

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究	孙建林, 常文静, 陈正侠, 曾辉 (1513)
北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究	崔彤, 程婧晨, 何万清, 任培芳, 聂磊, 徐东耀, 潘涛 (1523)
2006~2010年珠三角地区 SO ₂ 特征分析	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邓涛, 徐婉筠, 冉靓, 赵春生 (1530)
环境空气 PM _{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试	王强, 钟琪, 迟颖, 张杨, 杨凯 (1538)
燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放	裴冰 (1544)
南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应	方峰, 王磊, 席雪飞, 胡佳俊, 付小花, 陆兵, 徐殿胜 (1550)
基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算	冯驰, 金琦, 王艳楠, 赵丽娜, 吕恒, 李云梅 (1557)
贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析	吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 罗进, 蒋浩 (1565)
东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析	高磊, 陈建耀, 王江, 柯志庭, 朱爱萍, 许凯 (1573)
河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究	刘肖, 杨琰, 彭涛, 赵景耀, 任小凤, 张银环, 聂旭东, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (1582)
石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响	肖时珍, 熊康宁, 蓝家程, 张晖, 杨龙 (1590)
旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异	赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 于正良, 江泽利 (1598)
有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响	孙玉川, 王永启, 梁作兵, 袁道先 (1605)
山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究	曹霏霏, 杨丽原, 庞绪贵, 王炳华, 王云倩 (1615)
摇蚊幼虫扰动下沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应	史晓丹, 李勇, 李大鹏, 王忍, 邓猛, 黄勇 (1622)
南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响	郝卓, 高扬, 张进忠, 徐亚娟, 于贵瑞 (1630)
不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响	黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 石纹豪, 杨珊 (1639)
荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响	汪小雄, 姜成春, 李锦卫, 汪晓军 (1648)
黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用	陈亚楠, 袁玲 (1655)
饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制	丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 缪佳 (1662)
水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性	凌晓, 胡晨燕, 程明, 谷建 (1668)
化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响	张灿, 刘文君, 史云, 安代志, 白森, 徐稳 (1674)
牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性	马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 钟金魁, 李安邦 (1678)
丁二酸改性茶油树木屑吸附铅的研究	张晓峰, 陈迪云, 彭燕, 刘永胜, 熊雪莹 (1686)
SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响	张静, 肖太民, 张晶, 曹丽亚, 杜亚威, 刘春, 张磊 (1694)
TiO ₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制	郭宏生, 刘亚楠, 乔琪, 魏红, 董呈幸, 薛洁, 李克斌 (1700)
新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能	王刚, 杜凤龄, 常青, 徐敏 (1707)
基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量	曾善文, 王泽宇, 高敬, 刘东, 张代钧, 卢培利 (1713)
分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制	黄帅, 刘宏波, 殷波, 马惠君, 符波, 刘和, 白洁 (1720)
通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响	张喻, 韩融, 陆文静, 王洪涛, 明中远, 王强, 夏伟 (1727)
生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究	吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 杨慧娟, 孙剑辉 (1733)
百乐克 (BIOLAK) 活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析	田美, 刘汉湖, 申欣, 赵方庆, 陈帅, 姚永佳 (1739)
异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性	梁贤, 任勇翔, 杨垒, 赵思琪, 夏志红 (1749)
菌株 <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学	任磊, 史延华, 贾阳, 姚雪松, Ruth Nahurira, 弥春霞, 闫艳春 (1757)
短短芽孢杆菌及其芽孢对苣的降解	刘芷辰, 叶锦韶, 彭辉, 刘则华, 邓庭进, 尹华, 廖丽萍 (1763)
垃圾填埋场抗生素抗性基因初探	李蕾, 徐晶, 赵由才, 宋立岩 (1769)
不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查	麦晓蓓, 陶然, 杨扬, 张敏, 林剑华, 满滢 (1776)
硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响	柳蓉, 龙焰, 王立立, 何婷, 叶锦韶 (1785)
山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 李洪建, 李君剑, 武江星 (1793)
施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响	姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 刘庆芳, 王志齐, 张彦军, 李娜娜, 李如剑, 吴得峰, 孙棋棋 (1802)
宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估	张文超, 吕森林, 刘丁戎, 刘品威, 米持真一, 王效举, 王青耀 (1810)
宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义	张俊辉, 王瑾, 张健, 房妮, 夏敦胜 (1818)
长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征	毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 张小凯, 何丽芝, 王海龙 (1827)
矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响	李君剑, 刘峰, 周小梅 (1836)
三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究	肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国 (1842)
钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应	黄昭露, 陈泉源, 周娟, 谢墨函 (1849)
石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应	杨茜, 吴蔓莉, 聂麦茜, 王婷婷, 张明辉 (1856)
可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究	卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 谭蒙 (1864)
绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性	金诚, 赵转军, 南忠仁, 王胜利, 武文飞, 王厚成 (1870)
硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响	王丹, 李鑫, 王代长, 饶伟, 杜光辉, 杨军, 化党领 (1877)
臭氧对几种楠木气体交换参数的影响	李苗苗 (1888)
某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索	蔡锋, 赵士波, 陈刚才, 鲜思淑, 杨清玲, 周贤杰, 余海 (1902)
《环境科学》征订启事 (1543) 《环境科学》征稿简则 (1756) 信息 (1667, 1726, 1809, 1848)	

绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性

金诚, 赵转军, 南忠仁*, 王胜利, 武文飞, 王厚成

(兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘要: 通过对 Pb-Zn 复合胁迫下干旱区绿洲土壤中油菜种植进行盆栽试验模拟, 探讨了重金属复合污染对油菜生长的影响及其各形态之间的转化规律和生物有效性。结果表明, 低浓度 Pb、Zn 处理下, 油菜生长得到促进, 茎叶生长优势大于根系。随着外源重金属的投加, 土壤中 Pb、Zn 主要赋存形态较对照均由紧结合态向松结合态转化, 重金属生物有效性提升; 可交换态 Pb、碳酸盐结合态 Zn 分别是油菜不同部位吸收 Pb、Zn 的主要贡献形态。油菜在低浓度胁迫水平对 Pb、Zn 的富集能力和转移能力强于高浓度胁迫水平, 且油菜对 Pb、Zn 的富集、迁移系数均随土壤中对对应元素或共存元素生物有效态含量的增大而减小。所有处理中, 油菜茎叶中的 Pb 含量均超出了食品安全限量指标, 建议在此类土壤种植叶菜类蔬菜前进行相关指标检测。

关键词: 油菜; 绿洲土壤; 铅; 锌; 形态特征; 生物有效性

中图分类号: X131.3; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1870-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.05.049

Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress

JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren*, WANG Sheng-li, WU Wen-fei, WANG Hou-cheng

(College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Pot experiments were conducted on cole (*Brassica*) grown in oasis soil under combined stress of lead and zinc, to study the effect of heavy metal combined pollution on cole growth as well as the speciation conversion rules and bioavailability. The result showed that the promoting effect on cole growth was shown in the low concentration treatments, especially on stem leaves. With addition of exotic heavy metals, the main speciations of Pb and Zn in the soil transformed from tight-bound to loose-bound forms as compared to the control, and the bioavailability of heavy metals was increased. And, the exchangeable Pb and the carbonate bound form of Zn were the major contributing speciations which were absorbed in different parts of cole. What's more, the capabilities of uptake and translocation of Pb and Zn by cole were stronger at lower stress levels, and the enrichment and migration coefficients decreased with the increasing content of bioavailable fraction of the corresponding element or the coexisting element. In all treatments, the Pb concentration in the stem leaves of cole exceeded the food safety threshold, therefore it is recommended to conduct detection of relevant indicators before planting foliage vegetables in this kind of soil.

Key words: cole; oasis soil; lead; zinc; speciation characteristics; bioavailability

绿洲土壤是西北干旱地区的主要耕作土壤, 具有 pH 高、有机质贫乏等特点, 且在干旱区特有的气候条件、地理环境条件及人为影响等因素的共同作用, 致使不同区域绿洲土壤的理化性质具有较强的空间分异现象^[1~3], 其中, 重金属元素的迁移转化和生物富集为外界关注的焦点问题^[4~7]。有研究表明, 随着工业活动的开展, 绿洲土壤已出现不同程度的重金属污染^[8~10], 研究内容主要集中在 Cd、Pb、Cu、Cr、Ni 等元素^[11~16], 且有结论证实, 复合重金属污染较单一污染更复杂, 更难监测和治理^[17~20]。据不完全统计, 甘肃拥有铅锌矿 1122.49 万 t^[21], 位居全国第三, 开采、冶炼在带来巨大经济效益的同时, 也带来了不容忽视的环境风险。目前, Pb、Zn 复合污染对土壤-植物系统影响的研究较少^[22, 23], 对

干旱区绿洲土的相关研究更是缺乏。

为更好、更快地体现出 Pb、Zn 复合污染对于蔬菜的影响, 经过多次筛选, 最终选取市场需求量最大的叶菜类蔬菜——油菜 (*Brassica campestris* L.) 为供试材料, 以未污染的干旱区绿洲土为供试土壤。通过盆栽试验研究油菜在 Pb、Zn 复合污染情况下对重金属的吸收累积及土壤重金属的形态变化, 进而填补该区域 Pb-Zn 复合污染下叶菜蔬菜对重金属积累富集研究的空白, 以期为干旱区绿洲土壤重金属复合污染综合治理和作物食品安全评价提供科学

收稿日期: 2014-11-08; 修订日期: 2015-01-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51178209, 91025015)

作者简介: 金诚 (1989 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境污染机制和控制修复, E-mail: jinc2011@lzu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: zhongrennan@126.com

依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试植物为油菜(*Brassica campestris* L.), 品种为吉林大春科丰蔬菜研究所的四月蔓, 种子购自张掖市种子公司. 供试土壤为河西走廊地区的未污染

的绿洲土壤, 采集耕层的 0 ~ 20 cm, 基本理化性质见表 1. 土样风化后过 2 mm 筛, 按表 2 将不同剂量组合的重金属硝酸盐溶液加入 1.5 kg 干土中拌匀装入花盆, 稳定 2 周. 每种组合设置 3 个平行, 加水使土壤含水量为田间持水量的 60%, 保持 2 d 后播入油菜种子, 生长一周后间苗, 66 d 后分别采集土样和油菜样品待测.

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the test soil						
土壤类型	pH	有机质 /g·kg ⁻¹	碳酸盐 /%	阳离子交换量 /cmol·kg ⁻¹	Pb /mg·kg ⁻¹	Zn /mg·kg ⁻¹
绿洲土壤	8.16	15.59	5.64	8.1	22.3	62.97

表 2 供试土壤中 Pb 与 Zn 的处理浓度设计/mg·kg⁻¹

Table 2 Concentrations of lead and zinc in the test soils/mg·kg ⁻¹									
处理	TS0	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6	TS7	TS8
Pb	0	75	150	225	300	450	750	1 050	1 500
Zn	0	50	100	150	200	300	500	700	1 000

1.2 测试方法

供试土壤基本理化性质: pH(土水比 1:2.5)、阳离子交换量、有机质和碳酸盐的测定方法见土壤农业化学分析方法^[24]. 土壤 Pb、Zn 形态分析采用 Tessier 连续提取法^[16, 25], 5 种形态依次为: 可交换态(EX)、碳酸盐结合态(CAB)、铁锰氧化态(FMO)、有机结合态(OM)和残渣态(RES). 植物样品采用 HNO₃-HClO₄ 法(4:1, 体积比)于电热板上消解, 土壤样品采用 HNO₃-HF-HClO₄ 法于电热板上消解. 所有样品消解液用 0.5% 的稀硝酸定容至 50 mL 容量瓶, 采用美国 Thermo Fisher 原子吸收光谱仪 SOLLAR M6 测定样品中的 Pb、Zn 含量, 并添加 GBW 07401 (GSS-1) 标准土样和 GBW 10015 (GSB-6) 植物标准样品进行质量控制, 同时做溶剂空白. 标准样品均在标准值范围内, 溶剂空白测定值低于

检测限.

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 19.0 对数据进行统计分析, 采用 Origin 7.5 进行绘图.

2 结果与分析

2.1 Pb-Zn 复合胁迫对油菜生物量的影响

植物生物量的变化是反映重金属胁迫对植物生长影响的最直接途径之一, 植物干重常被作为评价参数. 油菜各部位干重随 Pb-Zn 复合胁迫水平变化见表 3. 从中可知, 油菜根系干重排序为 TS1 > TS2 > TS0 > TS4 > TS6 > TS7 > TS3 > TS5 > TS8; 茎叶干重排序为 TS1 > TS4 > TS2 > TS6 > TS3 > TS5 > TS0 > TS7 > TS8, 说明低浓度 Pb、Zn 对油菜生长有一定的促进效应, 且茎叶生长优势大于根系.

表 3 油菜干重随复合胁迫水平的变化/g

Table 3 Variation of cole dry weight with the combined stress level/g									
胁迫水平	TS0	TS1	TS2	TS3	TS4	TS5	TS6	TS7	TS8
根系	0.79	1.01	0.96	0.60	0.71	0.60	0.63	0.61	0.55
茎叶	8.71	11.49	10.87	9.36	11.30	8.82	9.61	8.14	7.87

2.2 油菜体内 Pb、Zn 的含量和分布

不同处理水平下油菜体内 Pb、Zn 含量与分布如图 1 所示. 油菜根系、茎叶中 Pb、Zn 含量均随 Pb-Zn 复合胁迫水平的增大而增大, 同一水平处理下根系 Zn 含量均小于茎叶 Zn 含量, 而根系 Pb 含量和增幅明显大于茎叶中相关参数.

2.3 土壤中 Pb、Zn 重金属形态的含量变化与分布特征

土壤重金属各形态分布特征常用分配系数来表征, 即土壤中该重金属形态占总量的比例. 利用各形态在重金属总量的相对含量大小, 消除重金属各形态含量随总量增加而增加的影响, 进而能较总量

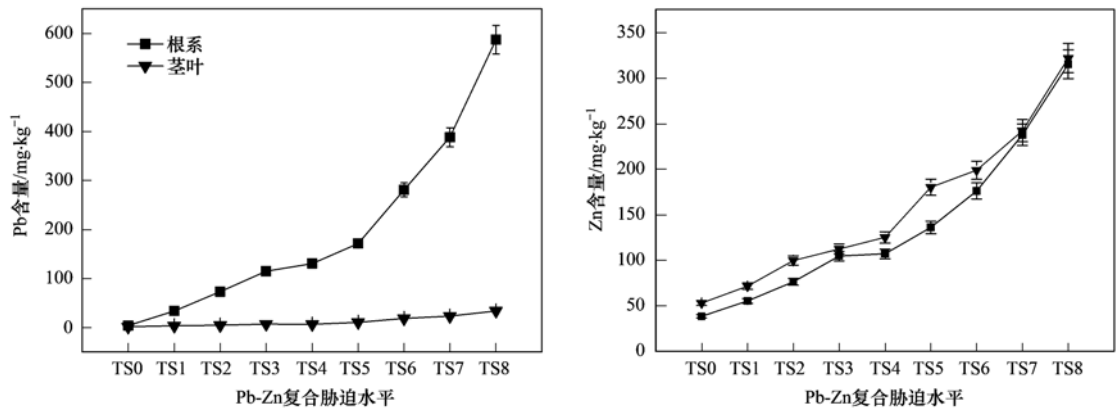


图1 不同胁迫水平下油菜体内 Pb、Zn 的含量与分布

Fig. 1 Content and distribution of lead, zinc in cole under different stress levels

和各形态含量更清楚地指示环境污染对土壤的冲击^[26]. 不同胁迫水平下油菜土壤中 Pb、Zn 各形态的含量变化特征见图 2. 油菜土壤中重金属不同形态的变异系数、Pearson 相关系数见表 4.

由图 2 可知,对照土壤中 Pb、Zn 形态分布特征, Pb: RES > FMO > OM > CAB > EX; Zn: RES > OM > FMO > CAB > EX. 这说明在对照土壤中, Pb、Zn 的主要赋存形态均为 RES, EX 含量均很小. 随胁迫浓度的增加, Pb、Zn 在供试土壤中的主要赋存

形态由 RES 转变为 CAB 和 FMO.

由表 4 可知, Pb、Zn 各形态中, EX 对外界胁迫响应强度最大, 其次是 CAB、FMO 和 OM, RES 最小, CAB 和 EX 分配系数逐渐增大, RES 持续下降, OM 逐渐下降至稳定. Pb 在土壤中除 RES 含量与复合胁迫水平显著相关外, 其余形态含量均满足极显著相关; Zn 在土壤中除 RES 外, 其余形态含量均与复合胁迫水平满足极显著相关.

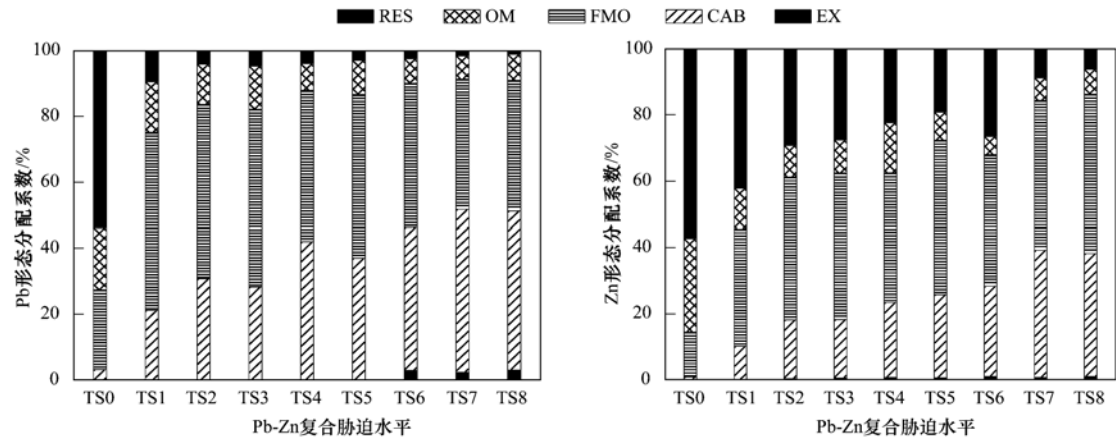


图2 不同胁迫水平下土壤中 Pb、Zn 形态变化特征

Fig. 2 Speciation variation characteristics of lead and zinc in soil under different stress levels

表 4 土壤中重金属不同形态的变异系数、Pearson 相关系数¹⁾

Table 4 Variation coefficient & Pearson correlation coefficient of different heavy metal speciations in the test soil		土壤中重金属的不同形态				
指标	元素	EX	CAB	FMO	OM	RES
变异系数	Pb	176.18	111.80	82.80	78.23	21.83
	Zn	118.24	112.11	87.09	52.14	35.19
形态含量-复合胁迫浓度	Pb	0.942 **	0.978 **	0.950 **	0.902 **	0.770 *
Pearson 相关系数	Zn	0.951 **	0.982 **	0.958 **	0.845 **	0.086

1) ** 表示 $P < 0.01$; * 表示 $P < 0.05$

2.4 土壤中 Pb、Zn 的生物有效性

2.4.1 Pb、Zn 在油菜不同部位含量与土壤中重金属有效态含量的关系

为明确油菜不同部位重金属含量与土壤中 Pb、Zn 各形态含量的关系,筛选出对油菜不同部位吸收贡献最大的重金属形态,通过逐步回归分析方法得到最优回归方程,如表 5 所示。

由表 5 可知,油菜根系、茎叶的 Pb 含量与土壤

Pb-EX(可交换态 Pb)呈极显著相关的线性模型,即在 TS0 ~ TS8 胁迫水平中,油菜根系、茎叶的 Pb 含量随土壤 Pb-EX 含量的增加而增加,根系 Pb 含量的增加速率远大于茎叶中 Pb 含量增加速率;油菜根系、茎叶的 Zn 含量与土壤 Zn-CAB(碳酸盐结合态 Zn)呈极显著相关的线性模型,即在 TS0 ~ TS8 胁迫水平中,油菜根系、茎叶的 Zn 含量随土壤 Zn-CAB 含量的增加而增加。

表 5 油菜不同部位重金属含量与土壤中 Pb、Zn 各形态含量的逐步回归分析¹⁾

Table 5 Result of multiple regression analysis between concentrations of lead and zinc in different parts of cole and concentration of different speciations in soil

自变量	因变量	逐步回归方程	调整 R^2	F
形态含量	根系 Pb	$Y = 120.016X_{EX} + 87.819$	0.741 **	24.166
	茎叶 Pb	$Y = 7.011X_{EX} + 5.635$	0.801 **	33.296
	根系 Zn	$Y = 6.873X_{CAB} - 12.085$	0.818 **	36.970
	茎叶 Zn	$Y = 6.727X_{CAB} + 8.727$	0.841 **	43.447

1) ** 代表 $P < 0.01$

2.4.2 Pb、Zn 的生物富集与转移能力

油菜作为一类叶菜类蔬菜,其地上部分可供人类和动物食用,且 Pb、Zn 在油菜体内的富集量及 Pb、Zn 从油菜根部向地上部分的转移量将直接影响到人类及动物的生命健康。故引入评价指标——重金属富集系数(bioconcentration factor, BCF)和转移系数(transfer factor, TF)分别来反映植物对重金属富集程度的高低和重金属向地上迁移能力的强弱。

由土壤-油菜系统中重金属富集系数和转移系数统计表(表 6)可知,不同复合胁迫水平下 Pb、Zn 的 BCF 值、TF 值均小于对照组。Pb 的 BCF 值排序

为 $TS1 = TS3 > TS2 > TS4 > TS5 > TS6 = TS7 > TS8$, TF 值随复合胁迫水平的增加而减小。Zn 的 BCF 值随复合胁迫水平的增加而减小,TF 值在 TS1 ~ TS5 水平大于 TS6 ~ TS8 水平,其中 TS2 处最大,在 TS6 ~ TS8 水平 TF 值随胁迫水平增加而减小。

2.4.3 Pb、Zn 双元素的交互作用

重金属复合污染下,某种元素在植物体内的富集迁移不仅受到元素自身含量、形态的影响,同时也受到土壤中其他共存元素的影响。不同元素间的交互作用引起理化性质的差异而存在区别,但单纯研究元素本身存在一定的局限性,缺乏可视化的表征。不同形态的重金属在迁移性和生物利用率方面存在差异,根据各形态生物利用的大小归类发现,重金属元素生物有效态(bioavailable concentrations)迁移性强,易于被生物富集,计算时常以 EX + CAB 为生物有效态^[27]。根据逐步回归方程,Pb、Zn 的主要贡献形态分别为 EX、CAB,故利用作物的富集和迁移特征参数与重金属生物有效态的关联,通过构建数学模型来推演此过程,进行初步的理论性探讨。

作物 BCF、TF 随土壤中重金属生物有效态含量的变化趋势经数据分析得出变量间负相关的非线性方程:

$$Y_{BCF(Pb)} = -0.044 \ln X_{(Bio-Pb)} + 0.606$$
$$(R^2 = 0.836, P < 0.01)$$

$$\ln Y_{TF(Pb)} = -0.414 \ln X_{(Bio-Pb)} + 6.205$$
$$(R^2 = 0.977, P < 0.01)$$

$$\ln Y_{BCF(Zn)} = -0.412 \ln X_{(Bio-Zn)} + 2.028$$

表 6 土壤-油菜系统中重金属富集系数和转移系数统计¹⁾

Table 6 TFs and BCFs of heavy metals in soil-cole system and their statistical values

胁迫水平	BCF		TF	
	Pb	Zn	Pb	Zn
TS1	0.49	0.74	1.65	1.30
TS2	0.47	0.58	1.05	1.31
TS3	0.49	0.45	0.91	1.07
TS4	0.41	0.39	0.82	1.17
TS5	0.38	0.38	0.79	1.32
TS6	0.31	0.26	0.63	1.13
TS7	0.31	0.23	0.61	1.02
TS8	0.30	0.21	0.54	1.02
最大值	0.49	0.74	1.65	1.32
最小值	0.30	0.21	0.54	1.02
平均值	0.39	0.40	0.87	1.17
对照	0.61	2.38	10.31	1.38

1) BCF = 植物地上部分重金属含量/土壤重金属含量; TF = 植物地上部分重金属含量/植物地下部分重金属含量

$$(R^2 = 0.976, P < 0.01)$$

$$Y_{TF(Zn)} = -0.057 \ln X_{(Bio-Zn)} + 1.398$$

$$(R^2 = 0.538, P < 0.05)$$

式中, BCF(Pb)、TF(Pb)、 $X_{(Bio-Pb)}$ 分别代表油菜对 Pb 的富集能力、迁移能力和土壤中 Pb 的生物有效态; BCF(Zn)、TF(Zn)、 $X_{(Bio-Zn)}$ 分别代表油菜对 Zn 的富集能力、迁移能力和土壤中 Zn 的生物有效态

上述曲线方程可以看出油菜对于 Pb、Zn 的富集、迁移随土壤中对对应元素生物有效态含量的增大而减小, 表明油菜对 Pb、Zn 的吸收受到对应元素浓度和形态的影响. 重金属生物有效态含量的高低直接影响作物组织内重金属元素的多少, 为探讨油菜对某一元素的富集迁移能力与土壤共存重金属元素形态之间的关系, 以 Pb、Zn 生物有效态含量作为自变量, 分别以油菜 Zn、Pb 的 BCF、TF 作为因变量, 得到负相关的非线性方程:

$$Y_{BCF(Pb)} = -0.055 \ln X_{(Bio-Zn)} + 0.618$$

$$(R^2 = 0.875, P < 0.01)$$

$$\ln Y_{TF(Pb)} = -0.493 \ln X_{(Bio-Zn)} + 6.484$$

$$(R^2 = 0.947, P < 0.01)$$

$$\ln Y_{BCF(Zn)} = -0.339 \ln X_{(Bio-Pb)} + 1.897$$

$$(R^2 = 0.966, P < 0.01)$$

$$Y_{TF(Zn)} = -0.045 \ln X_{(Bio-Pb)} + 1.382$$

$$(R^2 = 0.498, P < 0.05)$$

式中, BCF(Pb)、TF(Pb)、 $X_{(Bio-Pb)}$ 分别代表油菜对 Pb 的富集能力、迁移能力和土壤中 Pb 的生物有效态; BCF(Zn)、TF(Zn)、 $X_{(Bio-Zn)}$ 分别代表油菜对 Zn 的富集能力、迁移能力和土壤中 Zn 的生物有效态.

上述曲线方程可以看出油菜对于 Pb 或 Zn 的富集、迁移能力随土壤中共存重金属元素生物有效态含量的增大而减小, 表明油菜对 Pb、Zn 的吸收也受到共存元素的浓度和形态的影响.

3 讨论

Pb-Zn 低浓度胁迫水平下, 油菜生长优于对照, 茎叶生长优势大于根系, 说明低浓度重金属元素对植物生长一定的促进作用, 且相对于植物地上部分, 根系作为直接与土壤接触的器官, 受重金属影响程度强于地上部分. 值得注意的是, 试验中重金属元素以硝酸盐的形式添加至土壤, 氮肥效应可能也是促进植物生长的因素, 鉴于目前尚无明确的定量研究结论, 后期将重点探讨.

油菜根系、茎叶中 Pb 含量均随 Pb-Zn 复合胁迫水平的增加而增大, 根系 Pb 含量和增幅明显大于

茎叶中相关参数, 表明外源 Pb 的投加, 促进了油菜对 Pb 的富集吸收, 但 Pb 在油菜体内向上迁移能力偏弱, 主要在根系累积. 这可能是因为 Pb 具有很高的负电性, 在土壤中易与有机质、碳酸盐物质等形成难以被植物吸收、利用的惰性结合物, 且植物内皮层的凯氏带阻挡 Pb 向地上部位进一步转运, 因此致使根系成为植物吸收和积累 Pb 的主要部位^[28]. 油菜根系、茎叶中 Zn 含量均随 Pb-Zn 复合胁迫水平的增加而增大, 茎叶 Zn 含量均大于根系 Zn 含量. 这说明外源 Zn 的投加, 促进了油菜对 Zn 的富集吸收, 且 Zn 在油菜体内转移能力较强.

不同胁迫水平下 Pb、Zn 各形态中, EX 对外界胁迫响应强度最大, 其次是 CAB、FMO 和 OM, RES 最小, 且 Pb、Zn 在土壤中的主要赋存形态由 RES 转变为 CAB 和 FMO, 异于对照土壤. 土壤中 Pb、Zn 形态含量 (RES 除外) 受到复合胁迫水平的极显著影响. 这说明外源投加 Pb、Zn 对土壤-油菜系统中根际土的 Pb、Zn 形态含量有直接影响, 并促使 Pb、Zn 形态由紧结合态向松结合态转化.

油菜不同部位 Pb、Zn 含量与相应元素形态含量的逐步回归方程结果表明: 在 TS0 ~ TS8 胁迫水平中, Pb-EX、Zn-CAB 分别是油菜不同部位吸收 Pb、Zn 的主要贡献形态. 由于土壤中 Pb-EX、Zn-CAB 形态含量与复合胁迫浓度存在显著相关, 则说明外源投加 Pb、Zn 直接影响土壤中 Pb-EX、Zn-CAB 形态含量变化, 间接影响油菜对于 Pb、Zn 的吸收.

低浓度 Pb、Zn 的富集能力和转移能力均强于高浓度胁迫水平, 且通过模拟方程可知, 油菜对 Pb、Zn 的 BCF、TF 随着土壤中对对应元素和共存元素生物有效态含量的增大而减小, 其原因可能为: ①随重金属处理浓度的增大, 土壤重金属生物有效态含量随之增加, 油菜受到的负面影响逐渐加剧, 作物在未达到耐受极限前, 自身的调节和保护机制发挥作用, 抑制作物对 Pb、Zn 的吸收和迁移^[29~32]. 至于油菜在 Pb-Zn 复合胁迫下的耐受极限及作用机制, 尚需进一步研究讨论. ②Pb、Zn 在共存条件下体现为拮抗作用^[33], 互相竞争、抑制油菜对共存元素的吸收、富集. ③随胁迫浓度的增加, 植物对于 Pb、Zn 的富集量也在增加, 但 BCF、TF 是相对概念, 因统计分析时, 算式分子增加速率小于分母, 致使 BCF、TF 随有效态浓度增大而减小.

油菜作为叶菜类蔬菜, 其叶部重金属含量将直接影响人类与动物生命健康. 利用文献[34]中对

“芸薹类蔬菜、叶菜蔬菜”Pb 限量指标 ($0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 与 Pb-Zn 复合胁迫水平下油菜茎叶中 Pb 含量进行对比发现, Pb 超标率为 100%, 超出食品安全限量指标的最小倍数为 1.3, 最大倍数为 9.4。其中对照组土壤环境质量满足文献[35]一级土壤标准, 但对照组油菜茎叶 Pb 含量仍十分接近食品安全限值。这可能与油菜品种、干旱区特有的气候、土壤条件、盆栽试验局限性等因素有关, 具体结论需要进一步验证。

4 结论

(1) 绿洲土中投加低浓度的 Pb、Zn, 有助于植物的生长, 且植物在低浓度胁迫水平对 Pb、Zn 的富集能力和转移能力均强于高浓度胁迫水平。

(2) 外源 Pb、Zn 的投加, 促使 Pb、Zn 形态由紧密结合态向松结合态转化, 进而促进植物对 Pb、Zn 的富集吸收。Pb-EX、Zn-CAB 分别是植物不同部位吸收 Pb、Zn 的主要贡献形态, 显著受到外源投加 Pb、Zn 含量的影响, 因此限制或减少外源 Pb、Zn 污染物进入土壤是控制植物体内 Pb、Zn 含量的重要途径, 而土质等指标检测是保证食品安全的主要预防措施。

(3) 植物对于 Pb、Zn 的富集、迁移过程除了受到特定单一元素自身性质和浓度的影响外, 同时也受到共存元素及其交互作用的影响。

致谢: 兰州大学资源环境学院环境地学实验室团队成员对盆栽试验、采样和分析等工作的顺利开展提供了无私的援助, 特此感谢。

参考文献:

- [1] 王根绪, 程国栋. 西北干旱区土壤的生态特征与变化[J]. 干旱区资源与环境, 1999, **13**(3): 14-22.
- [2] 张勃, 张凯. 干旱区绿洲空间分异演化研究——以黑河流域绿洲为例[J]. 冰川冻土, 2002, **24**(4): 414-420.
- [3] 王幼奇, 白一茹, 王建宇. 引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价: 以银川市兴庆区为例[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2714-2720.
- [4] 杨慧, 王富华, 赵晓丽, 等. 叶菜类蔬菜中主要污染物调研分析研究[J]. 热带农业科学, 2013, **33**(10): 56-61.
- [5] 郑向群, 郑顺安, 李晓辰. 叶菜类蔬菜土壤铬(Ⅲ)污染阈值研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(12): 3039-3044.
- [6] Ma L Q, Rao G N. Chemical fractionation of cadmium, copper, nickel, and zinc in contaminated soils [J]. Journal of Environmental Quality, 1997, **26**(1): 259-264.
- [7] Golia E E, Dimirkou A, Mitsios I K. Influence of some soil parameters on heavy metals accumulation by vegetables grown in agricultural soils of different soil orders [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2008, **81**(1): 80-84.
- [8] 王宁, 南忠仁, 王胜利, 等. Cd/Pb 胁迫下油菜中重金属的分布、富集及迁移特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, **48**(3): 18-22.
- [9] 汪霞, 南忠仁, 武文飞, 等. 干旱区绿洲土壤中重金属的形态分布及生物有效性研究[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(7): 1663-1667.
- [10] Yang Y M, Nan Z R, Zhao Z J, et al. Bioaccumulation and translocation of cadmium in cole (*Brassica campestris* L.) and celery (*Apium graveolens*) grown in the polluted oasis soil, Northwest of China [J]. Journal of Environmental Sciences (China), 2011, **23**(8): 1368-1374.
- [11] Yang Y M, Nan Z R, Zhao Z J. Bioaccumulation and translocation of cadmium in wheat (*Triticum aestivum* L.) and maize (*Zea mays* L.) from the polluted oasis soil of Northwestern China [J]. Chemical Speciation and Bioavailability, 2014, **26**(1): 43-51.
- [12] Zhao Z J, Nan Z R, Wang S L, et al. Experiments on speciation and bioavailability of selected heavy metals in arid oasis soil, Northwest of China [J]. Advances in Earth Science, 2008, **23**(11): 1193-1200.
- [13] Zhao Z J, Nan Z R, Wang Z W, et al. Interaction between Cd and Pb in the soil-plant system: a case study of an arid oasis soil-cole system [J]. Journal of Arid Land, 2014, **6**(1): 59-68.
- [14] Wang S L, Nan Z R, Liu X W, et al. Accumulation and bioavailability of copper and nickel in wheat plants grown in contaminated soils from the oasis, northwest China [J]. Geoderma, 2009, **152**(3-4): 290-295.
- [15] Nan Z R, Li J J, Zhang J M, et al. Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions [J]. Science of the Total Environment, 2002, **285**(1-3): 187-195.
- [16] Wang Z W, Nan Z R, Wang S L, et al. Accumulation and distribution of cadmium and lead in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in contaminated soils from the oasis, north-west China [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, **91**(2): 377-384.
- [17] Amacher M C, Sparks D L, Page A L, et al. Nickel, cadmium, and lead [S]. Methods of Soil Analysis (Part 3 Chemical Methods), 1996. 739-768.
- [18] Branzini A, González R S, Zubillaga M. Absorption and translocation of copper, zinc and chromium by *Sesbania virgata* [J]. Journal of Environmental Management, 2012, **102**: 50-54.
- [19] Otitoloju A A. Relevance of joint action toxicity evaluations in setting realistic environmental safe limits of heavy metals [J]. Journal of Environmental Management, 2003, **67**(2): 121-128.
- [20] Cerqueira B, Covelo E F, Andrade L, et al. The influence of soil properties on the individual and competitive sorption and desorption of Cu and Cd [J]. Geoderma, 2011, **162**(1-2): 20-26.
- [21] 赵福刚. 我国铅锌矿选矿技术现状[J]. 有色矿冶, 2007, **23**

- (6): 20-25.
- [22] Chrzan A. Necrotic bark of common pine (*Pinus sylvestris* L.) as a bioindicator of environmental quality [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(2): 1066-1071.
- [23] 谢正苗, 李静, 徐建明, 等. 杭州市郊蔬菜基地土壤和蔬菜中 Pb, Zn 和 Cu 含量的环境质量评价[J]. *环境科学*, 2006, **27**(4): 742-747.
- [24] 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.
- [25] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. *Analytical Chemistry*, 1979, **51**(7): 844-851.
- [26] 武文飞, 南忠仁, 王胜利, 等. 绿洲土 Cd, Pb, Zn, Ni 复合污染下重金属的形态特征和生物有效性[J]. *生态学报*, 2013, **33**(2): 619-630.
- [27] 张朝升, 陈秋丽, 张可方, 等. 大坦沙污水厂污泥重金属形态及其生物有效性的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(3): 1259-1264.
- [28] 杨刚, 伍钧, 唐亚. 铅胁迫下植物抗性机制的研究进展[J]. *生态学杂志*, 2005, **24**(12): 1507-1512.
- [29] 李玉双, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 北方常见农作物根际土壤中铅、锌的形态转化及其植物有效性[J]. *生态环境*, 2006, **15**(4): 743-746.
- [30] 汪洪, 金继运. 植物对锌吸收运输及积累的生理与分子机制[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, **15**(1): 225-235.
- [31] Broadley M R, White P J, Hammond J P, *et al.* Zinc in plants [J]. *New Phytologist*, 2007, **173**(4): 677-702.
- [32] 魏树和, 周启星. 重金属污染土壤植物修复基本原理及强化措施探讨[J]. *生态学杂志*, 2004, **23**(1): 65-72.
- [33] 许中坚, 吴灿辉, 邱喜阳, 等. 铅-锌-镉复合污染物在土壤-芥菜/油菜系统中的迁移及交互作用[J]. *水土保持学报*, 2007, **21**(6): 1-6.
- [34] GB 2762-2012. 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [35] GB 15168-1995. 土壤环境质量标准[S].

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoextraction of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 15, 2015

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行