

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化	祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)
基于重庆本地碳成分谱的 PM _{2.5} 碳组分来源分析	张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)
重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究	徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)
基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析	王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)
基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)
典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析	徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)
火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究	王占山, 潘丽波 (853)
国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性	楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)
稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)
河口湿地近地面大气 CO ₂ 浓度日变化和季节变化	张林海, 仝川, 曾从盛 (879)
三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量	李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)
施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH ₄ 、N ₂ O 和 NH ₃ 排放特征	万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)
干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响	张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)
长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究	吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)
汾河中游浮游藻类群落特征及水质分析	王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)
基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究	陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)
三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征	李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)
黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析	于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)
太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素	揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)
黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系	董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)
纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究	杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)
铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究	唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)
磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响	张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)
预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响	赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)
陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行	付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)
冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征	黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)
烷基多苷促进污泥水解产酸的研究	陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)
高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响	操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)
兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价	李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)
珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价	郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)
海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价	李飞, 徐敏 (1035)
再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险	吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)
瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估	李如忠, 邵阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)
三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价	张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)
基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价	陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)
干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究	薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)
缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入	孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)
三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响	韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)
黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)
天然林土壤有机碳及矿化特征研究	杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)
不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化	张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)
硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响	杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)
6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应	山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)
基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究	张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)
人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究	吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)
农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析	陈晓娟, 吴小江, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)
中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态	宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)
苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析	周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)
UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响	刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)
Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响	张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)
对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究	宋彩霞, 邓新平, 厉阍, 肖伟 (1176)
克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用	刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)
铅元素人为循环环境释放物形态分析	梁静, 毛建素 (1191)
污染排放与环境质量关系模型构建与应用	李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)
微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展	闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)
《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)	

不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化

张思兰^{1,2}, 石孝均^{1,2}, 郭涛^{1,2*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 国家紫色土土壤肥力与肥料效益监测基地, 重庆 400716)

摘要: 土壤的湿润过程是一种常见的非生物胁迫形式, 为探明土壤湿润速率对土壤磷素淋溶的影响, 以及土壤微生物生物量与磷素淋溶形式的相关性, 设置0、2、4、24、48 h这5个不同土壤湿润速率, 对5个长期不同施肥处理的中性紫色土进行了室内磷素淋溶模拟分析。结果表明: ①土壤湿润过程中微生物生物量碳(MBC)在2 h降到最低, 随着湿润速率的降低, MBC逐渐升高; ②缓慢的土壤湿润速率有利于增强土壤的微生物活性, 有机肥配施氮磷钾肥(MNPK)的增强效果更加明显; ③所有施肥处理的磷素淋溶主要发生在0、2、4 h快速湿润速率下, 对于施用化肥的土壤而言, 缓慢湿润是减缓土壤磷素淋失的重要举措, 在田间磷素管理过程中具有重要意义; ④土壤淋洗出的磷以溶解态有机磷为主, 所有处理的淋洗液中DTP/TP、DOP/TP变化幅度最高, 分别为35.42%~85.99%、29.74%~78.58%; ⑤随着湿润速率的降低, 土壤微生物生物量碳与淋洗液中TP和TDP呈极显著负相关, 与DOP呈显著负相关($P < 0.05$)。综上所述, 可以推测土壤湿润后淋洗出的磷主要来源于土壤微生物。

关键词: 磷素淋溶; 湿润; 紫色土; 微生物生物量碳; 肥力

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-1111-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.03.041

Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Rewetting Rate

ZHANG Si-lan^{1,2}, SHI Xiao-jun^{1,2}, GUO Tao^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. The National Monitoring Base for Purple Soil Fertility and Fertilizer Efficiency, Chongqing 400716, China)

Abstract: Re-wetting was one of the most common forms of abiotic stresses experienced by soils. To investigate the effects of soil re-wetting rate on phosphorus (P) leaching and the relationship between soil microbial biomass carbon (MBC) and forms of P in leachate, five kinds of neutral purple soils of different fertilizer treatments were analyzed using simulating lab test at re-wetting rate of 0 h, 2 h, 4 h, 24 h and 48 h. The results showed that: ① The lowest content of MBC appeared at the rate of 2 h during the soil re-wetting process, and the content of MBC increased with the reducing re-wetting rate. ② Slower re-wetting helped to enhance soil microbial activity and the enhancement effect of organic fertilizer with NPK fertilizer (MNPK) was more significant. ③ The P leaching events of all fertilizer treatments occurred mainly at rapid re-wetting rates such as 0 h, 2 h, 4 h. Slower re-wetting was an important measure to prevent P leaching especially for the soils applied with chemical fertilizers, and it was of great significance in the field management of P. ④ Dissolved organic phosphorus (DOP) was the primary leaching part in leachate, and the variation range of ratio of total dissolved phosphorus (TDP) to total phosphorus (TP) and DOP to TP was 35.42% - 85.99% and 29.74% - 78.58% respectively. ⑤ With the reducing of re-wetting rate, significant negative correlation was observed between MBC and TP, TDP as well as DOP in the leachate ($P < 0.05$). To sum up, it was speculated that the P in soil leachate mainly came from soil microorganisms.

Key words: phosphorus leaching; re-wetting; purple soil; microbial biomass carbon; fertility

土壤磷(P)的大量输出是引起农业面源污染的主要原因, 要防治农业面源污染最关键的问题是对磷的来源加以控制^[1,2]。磷肥的施用是农田土壤磷的最主要来源, 当降雨径流发生时, 土壤磷以水溶态和颗粒态形式随径流向水体迁移, 成为水体中磷的重要补给源。目前国内外对于磷素淋溶形态已有大量研究, 主要从渗漏水中的可溶性全磷(TDP)、颗粒磷(PP)和全磷(TP)及土壤理化性质等方面进行探讨^[3~5], 而已进行的研究主要通过建立试验小区定点监测或者土柱模拟试验比较不同因素对磷形态

与数量变化的影响^[6,7], 而在土壤湿润过程中磷素淋洗的动态变化缺少相关的研究。

干燥土壤的湿润过程是一种常见的非生物胁迫形式, 其引起的土壤结构的物理性破坏和土壤表面基质的脱落增加了有机化合物的溶解性, 还可增加

收稿日期: 2013-07-01; 修订日期: 2013-09-16

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAD05B03); 农业部公益性行业科研专项(201203030); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2010B012)

作者简介: 张思兰(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤肥力, E-mail: silzhang@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: guotaosd@swu.edu.cn

微生物的流动性和可溶性有机物的扩散系数^[8]. 水旱轮作体系中,土壤经历着不断地干湿交替过程,而在由于变湿的过程中,土壤有效磷显著增加^[9],增大了土壤磷素进入环境中的可能性. 干土的快速湿润过程常常会引起土壤微生物数量、活性和土壤中易氧化活性有机碳数量的增加^[10,11],Turner 等^[12]的研究发现土壤重新湿润后进入水体中的水溶性磷可能来源于土壤微生物,而且与土壤快速湿润过程有关. Blackwell 等^[13]指出土壤湿润过程增加了土壤淋洗液中磷含量,且大部分属于有机磷. 因此,土壤湿润过程中微生物活性的增加是否会造成地表水中溶解磷的增加对控制土壤磷进入环境的来源具有重要意义.

紫色土是我国特有的土壤类型,主要分布在长江中上游. 重庆市北碚区位于三峡库区库尾,以适宜多种作物种植的水稻土、紫色土为主,占全部土壤面积的 81.7%,其磷素的迁移对三峡库区水体环境具有重要影响. 随着近年来极端天气的频繁发生,土壤干燥与湿润过程在短期内发生的频率越来越高,研究土壤湿润过程中土壤磷素的淋洗动态变化有助于预测土壤磷素淋洗进入环境的风险,特别是对于在三峡库区广泛分布的紫色土,有助于进行农田养分资源管理,减少磷素淋失,保障水体安全. 目前对中性紫色土磷素淋溶过程中土壤湿润速率是否影响磷的淋溶还鲜见报道. 为此,本研究通过在不同的湿速率条件下,比较长期不同定位施肥处理的紫色土磷素淋溶的形态,明确土壤湿润过程中土壤微生物生物量与磷的溶解性及淋失形式的相关性,以期为准评估长期施肥土壤磷素进入环境的风险以及合理进行水肥资源管理提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

长期施肥试验设在重庆市北碚区西南大学校本部试验农场内的“国家紫色土土壤肥力与肥料效益监测基地”,试验基地地处东经 106°26′,北纬 30°26′,属紫色丘陵区,方山浅丘坳谷地形,海拔

266.3 m,年均气温 18.4℃,全年降水 1 105.5 mm,日照 1 276.7 h,为亚热带季风气候. 四川和重庆的粮食基地县多分布在这种土壤上,具有广泛的代表性.

1.2 试验土壤

供试土壤为中性紫色水稻土,是由侏罗纪沙溪庙组紫色泥、页岩发育而成的紫色土(类),属于中性紫色土亚类、灰棕紫泥土属,是紫色土中面积最大的一个土属,约占紫色土类面积的 40%. 采用的耕作方式是稻-麦水旱轮作.

国家紫色土土壤肥力与肥料效益监测试验于 1991 年秋季开始,共设 13 个小区,小区面积为 120 m²,小区之间用 60 cm 深的水泥板隔开,互不侧渗且能独立排灌. 本研究涉及到 5 个小区处理:①对照(CK):无肥区;②化肥氮磷钾(NPK):水稻季氮肥(N)用量 150 kg·hm⁻²,小麦季每公顷氮肥(N)用量 135 kg·hm⁻²,每季磷肥(P₂O₅)用量 60 kg·hm⁻²,钾肥(K₂O)用量 60 kg·hm⁻²;③单施有机肥(M):有机肥每年施用一次,从 1996 年秋季开始每年在水稻收获后采用稻草还田,每公顷用量 7.5 t;④有机肥配施氮磷钾(MNPK);⑤永久休闲(F):长年不耕作、不施肥. 土壤样品于 2012 年 8 月 20 日水稻收获后利用“S”型布点法采于以上 5 个小区的耕层(0~20 cm),其基本化学性质见表 1. 去除土样中的植物残渣、石子等非土壤物质,风干后过 2 mm 筛,贮存备用.

1.3 试验处理

试验所用淋洗装置为内径 75 mm 的锥形塑料漏斗,漏斗柱口塞 0.3 g 不吸水的玻璃绒,分别称取以上 5 个处理的风干土样 21 g(以烘干土重计),松散地放置在锥形塑料漏斗中,在土样表层放置 0.45 μm 的滤膜,以利于土样中水的均匀分布. 试验处理参照 Blackwell 等^[13]的方法进行,21 g 土样用 30 mL 去离子水湿润,设置 0、2、4、24 和 48 h 共 5 个处理. 0 h 处理,去离子水一次性缓慢加入;其余处理分 10 次加入,每次加入 3 mL,2 h 处理,每隔 12 min 加一次水;4 h 处理,每隔 24 min 加一次水,以此

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic agrochemical properties of experimental soil

处理	有机质 /g·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	全磷 /g·kg ⁻¹	有效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	pH (土水比 1:20)
CK	20.63	1.06	0.46	3.86	70.00	7.94
NPK	25.64	1.45	0.75	28.12	63.00	7.16
M	26.94	1.53	0.44	4.38	133.00	7.45
MNPK	25.84	1.44	0.83	38.84	68.00	6.90
F	21.37	1.21	0.42	3.79	71.00	6.28

类推. 最后一次湿润后将整个装置放置 15 min, 便于收集更多的淋洗液, 将淋洗液收集在 30 mL 的聚碳酸酯瓶中, 及时测定或者在 4℃ 条件下保存, 并及时测定湿润土样的微生物生物量碳. 整个淋洗试验在 25℃ 条件下进行. 每个处理重复 3 次, 结果取平均值.

1.4 样品分析

水溶性磷(WP)的测定是称取 10 g 干土(以烘干干土重计), 加入 40 mL 去离子水, 振荡 1 h 后过滤^[13], 滤液用钼蓝比色法直接测定. Olsen-P 参照鲁如坤^[14]的方法, 称取 10 g 干土(以烘干土重计), 加入一小匙无磷活性炭粉和 200 mL 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ (pH 8.5), 振荡 1 h 后过滤, 滤液用钼酸铵比色法直接测定.

淋洗液中全磷含量采用改进的 Brookes 等^[15]的方法测定, 即加入分析纯高氯酸(70% ~ 72%) 2 mL 和 0.25 mL 饱和的 MgCl₂ 溶液, 高温消化至近干, 用 0.6 mol·L⁻¹ 下稀 HCl 加热溶解, 用钼锑抗比色法分析, 即为全磷(TP); 将过滤后的淋洗液采用与全磷相同的方法测定即为可溶性全磷(TDP); 将部分淋洗液用 0.45 μm 的微孔滤膜过滤, 用钼锑抗直接显色分析^[16]即为钼酸反应磷(MRP), 多为无机磷; 可溶性全磷(TDP)与钼酸反应磷(MRP)差值为可溶性有机磷(DOP), 全磷(TP)与可溶性全磷(TDP)的差值即为颗粒态磷(PP).

湿润后的土样等分成 7 份, 参考 Vance 等^[17]的方法测定微生物生物量碳(MBC), 3 份用氯仿熏蒸 24 h, 3 份不熏蒸, 每一份加入 12 mL 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 浸提, 滤液用 K₂Cr₂O₇ 消煮后用 FeSO₄ 滴定法测定; 剩余的一份土样用于测定水分含量.

研究数据的计算和分析分别采用 Excel 2003 和 SPSS 18.0 软件完成.

2 结果与分析

2.1 试验土样的磷状况

长期定位施肥造成土壤中不同磷的形态产生很大的变化, 由表 2 可以看出, 不同施肥处理间 Olsen-P 和 WP 都存在差异. 施用化学氮磷钾肥的土壤 Olsen-P 显著高于不施化肥的土壤, NPK 和 MNPK 处理的 Olsen-P 显著高于 CK、M 和 F 处理, MNPK 处理的 Olsen-P 含量最高(49.94 mg·kg⁻¹), 分别是 M、CK、F 处理的 9.8、10.6 和 10.5 倍. 化肥的施用也增加了土壤的 WP, MNPK 处理的 WP 达到最高(0.92 mg·kg⁻¹), 分别是 NPK、M、CK、F 处理的 1.6、7.1、2.3 和 2.0 倍, 单施厩肥的 WP 最低(0.13 mg·kg⁻¹), WP 与磷素淋失有一定相关性, 说明有机肥配施氮磷钾肥增加了磷素淋失的风险.

表 2 土样湿润前的基本性质¹⁾

Table 2 Basic properties of experimental soil before rewetting				
处理	Olsen-P /mg·kg ⁻¹	WP /mg·kg ⁻¹	含水量 /%	田间持水量 /%
CK	4.70 b	0.39 b	1.66	32.35
NPK	37.29 a	0.56 b	1.85	33.21
M	5.07 b	0.13 c	3.02	35.16
MNPK	49.94 a	0.92 a	1.88	34.87
F	4.76 b	0.4 b	2.31	29.62

1) 同一列中不同字母表示不同施肥处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平

2.2 湿润速率对微生物生物量碳的影响

由表 3 可以看出, 随着湿润速率的变化, 不同施肥处理的微生物生物量碳大致表现出相同的变化趋势, 从 0 ~ 48 h, 微生物生物量碳先降低后升高. 所有处理均在 2 h 湿润时降到最低, 随着湿润速率的降低, 微生物生物量碳逐渐升高. MNPK 处理的最高微生物生物量碳出现在 24 h(187.79 mg·kg⁻¹), 但在 4、24、48 h 时微生物生物量碳差异不显著. CK、NPK、M、F 处理的微生物生物量碳在 4、24、48 h 时差异显著, 且最高微生物生物量碳含量出现在 48 h. 不同施肥处理在相同的湿润速率下也存在显著差异, M 处理在 0 h 和 4 h 湿润时微生物生物量碳显著高于其余处理, MNPK 处理在 4 h 和 24 h 湿

表 3 土壤微生物生物量碳随湿润速率的变化¹⁾

Table 3 Variations of soil microbial biomass at different rewetting rates						
施肥处理	湿润前	0 h	2 h	4 h	24 h	48 h
CK	31.08 b C	96.76 b B	28.78 b C	73.77 c B	106.77 b AB	131.45 b A
NPK	77.71 a C	109.89 b B	58.32 b C	125.09 b B	100.12 b B	216.85 a A
M	62.15 a C	166.38 a AB	111.88 a B	144.7 ab B	128.21 b B	192.71 a A
MNPK	74.34 a B	98.61 b B	46.40 b C	173.59 a A	187.79 a A	157.59 b A
F	31.02 b C	56.88 bc C	32.67 b C	86.17 c B	95.69 b B	146.91 b A

1) 同一列不同小写字母表示不同施肥处理在相同湿润速率下差异达到 $P < 0.05$ 显著水平, 同一行不同大写字母表示同一施肥处理在不同湿润速率下差异达到 $P < 0.05$ 显著水平

润时的微生物生物量碳都显著高于 CK 和 F 处理, NPK 和 M 处理在 48 h 时的微生物生物量碳显著高于其余处理,可以看出施用有机肥的土壤微生物活性较高。

2.3 湿润速率对淋洗液中 TP 浓度的影响

图 1 为不同施肥处理淋洗液中 TP 浓度的变化曲线。在一定时间范围内,淋洗液中 TP 浓度大致表现出相同的变化趋势,随着湿润速率的减缓而降低。在 0~24 h 之间,CK、NPK、M、MNPK、F 处理淋洗液中的 TP 浓度变幅分别为 206.5~824.23、321.81~717.77、210.99~643.19、281.91~760.33、184.4~649.35 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,在 24 h 与 48 h 之间 TP 浓度变化不明显,说明当湿润速率降低时,湿润时间对土壤磷素淋失的影响不大。NPK 和 F 处理在 0 h 时淋洗液中的 TP 浓度最高,分别为 717.77 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 649.35 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,其余 3 个处理均在 2 h 时达到最高,M、MNPK 和 CK 处理的最高 TP 浓度分别为 394.34、612.03 和 425.44 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; NPK 和 CK 处理的 TP 浓度在 48 h 时降到最低,分别为 247.22 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 150.00 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,M、MNPK 和 F 处理的最低 TP 浓度出现在 24 h,分别为 210.99、281.91 和 184.40 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,说明土壤磷素的淋失主要发生在快速湿润速率条件下。在 0 h 和 4 h 湿润下条件下 NPK 和 MNPK 淋洗液中的 TP 浓度高于不施化肥的 M 和 CK 处理,在 24 h 和 48 h 湿润条件下各施肥处理的淋洗液 TP 浓度差异不显著,说明缓慢湿润施用化肥的土壤可以减缓磷素的淋失,在田间磷素管理过程中具有重要意义。

2.4 湿润速率对淋洗液中磷形态和浓度的影响

如图 2 所示,随着湿润速率的变化,土壤中钼酸

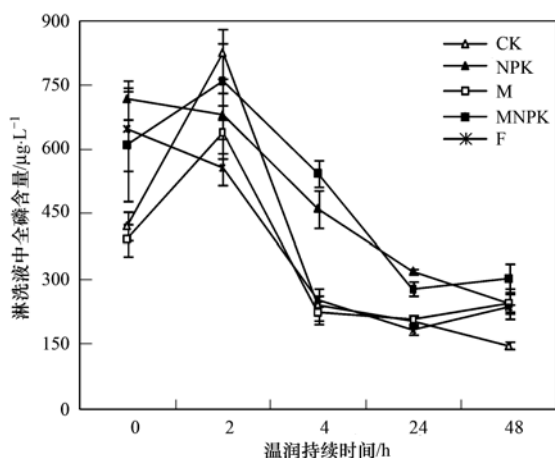


图 1 淋洗液中全磷浓度随湿润速率的变化

Fig. 1 Variations of TP concentration in leachate at different rewetting rates

盐反应磷(MRP)、可溶性全磷(TDP)、可溶性有机磷(DOP)和颗粒磷(PP)都有不同程度的淋洗,且各形态磷浓度均随着湿润速率的减缓大体呈下降的

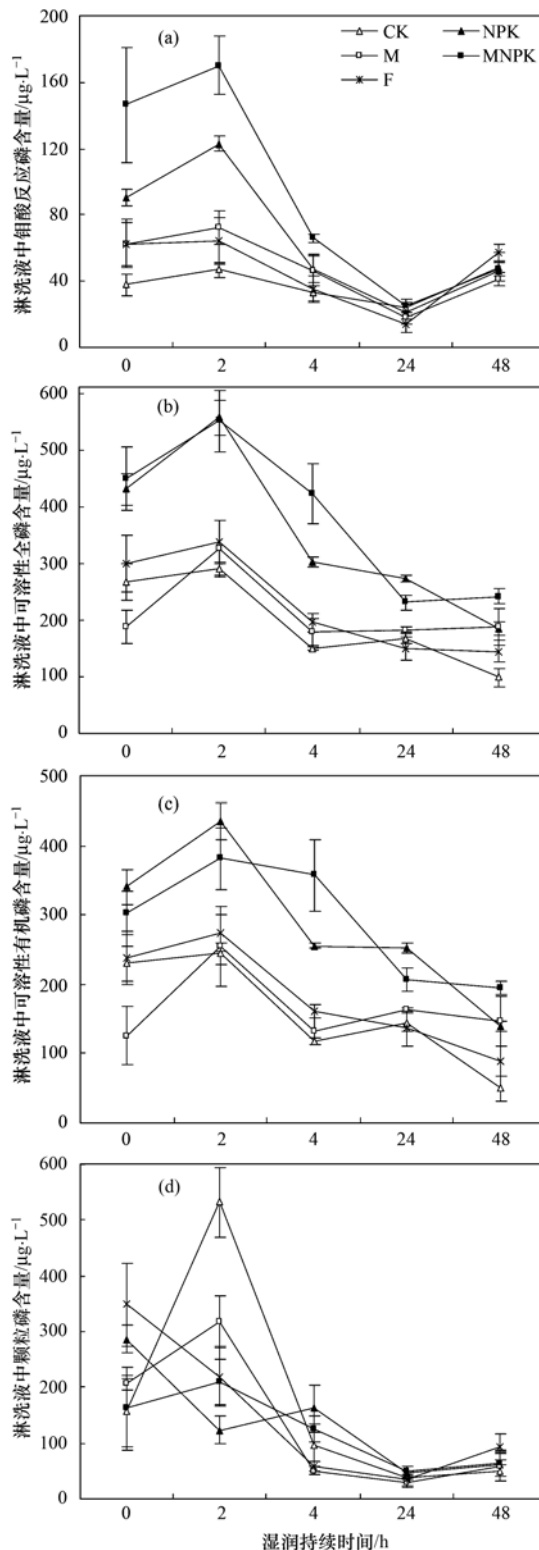


图 2 淋洗液中各形态磷浓度随湿润速率的变化

Fig. 2 Variations in concentrations of different forms of phosphorus in leachate at different rewetting rates

趋势. 图 2(a) 为不同施肥处理淋洗液中 MRP 浓度的变化曲线, 所有施肥处理呈相同的变化趋势, 均在 2 h 时达到最高, 24 h 时降到最低; 在 0 h 和 2 h 湿润速率下, MNPK 和 NPK 处理淋洗液中的 MRP 浓度高于 CK、M、F 处理, 在 4、24、48 h 湿润速率下各处理的 MRP 浓度差异不显著. 由图 2(b) 和 2(c) 可以看出, 所有施肥处理的 TDP 和 DOP 浓度变化趋势一致, 均在 2 h 时达到最高, 48 h 时达到最低. 图 2(d) 显示出不同施肥处理的 PP 浓度变化趋势稍有不同, NPK 和 F 处理的最高浓度出现在 0 h, 分别为 $286.73 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $348.93 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, MNPK、M 和 CK 处理则在 2 h 时达到最高, 分别为 208.70 、 316.60 和 $532.25 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 5 个处理的最低浓度均出现在 24 h. 在快速湿润速

率 0、2 和 4 h 条件下 NPK、MNPK 处理的 DTP、DOP 浓度高于 CK、M、F 处理, 在缓慢湿润速率 24 h 和 48 h 条件下各处理的 MRP、DTP、DOP、PP 浓度差异不显著, 说明湿润速率是影响磷素淋溶的重要因子.

为了更清楚地说明土壤磷素淋溶的主要形态, 表 4 列举了 5 种施肥处理土壤在不同湿润速率下渗滤液中 MRP、DTP、DOP、PP 与 TP 的比率. 从中可以看出, MRP/TP、DTP/TP、DOP/TP、PP/TP 在所有处理中变化幅度分别为 $5.68\% \sim 32.43\%$ 、 $35.42\% \sim 85.99\%$ 、 $29.74\% \sim 78.58\%$ 、 $14.01\% \sim 64.58\%$, 说明磷素淋失的主要形态为可溶性磷. 由 $\text{DOP} = \text{DTP} - \text{MRP}$ 可知, 淋洗出的大部分可溶性磷为可溶性有机磷.

表 4 淋洗液中不同形态磷浓度以及占全磷浓度的比率

Table 4 Concentration of different forms of phosphrous and their ratio to TP in leachate					
湿润持续时间/h	施肥处理	MRP/TP/%	TDP/TP/%	DOP/TP/%	PP/TP/%
0	CK	8.95	62.94	53.99	37.06
	NPK	12.58	60.05	47.47	39.95
	M	15.81	47.79	31.99	52.21
	MNPK	23.90	73.48	49.57	26.52
	F	9.60	46.26	36.67	53.74
2	CK	5.68	35.42	29.74	64.58
	NPK	18.08	81.91	63.84	18.09
	M	11.23	50.78	39.55	49.22
	MNPK	22.40	72.55	50.15	27.45
	F	11.50	60.60	49.10	39.40
4	CK	13.30	61.17	47.87	38.84
	NPK	10.21	65.12	54.92	34.88
	M	20.27	78.03	57.76	21.97
	MNPK	12.03	77.15	65.12	22.85
	F	13.81	77.23	63.42	22.77
24	CK	11.57	81.84	70.27	18.16
	NPK	6.66	85.24	78.58	14.76
	M	8.39	85.99	77.60	14.01
	MNPK	8.92	81.93	73.01	18.07
	F	7.66	81.60	73.94	18.40
48	CK	32.43	66.05	33.62	33.95
	NPK	18.68	75.07	56.39	24.93
	M	16.68	76.14	59.46	23.86
	MNPK	15.42	78.87	63.45	21.13
	F	24.07	61.09	37.02	38.91

2.5 微生物生物量碳与淋洗液中 TP、TDP 和 DOP 的相关性分析

在 TP、TDP 和 DOP 中, 有机磷所占的比例较高, 而这部分有机磷有可能来源于微生物. 为了更清晰地说明微生物生物量与土壤磷素淋溶的关系, 图 3 显示了微生物生物量碳与淋洗液中 TP、TDP

和 DOP 浓度的线性关系, 可以看出微生物生物量碳与淋洗液中 TP 和 TDP 呈极显著负相关, 与 DOP 呈显著负相关. 这与前面提到的微生物生物量碳随着湿润速率的减缓而增加和 TP、TDP 和 DOP 随着湿润速率的减缓而降低是相呼应的, 说明土壤湿润速率对磷素淋溶的影响与土壤微生物生物量的变化有

关. 结合 DTP/TP、DOP/TP 的分析,淋洗出的大部分磷为可溶性有机磷,可以推测土壤湿润后淋溶出的磷主要来源于土壤微生物.

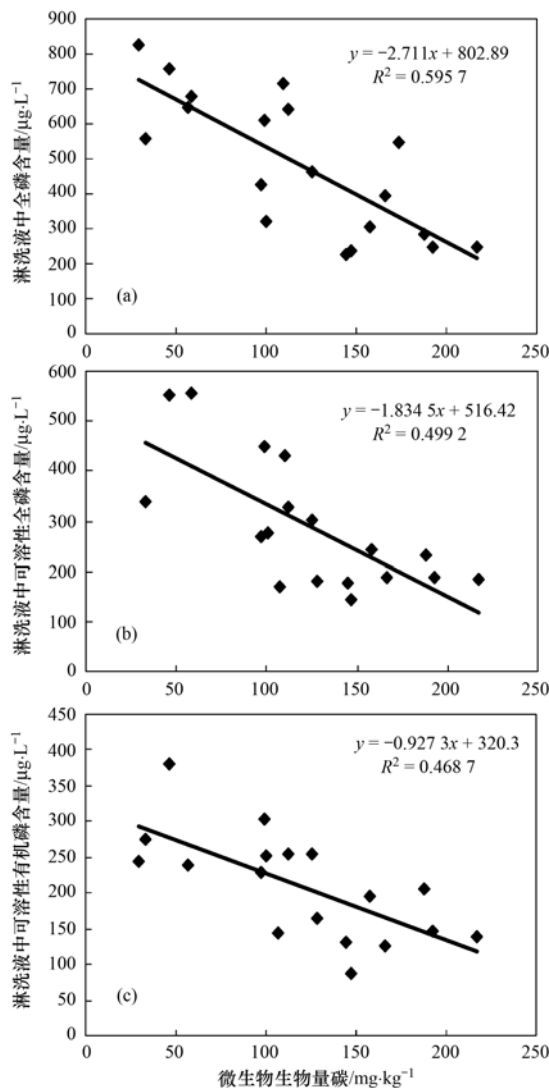


图3 土壤微生物生物量碳与淋洗液中 TP、TDP 和 DOP 的相关性

Fig. 3 Relationship between soil microbial biomass carbon and TP, TDP, DOP in leachate

3 讨论

3.1 长期不同施肥模式对土壤磷素淋溶的影响

不同培肥措施长期实施会导致土壤性质和肥力的差异. 赵庆雷等^[18]的研究指出长期不同施肥模式显著改变了 0~20 cm 土壤磷素肥力特性, NPK 化肥配施与无肥对照相比, 耕层土壤 Olsen-P 和 TP 含量分别提高了 108.8% 和 31.9%. 古巧珍等^[19]的研究也指出氮磷钾化肥配施有机肥料可以使土壤有机质、全氮和全磷大幅度增加. 本研究也得出了类似的结果, 长期施用化肥 (NPK) 和有机肥配施氮磷钾

肥 (MNPK) 的土壤磷储量显著高于没有施用化肥的处理 (M、CK、F).

土壤磷素状况是影响磷素淋溶的重要因素, 当土壤有效磷达到淋溶临界值时, 磷素就会随径流进入环境中^[20], 长期不同施肥模式可以通过改变土壤磷储量而改变土壤磷素淋溶特性. 在本研究快速湿润速率下, 施用化肥的土壤 (NPK、MNPK) 湿润后淋洗液中的 MRP 浓度高于不施化肥的处理 (M、CK、F), 在缓慢湿润条件下各施肥处理的淋洗液 MRP 浓度差异不显著, 而 MRP 多为无机磷, 生物有效性高, 说明快速湿润对施用化肥土壤的磷素淋失存在很大的威胁.

3.2 土壤湿润速率对磷素淋溶和微生物生物量碳动态的影响

土壤经过干燥-湿润后溶解出的磷以有机磷为主, 因为磷素是微生物有机体的重要组成元素, 主要存在于磷脂、核酸、酶等化合物中, 而微生物细胞在土壤干燥过程中渗透压发生变化而裂解死亡, 从而释放大量的磷素^[21]. 裂解释放的磷素有多种去向, 部分被土壤中的活性微生物吸收利用, 部分被植物吸收, 还有一部分被淋洗进入环境中^[22], 但磷素淋溶的程度主要取决于湿润类型, 湿润速率是磷素淋溶的重要影响因素. 本研究结果显示, 磷素淋溶主要发生在快速湿润条件下, 与 Blackwell 等^[13]的结果一致. 在整个湿润过程中, 淋溶出的磷以溶解态为主, 这与杨学云等^[23]的原状土柱模拟试验结果是一致的, 但其研究中淋洗出的钼酸反应磷 (MRP) 比例较高, 本研究是可溶性有机磷 (DOP) 的比例较高, 可以进一步推测淋洗出的磷来源于土壤微生物.

微生物生物量碳可以表征微生物的活性, 本研究结果得出, 在快速湿润作用下, 土壤微生物生物量碳含量降低, 随着湿润速率的减缓, 土壤微生物生物量碳含量逐渐升高. 其含量降低是因为土壤经过干燥过程后快速重新湿润过程对微生物产生了渗透性震扰, 使一部分仍存活的微生物不能重新适应新的生活环境被迫死亡, 同时也能释放更多的有机无机溶质^[24]. 土壤干燥过程使得大量土壤微生物死亡, 而死亡微生物体是很容易被分解的活性有机质, 同时存活微生物为了维持其水势与外界平衡也会被迫向其体外排放大量易分解有机化合物^[21], 这样就使得经过干燥和重新湿润的土壤中积累起了相当数量易被微生物呼吸消耗的活性有机质; 在缓慢湿润过程中存活的微生物自身可以进行渗透调节, 适应新的环境, 并吸收利用积累的大量活性有机质而快速

繁殖生长,重新活跃起来的新微生物种群具有更强的生物活性,本研究在缓慢湿润作用下能检测到微生物生物量碳含量有所升高,这与 Bottner^[25]的研究结果一致。但 Butterly 等^[26]的研究指出,土壤经过反复干燥-湿润过程后土壤微生物生物量碳和磷会逐渐降低。影响土壤干燥-重新湿润过程中微生物量变化的因素很多,例如土壤类型、干燥程度、湿润时间、湿润频率、微生物种类等,因此会出现多种研究结果。

3.3 土壤磷素淋洗的动态变化对土壤微生物量变化的响应

虽然微生物生物量在土壤有机质中所占的比例很小,但是它固磷量却很大^[27],大量研究也已证明土壤经过干燥-湿润过程后释放出的磷主要来源于微生物生物量^[4,12]。Turner 等^[28]对采自英格兰和威尔士的 29 种草原土壤进行了干燥和快速重湿润处理,得出土壤的水溶性磷与微生物生物量磷呈极显著正相关,指出微生物释放的磷很可能与土壤优先流结合淋洗出土体而引发水体污染,解释了土壤经过干燥-重湿润过程后水体中的磷浓度升高的现象。本研究结果指出,在快速湿润条件下,微生物生物量碳含量降低,淋洗液中的磷浓度却是最高的,说明土壤湿润后淋洗出的磷来源于土壤中的微生物;随着湿润速率的降低,微生物生物量碳与淋洗液中 TP 和 TDP 呈现的是极显著负相关,与 DOP 呈显著负相关,这与 Turner 等^[28]的结果并不矛盾。本研究讨论的是湿润速率对土壤磷素淋溶的影响,在前面也提到,在缓慢湿润过程中存活的微生物可以吸收利用积累的大量活性有机质而快速繁殖,因此在缓慢湿润作用下能检测到微生物生物量碳含量有所升高,而淋洗出的磷含量就会相应地降低,说明土壤湿润速率减缓可以降低磷素淋溶的风险。

4 结论

(1)所有施肥处理的微生物生物量碳在 2 h 湿润时降到最低,随着湿润速率的降低,微生物生物量碳逐渐升高。缓慢的土壤湿润速率有利于增强土壤的微生物活性,有机肥配施氮磷钾肥(MNPK)的增强效果更加明显,湿润速率在由快变慢的过程中,MNPK 处理的微生物生物量碳显著高于不施化肥处理(CK、F)。

(2)土壤湿润速率是影响磷素淋溶的重要因素,所有施肥处理的磷素淋溶都发生 0 h、2 h、4 h 快速湿润速率下,缓慢湿润土壤可以减缓土壤磷素

的淋失。在 0 h 和 4 h 湿润条件下 NPK 和 MNPK 淋洗液中的 TP 浓度显著高于不施化肥的 M 处理,在 24 h 和 48 h 湿润条件下各处理差异不显著,对于施用化肥的土壤缓慢湿润是减缓土壤磷素淋失的重要举措,在田间磷素管理过程中具有重要意义。

(3)土壤淋洗出的磷以溶解态有机磷为主,所有处理的淋洗液中 DTP/TP、DOP/TP 变化幅度最高,分别为 35.42%~85.99%、29.74%~78.58%。随着湿润速率的降低,土壤微生物生物量碳与淋洗液中 TP 和 TDP 呈极显著负相关,与 DOP 呈显著负相关,可以推测土壤湿润后淋洗出的磷主要来源于土壤微生物。

参考文献:

- [1] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017.
- [2] Sharpley A N. Soil mixing to decrease surface stratification of phosphorus in manured soils [J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32(4): 1375-1384.
- [3] Wendroth O. Phosphorus loss from soil to water [J]. Journal of Environmental Quality, 1999, 28(3): 1041-1042.
- [4] Turner B L, Hayarth P M. Phosphorus forms and concentrations in leachate under four grassland soil types [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(3): 1090-1099.
- [5] 李学平,石孝均. 紫色水稻土磷素动态特征及其环境影响研究[J]. 环境科学, 2008, 29(2): 434-439.
- [6] 张志剑,阮俊华,朱荫渭,等. 稻田层间流活性磷素的动态变化[J]. 环境科学, 2003, 24(2): 46-49.
- [7] 姜运生,李忠佩,张桃林. 不同水分状况及施磷量对水稻土中速效磷含量的影响[J]. 土壤, 2005, 37(6): 640-644.
- [8] Powlson D S, Jenkinson D S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil- II. Gamma irradiation, autoclaving, air-drying and fumigation [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1976, 8(3): 179-188.
- [9] 兰全美,张锡洲,李廷轩. 水旱轮作条件下免耕土壤主要理化特性研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 145-149.
- [10] Pulleman M, Tietema A. Microbial C and N transformations during drying and rewetting of coniferous forest floor material [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(2): 275-285.
- [11] Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(11): 1485-1498.
- [12] Turner B L, Hayarth P M. Phosphorus solubilization in rewetted soils [J]. Nature, 2001, 411(6835): 258.
- [13] Blackwell M S A, Brookes P C, De la Fuente-Martinez N, et al. Effects of soil drying and rate of re-wetting on concentrations and forms of phosphorus in leachate [J]. Biology and Fertility of Soils, 2009, 45(6): 635-643.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 179-181.

- [15] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1982, **14**(4): 319-329.
- [16] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, *et al.* Phosphorus leaching from containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, **24**(5): 904-910.
- [17] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, **19**(6): 703-707.
- [18] 赵庆雷, 王凯荣, 马加清, 等. 长期不同施肥模式对稻田土壤磷素及水稻磷营养的影响[J]. *作物学报*, 2009, **35**(8): 1539-1545.
- [19] 古巧珍, 杨学云, 孙本华, 等. 长期定位施肥对土娄土耕层土壤养分和土地生产力的影响[J]. *西北农业学报*, 2004, **13**(3): 121-125.
- [20] 李学平, 石孝均, 刘萍, 等. 紫色土磷素流失的环境风险评估——土壤磷的“临界值”[J]. *土壤通报*, 2011, **42**(5): 1153-1158.
- [21] Grierson P F, Comerford N B, Jokela E J. Phosphorus mineralization kinetics and response of microbial phosphorus to drying and rewetting in a Florida Spodosol[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **30**(10-11): 1323-1331.
- [22] Qiu S, McComb A J, Bell R W, *et al.* Phosphorus dynamics from vegetated catchment to lakebed during seasonal refilling[J]. *Wetlands*, 2004, **24**(4): 828-836.
- [23] 杨学云, 古巧珍, 马路军, 等. 壤土磷素淋移的形态研究[J]. *土壤学报*, 2005, **42**(5): 792-798.
- [24] Halverson L J, Jones T M, Firestone M K. Release of intracellular solutes by four soil bacteria exposed to dilution stress [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**(5): 1630-1637.
- [25] Bottner P. Response of microbial biomass to alternate moist and dry conditions in a soil incubated with ^{14}C - and ^{15}N -labelled plant material [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, **17**(3): 329-337.
- [26] Butterly C R, Bunemann E K, McNeill A M, *et al.* Carbon pulses but not phosphorus pulses are related to decreases in microbial biomass during repeated drying and rewetting of soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(7): 1406-1416.
- [27] McNeill A M, Sparling G P, Murphy D V, *et al.* Changes in extractable and microbial C, N, and P in a Western Australian wheatbelt soil following simulated summer rainfall [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, **36**(5): 841-854.
- [28] Turner B L, Driessen J P, Haygarth P M, *et al.* Potential contribution of lysed bacterial cells to phosphorus solubilisation in two rewetted Australian pasture soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(1): 187-189.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron; Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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)

2014年3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行