

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化	薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)
北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源	周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)
利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布	刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)
兰州城区大气 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)
成都市西南郊区春季大气 PM _{2.5} 的污染水平及来源解析	林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晚芬(1629)
中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征	刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)
固定源排放污染物健康风险评价方法的建立	陈强,吴焕波(1646)
北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试	胡月琪,郭晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)
南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价	王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金花(1662)
CoCuMnO ₂ 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学	孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)
大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化	张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)
典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征	史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)
利用δ ¹⁵ N-NO ₃ ⁻ 和 δ ¹⁸ O-NO ₃ ⁻ 示踪北京城区河流硝酸盐来源	赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)
柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析	王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)
三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响	陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)
亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究	王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)
平原河网典型污染物生物降解系数的研究	冯帅,李叙勇,邓建才(1724)
沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例	张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)
苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素	任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)
河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价	王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)
顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价	蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)
台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险	陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)
乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芳宁,张连凯,苏春田(1779)
岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例	王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)
广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素	黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)
基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(<i>Bacteroides</i>) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例	张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)
典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征	梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)
钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成	刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)
天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究	丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)
臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素	董秉直,张佳丽,何畅(1837)
污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析	程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)
HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学	郭俊元,王彬(1852)
放射性废水处理中吸附铀的优势藻种筛选	李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)
微米 Fe ₃ O ₄ 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究	钱旭,王毅力,赵丽(1864)
间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能	宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)
不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤 CO ₂ 和 N ₂ O 排放通量的影响	郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)
卫河新乡市区段春季溶解 CH ₄ 与 N ₂ O 浓度特征	侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)
模拟氮沉降对内蒙古克什克腾草原 N ₂ O 排放的影响	杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)
土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制	曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)
黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局	高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)
耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响	史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)
北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险	赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)
准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析	刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)
纳米 TiO ₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响	张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)
纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学	马少云,祝方,商执峰(1953)
低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响	宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)
粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响	黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)
萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析	王亚男,程立娟,周启星(1978)
高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响	郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)
磺胺抗性消长与堆肥进程交互特征	林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)
《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)	

纳米 TiO₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响

张金洋^{1,2}, 王定勇^{2,3*}, 梁丽², 李楚娴², 张成², 周雄², 刘娟¹

(1. 内江师范学院化学化工学院, 内江 641112; 2. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 3. 重庆市农业资源与环境重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 通过室外模拟淹水实验研究纳米 TiO₂ 对土壤重金属迁移转化的影响, 分析了两种纳米 TiO₂ 对三峡水库典型消落区土壤中 Cr、Zn、Pb、Cu 和 Cd 释放和形态变化的影响. 结果表明, 淹水两个月后, 添加 4 g·kg⁻¹ 金红石和锐钛矿颗粒处理均导致约 30% 的 Cr 释放到水中, 主要促进可氧化态和残渣态 Cr 的溶出, 从而促进土壤 Cr 的活化, 大大提高其生态风险; 另外, 添加 4 g·kg⁻¹ 金红石颗粒处理导致酸可交换态和可氧化态 Pb 含量分别下降 25.92% 和 33.09%, 增强其迁移性; 但添加锐钛矿颗粒处理促进土壤中可氧化态 Zn 的生成, 含量提高约 30%, 有利于 Zn 的固定; 此外, 两种纳米 TiO₂ 颗粒对 Cu 和 Cd 的形态均没有明显的影响. 因此, 纳米 TiO₂ 对土壤中 Cr 释放和形态变化影响最大, 其次是 Pb 和 Zn, 在进行重金属污染土壤的修复及其风险评估时需要特别注意.

关键词: 纳米二氧化钛; 土壤; 重金属; 形态; 转化

中图分类号: X131.3; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1946-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.05.044

Effect of Nano-TiO₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil

ZHANG Jin-yang^{1,2}, WANG Ding-yong^{2,3*}, LIANG Li², LI Chu-xian², ZHANG Cheng², ZHOU Xiong², LIU Juan¹

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Neijiang Normal University, Neijiang 641112, China; 2. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400715, China)

Abstract: The effects of nano-TiO₂ on migration and transformation of heavy metals in soil were investigated by outdoor flooding simulation experiments. Cr, Pb, Zn, Cd and Cu contents of different forms were determined in soil of typical fluctuating zone of Three Gorges Reservoir. The results showed that, after flooding months, both addition of 4 g·kg⁻¹ of rutile and anatase particles resulted in the release of about 30% Cr into the water. Nano-TiO₂ particles mainly promoted the dissolution of oxidizable residual Cr, and elevated its ecological risk. Thus nano-TiO₂ promoted the activation of chromium and improved the mobility of chromium in soil. 4 g·kg⁻¹ of rutile particles caused the decrease of acid exchangeable lead by 25.92% and oxidizable lead by 33.09%, and enhanced the mobility of Pb. However, anatase particles caused the increase of oxidizable zinc by 30% in soil, which facilitated fixing of zinc. In addition, two types of nano-TiO₂ particles had no significant effect on the speciation changes of Cu and Cd. Therefore, the effect of nano-TiO₂ on release and transformation of Cr in soil was the largest, followed by Pb and Zn. This needs special attention when using nano-TiO₂ to remediate heavy metals contaminated soil and assessing its environmental risk.

Key words: nano-TiO₂; soil; heavy metal; speciation; transformation

纳米 TiO₂ 是应用最早的纳米材料之一, 已经被广泛应用于各领域数十年^[1~5], 其在生产、使用和废物处理过程中必将进入环境^[6]. 土壤和沉积物是环境污染物的汇聚场所, 进入环境的纳米 TiO₂ 最终也汇入土壤或沉积物中^[7, 8]. 有研究预测纳米 TiO₂ 在污泥处理的土壤中的含量以 42 ~ 89 μg·(kg·a)⁻¹ 的速度增加^[9], 全球范围内预计到 2025 年高风险区域土壤中纳米 TiO₂ 的含量可达到 20 g·kg⁻¹^[9, 10]. 并且, 利用纳米 TiO₂ 的光催化作用降解土壤中有机农药和处理重金属污染也是目前正在探索的土壤修复新方法之一. 由于具有催化活性, 理论上可能改变重金属的价态和存在状态, 一些

研究显示, 纳米 TiO₂ 对土壤中 Zn、Pb、Cu、Cd 等有一定固定作用^[11, 12]. 因此关于纳米 TiO₂ 的安全应用及对土壤环境的生态风险问题已成为关注的焦点. 有研究显示纳米 TiO₂ 颗粒影响 Cu²⁺ 在不同类型土壤中的迁移^[13]. 但目前关于纳米 TiO₂ 对其他重金属的迁移转化的影响还知之甚少. 重金属的形态变化是反映其迁移转化的重要指标, 因此, 本研究

收稿日期: 2015-10-28; 修订日期: 2015-12-14

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013GB430004); 国家自然科学基金项目(41173116); 中央高校基本业务费专项(XDJK2015C124); 四川省大学生创新创业训练计划项目(X201319)

作者简介: 张金洋(1980~), 女, 博士, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: goldensea73@163.com

* 通讯联系人, E-mail: dywang@swu.edu.cn

以三峡水库典型消落区土壤为对象,通过室外的模拟淹水实验,分析两种晶型的纳米 TiO₂ 颗粒对土壤中重金属形态变化的影响,以期对纳米 TiO₂ 的安全应用及其环境风险预测提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 纳米 TiO₂ 颗粒与供试土壤

锐钛矿颗粒(~ 100 nm)和金红石颗粒(< 25 nm)颗粒均购自阿拉丁试剂公司(Aladdin),纯度均

为 99.8%。

供试土壤采自三峡水库干流重庆市忠县石宝寨(N30°25'5.5", E108°10'5.5")消落区,海拔 153 m 处,该消落区淹没面积较大,且随水库水位而变化,占重庆市消落区总面积的 1/10,土壤类型是西南地区典型的紫色土,每年 4 ~ 9 月为落干期,其余时间为淹水期。样品风干后粉碎,过 2 mm 和 0.149 mm 筛,混合均匀备用。土壤基本的理化性质和 Cr、Zn、Pb、Cu、Cd 含量如表 1。

表 1 供试土样的基本特性

Table 1 Physicochemical properties of soil for test										
pH	有机质 /g·kg ⁻¹	CEC /cmol·kg ⁻¹	机械组成/%			Cr /mg·kg ⁻¹	Pb /mg·kg ⁻¹	Zn /mg·kg ⁻¹	Cd /mg·kg ⁻¹	Cu /mg·kg ⁻¹
			<0.02 mm	0.02 ~ 0.25 mm	>0.25 mm					
8.04	15.76	7.12	45.88	51.00	3.12	25.14 ± 0.51	73.84 ± 3.25	133.29 ± 10.81	2.83 ± 0.06	32.91 ± 1.14

1.2 实验方法

用超纯水配制 300 mL 0.2 g·L⁻¹ 和 0.4 g·L⁻¹ 的纳米 TiO₂ 颗粒悬液,超声 30 min。称 30 g 土样(0.149 mm),加到纳米 TiO₂ 颗粒悬液中,摇匀,土样中纳米 TiO₂ 颗粒的添加量分别为 2 g·kg⁻¹ 和 4 g·kg⁻¹,金红石处理组编号为 R2(2 g·kg⁻¹)和 R4(4 g·kg⁻¹),锐钛矿处理组编号为 T2(2 g·kg⁻¹)和 T4

(4 g·kg⁻¹),以不加纳米 TiO₂ 处理为对照,每个处理重复 3 次。实验采用磨口硼硅玻璃瓶,加盖,置于室外环境中,60 d 后,分离上覆水,测定水样中 Cr、Pb、Zn、Cd 和 Cu 的浓度,土样冻干后粉碎,过筛(0.149 mm),混合均匀。采用改进的 BCR 连续提取法^[14]分析样品中各形态 Cr、Pb、Zn、Cd 和 Cu 的含量,具体步骤见表 2。

表 2 各形态重金属的提取方法

Table 2 Extraction method of various forms of heavy metals in soil		
步骤	提取方法	形态
1	称取 1.00 g 样品到 100 mL 聚丙烯离心管中,加入 0.11 mol·L ⁻¹ HAc 40 mL,室温下振荡 16 h(250 r·min ⁻¹),离心分离(4 000 r·min ⁻¹ ,20 min),取上层清液到聚乙烯瓶中,置在 4℃ 冰箱中待测,残渣用超纯水清洗两次	可交换态
2	向上述残渣中加入 0.5 mol·L ⁻¹ NH ₂ OH·HCl 40 mL,振荡 16 h,离心分离。其余操作同第一步	可还原态
3	向第二步提取后的残渣中缓慢加入 10 mL H ₂ O ₂ ,盖上表面皿,偶尔振荡,室温下消解 1 h,然后水浴加热到 85℃ 消解 1 h,去表面皿,升温加热至溶液近干,再加入 10 mL H ₂ O ₂ ,重复以上过程。冷却后,加 1 mol·L ⁻¹ NH ₄ OAc 50 mL,其余操作同第一步	可氧化态
4	将第三步提取后的残渣转到 50 mL 聚四氟乙烯烧杯中,加入 10 mL HNO ₃ 、10 mL HF 和 3 mL HClO ₄ ,盖上盖子后放到电热板上低温加热 1 h,再中温加热 1 h 之后开盖除去硅。至冒浓厚白烟时就盖上盖子。等到坩埚壁上的黑色有机物消失后,打开盖驱赶白烟直到内容物呈黏稠状。取下稍冷,用水冲洗坩埚盖和内壁,并加入 1 mL V(HNO ₃):V(H ₂ O) = 1:1 的溶液低温加热溶解残渣。消解液冷却后将其转移至 25 mL 容量瓶中,定容后摇匀待测	残渣态

实验采用超纯水(Minipore 18.2 MΩ·cm),所用试剂均为优级纯,样品采用电感耦合等离子体质谱 ICP-MS(Thermo,iCAP-Q)测定。实验过程采用空白实验、标准工作曲线、加标回收、标准物质(GBW 07406)进行质量控制,回收率在 90.6% ~ 106.8% 之间。

2 结果与分析

2.1 上覆水中各重金属元素的浓度

淹水 60 d 后,上覆水中各重金属元素的浓度如表 3。与对照相比,添加纳米 TiO₂ 颗粒处理后,上覆水中 Cr 浓度均明显升高(P < 0.05),且均随纳米

TiO₂ 颗粒浓度的增加而升高,4 g·kg⁻¹ 处理组 Cr 浓度均大幅升高,说明两种纳米 TiO₂ 颗粒均促进土壤中 Cr 的释放,提高水体污染风险,且浓度越高风险越大。上覆水中 Pb 浓度仅 R4 处理组明显升高,表明 4 g·kg⁻¹ 金红石促进土壤中 Pb 的释放。与 Cr 和 Pb 不同的是,T2 和 T4 处理组上覆水中 Zn 浓度明显低于对照组,说明锐钛矿纳米 TiO₂ 抑制土壤 Zn 的溶出,具有一定的固定作用。此外,上覆水中 Cd 浓度均非常低,差异也较小,可能是由于土壤中 Cd 含量很低或纳米 TiO₂ 对土壤 Cd 影响很小;各处理组 Cu 含量与对照相比也没有明显的变化,显示纳

表 3 上覆水中各重金属元素的浓度¹⁾/μg·mL⁻¹

Table 3 Concentrations of heavy metal elements in overlying water/μg·mL⁻¹

元素	对照	R2	T2	R4	T4
Cr	0.021 ± 0.002	0.111 ± 0.013 *	0.051 ± 0.008 *	0.644 ± 0.018 *	0.675 ± 0.051 *
Pb	0.268 ± 0.054	0.227 ± 0.002	0.324 ± 0.003	0.561 ± 0.006 *	0.233 ± 0.021
Zn	1.457 ± 0.144	1.552 ± 0.066	0.892 ± 0.066 *	1.343 ± 0.021	0.312 ± 0.056 *
Cd	0.006 ± 0.001	0.001 ± 0.000	0.012 ± 0.001	0.004 ± 0.000	0.002 ± 0.000
Cu	0.179 ± 0.030	0.178 ± 0.023	0.197 ± 0.010	0.213 ± 0.018	0.180 ± 0.024

1) * 表示 $P < 0.05$ (与对照相比),下同

米 TiO₂ 对土壤 Cu 释放的影响很小.

2.2 土壤中重金属的总量变化

经过反复淹水和落干过程,三峡水库消落带土壤重金属含量相对较稳定.淹水 60 d 后,与原样相比,对照组各重金属元素的总量均略有降低,但没有明显的差异(表 4).与对照相比,4 g·kg⁻¹ 纳米 TiO₂ 颗粒处理组 Cr 含量均明显下降,分别降低 30.20%

和 30.85%,这与上覆水中该处理组 Cr 浓度急剧升高是一致,R4 和 T4 处理组上覆水中 Cr 浓度显著升高,进一步证明土壤中 Cr 释放到水中.金红石颗粒组土壤 Pb 含量呈下降趋势,但没有达到显著水平.锐钛矿颗粒处理组土壤 Zn 呈升高趋势,且 T4 处理组明显高于对照组.此外,土壤中 Cd 和 Cu 均没有明显变化.

表 4 土壤中各重金属元素的总量变化/mg·kg⁻¹

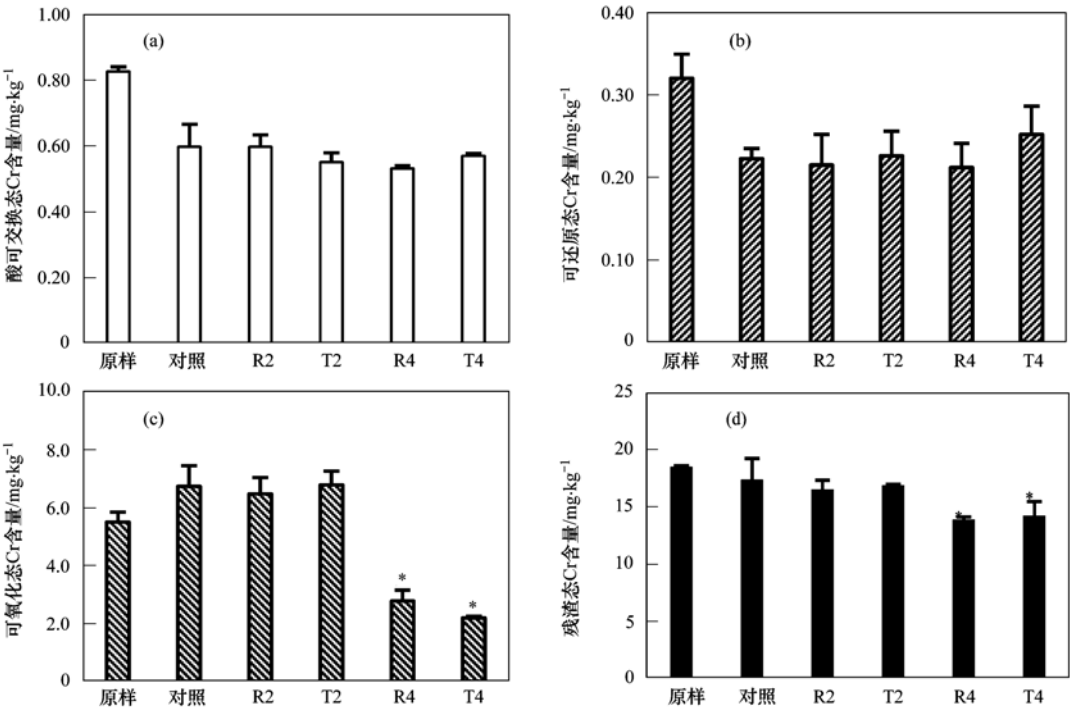
Table 4 Change of the total amounts of heavy metals in soils/mg·kg⁻¹

处理	Cr	Pb	Zn	Cd	Cu
原样	25.14 ± 0.51	73.84 ± 3.25	133.29 ± 10.81	2.83 ± 0.06	32.91 ± 1.14
对照	24.93 ± 2.65	71.43 ± 3.03	120.07 ± 3.67	2.72 ± 0.16	30.74 ± 1.08
R2	23.82 ± 1.44	69.47 ± 1.81	119.97 ± 4.32	2.82 ± 0.05	31.00 ± 0.75
T2	24.44 ± 0.65	70.07 ± 4.24	126.17 ± 5.55	2.70 ± 0.08	30.48 ± 1.71
R4	17.40 ± 0.65 *	66.53 ± 4.04	116.17 ± 6.55	2.78 ± 0.14	30.35 ± 2.21
T4	17.24 ± 1.33 *	71.40 ± 2.23	128.41 ± 0.87 *	2.81 ± 0.09	30.62 ± 1.08

2.3 土壤中重金属的形态变化

从形态分布来看,供试土壤 Cr 主要以残渣态和

可氧化态形式存在(图 1),两种形态占总量的 95% 以上.值得注意的是,两种纳米 TiO₂ 颗粒均促进土



* 表示 $P < 0.05$ (与对照相比),下同

图 1 土壤中各形态铬的含量

Fig. 1 Contents of different speciation of chromium in soil

壤中这两种形态 Cr 的释放, R4 和 T4 处理组可氧化态 Cr 含量分别下降 58.79% 和 67.40%, 残渣态含量分别下降 20.08% 和 18.11%, 土壤 Cr 的活性增强, 环境风险增大. 纳米 TiO₂ 处理组酸可交换态和可还原态 Cr 与对照相比没有明显变化, 说明释放出来的可氧化态和残渣态 Cr 没有转化成其他形态, 全部进入水中.

土壤中 Pb 主要以残渣态存在(图 2), 所占比例为 51.77% ~ 61.87%, 且淹水后略有升高, 其次是

可还原态, 淹水后, 可还原态 Pb 含量均明显低于原样, 但纳米 TiO₂ 对这两种形态 Pb 均没有明显的影响. 土壤中酸可交换态和可氧化态 Pb 含量的变化规律类似, 仅 R4 处理组明显低于对照组, 其他处理组都没有明显的变化, 值得注意的是, 虽然 R4 处理组土壤中总 Pb 含量下降没有达到显著水平, 但实际上仍有少量 Pb 释放到水中, 只是本研究采用的土壤中酸可交换态和可氧化态 Pb 含量相对较低, 所以对总量变化影响较小.

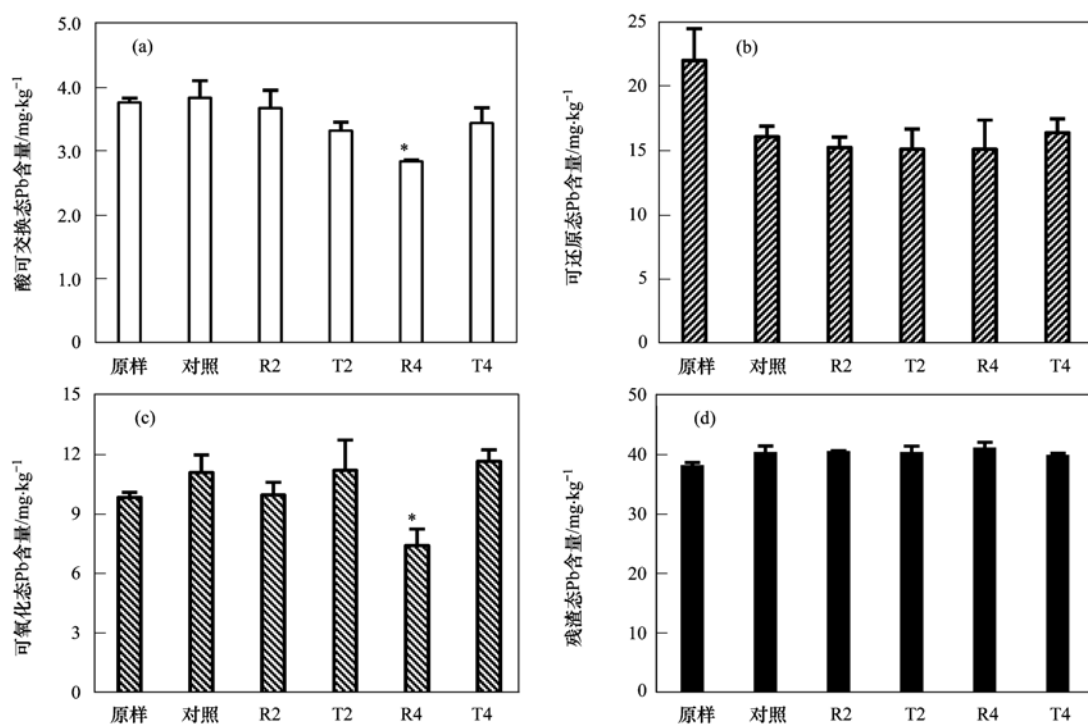


图 2 土壤中各形态铅的含量

Fig. 2 Contents of different speciation of lead in soil

土壤中 4 种形态 Zn 的含量分布相对比较均匀(图 3), 淹水后呈现酸可交换态和可还原态向可氧化态和残渣态转化的趋势, 纳米 TiO₂ 颗粒对酸可交换态、可还原态和残渣态 Zn 含量的影响不明显; 可氧化态 Zn 淹水后也呈升高趋势, 其中锐钛矿颗粒处理组(T2 和 T4) 达到显著水平($P < 0.05$), 分别比对照高 42.65% (T2) 和 44.25% (T4), 说明锐钛矿颗粒促进了可氧化态 Zn 的形成, 使部分溶解的 Zn 转化成可氧化态滞留在土壤中, 这也是 T2 和 T4 处理组上覆水 Zn 含量明显低于对照组, 且土壤中 Zn 总量高于对照组的主要原因.

此外, 供试土壤 Cd 含量较低, 各形态的含量变化不明显, 纳米 TiO₂ 对 Cu 的形态和总量也没有明显的影响(图 4).

3 讨论

综合上覆水、土壤重金属总量和各形态的含量变化可以看出, 土壤重金属总量的变化能反映出不同处理之间的变化趋势, 上覆水的变化能够较准确地反映出不同处理之间的差异, 各形态含量的变化才能判断纳米 TiO₂ 对土壤重金属的影响过程.

土壤中重金属的存在形态与 pH、氧化还原电位、铁锰氧化物、有机质、微生物等因素有关. 本研究土壤淹水后处于还原条件, 通常在还原条件下, 重金属和土壤中的硫容易形成硫化物沉淀, 因此一般残渣态含量会升高. 本研究中 Pb、Zn 和 Cu 也有类似的规律, 各处理组残渣态含量均略有升高. 但 Cr 的变化差异较大, 各处理组残渣态含量均降低, 其中对照组和 2 g·kg⁻¹ 纳米 TiO₂ 处理组(R2 和 T2)

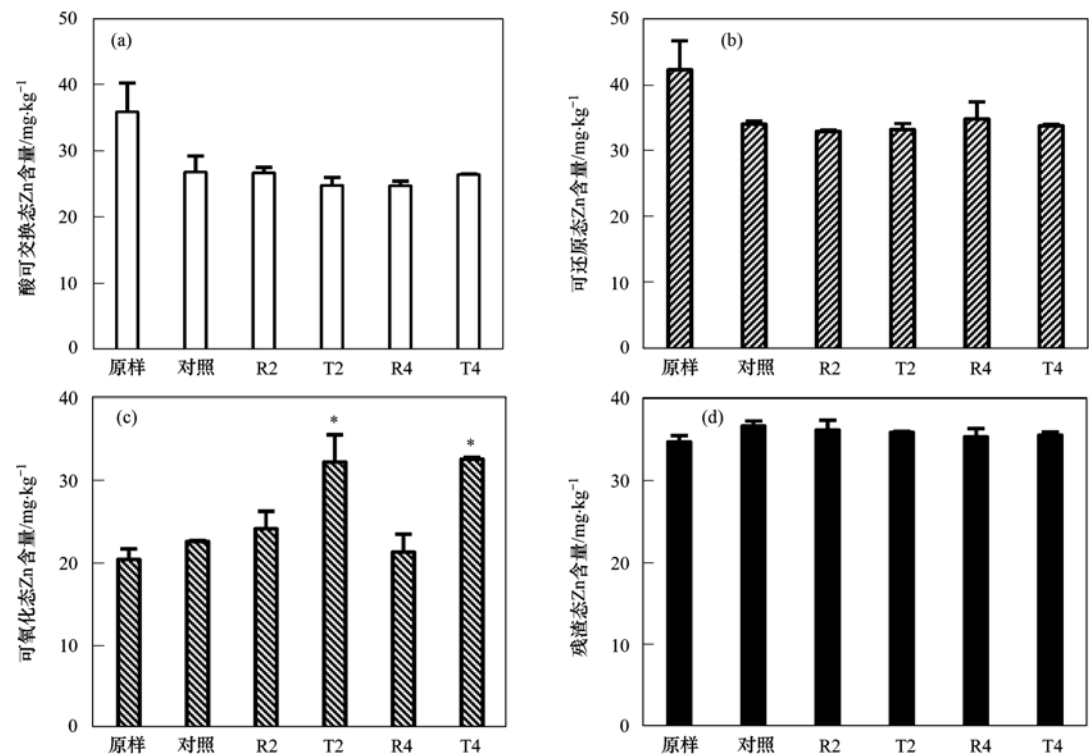


图 3 土壤中各形态锌的含量

Fig. 3 Contents of different speciation of zinc in soil

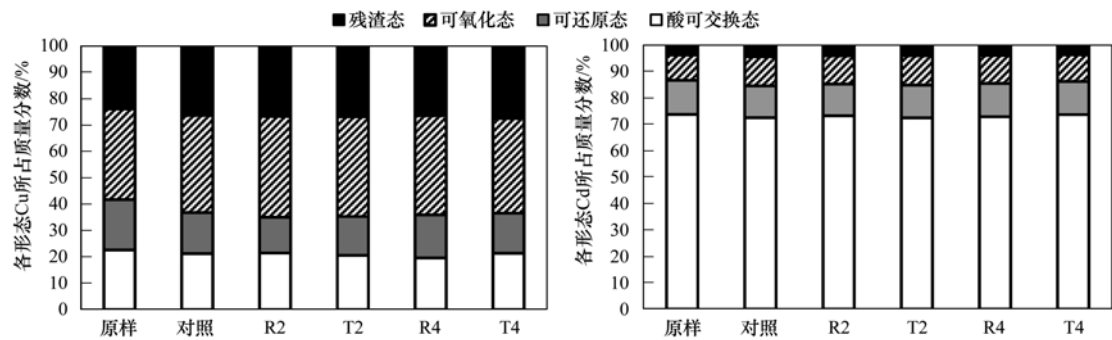


图 4 土壤中各形态铜和镉的比例

Fig. 4 Proportions of different speciation of copper and cadmium in soil

的变化与陈英旭等^[15]的研究结果相似,还原条件下土壤中铬有从残渣态逐渐向有机结合态(可氧化态)转化的趋势. 但 $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 纳米 TiO_2 处理组(R4和T4)残渣态和可氧化态都大幅降低,并且对应的上覆水中Cr浓度大幅升高,说明 $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 纳米 TiO_2 处理促进残渣态和可氧化态Cr的溶出,这可能与Cr的价态变化有关. 纳米 TiO_2 与铬可以发生复杂化学反应,Cr(VI)可被纳米 TiO_2 光催化还原成Cr(III)^[16~22],但在 Mn^{2+} 存在时,不仅能催化中毒^[23],还能氧化Cr(IV)[Cr(VI)光催化还原的中间产物]而阻碍Cr(VI)的还原^[24]. Mn^{2+} 是土壤中普遍存在的元素,阻碍Cr(VI)的光催化还原过程是

可能的. 此外,Cr(VI)的光催化反应还受pH、有机物等多种因素的影响^[25, 26]. 土壤是一个复杂的体系,纳米 TiO_2 与土壤中铬是直接发生反应,还是通过改变土壤环境条件间接导致其溶出,还需进一步研究确定.

可氧化态重金属一般氧化环境下易分解释放,还原条件下有利于其积累,因而一般在还原条件下,可氧化态重金属含量会升高. 本研究中除了R4和T4处理组可氧化态Cr含量明显降低外,金红石颗粒处理组可氧化态Pb含量也随颗粒浓度升高而降低,其中R4处理明显降低,表明金红石颗粒抑制了可氧化态Pb的形成,其他各处理组可氧化态含量均

呈上升趋势. 与 Cr 类似, 金红石颗粒对可氧化态 Pb 的抑制可能与其价态变化有关, Pb 的价态有 +4 和 +2, 结合土壤可氧化态 Cr 和 Pb 的结果, 推测在本实验条件下, 纳米 TiO₂ 可能促进土壤中低价的 Cr 和 Pb 向高价转化, 起了光催化氧化的作用, 高价态 Cr 和 Pb 的活性和溶解性均高于低价态, 毒性也高于低价态, 因此纳米 TiO₂ 颗粒在提高土壤 Cr 和 Pb 的迁移性的同时可能也提高了生态毒性, 特别是 Cr. 此外, 与之相反的是, 锐钛矿颗粒处理显著提高了可氧化态 Zn 的含量, 将淹水过程释放出来的可还原态和酸可交换态 Zn 部分转化成可氧化态而截留在土壤中, 相应的上覆水中 Zn 浓度显著低于对照组也证明了锐钛矿颗粒抑制土壤 Zn 的溶出, 降低水体污染风险. 其原因可能是由于纳米 TiO₂ 颗粒易与土壤中有有机胶体类物质(如腐殖质)结合, 因其具有较强的吸附作用, 从而提高土壤中有有机物对溶出 Zn²⁺ 的捕获能力, 由此可以推测锐钛矿颗粒比金红石颗粒的吸附作用更强, 本研究中纳米 TiO₂ 对 Hg²⁺ 的吸附作用的结果证明了这一推测, 锐钛矿颗粒对 Hg²⁺ 的吸附作用远高于金红石颗粒^[27].

土壤中可还原态重金属的含量均没有明显的变化, 虽然纳米 TiO₂ 对土壤 Fe 和 Mn 形态影响的研究结果显示, 2 g·kg⁻¹ 金红石颗粒和 4 g·kg⁻¹ 锐钛矿颗粒促进了少量可还原态 Fe 和 Mn 的转化^[28], 但并没有影响到本研究中 5 种重金属铁锰氧化物结合态的释放, 对氧化态 Hg 的影响更大^[29], 这可能与本研究中几种重金属可还原态含量相对较低有关, 而该土壤中氧化态汞的含量较高. 酸可交换态重金属的含量变化, 除了 R4 处理组酸可交换 Pb 含量有明显降低以外, 其他处理组与对照相比均没有明显变化.

4 结论

本实验条件下, 纳米 TiO₂ 对土壤 Cr、Zn、Pb、Cu 和 Cd 的形态转化存在较大的差异. 对 Cr 的影响最大, 锐钛矿和金红石两种晶型均可促进土壤中残渣态和可氧化态 Cr 的释放, 提高其生态风险; 金红石型纳米 TiO₂ 促进土壤中可氧化态和酸可交换态 Pb 的释放; 在采用纳米 TiO₂ 材料对 Cr 和 Pb 污染土壤进行修复时需要特别注意. 而锐钛矿颗粒对土壤中 Zn 具有一定的固定作用; 两种纳米 TiO₂ 颗粒对土壤中 Cu 和 Cd 则几乎没有影响.

参考文献:

[1] Lomer M C E, Thompson R P H, Comisso J, *et al.* Determination of titanium dioxide in foods using inductively

coupled plasma optical emission spectrometry[J]. *The Analyst*, 2000, **125**(12): 2339-2343.

[2] Contado C, Pagnoni A. TiO₂ in commercial sunscreen lotion: flow field-flow fractionation and ICP-AES together for size analysis [J]. *Analytical Chemistry*, 2008, **80**(19): 7594-7608.

[3] Reijnders L. Cleaner nanotechnology and hazard reduction of manufactured nanoparticles[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2006, **14**(2): 124-133.

[4] He X J, Hwang H M. Engineered TiO₂ nanoparticles: their fate and effects in natural aquatic environments [M]. *Titanium Dioxide: Chemical Properties, Applications and Environmental Effects*. New York: Nova Science Publishers, 2014. 1-20.

[5] Nur Y, Lead J R, Baalousha M. Evaluation of charge and agglomeration behavior of TiO₂ nanoparticles in ecotoxicological media[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **535**: 45-53.

[6] Gottschalk F, Sun T Y, Nowack B. Environmental concentrations of engineered nanomaterials: review of modeling and analytical studies[J]. *Environmental Pollution*, 2013, **181**: 287-300.

[7] Sun P D, Zhang K K, Fang J, *et al.* Transport of TiO₂ nanoparticles in soil in the presence of surfactants[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **527-528**: 420-428.

[8] Chekli L, Roy M, Tijing L D, *et al.* Agglomeration behaviour of titanium dioxide nanoparticles in river waters: a multi-method approach combining light scattering and field-flow fractionation techniques[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, **159**: 135-142.

[9] Gottschalk F, Sonderer T, Scholz R W, *et al.* Modeled environmental concentrations of engineered nanomaterials (TiO₂, ZnO, Ag, CNT, fullerenes) for different regions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(24): 9216-9222.

[10] Ge Y, Priester J H, Van De Werfhorst L C, *et al.* Potential mechanisms and environmental controls of TiO₂ nanoparticle effects on soil bacterial communities[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(24): 14411-14417.

[11] 丁园, 刘燕红, 郝双龙, 等. 化学改良剂对红壤中铜、镉吸附行为的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2010, **32**(4): 824-828.

[12] 孟丽华. 胶体二氧化钛对水土环境重金属污染控制研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009. 1-44.

[13] 方婧, 周艳萍, 温蓓. 二氧化钛纳米颗粒对铜在土壤中运移的影响[J]. *土壤学报*, 2011, **48**(3): 549-556.

[14] 张朝阳, 彭平安, 宋建中, 等. 改进 BCR 法分析国家土壤标准物质中重金属化学形态[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(11): 1881-1884.

[15] 陈英旭, 何增耀, 吴建平. 土壤中铬的形态及其转化[J]. *环境科学*, 1994, **15**(3): 53-56.

[16] Wang L M, Wang N, Zhu L H, *et al.* Photocatalytic reduction of Cr(VI) over different TiO₂ photocatalysts and the effects of dissolved organic species[J]. *Journal of Hazardous Materials*,

- 2008, **152**(1): 93-99.
- [17] 陈心满, 徐明芳. UV/TiO₂ 光催化还原 Cr (VI) 过程中吸附作用的影响及其消除 [J]. 环境科学, 2006, **27** (5): 913-917.
- [18] 付宏祥, 吕功煊, 李树本. Cr (VI) 离子在 TiO₂ 表面的光催化还原机理研究 [J]. 化学物理学报, 1999, **12** (1): 112-116.
- [19] Akkan S, Altın I, Koç M, *et al.* TiO₂ immobilized PCL for photocatalytic removal of hexavalent chromium from water [J]. Desalination and Water Treatment, 2015, **56**(9): 2522-2531.
- [20] Paul M L, Samuel J, Roy R, *et al.* Studies on Cr (IV) removal from aqueous solutions by nanotitania under visible light and dark conditions [J]. Bulletin of Materials Science, 2015, **38** (2): 393-400.
- [21] Ravishankar T N, Muralikrishna S, Kumar K S, *et al.* Electrochemical detection and photochemical detoxification of hexavalent chromium (Cr(VI)) by Ag doped TiO₂ nanoparticles [J]. Analytical Methods, 2015, **7**(8): 3493-3499.
- [22] Song R, Bai B, Jing D W. Hydrothermal synthesis of TiO₂-yeast hybrid microspheres with controllable structures and their application for the photocatalytic reduction of Cr (VI) [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2015, **90** (5): 930-938.
- [23] Burns R A, Crittenden J C, Hand D W, *et al.* Effect of inorganic ions in heterogeneous photocatalysis of TCE [J]. Journal of Environmental Engineering, 1999, **125**(1): 77-85.
- [24] Elovitz M S, Fish W. Redox interactions of Cr (VI) and substituted phenols: products and mechanism [J]. Environmental Science & Technology, 1995, **29**(8): 1933-1943.
- [25] 傅宏祥, 吕功煊, 李树本. 有机物存在下 Cr⁶⁺ 离子的光催化还原 [J]. 物理化学学报, 1997, **13**(2): 106-112.
- [26] 杨永凡, 费学宁. TiO₂ 光催化去除废水中重金属离子的研究进展 [J]. 工业水处理, 2012, **32**(7): 9-14.
- [27] 周雄, 张金洋, 王定勇, 等. 纳米 TiO₂ 吸附 HgCl₂ 水溶液中 Hg (II) [J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 220-227.
- [28] 张金洋, 王定勇, 李楚娴, 等. 纳米 TiO₂ 对土壤中 Al、Fe 和 Mn 释放及形态的影响 [J]. 水土保持学报, 2015, **29**(2): 238-241.
- [29] 张金洋, 李楚娴, 王定勇, 等. 纳米 TiO₂ 对底泥中汞释放及活化的影响 [J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4567-4572.

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Lanzhou City	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM _{2.5} in Southwest Suburb of Chengdu in Spring	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO ₂ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojingong Cave in Guangdong Province	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co ²⁺ Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe ₃ O ₄ Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO ₂ and N ₂ O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH ₄ and N ₂ O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N ₂ O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO ₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i>	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorffii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 15, 2016

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行