

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第10期

Vol.38 No.10

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平 (3987)
卫星遥感在 NO ₂ 总量控制中的应用	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇 (3998)
京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估	王振波, 梁龙武, 林雄斌, 刘海猛 (4005)
南京北郊冬春季气溶胶数浓度变化特征分析	吴丹, 张璠, 刘刚, 吴明, 夏俊荣, 盖鑫磊, 李凤英, 杨孟 (4015)
冬季临安大气本底站气溶胶来源解析及其粒径分布特征	施双双, 王红磊, 朱彬, 林旭, 郭婷, 沙丹丹, 蒋琳, 张玉欣, 师远哲 (4024)
成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征	陶月乐, 李亲凯, 张俊, 李斯奇, 李晓东 (4034)
泉州市大气 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 张棕巍, 许文质 (4044)
2011~2012 年北京大气 PM _{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析	周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 段菁春, 谭吉华, 张元勋, 贺克斌, 马永亮 (4054)
厦门海沧区 PM _{2.5} 中金属元素污染评价及来源分析	赵莉斯, 于瑞莲, 徐玲玲, 胡恭任, 吴鑫, 陈衍婷 (4061)
道路扬尘 PM _{2.5} 中金属元素污染特征及健康风险评估	张静, 张衍杰, 方小珍, 李凤华, 吴琳, 毛洪钧 (4071)
福建九仙山大气 PM ₁₀ 及部分化学组成的季节变化	魏雅, 林长城, 胡清华, 吴水平 (4077)
北京城区冬季空气污染时期 C2~C6 碳氢化合物含量特征	李月, 魏巍, 杨干, 陈东升, 程水源, 韩力慧 (4084)
2016 年北京市春节大气颗粒物污染特征激光雷达监测分析	石琳琳, 李令军, 李倩, 姜磊, 周一鸣, 李云婷, 刘保献, 张大伟 (4092)
廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性	李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4100)
人类活动对漓江地表水体水-岩作用的影响	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (4108)
岩溶区水库冬季溶解有机质组成特征及来源:以桂林五里峡水库为例	卢晓斌, 彭文杰, 李强, 房君佳, 靳振江, 宋昂, 黄炳惠, 于爽 (4120)
岩溶关键带微量元素运移的时空变化:以豫西鸡冠洞为例	梁沙, 杨琰, 张娜, 孙喆, 张萍, 田宁, 凌新有, 任小敏 (4130)
龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征	苟婷, 马千里, 王振兴, 王丽, 姚玲爱, 许振成, 赵学敏, 梁荣昌, 蓝郁 (4141)
阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系	罗宜富, 李磊, 李秋华, 焦树林, 李红梅, 陈峰峰 (4151)
天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性	孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 史浩辰, 杭心语, 徐涤非 (4160)
程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险	于真真, 刘恩峰, 张恩楼, 林琪, 沈吉, 王荣, 李艳玲 (4169)
自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征	左继超, 郑海金, 奚同行, 王凌云, 聂小飞, 刘昭 (4178)
邻苯二甲酸酯在三峡库区消落带非淹水期土壤中污染特征及健康风险	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4187)
滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析	王乙震, 张世禄, 孔凡青, 袁媛 (4194)
潍坊滨海经济技术开发区饮用水中有机磷酸酯的水平及人体暴露风险评估	董政, 马玉龙, 李珺琪, 袁浩东, 金军, 王英 (4212)
道路灰尘中有机磷阻燃剂污染特征及人体暴露	李静, 王俊霞, 许婉婷, 尚荣双, 顾海东, 温耀进, 张丽君 (4220)
居民经手口途径摄入含 PAHs 颗粒物的致癌风险评价	佟瑞鹏, 杨校毅, 张磊, 程蒙召 (4228)
基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变	刘宇, 兰双双, 张永祥, 李芳春, 侯树楷 (4236)
Ag-AgI/CN/MA 复合物的制备及其可见光催化性能	张塞, 张丽丽, 胡春 (4245)
凤眼莲对富营养化水体中氨氮化和反硝化微生物的影响	李洁, 蒋丽娟, 王晓琳, 肖琳 (4253)
利用含 Cu(II) 废水强化微生物燃料电池处理含 Cr(VI) 废水	熊晓敏, 吴夏芳, 贾红华, 雍晓雨, 周俊, 韦萍 (4262)
生态高负荷土地快速渗滤系统处理猪场废水的效能及微生态	宿程远, 刘凡凡, 钟余, 黄智, 郑鹏, 农志文, 卢宇翔 (4271)
细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响	涂仁杰, 金文标, 韩松芳, 陈洪一 (4279)
污水处理厂消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除	刘亚兰, 马岑鑫, 丁河舟, 邱勇, 李冰, 王硕, 李激 (4286)
AnMBR-A-MBR 和 A ² -MBR 工艺处理焦化废水效果与急性毒性物质特征对比	朱佳迪, 李菲菲, 陈吕军 (4293)
基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性运行	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (4302)
新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷	周彦卿, 郝庆霞, 刘思远, 王雨沙 (4309)
连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升	朱强, 刘凯, 董石语, 顾澄伟, 王凡, 李祥, 黄勇 (4316)
基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征	闫刚, 李田, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (4324)
两段式曝气对好氧颗粒污泥脱氮性能的影响	王文啸, 卞伟, 王盟, 阚睿哲, 赵青, 梁东博, 李军 (4332)
醋糟高效厌氧消化体系构建	周云龙, 许之扬, 赵明星, 施万胜, 黄振兴, 何迪, 阮文权 (4340)
基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比:以龙岩市适中镇为例	王蕊, 陈明, 陈楠, 刘冠男, 张二喜, 刘晓端, 张佳文 (4348)
锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价	陈凤, 董泽琴, 王程程, 韦雪花, 胡宇, 张丽娟 (4360)
三峡库区典型消落带 CH ₄ 排放的变化特征及影响因素	柴雪思, 郝庆菊, 黄哲, 范志伟, 江长胜 (4370)
地膜覆盖对菜地生态系统 N ₂ O 排放的影响	冯迪, 郝庆菊, 张凯莉, 石将来, 石孝均, 江长胜 (4380)
不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响	向秋洁, 杨雨洽, 张成, 相欣奕, 木志坚 (4390)
半固态培养条件下烟曲霉去除土壤中镉	陈耀宁, 汪元南, 黎媛萍, 李辉, 陈艳容, 伍艳馨, 苟宇, 朱福造, 张道利, 刘耀, 曾光明 (4398)
猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化	温沁雪, 曹永森, 陈志强 (4405)
堆肥-生物强化对重度石油污染土壤的修复作用	吴蔓莉, 陈凯丽, 叶茜琼, 祁燕云, 徐会宁, 王卓, 薛鹏飞, 朱常琳 (4412)
微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响	安丽芸, 李君剑, 严俊霞, 李洪建 (4420)
冬小麦田 O ₃ 气孔与非气孔沉降及风险评估	徐静馨, 郑有飞, 赵辉, 储仲芳, 黄积庆, 袁月 (4427)
中国西南酸雨区降水化学特征研究进展	周晓得, 徐志方, 刘文景, 武瑶, 赵童, 蒋浩 (4438)
《环境科学》征稿简则 (4261) 《环境科学》征订启事 (4270) 信息 (4186, 4404, 4446)	

微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响

安丽芸, 李君剑*, 严俊霞, 李洪建

(山西大学黄土高原研究所, 太原 030006)

摘要: 土壤微生物群落在生态系统过程中发挥着重要的作用, 而关于土壤微生物多样性对生态系统功能的影响无一致结论. 为了研究微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响, 将稀释 10^{-1} 、 10^{-3} 和 10^{-5} 倍 (D1、D3 和 D5) 的庞泉沟阔叶混交林土壤悬液接种在灭菌的土样中. 通过碱式滴定法和 Biolog Eco 板等实验方法测定了不同多样性梯度下土壤碳矿化速率和碳代谢利用模式的变化. 结果表明培养 6 周后, D1 处理的碳矿化速率、累积碳矿化量、平均孔颜色变化率 (AWCD) 和多样性指数 (Shannon、McIntosh 和丰富度指数) 均显著高于 D5 处理. 且相关分析表明, 累积碳矿化量和 AWCD 与丰富度呈显著负相关. 对碳源吸光度做主成分分析 (PCA) 和单因素方差分析发现微生物多样性梯度的土壤碳源利用模式也存在差异. 因此, 微生物多样性下降影响土壤的碳矿化速率和碳源利用模式, 导致陆地生态系统的功能发生改变, 在森林土壤管理中, 应重视土壤微生物物种多样性变化对生态系统功能的影响.

关键词: 微生物多样性; 碳矿化速率; Biolog Eco 板; 功能多样性; 碳源利用模式

中图分类号: X144; X172 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2017)10-4420-07 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.201702058

Effects of Microbial Diversity on Soil Carbon Mineralization

AN Li-yun, LI Jun-jian*, YAN Jun-xia, LI Hong-jian

(Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Soil microbial community plays an important role in ecosystem functions; however, little is known about the importance of microbial diversity to the ecosystems. In this study, serial dilution of soil suspension (10^{-1} , 10^{-3} , and 10^{-5}) was performed and inoculated into the sterilized soils that form the broadleaf mixed forests in Pangquangou. The change in the carbon mineralization rate and the pattern of the carbon source utilization were studied by titration, Biolog Eco, and other experimental methods. The results show that after being incubated for six weeks, carbon mineralization rate, the cumulative amount of carbon mineralization, average well color development (AWCD), and diversity index (Shannon, McIntosh, and richness index) of D1 were significantly higher than those of the D5 treatment. The cumulative amount of carbon mineralization and AWCD was strongly and inversely correlated with richness. Principal component analysis and one-way ANOVA also indicated that the patterns of carbon source utilization of microbially diverse soil were different. Therefore, the loss of microbial diversity affects the carbon mineralization rate and the pattern of carbon source utilization, leading to functional changes in terrestrial ecosystems. In the management of forest soils, the effects of soil microbial diversity on ecosystem functions should be considered.

Key words: microbial biodiversity; mineralization rate; Biolog Eco; functional diversity; carbon source utilization patterns

目前关于物种多样性与生态功能稳定的关系已成研究热点^[1]. 如空间异质性假说^[2]认为, 环境越复杂, 生物多样性越高; 生产力假说^[3]认为系统中的能量越多, 系统中的生物量就越多, 更多的生物量代表着更多的物种多样性; 水热动力假说^[4]认为水分和温度共同决定生物多样性. 但是以上假说讨论的核心多关于地上植被, 尽管微生物多样性直接或间接地参与了地球生物地理化学循环过程如腐殖质的形成、初级生产力的生产、凋落物的降解、营养物的转运和循环以及在气候调节方面也起到一定的作用^[5-8], 但是对微生物群落多样性的讨论仍较少.

目前土壤微生物多样性的重要性受到功能冗余挑战^[9-11]. 功能冗余认为在生态系统中, 不同的物种发挥着相同的功能, 一个物种的丧失可以由另一物种来替代, 因此, 生物多样性的降低对于生态系

统功能没有较大影响. 如 Rousk 等^[12]发现细菌和真菌生长的改变对碳矿化影响很小; Naidoo 等^[13]通过梯度稀释方法研究功能冗余与微生物群落物种多样性的关系, 研究发现不同稀释处理对底物的吸收速率没有显著影响. 然而 Philippot 等^[14]发现生物多样性的降低影响土壤的固氮能力, 而且稀有微生物虽然数量较少, 但是在生态系统功能中仍发挥着重要的作用, 如可以增强植物抵抗食草动物啃食的能力^[15]. 因此, 功能冗余与生物多样性的关系仍需要做进一步的研究.

本研究选取庞泉沟自然保护区阔叶混交林土壤

收稿日期: 2017-02-14; 修订日期: 2017-05-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271530)

作者简介: 安丽芸 (1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微生物生态学, E-mail: 836544181@qq.com

* 通信作者, E-mail: lijunjian@sxu.edu.cn

为对象, 通过梯度稀释、碱式滴定法和 Biolog Eco 板等实验手段, 分析不同多样性梯度下碳矿化速率和碳代谢利用模式的变化, 揭示物种多样性对土壤碳循环的影响, 评估功能冗余对生态系统功能的相对重要性, 以期为森林土壤管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究样地

研究样地位于山西省庞泉沟自然保护区阔叶混交林(111°22' ~ 111°33'E、37°45' ~ 37°55'N)。该地区属于暖温带大陆性季风气候, 年平均气温 4.3℃, 年平均降水量 822.6 mm, 无霜期 100 ~ 125 d。土壤类型为淡褐土, 土壤肥力高, 成土时间长, 微生物群落结构较为稳定, 是研究多样性与碳矿化的理想实验平台。

1.2 土样梯度稀释处理

在庞泉沟自然保护区阔叶混交林土壤表层(0 ~ 10 cm)处采集土样, 土壤有机碳 (26.27 ± 1.87) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全 N (1.79 ± 0.09) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 7.26 ± 0.04 。采集的土壤样品分成两部分, 一部分 4℃ 冰箱保存, 用于制作土壤悬浮液, 另一部分风干, 过 2 mm 筛, 高压蒸汽锅灭菌处理。将 100 g 新鲜的土样与 300 mL 无菌蒸馏水混合, 得到的土壤悬浮液为 10^0 。将土壤悬浮液进行梯度稀释, 分别得到 10^{-1} 、 10^{-3} 和 10^{-5} 稀释倍数的土壤悬浮液(D1、D3 和 D5 处理), 将这些土壤悬浮液接种在灭菌的土样中, 每个 3 个重复, 20℃ 条件下培养 6 周。在此期间, 采用碱式滴定法^[16]测定土壤微生物群落的碳矿化速率, 土壤培养结束后, 采用 Biolog Eco 板^[17]在 590 nm 波长下测定孔吸光值, 通过分析平均孔颜色变化率(AWCD)、碳源代谢强度、生物多样性指数(Shannon、Simpson、McIntosh 和碳源利用丰富度指数)和碳源相对利用率的变化规律, 探究不同多样性土壤微生物群落碳矿化速率和碳源利用模式的差异, 具体计算方法参考文献[18]。

1.3 数据处理

采用 SPSS 23.0 软件, 通过单因素方差分析(ANOVA)分析不同多样性处理对 AWCD、K、碳源代谢强度、Shannon、Simpson、McIntosh 和丰富度指数的影响, 若差异显著, 则采用 Duncan 检验多重比较。采用 Rv3.3.1 vegan 程序包对不同碳源吸光度做主成分分析(PCA), PCA 结果用因子载荷图表示^[19], 采用 gplots 程序包做热图, 分析不同处理碳源利用模式的变化。

2 结果与分析

2.1 稀释和接种对土壤碳矿化的影响

随着稀释梯度增加, 碳矿化速率逐渐减少。与 D1 处理相比, D3 和 D5 处理平均碳矿化速率分别降低 22.57% 和 52.42%。D1 与 D5 处理有显著差异($P < 0.05$), D1 与 D3、D3 与 D5 处理无显著差异。在培养初期, 各稀释处理碳矿化速率均较低, 随着培养时间增加, 碳矿化速率表现出先升高后下降的趋势, 在培养后期, 又出现一个呼吸小高峰, 最后逐步趋于稳定(图 1)。培养结束后, D3 和 D5 处理累积碳矿化量较 D1 处理相比分别降低了 19.47% 和 51.59%, 且 D1 处理累积碳矿化量显著高于 D3 和 D5 处理($P < 0.05$), 见图 2。

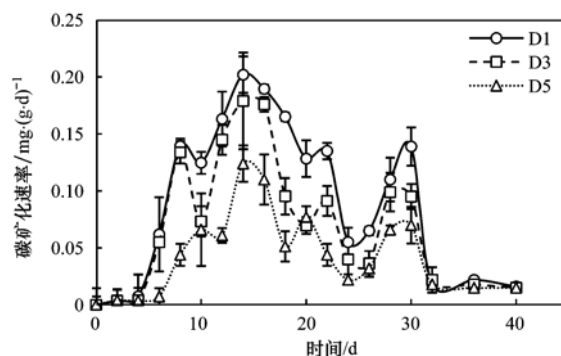
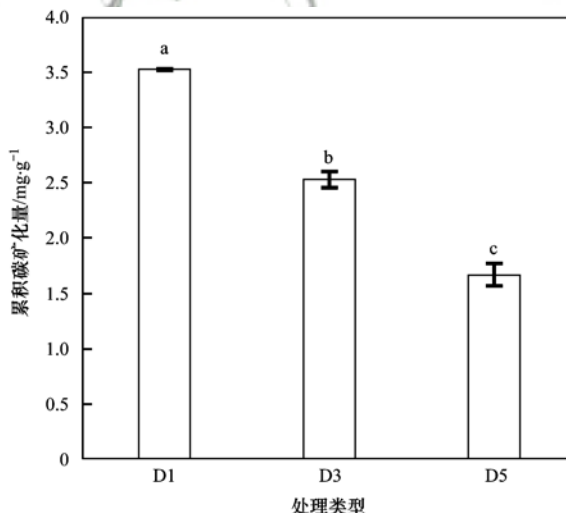


图 1 不同稀释处理下碳矿化速率的动态变化

Fig. 1 Dynamics of the mineralization rate in different soil types



不同字母表示差异显著($P < 0.05$)

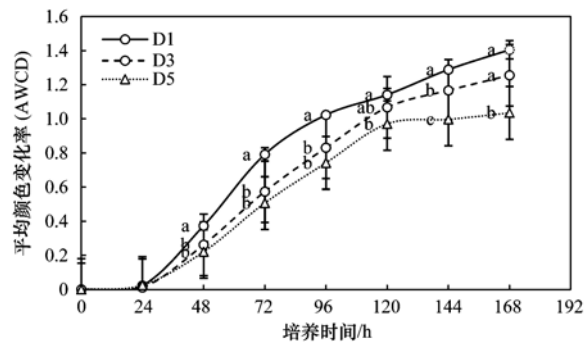
图 2 不同稀释处理下累积碳矿化量

Fig. 2 Cumulative amount of carbon mineralization in different soil types

2.2 稀释和接种对微生物群落 AWCD 和碳源利用强度的影响

接种不同多样性梯度土壤悬浮液的土壤表现出

相同的发展趋势:在代谢反应迅速发展之前,有 0 ~ 24 h 的滞后期,碳源基本未被微生物群落利用,培养 24 h 后, D1 处理的土壤微生物群落 AWCD 明显高于 D3 和 D5 处理,具有更高的碳源利用能力($P < 0.05$). 培养 96 h 后,各处理 AWCD 增长速率逐渐降低且趋于稳定达到最大值(K 值). 3 种处理土壤达到 $K/2$ 所需时间没有显著差异,均为 (96 ± 2) h,因此采用 96 h 的吸光值进行分析能更真实地反映土壤微生物群落生长的实际情况(图 3).



不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)
图 3 不同稀释处理下孔平均颜色变化率的动态变化
Fig. 3 Dynamics of the average well color development in different soil types

对 96 h 的 AWCD 进行单因素方差分析(表 1),发现 D1 处理明显高于 D3 和 D5 处理($P < 0.05$), D3 与 D5 处理间无显著差异. 说明多样性越高,土壤微生物群落利用碳源代谢能力(S)则越强. D1 处

理 K 值和碳源代谢强度显著高于 D5 处理($P < 0.05$),说明 D1 处理土壤微生物群落有较高的多样性,且具有较高的碳源代谢能力.

表 1 不同稀释处理的土壤微生物群落 AWCD、 K 及碳源代谢强度¹⁾

Table 1 AWCD, K , and S of soil microbial community in different soil types			
处理	AWCD	K	S
D1	$1.04 \pm 0.01a$	$1.41 \pm 0.05a$	$0.213 \pm 0.005a$
D3	$0.79 \pm 0.04b$	$1.26 \pm 0.03a$	$0.187 \pm 0.004b$
D5	$0.74 \pm 0.07b$	$1.03 \pm 0.05b$	$0.178 \pm 0.03b$

1) 不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$),下同

2.3 稀释和接种对微生物群落碳代谢功能多样性的影响

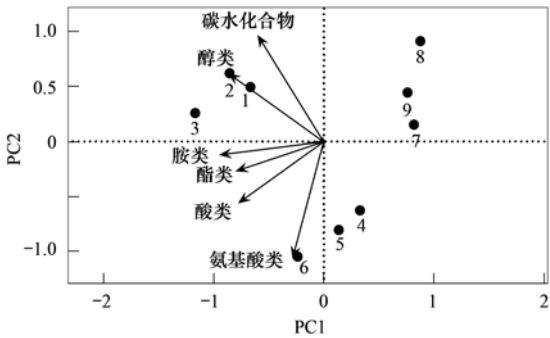
与 AWCD 相似, D1 处理 Shannon、McIntosh 和丰富度指数均最大,表明 D1 处理土壤微生物种类最多、分布较均匀且对碳源利用程度最高. D1 处理 Shannon 指数显著高于 D3 和 D5 处理($P < 0.05$), D3 与 D5 处理间无显著差异; D1 处理 McIntosh 指数与 D3 处理无显著差异,说明 D1 处理虽能显著提高土壤微生物的种类数,但土壤微生物群落的碳源利用能力没有显著增强; D1 处理丰富度指数显著高于 D3 和 D5 处理($P < 0.05$),说明多样性能显著提高土壤微生物群落的种类数与均匀度以及土壤微生物群落的碳源利用能力. Simpson 指数在各处理间无显著差异($P < 0.05$),见表 2.

表 2 96 h 土壤微生物群落多样性指数

Table 2 Diversity indices in soil microbial community at incubation time of 96 h				
处理	Shannon 指数	Simpson 指数	McIntosh 指数	丰富度指数
D1	$3.16 \pm 0.03a$	$0.96 \pm 0.0004a$	$6.63 \pm 0.07a$	$27.33 \pm 0.33a$
D3	$3.08 \pm 0.03b$	$0.96 \pm 0.0021a$	$6.31 \pm 0.18a$	$19.00 \pm 0.58b$
D5	$3.05 \pm 0.01b$	$0.97 \pm 0.0014a$	$5.68 \pm 0.14b$	$15.67 \pm 0.67c$

2.4 稀释和接种对微生物群落碳源利用模式的影响

主成分分析(PCA)表明稀释处理导致土壤微生物群落结构和碳源利用模式发生改变(图 4). 采用 96 h 的吸光度进行主成分分析,提取 2 个主成分 PC1 与 PC2,分别可以解释变量 47.35% 和 30.61%. 不同处理在 PC 轴出现了明显的分异,整体可分为三类,即 D1、D3 和 D5. 对各处理主成分进行单因素方差分析,发现 D1 与 D3、D5 处理均有显著差异, D3 与 D5 处理无显著差异($P < 0.05$). 可见 PC1 和 PC2 能区分不同处理土壤微生物的群落特征.



PC1 和 PC2 代表主成分, D1:1 ~ 3, D3:4 ~ 6, D5:7 ~ 9

图 4 不同处理土壤微生物群落代谢主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis for carbon utilization of the soil microbial community in different treatments

在 Biolog Eco 板 31 种碳源中, 有 22 种碳源属于 PC1, 包括 6 种碳水化合物、4 种氨基酸、1 种酯类、3 种醇类、2 种胺类和 6 种酸类; 可见对 PC1 起分异作用的碳源主要是碳水化合物类和酸类, 其次是氨基酸类和醇类. 5 种碳源属于 PC2, 包括 1 种碳水化合物、1 种氨基酸、2 种酯类和 1 种酸类, 同时属于 PC1 和 PC2 的碳源包括碳水化合物类、氨基酸类、酯类和酸类(表 3).

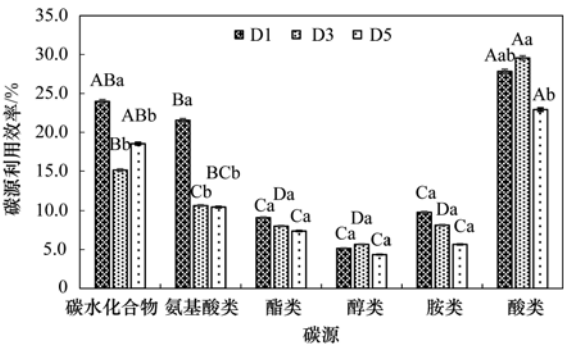
碳源相对有效利用率与稀释梯度和碳源类型有关(图 5), 碳水化合物类、氨基酸类和酸类的有效利用率较高(范围 15.14% ~ 29.56%), 相反, 其他类型碳源的相对有效利用率较低(范围 4.35% ~ 9.79%). D1 与 D5 碳水化合物和氨基酸类相对有效利用率有显著差异($P < 0.05$).

图 6 显示不同处理土壤微生物群落对 31 种碳源的利用情况存在差异, 碳源利用率低则说明微生物

物对其利用需求减少, 高利用率说明微生物对其需求增加. 不同处理土壤微生物群落高利用率碳源数

表 3 主成分载荷矩阵¹⁾

Table 3 Loading matrix of principal components			
主成分	碳源种类	项目	r
PC1	碳水化合物类	β -甲基-D-葡萄糖苷	0.985
		α -D-葡萄糖-1-磷酸	0.981
		L-天门冬酰胺	-0.968
		D-纤维二糖	0.699
		α -D-乳糖	0.665
		D-木糖	0.552
	氨基酸类	甘氨酸-L-谷氨酸	0.979
		L-苏氨酸	0.978
		L-苯基丙氨酸	0.771
		L-丝氨酸	-0.772
	酯类	吐温 40	0.946
	醇类	D,L- α -磷酸甘油	0.936
		D-甘露醇	0.891
		i-赤藓糖醇	0.864
PC2	胺类	N-乙酰基-D-葡萄糖胺	0.949
		苯乙基胺	0.574
	酸类	α -丁酮酸	0.912
		D-半乳糖醛酸	-0.902
		D-氨基葡萄糖酸	0.854
		2-羟苯甲酸	0.655
		γ -羟基丁酸	0.628
		衣康酸	0.578
	碳水化合物类	肝糖	-0.742
		L-精氨酸	0.757
	酯类类	D-半乳糖酸 γ 内酯	0.798
		吐温 80	0.898
	酸类	4-羟基苯甲酸	0.683



小写字母表示同一类碳源不同处理差异显著($P < 0.05$),
大写字母表示同一处理不同碳源差异显著($P < 0.05$)

图 5 六类碳源的相对有效利用率

Fig. 5 Relative use efficiency of six carbon sources

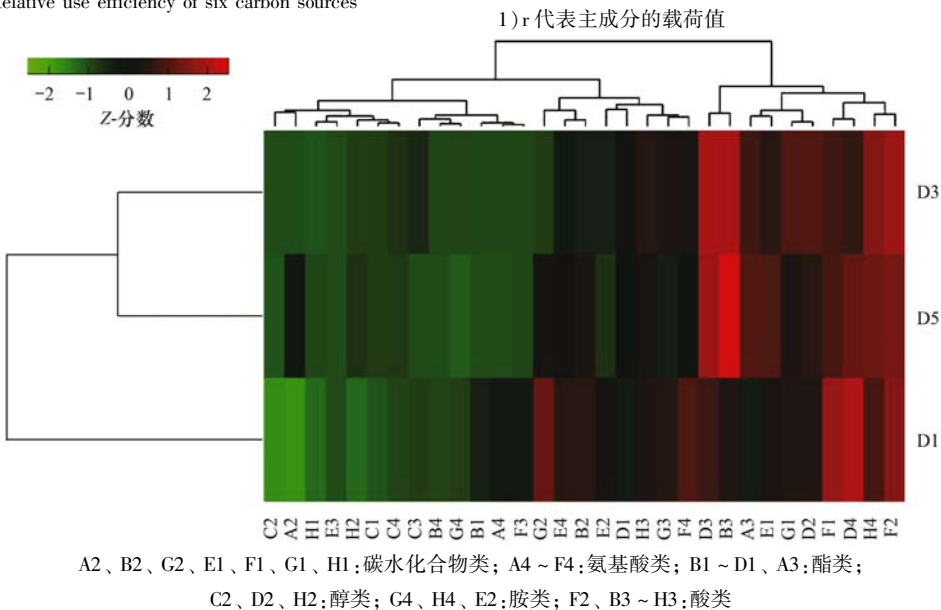


图 6 不同稀释处理土壤微生物碳源利用率 heatmap

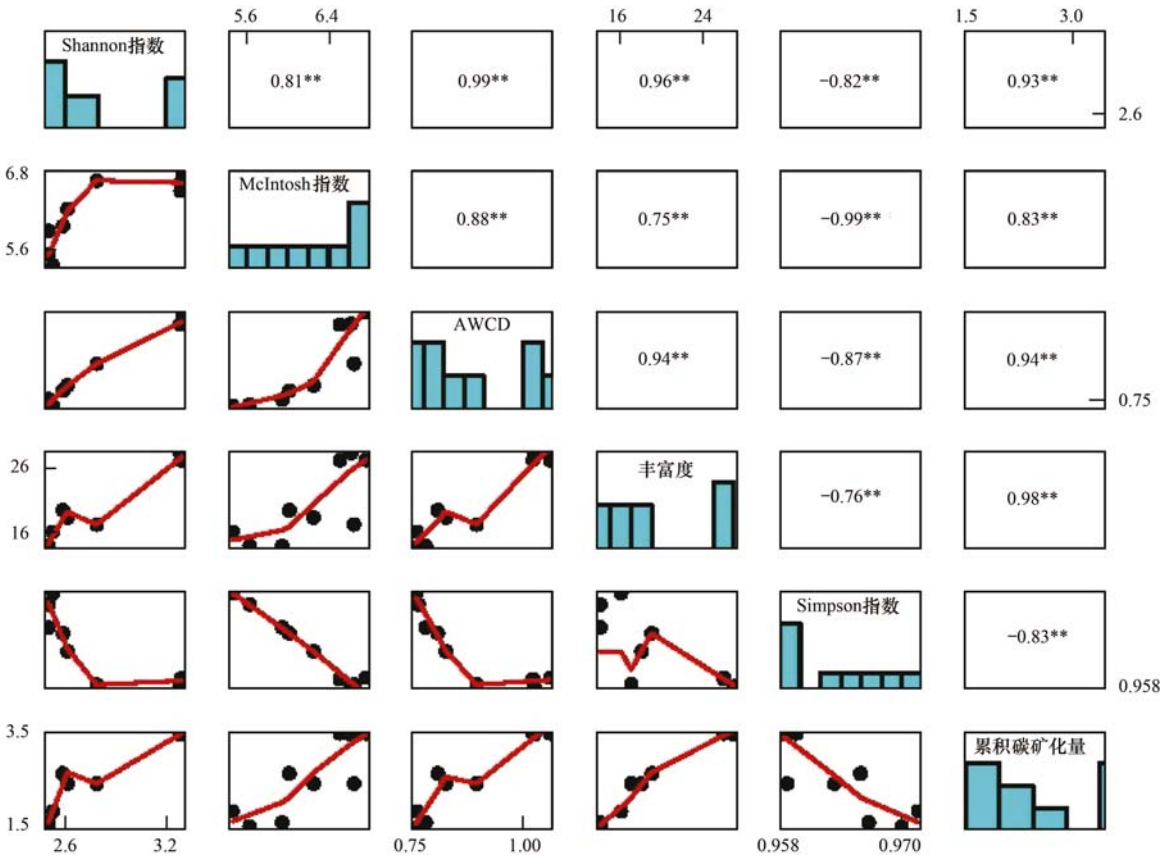
Fig. 6 Heat map of utilization of the 31 carbon substrates in different soil types

(碳源利用率 >0.04) 显著差异. D1、D3 和 D5 处理高利用率碳源分别有 10.67、9.33 和 6.67 种, D1 与 D5 处理有显著差异, D1 与 D3、D3 与 D5 无显著差异 ($P < 0.05$). 与 D1 处理相比, D5 处理土壤微生物对肝糖、D-纤维二糖、L-精氨酸、L-苏氨酸、甘氨酸-L-谷氨酸、丙酮酸甲酯、苯乙基胺、 γ -羟基丁酸和衣康酸的利用显著降低; 对 D-半乳糖醛酸的利用显著增加; 对 α -D-乳糖、 β -甲基-D-葡萄糖苷、L-苯基丙氨酸、吐温 40、*i*-赤藓糖醇、D,L- α -磷酸甘油、苯乙基胺、2-羟基苯甲酸和

γ -羟基丁酸的代谢均极低 (碳代谢利用率 < 0.02). 且聚类分析表明 3 个处理聚为两类, 其中 D3 与 D5 聚为一类.

2.5 土壤微生物碳代谢功能多样性指数与 AWCD 和累积碳矿化量的相关分析

图 7 表明累积矿化量与 AWCD、Shannon 指数、McIntosh 指数和丰富度呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 其中与丰富度指数的相关系数最高, 说明丰富度是导致碳源代谢强度和累积矿化量变化的主要原因, 与 Simpson 极显著负相关.



* 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$;
用前一组变量为纵坐标, 后一组变量为横坐标, 左下角为所对应的散点图, 右上角为其对应的相关系数

图 7 多样性指数与 AWCD 和累积碳矿化量的相关分析

Fig. 7 Correlation analysis between diversity index, AWCD, and cumulative carbon mineralization

3 讨论

3.1 土壤碳矿化速率

土壤微生物群落碳矿化速率和功能多样性, 不仅受到土壤微生物丰度的影响, 与土壤微生物多样性也有一定关联^[20, 21]. 目前为止, 许多研究采用梯度稀释法人工改变微生物多样性, 理论上认为稀释处理移除了稀有微生物类群, 对于复杂的自然生态系统 (如土壤), 这是一种少有的便利方法^[15, 22, 23].

Yan 等^[24]证实稀释处理降低了土壤悬浮液和接种后土样的微生物物种多样性. Philippot 等^[14]发现多样性的降低影响土壤微生物群落的固氮速率. 为了评估碳矿化速率是否受多样性影响, 在培养阶段采用碱式滴定法测量微生物碳矿化速率, 发现随着培养时间增加, 不同处理土壤碳矿化速率呈先增加后降低的趋势, 但是在培养末期出现另一个呼吸小高峰, 这可能是因为灭菌土样中营养有限, 随着培养时间增加, 易降解有机碳逐渐被消耗, 呼吸速率先

增加后逐渐减弱,在培养后期,由于微生物对难降解有机碳及代谢产物的利用,因此出现另一个呼吸小高峰。另一方面,在培养末期,土壤碳矿化速率与多样性呈负相关,D1 与 D5 处理有显著差异($P < 0.05$),D1 与 D3、D3 与 D5 处理无显著差异,累计矿化量也是如此。由于培养结束后,不同稀释处理的土壤细菌丰度无显著差异,因此,排除了生物量对土壤碳矿化速率和累积碳矿化量的影响。

综上,本研究推断物种多样性显著影响了土壤碳矿化速率和累计矿化量,对庞泉沟土壤生态系统功能产生较大影响。

3.2 土壤微生物群落功能多样性分析

培养结束后,采用 Biolog Eco 板研究土壤微生物群落碳代谢多样性,其结果反映了碳源的利用模式^[25, 26]。在整个培养过程中,D1 处理的 Shannon、McIntosh 和丰富度指数都显著高于 D5 处理($P < 0.05$),原因可能是:①一定程度的稀释不会影响土壤微生物多样性,但稀释度超过阈值后,多样性则随着稀释程度的增加而降低,然而物种丰富度的降低可能通过均匀度的增加得到了一定程度的缓冲,这导致 D5 处理与 D3 处理相比,多样性降低的程度较小。②稀释处理可能破坏了物种之间的共生关系,使某些物种不能生存,导致多样性降低。③稀释处理缓和了物种之间的竞争关系,这可能导致群落中某些稀有种丰度在培养过程中快速增加,而生物不同的生长速率也影响了物种多样性^[27]。AWCD 变化幅度较大的土样具有较高的碳源利用能力,也往往具有较高的微生物丰度。对 96 h 的 AWCD 进行单因素方差分析,发现不同处理土壤微生物 AWCD 随培养时间的增加呈逻辑斯蒂增长模式,且 D1 处理 AWCD 显著高于 D3 和 D5 处理($P < 0.05$)。这可能是因为稀释处理使物种多样性降低,导致碳源利用能力减弱,与固氮速率相似。但是 Wertz 等^[28]发现移除实验导致微生物多样性减少的程度不足以影响土壤碳矿化和固氮速率,这可能是因为采集土样物种组成和结构的不同,因此对多样性减少响应的模式有差异。

通过 PCA 分析发现不同处理在 PC 轴出现了明显的分异,整体可分为三类,即 D1、D3 和 D5,其中与 PC1 显著相关的碳源有 22 种,主要为碳水化合物类和酸类,其次是氨基酸类和醇类;与 PC2 显著相关的碳源有 5 种($P < 0.05$)。热图也表明稀释处理聚为三类。由此可知,不同稀释处理土壤微生物群落形成了各自独特的代谢功能特征,且 D1 处

理土壤微生物对碳水化合物类(肝糖、D-纤维二糖)、氨基酸类(L-精氨酸、L-苏氨酸、甘氨酸-L-谷氨酸)、酯类(丙酮酸甲酯)、胺类(苯乙基胺)和酸类(γ -羟基丁酸、衣康酸)的利用显著高于 D5 处理;对 D-半乳糖醛酸的利用显著低于 D5 处理($P < 0.05$)。这可能是因为稀释处理后,由于种间竞争减弱,降解纤维素和木质素的微生物快速增殖,土壤中诱导降解纤维素和木质素的酶增加,因此半乳糖醛酸的利用效率逐渐提高。

AWCD 最大值(K 值)越大代表生物多样性越高、生态位越特化^[29]。生态位理论认为群落稳定存在是由于生态位的分化,而功能冗余认为在生态系统中,不同的物种发挥着相同的功能,一个物种的丧失可以由另一物种来替代,因此,生物多样性降低对生态系统功能没有较大影响^[9, 10]。本研究 D1 处理的 K 值显著高于 D5 处理($P < 0.05$),说明 D1 处理土样生物多样性高,群落结构稳定,且 D1 处理累积碳矿化量和 AWCD 显著均高于 D5 处理,说明在一定尺度上,生物多样性越高,群落结构越稳定,生态功能则越强。

综上,土壤微生物物种多样性与土壤碳矿化速率和累计矿化量显著相关,这与功能冗余相悖,因此推断在庞泉沟自然保护区阔叶混交林中,土壤微生物物种多样性的减少影响其生态系统功能,功能冗余被高估。

4 结论

(1)本研究推断在庞泉沟自然保护区阔叶混交林,土壤微生物多样性的降低显著影响了土壤的碳矿化速率和累计矿化量,对其生态系统功能产生较大影响。

(2)物种多样性影响土壤的碳源利用模式,功能冗余被高估。

参考文献:

- [1] 罗路云,金德才,左晖,等. 沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 735-742.
Luo L Y, Jin D C, Zuo H, et al. Effects of *Rhodopseudomonas palustris* PSB06 on pepper rhizosphere microbial community structure [J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 735-742.
- [2] Báldi A, Batáry P. Spatial heterogeneity and farmland birds: different perspectives in Western and Eastern Europe[J]. Ibis, 2011, **153**(4): 875-876.
- [3] Wright D H. Species-energy theory: an extension of species-area theory[J]. Oikos, 1983, **41**(3): 496-506.
- [4] O'Brien E. Water-energy dynamics, climate, and prediction of

- woody plant species richness: an interim general model [J]. *Journal of Biogeography*, 1998, **25**(2): 379-398.
- [5] 景新新, 苏志忠, 邢红恩, 等. 不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 3208-3215.
- Jing X X, Su Z Z, Xing H E, *et al.* Biological effects of ZnO nanoparticles as influenced by arbuscular mycorrhizal inoculation and phosphorus fertilization[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 3208-3215.
- [6] 曾清苹, 何丙辉, 毛巧芝, 等. 缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物 PLFA 沿海拔梯度的变化[J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4667-4675.
- Zeng Q P, He B H, Mao Q Z, *et al.* Effects of different altitudes on soil microbial PLFA and enzyme activity in two kinds of forests [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4667-4675.
- [7] Sayer E J, Oliver A E, Fridley J D, *et al.* Links between soil microbial communities and plant traits in a species-rich grassland under long-term climate change [J]. *Ecology and Evolution*, 2017, **7**(3): 855-862.
- [8] Xu Z W, Ren H Y, Li M H, *et al.* Environmental changes drive the temporal stability of semi-arid natural grasslands through altering species asynchrony[J]. *Journal of Ecology*, 2015, **103**(5): 1308-1316.
- [9] Kelly E L A, Eynaud Y, Clements S M, *et al.* Investigating functional redundancy versus complementarity in Hawaiian herbivorous coral reef fishes [J]. *Oecologia*, 2016, **182**(4): 1151-1163.
- [10] Loreau M. Does functional redundancy exist? [J]. *Oikos*, 2004, **104**(3): 606-611.
- [11] Moya A, Ferrer M. Functional redundancy-induced stability of gut microbiota subjected to disturbance [J]. *Trends in Microbiology*, 2016, **24**(5): 402-413.
- [12] Rousk J, Brookes P C, Bååth E. Contrasting soil pH effects on fungal and bacterial growth suggest functional redundancy in carbon mineralization [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, **75**(6): 1589-1596.
- [13] Naidoo R, Balmford A, Costanza R, *et al.* Global mapping of ecosystem services and conservation priorities[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**(28): 9495-9500.
- [14] Philippot L, Spor A, Hénault C, *et al.* Loss in microbial diversity affects nitrogen cycling in soil [J]. *ISME Journal*, 2013, **7**(8): 1609-1619.
- [15] Hol W H G, De Boer W, Termorshuizen A J, *et al.* Reduction of rare soil microbes modifies plant-herbivore interactions [J]. *Ecology Letters*, 2010, **13**(3): 292-301.
- [16] Bekku Y, Koizumi H, Oikawa T, *et al.* Examination of four methods for measuring soil respiration[J]. *Applied Soil Ecology*, 1997, **5**(3): 247-254.
- [17] Delgado-Baquerizo M, Giarinada L, Reich P B, *et al.* Lack of functional redundancy in the relationship between microbial diversity and ecosystem functioning [J]. *Journal of Ecology*, 2016, **104**(4): 936-946.
- [18] 王强, 戴九兰, 吴大千, 等. 微生物生态研究中基于 BIOLOG 方法的数据分析[J]. *生态学报*, 2010, **30**(3): 817-823.
- Wang Q, Dai J L, WU D Q, *et al.* Statistical analysis of data from BIOLOG method in the study of microbial ecology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(3): 817-823.
- [19] 刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 等. 鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2141-2148.
- Liu X, Liu B G, Chen Y W, *et al.* Responses of nutrients and chlorophyll a to water level fluctuations in Poyang Lake [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2141-2148.
- [20] Juarez S, Nunan N, Duday A C, *et al.* Soil carbon mineralisation responses to alterations of microbial diversity and soil structure[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, **49**(7): 939-948.
- [21] Vivant A L, Garmyn D, Maron P A, *et al.* Microbial diversity and structure are drivers of the biological barrier effect against *Listeria monocytogenes* in soil [J]. *PLoS One*, 2013, **8**(10): e76991.
- [22] Pedrós-Alió C. Marine microbial diversity: can it be determined? [J]. *Trends in Microbiology*, 2006, **14**(6): 257-263.
- [23] Coste J H. The principles and practice of the Diluton methods of sewage disposal. By W. E. Adeney. Cambridge public health series. Edited by G. S. Graham-Smith, M. D., F. R. S., and J. E. Purvis, M. A. Pp. xii + 161. London: Cambridge university press, 1928. 12s, 6d [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 1928, **47**(43): 1123-1124.
- [24] Yan Y, Kuramae E E, Klinkhamer P G L, *et al.* Revisiting the dilution procedure used to manipulate microbial biodiversity in terrestrial systems[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2015, **81**(13): 4246-4252.
- [25] 赵志瑞, 崔丙健, 侯彦林, 等. 水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 3011-3017.
- Zhao Z R, Cui B J, Hou Y L, *et al.* Impact on the microbial biomass and metabolic function of carbon source by black soil during rice cultivation [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 3011-3017.
- [26] Loreau M, Naeem S, Inchausti P, *et al.* Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges [J]. *Science*, 2001, **294**(5543): 804-808.
- [27] Watt M, Hugenholtz P, White R, *et al.* Numbers and locations of native bacteria on field-grown wheat roots quantified by fluorescence *in situ* hybridization (FISH) [J]. *Environmental Microbiology*, 2006, **8**(5): 871-884.
- [28] Wertz S, Degrange V, Prosser J I, *et al.* Maintenance of soil functioning following erosion of microbial diversity [J]. *Environmental Microbiology*, 2006, **8**(12): 2162-2169.
- [29] 贺纪正, 王军涛. 土壤微生物群落构建理论与时空演变特征 [J]. *生态学报*, 2015, **35**(20): 6575-6583.
- He J Z, Wang J T. Mechanisms of community organization and spatiotemporal patterns of soil microbial communities [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(20): 6575-6583.

CONTENTS

Correlation Analysis of the Urban Heat Island Effect and Its Impact Factors in China	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3987)
Application of Satellite Remote Sensing in NO _x Emission Control	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (3998)
Control Models and Effect Evaluation of Air Pollution in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration	WANG Zhen-bo, LIANG Long-wu, LIN Xiong-bin, <i>et al.</i> (4005)
Pollution Characteristics of Aerosol Number Concentration in Winter and Spring in a Northern Suburb of Nanjing	WU Dan, ZHANG Fan, LIU Gang, <i>et al.</i> (4015)
Source Apportionment and Size Distribution of Aerosols at Lin'an Atmosphere Regional Background Station During Winter	SHI Shuang-shuang, WANG Hong-lei, ZHU Bin, <i>et al.</i> (4024)
Seasonal Variations in Particle Size Distribution and Water-soluble Ion Composition of Atmospheric Particles in Chengdu	TAO Yue-le, LI Qin-kai, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4034)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Quanzhou City	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4044)
Chemical Characteristics and Sources of Heavy Metals in Fine Particles in Beijing in 2011-2012	ZHOU Xue-ming, ZHENG Nai-jia, LI Ying-hong, <i>et al.</i> (4054)
Pollution Assessment and Source Analysis of Metals in PM _{2.5} in Haicang District, Xiamen City, China	ZHAO Li-si, YU Rui-lian, XU Ling-ling, <i>et al.</i> (4061)
Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in PM _{2.5} Fraction of Road Dust	ZHANG Jing, ZHANG Yan-jie, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4071)
Seasonal Variations in PM ₁₀ and Associated Chemical Species in Jiuxian Mountain in Fujian Province	WEI Ya, LIN Chang-cheng, HU Qing-hua, <i>et al.</i> (4077)
Characteristics of C2-C6 Hydrocarbons During the Winter Air Pollution Period in Beijing Urban Area	LI Yue, WEI Wei, YANG Gan, <i>et al.</i> (4084)
Analysis of Atmospheric Particulate Matter Pollution Characteristics by LIDAR in Beijing During Spring Festival, 2016	SHI Lin-lin, LI Ling-jun, LI Qian, <i>et al.</i> (4092)
Influence Factors and Sensitivity of Ozone Formation in Langfang in the Summer	LI Lei, ZHAO Yu-mei, WANG Xu-guang, <i>et al.</i> (4100)
Impact of Human Activities on Water-Rock Interactions in Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (4108)
Distinguishing the Properties and Sources of the Dissolved Organic Matter in Karst Reservoir Water During Winter Using Three-Dimensional Fluorescence Spectrum Technology: A Case Study in Wulixia Reservoir of Guangxi Province	LU Xiao-xuan, PENG Wen-jie, LI Qiang, <i>et al.</i> (4120)
Analysis of Temporal and Spatial Variations in Trace Element Migration in Karst Critical Zone: An Example of Jiguan Cave, Henan	LIANG Sha, YANG Yan, ZHANG Na, <i>et al.</i> (4130)
Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi Reservoir	GOU Ting, MA Qian-li, WANG Zhen-xing, <i>et al.</i> (4141)
Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll a and Its Relationship to Algae and Environmental Factors in Aha Reservoir	LUO Yi-fu, LI Lei, LI Qiu-hua, <i>et al.</i> (4151)
Spatio-temporal Variations in Phytoplankton Community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4160)
Spatio-temporal Variations, Contamination and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Chenghai Lake	YU Zhen-zhen, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (4169)
Characteristics of Phosphorus Output Through Runoff on a Red Soil Slope Under Natural Rainfall Conditions	ZUO Ji-chao, ZHENG Hai-jin, XI Tong-hang, <i>et al.</i> (4178)
Occurrence, Distribution and Health Risk of the Phthalate Esters in Riparian Soil in the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (4187)
Seasonal Distribution, Composition, and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in the Main Stream of the Luanhe River	WANG Yi-zhen, ZHANG Shi-lu, KONG Fan-qing, <i>et al.</i> (4194)
Occurrence and Human Exposure Risk Assessment of Organophosphate Esters in Drinking Water in the Weifang Binhai Economic-Technological Development Area	DONG Zheng, MA Yu-long, LI Jun-qi, <i>et al.</i> (4212)
Contamination Characteristics and Human Exposure to Organophosphate Flame Retardants in Road Dust from Suzhou City	LI Jing, WANG Jun-xia, XU Wan-ting, <i>et al.</i> (4220)
Cancer Risk of Human Intake of PAH-Contaminated Particles Based on Hand-to-Mouth Activities	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (4228)
Spatio-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability Based on Spatial Autocorrelation	LIU Yu, LAN Shuang-shuang, ZHANG Yong-xiang, <i>et al.</i> (4236)
Preparation of Ag-AgI/CN/MA Composites and Their Visible-light Photocatalytic Performance	ZHANG Sai, ZHANG Li-li, HU Chun (4245)
Effect of <i>Eichhornia crassipes</i> on Ammonification and Denitrification Microorganisms in Eutrophic Freshwaters	LI Jie, JIANG Li-juan, WANG Xiao-lin, <i>et al.</i> (4253)
Utilization of Copper (II) Wastewater for Enhancing the Treatment of Chromium (VI) Wastewater in Microbial Fuel Cells	XIONG Xiao-min, WU Xia-yuan, JIA Hong-hua, <i>et al.</i> (4262)
Efficiency and Microecology of a Soil Infiltration System with High Hydraulic Loading for the Treatment of Swine Wastewater	SU Cheng-yuan, LIU Fan-fan, ZHONG Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effects of Bacteria on the Growth of and Lipid Accumulation in <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivated in Municipal Wastewater	TU Ren-jie, JIN Wen-biao, HAN Song-fang, <i>et al.</i> (4279)
Enhanced Antibiotic Resistant Bacteria Removal from Wastewater Treatment Plant by Different Disinfection Technologies	LIU Ya-lan, MA Cen-xin, DING He-zhou, <i>et al.</i> (4286)
Coking Wastewater Treatment Efficiency and Comparison of Acute Toxicity Characteristics of the AnMBR-A-MBR and A ² -MBR Processes	ZHU Jia-di, LI Fei-fei, CHEN Li-jun (4293)
Stability of the CANON Process Based on Real-Time Control Technologies	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (4302)
Improving Nitrogen and Phosphorus Removal from Reclaimed Water Using a Novel Sulfur/Iron Composite Filler	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (4309)
Start-up and Capacity Enhancement of a Partial Nitrification Pilot Reactor in Continuous Flow	ZHU Qiang, LIU Kai, DONG Shi-yu, <i>et al.</i> (4316)
Quick Start-up Performance of Combined ANAMMOX Reactor Based on Different Inoculated Sludge Types	LÜ Gang, LI Tian, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (4324)
Effect of Two-Stage Aeration on Nitrogen Removal Performance of Aerobic Granular Sludge	WANG Wen-xiao, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (4332)
Construction of a High Efficiency Anaerobic Digestion System for Vinegar Residue	ZHOU Yun-long, XU Zhi-yang, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (4340)
Comparision of Ecological Risk Assessment Based on the Total Amount and Speciation Distribution of Heavy Metals in Soil: A Case Study for Longyan City, Fujian Province	WANG Rui, CHEN Ming, CHEN Nan, <i>et al.</i> (4348)
Heavy Metal Contamination of Soils and Crops near a Zinc Smelter	CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4360)
Characteristics and Influencing Factors of CH ₄ Emissions from the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (4370)
Effects of Plastic Film Mulching on Nitrous Oxide Emissions from a Vegetable Field	FENG Di, HAO Qing-ju, ZHANG Kai-li, <i>et al.</i> (4380)
Effects of Bamboo Biochar on Greenhouse Gas Emissions During the Municipal Sludge Composting Process	XIANG Qiu-jie, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4390)
Removal of Cd from Soil by <i>Aspergillus fumigatus</i> in a Semi-solid Culture	CHEN Yao-ning, WANG Yuan-nan, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4398)
Removal of Chlortetracycline and Morphological Changes in Heavy Metals in Swine Manure Using the Composting Process	WEN Qin-xue, CAO Yong-sen, CHEN Zhi-qiang (4405)
Remediation of Petroleum-Contaminated Soil Using a Bioaugmented Compost Technique	WU Man-li, CHEN Kai-li, YE Xi-qiong, <i>et al.</i> (4412)
Effects of Microbial Diversity on Soil Carbon Mineralization	AN Li-yun, LI Jun-jian, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4420)
Ozone Deposition and Risk Assessment for a Winter Wheat Field; Partitioning Between Stomatal and Non-stomatal Pathways	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (4427)
Progress in the Studies of Precipitation Chemistry in Acid Rain Areas of Southwest China	ZHOU Xiao-de, XU Zhi-fang, LIU Wen-jing, <i>et al.</i> (4438)