Pollution Process in Beijing During 2000-2014	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (3961)
Characteristics and Formation Mechanism of a Multi-Day Haze in the Winter of Shijiazhuang Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer(SPAMS)	 ZHOU Jing-bo, REN Yi-bin, HONG Gang, <i>et al.</i> (3972)
Modeling Study of A Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta	ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3981)
Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta	LIU Jian, WU Dui, FAN Shao-jia (3989)
Distribution Characteristics of Urea and Constitution of Dissolved Nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in Spring	LI Zhi-lin, SHI Xiao-yong, ZHANG Chuang-song (3999)
Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin	PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (4005)
Input Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients Pollution in the Primary Pollution Source of the Daliao River	MA Ying-qun, ZHANG Lei, ZHAO Yan-min, <i>et al.</i> (4013)
Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Yong-sheng, LI Hai-ying, REN Jia-ying, <i>et al.</i> (4021)
Summer Greenhouse Gases Exchange Flux across Water-air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China	 LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (4032)
Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms	WANG Feng-wu, LIU Wei, WAN Juan-juan, <i>et al.</i> (4043)
Distribution Characteristics and Source of Fluoride in Groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A Case Study in Nanpi County	 KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, ZHAO Huan, <i>et al.</i> (4051)
Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City	CUI Ya-feng, HE Jiang-tao, SU Shi-hui, <i>et al.</i> (4060)
Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay	HE Hui, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (4068)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River	LIANG Zuo-bing, SHEN Li-cheng, SUN Yu-chuan, <i>et al.</i> (4074)
Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, XIAO Shi-zhen (4081)
Variation Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Subterranean River During Rainfall Events	JIANG Ze-li, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (4088)
Distribution and Transportation Characteristics of Heavy Metals in Nanshan Laolongdong Subterranean River System and Its Capacity of Self-Purification in Chongqing	 REN Kun, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (4095)
Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	LIANG Li, WANG Yong-min, LI Xian-yuan, <i>et al.</i> (4103)
Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combination Disturbance	WANG Ren, LI Da-peng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4112)
Norfloxacin Solution Degradation Under Ultrasound, Potassium Persulfate Collaborative System	WEI Hong, SHI Jing-zhuan, LI Jia-lin, <i>et al.</i> (4121)
Degradation of Acid Orange 7 with Persulfate Activated by Silver Loaded Granular Activated Carbon	WANG Zhong-ming, HUANG Tian-yin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (4127)
Kinetics and Reactive Species Analysis of Dimetridazole Degradation by TiO ₂	CHEN Dong-mei, YU Ze-bin, SUN Lei, <i>et al.</i> (4135)
Performance and Mechanism of Ferric Tannate in the Removal of Inorganic Nitrogen from Wastewater	ZHANG Rui-na, LI Lin, LIU Jun-xin (4141)
Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (4148)
Advanced Treatment of Incineration Leachate with O ₃ -BAC and Double O ₃ -BAC	DU An-jing, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4154)
Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier	WANG Hui-fang, FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (4161)
Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule	CUI Jian-hong, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4168)
Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage	ZHANG Shi-ying, WU Peng, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (4174)
Rapid Start-up of Simultaneous Nitrification and Denitrification Coupled Phosphorus Removal Process and Its Performing Characteristics	LENG Lu, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (4180)
Effect of HCO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitritation-ANAMMOX Process	LI Xiang, CHENG Zong-heng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4189)
Research on Cultivation and Stability of Nitritation Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (4195)
Influence of the Application of Activated Persulfate on Municipal Sludge Conditioning	XU Xin, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (4202)
Influence of Temperature on the Anaerobic Packed Bed Reactor Performance and Methanogenic Community	XIE Hai-ying, WANG Xin, LI Mu-yuan, <i>et al.</i> (4208)
Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application	BAI Li-ping, LUO Yun, LIU Li, <i>et al.</i> (4218)
Comprehensive Risk Assessment of Soil Heavy Metals Based on Monte Carlo Simulation and Case Study	YANG Yang, DAI Dan, CAI Yi-min, <i>et al.</i> (4225)
Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment	ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, <i>et al.</i> (4232)
Effects of Land Use Type on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Water-Stable Aggregates in Jinyun Mountain	LI Zeng-quan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4241)
Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming	LAN Mu-ling, GAO Ming (4252)
Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage	DU Yi-fei, FANG Kai-kai, WANG Zhi-kang, <i>et al.</i> (4260)
Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by <i>Sedum alfredii</i> Hance	YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, <i>et al.</i> (4268)
<i>In-situ</i> Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System	ZHU Wei, LIU Li, WU Yan-ming, <i>et al.</i> (4277)
Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (4283)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes	WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying, ZHANG Yu-hong, <i>et al.</i> (4291)
Depth Profiles of Methane Oxidation Kinetics and the Related Methanotrophic Community in a Simulated Landfill Cover	XING Zhi-lin, ZHAO Tian-tao, GAO Yan-hui, <i>et al.</i> (4302)
Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells	MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin (4311)
Development of a Monoclonal Antibody-Based Sensor for Environmental Pyrene and Benzo(a)pyrene Detection	LI Xin, QIAO Yan, ZHONG Guo-zhen (4319)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年11月15日 第36卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 11 Nov. 15, 2015

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: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行