

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)	

硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响

杨波¹, 王文¹, 曾清如², 周细红²

(1. 三亚学院理工学院, 三亚 572022; 2. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128)

摘要: 通过实验室模拟, 研究了不同浓度硫脲与尿素配施后, 对酸性红壤的 pH 值及其金属元素有效性的影响。结果表明, 土壤施加尿素后, 其 pH 值有先升高后逐渐下降的趋势, 而硫脲与尿素配施后, 其 pH 值的下降趋势会受到抑制, 尤其是当硫脲浓度达到 $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 土壤 pH 由最初的 4.65 上升到 6.50 以上, 并在实验的中后期一直维持在 6.0 以上。硫脲和尿素配施后, Cu 的有效态含量受硫脲浓度的影响较小, Zn、Al 的有效态含量随着硫脲浓度的升高而降低, Mn 的有效态含量在高浓度硫脲下, 其含量保持在一个较高的水平, 达到 $110 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。对于 Cu、Zn 和 Al 来说, 在不同浓度硫脲和尿素配施后, 其有效态含量与土壤的 pH 值呈现出明显的负相关。而对于 Mn 来说, 在单施尿素的情况下, 其有效态含量与土壤的 pH 值呈现出负相关, 而在施入硫脲后, 其有效态含量与土壤 pH 并没有呈现出明显的规律性。同时, 研究结果还表明酸性红壤 Al 有效性随着土壤 pH 的升高而减小, 当硫脲与尿素配合使用时, 短期内土壤 pH 上升得更高, 从而使得酸性红壤中 Al 的有效性减小。在硫脲和尿素配施后, 土壤中 Mn 的有效态含量并不简单地取决于土壤的 pH 值, 由于硫脲对 Mn 的络合作用和氧化还原作用, 其含量受到土壤 pH 值和硫脲的共同影响。

关键词: 硫脲; 尿素; 酸性红壤; pH; 金属离子; 有效态

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-1119-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.03.042

Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil

YANG Bo¹, WANG Wen¹, ZENG Qing-ru², ZHOU Xi-hong²

(1. School of Science and Technology, Sanya University, Sanya 572022, China; 2. College of Resource and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Through the simulation research, the effects of application of thiourea and urea on pH and availability of metal ions in acid red soil were studied, and the results showed that after applying urea, the soil pH increased in the first experimental stage and then reduced gradually to a low level, however, decreased trends of soil pH values were inhibited by the application of thiourea, especially when the concentration of thiourea reached to $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ dry soil, the soil pH was stable at high level, which exceeded to 6.0. It proved that the application of thiourea could inhibit the soil acidification due to urea application. After applying urea with different concentrations of thiourea, the available contents of Zn and Al decreased with the increasing concentration of thiourea, nevertheless, when the concentration of thiourea reached to $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, the available content of Mn was stable at high level which was over $110 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. In addition, the results showed a highly significant negative correlation between the soil pH and the available content of Cu, Zn and Al, but for Mn, no discipline was found between the soil pH and the availability after applying thiourea. Moreover, the soil pH became higher after applying urea with thiourea compared to add urea only, which led to the decreasing of available content of Al, and it was benefited for the control of the phytotoxic effect of Al. The available content of Mn in the soil not only depended on soil pH but also the content of thiourea due to its redox and complexing reaction with Mn.

Key words: thiourea; urea; acid red soil; pH; metal ions; availability

尿素作为世界主要氮肥而被长期广泛地使用, 其产生的环境问题, 如土壤酸化, 已引起研究者的关注。化学肥料的大量使用, 尤其是氮肥的使用, 使不同土壤 pH 值降低^[1~6]。土壤酸化可增加有害重金属元素如铝、锰、镉、汞、铅、铬等在土壤中的活性, 或导致有毒物质的释放, 使之毒性增强, 进一步对土壤生物造成危害^[7~11]。研究表明, 农田长期施用尿素会诱导土壤酸化, 微量营养元素溶解量增加, 其中表层土壤尤为严重^[12]。对于施用硫酸铵的森林土壤, 土壤溶液中铝离子浓度明显升高, 对植物的毒性增强^[13]。

硫脲既是一种硝化抑制剂也是一种脲酶抑制剂^[14]。硫脲作为硝化抑制剂, 通常与氮肥一起施用, 能够提高氮肥的利用率。目前, 对硫脲的研究主要集中在对土壤氮素转化与作物氮营养的影响等方面。硫脲与尿素配施能有效抑制土壤中尿素的分解, 减少 NH_3 挥发损失和延缓氮素的矿化过程, 同

收稿日期: 2013-07-15; 修订日期: 2013-09-13

基金项目: 海南省高等学校科研项目 (Hjkj2013-46); 国家自然科学基金项目 (30770389); 三亚学院地科技合作项目 (2012YD51); 三亚学院人才引进项目

作者简介: 杨波 (1981~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境污染与防治, E-mail: yangbo810819@163.com

时促进作物生长,增加作物产量^[15~19].但是,尿素的使用,能够引起土壤 pH 降低,并增加对植物有毒性作用的金属离子的溶出,而硫脲在农业上的使用所带来的环境问题受到的关注却较小,有关硫脲与尿素配施对土壤中的金属离子的溶出效应也鲜见报道.此外,硫脲与尿素配施对南方普遍存在的酸性红壤 pH 值的影响报道也较少,而了解这些影响对全面评价硫脲的作用、其对环境的影响及指导农业生产都具有重要意义.

本研究通过实验室模拟,分析了不同比例的硫脲与尿素配施对酸性红壤 pH 值的影响.同时,探讨了硫脲与尿素配施后对酸性红壤中的 Cu、Mn、Zn

和 Al 等 4 种金属元素有效性的影响,以期能够更加全面地认识硫脲的作用及其对土壤环境的一些影响,对农业生产的指导起到一定的积极作用.

1 材料与方法

1.1 供试材料

土壤样品取自湖南长沙郊区菜园的表层红壤,属第四纪红壤.土壤样品进行自然风干,去除植物残留的根、叶和砾石,碾碎后过 10 目筛备用.土壤的物理和化学性质见表 1.供试尿素为普通尿素,硫脲购自国药集团化学试剂有限公司.本实验所采用的试剂均为分析纯或优级纯.

表 1 土壤样品基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of tested soil

土壤类型	pH	有机质/%	CEC/cm ² ·kg ⁻¹	全氮/%	脲酶活性/mg·(kg·h) ⁻¹
红菜园土	4.65	3.71	11.03	0.13	30.72

1.2 主要仪器设备

数显恒温水浴锅 HH-6,电热板,HI9024C 便携式 pH 测定仪,SHY-2A 双功能水浴恒温振荡器,SHZ-85 旋转气浴恒温振荡器,AUX120 系列万分之一天平,PYX-800Q-B 人工气候箱,原子吸收光谱仪 AA240FS(Varian,美国).

1.3 实验设计

实验配制 3 种不同浓度比例的硫脲和尿素混合储备液待用.储备液 I:20 mmol·kg⁻¹ 尿素 + 0 mmol·kg⁻¹ 硫脲;储备液 II:20 mmol·kg⁻¹ 尿素 + 1 mmol·kg⁻¹ 硫脲;储备液 III:20 mmol·kg⁻¹ 尿素 + 5 mmol·kg⁻¹ 硫脲.分别称取 20 g 土壤样品放置于 15 个 150 mL 锥形瓶中,每 5 个锥形瓶分别添加上述 3 种储备液 5 mL,分别标记为处理 I、II 和 III,添加蒸馏水,使其湿度保持在 80%,并放入人工气候箱内进行培养,培养温度和湿度分别为 25℃ 和 80%.然后,分别于第 1、第 2、第 3、第 5 和第 7 周末取出土壤样品,进行土壤 pH 与金属离子 Al、Mn、Cu、Zn 含量的测定.每个处理进行 3 次平行实验.

1.4 分析方法

pH 值的测定^[20]:取土壤样品,加入蒸馏水(水土比为 5:1),用玻璃棒剧烈搅拌 1~2 min,静置 30 min,然后取上清液,采用 HI9024C 便携式 pH 测定仪测定 pH 值.

土壤浸提液制备采用如下方法:准确称取土壤样品 10.0 g,加入 100 mL 1 mol·L⁻¹ 的 KCl 溶液,

25℃ 振荡 1 h,在 2 000 r·min⁻¹ 转速下离心 15 min,取上清液加入 1~2 滴浓硫酸,放入冰箱低温保存,用于测定金属离子 Al、Mn、Cu、Zn 的含量.

Al 元素金属离子浓度的测定采用铝试剂比色法:在中性或酸性介质中,铝试剂与铝反应生成红色络合物,其吸光度与铝的含量在一定浓度范围内呈正比.50 mL 刻度管中加入 pH 4.2 缓冲液,加入 10 g·L⁻¹ 抗坏血酸 2 mL,加蒸馏水约 15 mL,然后准确加入铝试剂 10 mL,再加入上述土壤浸提液 1 mL,定容混匀,置于沸水浴中加热 10~15 min,以加速显色,取出冷却后用 530 nm 波长测定吸光度.Mn、Cu、Zn 离子含量测定采用原子吸收分光光度法进行测定.

2 结果与分析

2.1 硫脲与尿素配施对土壤 pH 值的影响

硫脲和尿素配施后,土壤的 pH 值变化见表 2.第 1 周,3 个处理土壤的 pH 值都有所升高.而在第 1 周以后,单独施用尿素和低浓度硫脲与尿素配施的土壤中,其 pH 值随时间的延长出现了下降的现象,没有施入硫脲的处理下降快速区在 2~3 周,低浓度硫脲的处理下降快速区在 3~4 周,下降速度较没有施入硫脲的土壤慢.大量研究表明,尿素从施入开始,在开始阶段有一个迅速水解期,会导致土壤的 pH 显著上升,但是,随着时间的延长,土壤 pH 值会缓慢下降^[3~5,21~23].其致酸机制如下:土壤中尿素水解产生的 NH₄⁺ 可以通过硝化细菌的作用转化

为亚硝酸盐和硝酸盐,并产生 H^+ ,从而降低土壤的 pH 值. 本实验中,在第 2 周时,土壤 pH 值都远大于原土的 pH 值,说明在 2 周内尿素的水解占据了主导地位. 从第 2 周到第 5 周,没有施入硫脲的土壤的 pH 值逐渐下降,同时施入低浓度硫脲的土壤 ($1.0 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$) 也出现了同样的现象,但其下降速度较缓,说明在单独施加尿素与低浓度硫脲和尿素配施的土壤中,从第 2 周开始,硝化作用逐渐增强,导致了土壤的酸化.

然而,当硫脲浓度达到 $5.0 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,土壤的 pH 值在实验初期显著上升后,在实验中后期一直维持在较高水平,并没有随着时间的延长而

出现明显的下降. 有研究表明,硫脲是一种硝化抑制剂^[16,17],控制 NH_4^+ 向 NO_3^- 的转化,从而抑制了 H^+ 的释放. 尿素和硫脲同时施入土壤与单施尿素相比,能有效地控制土壤 pH 值的降低. 施入低浓度硫脲的土壤,其 pH 的下降程度也受到了一定的抑制,而当硫脲浓度达到 $5.0 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,对控制整个实验期间 pH 值的降低有着显著的效果. 本实验中,施入高浓度硫脲的土壤在第 2 周 pH 值到达 6.28 后,随着时间的推移 pH 值一直处于 6.52~6.19 的水平. 可以预见,硫脲在农业中的应用在一定程度上能够控制由于使用尿素而引起土壤的酸化问题.

表 2 硫脲与尿素配施对土壤 pH 值的影响
Table 2 Changes in soil pH induced by thiourea

硫脲浓度/ $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	第 0 周	第 1 周	第 2 周	第 3 周	第 5 周	第 7 周
0	4.65 ± 0.01	5.75 ± 0.01	5.23 ± 0.03	4.89 ± 0.02	4.51 ± 0.04	4.56 ± 0.07
1	4.65 ± 0.01	6.30 ± 0.00	6.15 ± 0.03	5.78 ± 0.02	5.39 ± 0.05	5.15 ± 0.01
5	4.65 ± 0.01	6.28 ± 0.05	6.41 ± 0.03	6.52 ± 0.02	6.28 ± 0.01	6.19 ± 0.06

2.2 尿素与硫脲配施对土壤中有效态金属离子 Cu、Zn、Al、Mn 含量的影响

硫脲和尿素配施后,土壤中的有效态金属离子 Cu、Zn、Al、Mn 的含量变化见图 1. 单独施入尿素的土壤中,Cu、Mn、Zn、Al 的金属离子含量在第 1 周都出现了显著的降低,Cu 离子含量从 1.26

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降到 $1.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Zn 离子含量从 $14.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降到 $7.57 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Al 离子含量从 $47.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降到 $10.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Mn 离子含量从 $64.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降到 $8.13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 然而,随着时间的推移,土壤中的 4 种有效态金属离子含量都逐渐升高,甚至超过了第 1 周的含量.

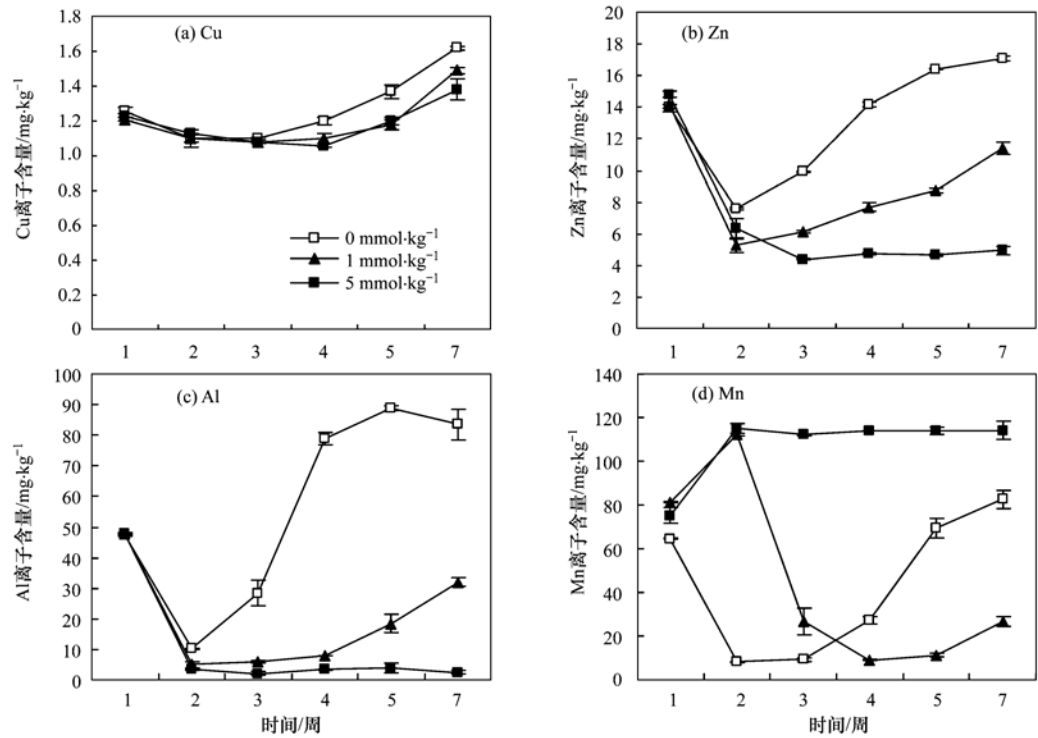


图 1 硫脲对土壤金属离子含量的影响
Fig. 1 Effects of thiourea on the content of metal ions in soil

但是,在添加了硫脲的处理中结果却大不相同.当土壤中硫脲浓度达到 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, Cu、Zn、Al 这 3 种有效态金属离子含量在第 1 周显著地降低,随后其含量随时间的推移开始缓慢地上升,其趋势与没有添加硫脲的土壤中现象相同,但是,其上升幅度和速度都有明显降低[图 1(a)~1(c)].不同的是, Mn 的有效态金属离子含量在第 1 周猛烈上升后开始急剧下降,在第 1 周,其含量从 $81.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 上升到 $112.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,随后几周其含量又下降到 $26.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

当土壤中硫脲浓度达到 $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, Cu、Zn、Al 的金属有效态含量在第 1 周也有显著的降低. Cu 的有效态金属离子含量随时间的推移开始缓慢上升. Zn 和 Al 的有效态金属离子含量在第 1 周显著降低后一直保持在一个较低的浓度水平[图 1(a)~1(c)].出乎意料的是, Mn 的有效态金属离子含量在第 1 周急剧上升后一直保持在一个较高的浓度, Mn 的金属有效态含量从 $75.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 上升到 $114.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,随后几周一直保持在 $111.98 \sim 114.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的水平[图 1(d)].

整体看来, Cu 的有效态金属离子含量受硫脲浓度的影响较小. Zn、Al 的有效态金属离子含量随着硫脲浓度的升高而降低. Mn 的有效态金属离子含量情况较复杂,高浓度硫脲浓度下,其含量保持在一个较高的浓度水平.

2.3 硫脲与尿素配施后有效态金属离子含量与土壤 pH 值的关系

研究表明,土壤中有有效态金属离子的含量与土壤的 pH 关系比较密切^[7,25,26]. 土壤 pH 值降低,意味着土壤中存在更多的 H^+ ,而更多 H^+ 的存在,会造成金属从土壤中的释放,使得土壤的有效态金属离子含量增加^[21,27]. 本实验中,不同浓度硫脲和尿素配施后,土壤中的有效态金属离子含量与土壤 pH 值的相关性见图 2~图 5. 对于 Cu、Zn 和 Al 来说,在不同浓度硫脲和尿素配施后,其金属有效态含量与土壤的 pH 值呈现出明显的负相关关系(图 2~图 4). 而对于 Mn 来说,在单施尿素的情况下,其有效态含量与土壤的 pH 值呈现出负相关,而在施入硫脲后,其有效态含量与土壤 pH 并没有呈现出明显的规律性(图 5).

3 讨论

本研究发现,实验的第 2 周以后,添加了硫脲的土壤中, Zn 和 Al 的金属有效态含量增长速度和幅

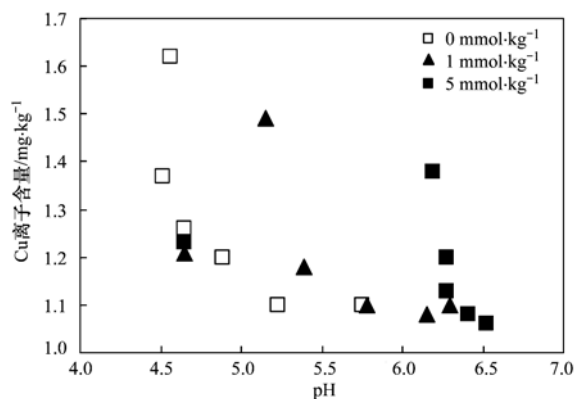


图 2 不同浓度硫脲和尿素配施后土壤中 Cu 离子的含量与 pH 值的关系

Fig. 2 Relationship between Cu content and pH value in soil with different concentrations of thiourea

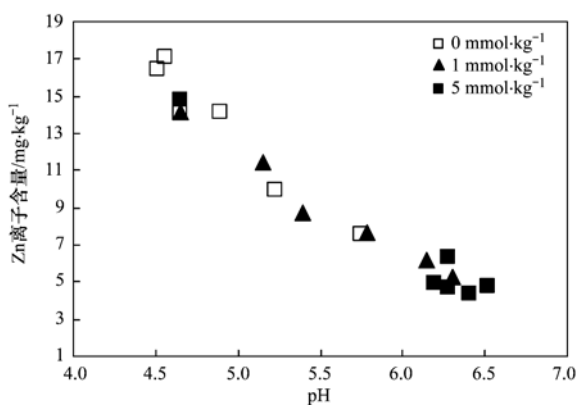


图 3 不同浓度硫脲和尿素配施后土壤中 Zn 离子的含量与 pH 值的关系

Fig. 3 Relationship between Zn content and pH value in soil with different concentrations of thiourea

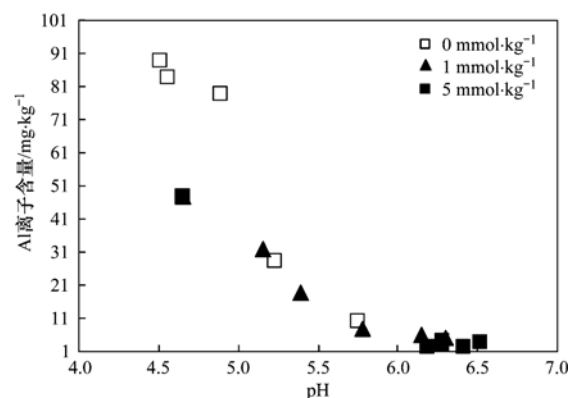


图 4 不同浓度硫脲和尿素配施后土壤中 Al 离子的含量与 pH 值的关系

Fig. 4 Relationship between Al content and pH value in soil with different concentrations of thiourea

度较没添加硫脲的土壤都有明显的减小,并且硫脲浓度越高,这种抑制作用越明显. 当硫脲浓度达到

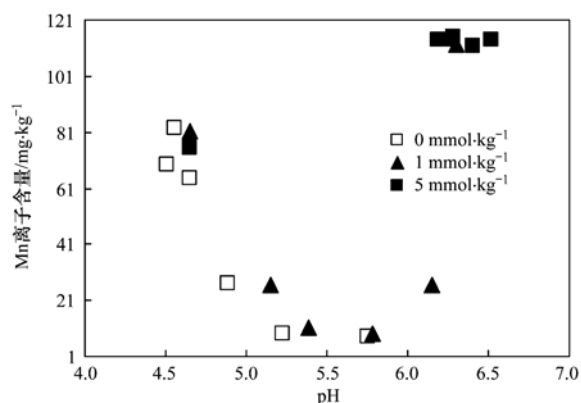


图5 不同浓度硫脲和尿素配施后土壤中 Mn 离子的含量与 pH 值的关系

Fig. 5 Relationship between Mn content and pH value in soil with different concentrations of thiourea

5.0 mmol·kg⁻¹时, Al、Zn 的金属有效态含量在后 6 个星期一直保持在较低的水平. 可见, 硫脲的存在显著影响了 Zn 和 Al 有效态金属离子在土壤中的含量. 究其原因, 硫脲作为硝化抑制剂的同时, 还是一种脲酶抑制剂, 其抑制了尿素的水解和铵态氮向硝态氮的转化, 减少了氢离子的释放, 间接影响了 Al 和 Zn 从土壤中的释放, 从而造成这 2 种金属离子含量维持在较低的水平. 此外, 相对于 Al 和 Zn 来说, Cu 的活泼性不强, 因此, 在本实验中, 表现为硫脲对其有效态含量的影响较小.

在实验后期, 单独施加尿素的土壤中, Al 的有效态含量远远超过了实验初始阶段[图 1(c)], 过高浓度的铝会降低土壤的肥力和质量, 不利于植物生长. 酸性土壤面积约占世界上可耕作土壤的 40%, 而过多 Al 离子是酸性土壤中影响植物生长的主要障碍因子^[21, 28]. 土壤中 Al 元素有效性与土壤 pH 呈负相关, 在本实验中得到证实, 同时, 当硫脲与尿素配合使用时, 短期内土壤 pH 上升得更高, 从而使得酸性红壤中 Al 的有效性减小. 由此可见, 硫脲作为硝化抑制剂, 除了增加氮肥的利用率以外, 同时产生了一定的环境效益, 即减少了酸性红壤作物所面临的 Al 毒害. 硫脲和尿素配施, 不仅可以抑制由于尿素使用而引起的土壤酸化, 还能有效控制有效态 Al 离子在土壤中的含量.

一般而言, 土壤中潜在的氧化还原性以及土壤 pH 值对土壤中 Mn 的金属有效态含量影响很大^[29]. 硫脲的分子式为 CH₄N₂S, 由于其具有还原性和络合作用, 在贵金属分析及冶金等领域中获得广泛应用^[30]. 硫脲作为还原剂, 会参与 Mn 的氧化还原反应而影响 Mn 的有效性. 本研究中, 在单施尿

素的土壤中, 土壤有效 Mn 的量与土壤 pH 值呈负相关, 但是, 当硫脲作为氮肥增效剂与尿素配施入酸性红壤后, 其有效态含量与土壤的 pH 值并没有呈现出应有的负相关关系. 究其原因, 笔者推测: 由于硫脲和过渡金属 Mn 的特殊性质, 在酸性条件下, 硫脲可以将土壤中 Mn 还原或络合而增加 Mn 的有效态含量. 在本研究中, 高浓度硫脲(5.0 mmol·kg⁻¹)下, 土壤的 pH 值维持在一个较高的水平, 而土壤中 Mn 的有效态含量同样维持在一个较高浓度水平, 说明在此情况下硫脲的络合作用和还原作用大大提高了土壤中 Mn 的金属有效态含量, 并且, 其作用远远大于土壤 pH 对它的影响. 在低硫脲浓度(1.0 mmol·kg⁻¹)下, 实验初始阶段虽然土壤的 pH 值升高了(表 2), 但是, 土壤中 Mn 的有效态含量也上升了[图 1(d)], 同样说明此时硫脲的络合作用和氧化还原作用对 Mn 的有效态含量起了主要作用. 但在实验后期, 可能由于硫脲的浓度较低, 在本实验的中后期阶段硫脲逐渐消耗后, pH 值的作用重新占据主导因素, 造成了后期的 Mn 的有效态含量的降低. 在本实验的后期, 土壤中 Mn 的有效态含量都低于未施用硫脲的土壤, 究其原因, 实验中后期硫脲的消耗, 导致了硫脲对 Mn 的络合和还原作用逐渐减弱直至消失, 此时, 施用了低浓度硫脲土壤的 pH 要高于未施用硫脲的土壤, 由于在没有硫脲的影响下, pH 值与 Mn 的有效态含量呈反比的关系, 造成了本实验后期施用了低浓度硫脲土壤中 Mn 的有效态含量都低于未施用硫脲的土壤. 综上所述, 在硫脲和尿素配施后, 土壤中 Mn 的有效态含量并不是简单地取决于土壤的 pH 值, 其含量受到土壤 pH 值和硫脲的共同影响. 此外, 有研究表明硫脲难以被微生物降解^[31], 所以当硫脲用量较大时, 将在相当长时间内由于其强还原性而导致红壤中有效 Mn 的量增加, 并可能对栽培的作物产生伤害.

4 结论

(1) 土壤施加尿素后, 土壤的 pH 有先升高后逐渐下降的趋势, 而硫脲与尿素配施后, 土壤的 pH 的下降趋势会受到抑制, 尤其是当硫脲浓度达到 5.0 mmol·kg⁻¹时, 对控制整个实验期间 pH 值的降低有着显著的效果.

(2) 硫脲和尿素配施后, Cu 的有效态金属离子含量受硫脲浓度的影响较小. Zn、Al 的有效态金属离子含量随着硫脲浓度的升高而降低. Mn 的有效态金属离子含量情况较复杂, 高浓度硫脲浓度下, 其

含量保持在一个较高的浓度水平。

(3) 对于 Cu、Zn 和 Al 来说,在不同浓度硫脲和尿素配施后,其金属有效态含量与土壤的 pH 值呈现出明显的负相关。对于 Mn 来说,在单施尿素的情况下,其有效态含量与土壤的 pH 值呈现出负相关,而在施入硫脲后,其有效态含量与土壤 pH 并没有呈现出明显的规律性。

(4) 酸性红壤 Al 有效性随着土壤 pH 的升高而减小,当硫脲与尿素配合使用时,短期内土壤 pH 上升得更高,从而使得酸性红壤中 Al 的有效性减小。

(5) 在硫脲和尿素配施后,土壤中 Mn 的有效态含量并不是简单的取决于土壤的 pH 值,由于硫脲对 Mn 的络合作用和氧化还原作用,其含量受到土壤 pH 值和硫脲的共同影响。

参考文献:

- [1] 张永春,汪吉东,沈明星,等. 长期不同施肥对太湖地区典型土壤酸化的影响[J]. 土壤学报, 2010, **47**(3): 465-472.
- [2] 张喜林,周宝库,孙磊,等. 长期施用化肥和有机肥料对黑土酸度的影响[J]. 土壤通报, 2008, **39**(5): 1221-1223.
- [3] Cabrera M L, Kissel D E, Bock B R. Urea hydrolysis in soil: Effects of urea concentration and soil pH [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1991, **23**(12): 1121-1124.
- [4] Bouman O T, Curtin D, Campbell C A, *et al.* Soil acidification from long-term use of anhydrous ammonia and urea [J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, **59**(5): 1488-1494.
- [5] Kyvergya P M, Blackmer A M, Ellsworth J W, *et al.* Soil pH effects on nitrification of fall-applied anhydrous ammonia [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, **68**(2): 545-551.
- [6] Petersen S O, Stamatiadis S, Christofides C. Short-term nitrous oxide emissions from pasture soil as influenced by urea level and soil nitrate [J]. Plant and Soil, 2004, **267**(1-2): 117-127.
- [7] Zeng F R, Ali S, Zhang H T, *et al.* The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(1): 84-91.
- [8] Smith S R. Effect of soil pH on availability to crops of metals in sewage sludge-treated soils. I. Nickel, copper and zinc uptake and toxicity to ryegrass [J]. Environmental Pollution, 1994, **85**(3): 321-327.
- [9] 郭朝晖,廖柏寒,黄昌勇. 酸雨对污染环境中重金属化学行为的影响[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, **4**(9): 7-11.
- [10] 陈怀满. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 18-20.
- [11] 张北赢,陈天林,王兵. 长期施用化肥对土壤质量的影响[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(11): 182-187.
- [12] Malhi S S, Nyborg M, Harapiak J T. Effects of long-term N fertilizer-induced acidification and liming on micronutrients in soil and in bromegrass hay [J]. Soil and Tillage Research, 1998, **48**(1-2): 91-101.
- [13] Bergholm J, Berggren D, Alavi G. Soil acidification induced by ammonium sulphate addition in a Norway spruce forest in southwest Sweden [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2003, **148**(1-4): 87-109.
- [14] 孙爱文,石元亮,郭爱民,等. 硫脲在农业中的研究和应用[J]. 土壤通报, 2003, **34**(4): 377-380.
- [15] 余光辉,张杨珠,王大娟. 几种硝化抑制剂对土壤和小白菜硝酸盐含量及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(2): 247-250.
- [16] 孙爱文,石元亮,朱志峰,等. 硫脲及抑制剂组合对土壤尿素氮转化和玉米产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, **11**(4): 481-486.
- [17] 何盈,蔡顺香,陈子聪,等. 硫脲用量对菠菜生理指标及土壤氮素转化的影响[J]. 生态环境, 2008, **17**(6): 2431-2417.
- [18] Di H J, Cameron K C. Reducing environmental impacts of agriculture by using a fine particle suspension nitrification inhibitor to decrease nitrate leaching from grazed pastures [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, **109**(3-4): 202-212.
- [19] Zacherl B, Amberger A. Effect of the nitrification inhibitors dicyandiamide, nitrapyrin and thiourea on *Nitrosomonas europaea* [J]. Fertilizer Research, 1990, **22**(1): 37-44.
- [20] 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. 101-102.
- [21] 曾清如,廖柏寒,蒋朝辉,等. 施用尿素引起红壤 pH 及铝活性的短期变化[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(2): 249-252.
- [22] Morikawa C K, Saigusa M. Effect of continuous application of low-acidulent fertilizer on acidification of an andisol and plant growth [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2003, **34**(5-6): 607-618.
- [23] 鲁如坤,时正元,赖庆旺. 红壤养分退化研究(II)-尿素和碳铵在红壤中的转化[J]. 土壤通报, 1995, **26**(6): 241-243.
- [24] 赵晶,冯文强,秦鱼生,等. 不同氮磷钾肥对土壤 pH 和镉有效性的影响[J]. 土壤学报, 2010, **47**(5): 953-961.
- [25] 夏星辉,陈静生. 土壤重金属污染治理方法研究进展[J]. 环境科学, 1997, **18**(3): 72-76.
- [26] 景丽洁,王敏. 不同类型土壤对重金属的吸附特性[J]. 生态环境, 2008, **17**(1): 245-248.
- [27] Walker D J, Clemente R, Bernal M P. Contrasting effects of manure and compost on soil pH, heavy metal availability and growth of *Chenopodium album* L. in a soil contaminated by pyritic mine waste [J]. Chemosphere, 2004, **57**(3): 215-224.
- [28] 沈宏,严小龙,郑少玲,等. 铝毒胁迫诱导菜豆柠檬酸的分泌与累积[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(3): 307-310.
- [29] Bekker A W, Chase R G, Hue N V. Effects of coralline lime on nutrient uptake and yield of field-grown sweet corn and peanuts in oxidic soils of Western Samoa [J]. Fertilizer Research, 1993, **36**(3): 211-219.
- [30] 张静,兰新哲,宋永辉,等. 酸性硫脲法提金的研究进展[J]. 贵金属, 2009, **30**(2): 75-82.
- [31] Xiong X J, Hirata M, Takanashi H, *et al.* Analysis of acclimation behavior against nitrification inhibitors in activated sludge processes [J]. Journal of Fermentation and Bioengineering, 1998, **86**(2): 207-214.

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