

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,李晓芬(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,邬晓东,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)

CoCuMnO₂ 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δ¹⁵N-NO₃⁻ 和 δ¹⁸O-NO₃⁻ 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,蓝芙宁,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(*Bacteroides*) 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剂的势优势藻种筛选 李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)

微米 Fe₃O₄ 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土壤 CO₂ 和 N₂O 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 CH₄ 与 N₂O 浓度特征 侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)

模拟气沉降对内蒙古克氏针茅草原 N₂O 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 TiO₂ 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的交互特征 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)

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¹, 赵秀兰^{1,2*}, 常同举¹, 卢吉文³

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716; 3. 重庆市垫江环境监测站, 重庆 408300)

摘要: 通过长期定位试验, 研究了常规平作 (FPF) 和水旱轮作 (PR) 这 2 种耕作方式下紫色水稻土不同粒径 (1~2、0.25~1、0.05~0.25、<0.05 mm) 团聚体中有机质和重金属 (Cu、Zn、Pb、Cd、Fe 和 Mn) 的含量和分布特征, 探讨了不同粒径团聚体中重金属与有机质的关系。结果表明, 两种耕作方式下团聚体粒径组成均以 0.05~0.25 mm 和 <0.05 mm 为主, 土壤和各粒径团聚体中有机质含量均为常规平作高于水旱轮作, 且随粒径的减小而降低。耕作方式对土壤重金属含量的影响不显著, 但相比于 PR, FPF 有助于团聚体、有机质和重金属在 1~2 mm 和 0.25~1 mm 大粒径团聚体中聚集, 降低其在 <0.05 mm 和 0.05~0.25 mm 粒径团聚体中的分布。相关分析表明, 土壤团聚体中重金属含量与有机质的含量呈负相关, 它们的总量却呈正相关关系。同一耕作方式下, 重金属对有机质变化的敏感程度为 Mn > Zn > Pb > Cu > Fe > Cd, 而同一重金属元素对有机质变化的反应则为 PR 较 FPF 更敏感。

关键词: 耕作方式; 紫色水稻土; 团聚体; 有机质; 重金属

中图分类号: X171; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1923-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.05.041

Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates

SHI Qiong-bin¹, ZHAO Xiu-lan^{1,2*}, CHANG Tong-ju¹, LU Ji-wen³

(1. Key Laboratory of Eco-Environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment of Chongqing, Chongqing 400716, China; 3. Chongqing Dianjiang Environmental Protection Monitoring Station, Chongqing 408300, China)

Abstract: A long-term experiment was utilized to study the effects of tillage methods on the contents and distribution characteristics of organic matter and heavy metals (Cu, Zn, Pb, Cd, Fe and Mn) in aggregates with different sizes (including 1-2, 0.25-1, 0.05-0.25 mm and <0.05 mm) in a purple paddy soil under two tillage methods including flooded paddy field (FPF) and paddy-upland rotation (PR). The relationship between heavy metals and organic matter in soil aggregates was also analyzed. The results showed that the aggregates of two tillage methods were dominated by 0.05-0.25 mm and <0.05 mm particle size, respectively. The contents of organic matter in each aggregate decreased with the decrease of aggregate sizes, however, compared to PR, FPF could significantly increase the contents of organic matter in soils and aggregates. The tillage methods did not significantly affect the contents of heavy metals in soils, but FPF could enhance the accumulation and distribution of aggregate, organic matter and heavy metals in aggregates with diameters of 1-2 mm and 0.25-1 mm. Correlation analysis found that there was a negative correlation between the contents of heavy metals and organic matter in soil aggregates, but a positive correlation between the amounts of heavy metal and organic matter accumulated in soil aggregates. From the slope of the correlation analysis equations, we could found that the sensitivities of heavy metals to the changes of soil organic matters followed the order of Mn > Zn > Pb > Cu > Fe > Cd under the same tillage. When it came to the same heavy metal, it was more sensitive in PR than in FPF.

Key words: tillage method; purple paddy soil; aggregate; organic matter; heavy metal

土壤中过量的重金属不仅会抑制植物的生长, 还可通过食物链危害到人和动物的健康^[1]。研究土壤-植物系统中重金属的积累和迁移转化行为及其影响因素具有十分重要的意义。土壤有机质是土壤的组成成分之一, 不仅是评价土壤肥力和质量的重要指标, 也是影响重金属在土壤中的存在形态和迁移转化, 生物有效性及毒性的重要土壤性质之

—^[2,3]。关于土壤有机质与重金属间的相互作用受到广泛关注。

收稿日期: 2015-10-30; 修订日期: 2015-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471272); 国家科技支撑计划项目(2013BAJ11B03)

作者简介: 史琼彬(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为废物处理与资源化, E-mail: sqb19901009@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zxl@swu.edu.cn

团聚体是土壤最基本的物质和功能单元,由于与有机物和矿物质的结合方式不同,不同粒径团聚体的重金属在土壤微环境中的空间分异性及生物有效性等方面存在差异^[4,5]. 如 Zhang 等^[6]和 Quenea 等^[7]研究表明,随着土壤团聚体粒径的减小,团聚体中 Cu、Zn 和 Cd 的含量显著提高; Balabane 等^[8]也报道,在某低污染草地, >2、2~0.2、0.2~0.1 和 0.1~0.05 mm 粒径的团聚体中 Cd 的富集量分别是原始土样的 5、9、9 和 11 倍. 团聚体还是土壤有机质分解转化和腐殖质形成的最重要场所^[9],而有机质又是土壤团聚体的胶结物质,不仅对土壤团聚体的形成起着十分重要的作用,还与土壤团聚体的功能紧密相关^[10]. 已有研究报道了土壤团聚体中有机质的数量、特性及其对农业管理措施如耕作^[11]、轮作^[12]和有机物料施用^[13]等的响应,但关于不同耕作方式下不同粒径团聚中重金属与有机质间的关系研究很少. 常规平作是一类特殊的稻田,广泛分布在我国西南及南方地区,面积达 $2.7 \times 10^6 \sim 4.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[14],其种植模式为夏季水稻,冬季关水休闲,水旱轮作是在同一田地内进行水稻与旱地作物的轮换种植,适宜于南方长江流域及以南的富水地区,也是我国主要的作物生产系统之一^[15,16]. 本研究以 1990 年建立的长期定位试验为依托,比较了两种耕作方式下紫色水稻土团聚体中重金属含量与分布特征的变化及其与有机质变化的关系,以期为紫色土区重金属污染稻田的修复提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及试验处理

长期定位试验始于 1990 年,设在重庆市北碚区西南大学试验农场,该农场地理位置为 $106^{\circ}26'E$, $30^{\circ}26'N$,海拔 230 m,年均气温 $18.3^{\circ}C$,年日照 1 276.7 h,年均降雨量 1 105.4 mm,其中 5~9 月降雨量占全年降雨量的 70%,年平均无霜期 334 d. 试验地土壤为紫色中生代侏罗纪沙溪庙组灰棕紫色沙泥岩母质上发育的中性紫色水稻土,试验前土壤基本理化性质为:pH 7.1,有机质 $23.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,碱解氮 $120.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $7.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $71.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

试验设 2 个处理:①常规平作(中稻-冬水田, flooded paddy field, FPF),按照传统方法每年三犁三耙翻耕植稻,水稻收获后灌冬水休闲至来年 4 月;②水旱轮作(中稻-油菜, paddy-upland rotation, PR, 该处理于 1998 年前为中稻-小麦轮作),按传统方法

水稻平作,水稻收获后,放干田内水翻耕种植油菜,油菜收获后灌水犁耙种水稻. 每处理小区面积 20 m^2 ,随机排列,4 次重复,各处理的施肥量均为尿素 $273.1 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 过磷酸钙 $500.3 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 氯化钾 $150.1 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,过磷酸钙做底肥一次施用,尿素用量的 2/3 做底肥,1/3 做追肥,氯化钾底肥和追肥各 1/2.

1.2 土样采集与分析

于水稻成熟后采集土壤样品,每个小区随机取 6 个点,取用 0~10 cm 的表层土壤样品,土样去除新鲜的植物残物后混匀,放在干净通风处风干,磨细,分别过 2 mm 和 0.25 mm 筛,分别用于土壤团聚体分离、有机质和重金属总量的测定. 土壤团聚体分离方法参考 Cambardella 等的研究方法^[17]. 称土样 20 g,于 250 mL 三角瓶中,加 $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $(\text{NaPO}_3)_6$ 溶液 100 mL,先手摇 15min,再用振荡器 ($90 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$) 振荡 18h 进行机械分散,过 1、0.25 和 0.05 mm 系列土筛,反复用蒸馏水冲洗,获得粒径为 1~2、0.25~1、0.05~0.25 和 $<0.05 \text{ mm}$ 的团聚体,其中小于 0.05 mm 团聚体用离心方法浓集. 各粒径团聚体经 $60^{\circ}C$ 下烘干称重,磨细,过 0.25 mm 筛备用.

土壤和各粒径团聚体中有机质含量采用重铬酸钾-外加热法测定,重金属含量采用王水-高氯酸法消煮,原子吸收分光光度法测定^[18]. 土样重金属含量测定采用标准土样 GBW07428 (GSS-14) 进行质量控制.

1.3 数据统计与分析

采用 Excel 2010、Origin 9.0 和 SPSS 17.0 进行有关数据的计算、方差分析及 *t* 检验分析、相关分析和图形制作,显著水平设为 0.05.

2 结果与分析

2.1 耕作方式对不同粒径土壤团聚体分布的影响

表 1 为两种耕作方式下各粒级团聚体的质量分数分布. 不同粒径团聚体回收率在 96.99%~97.09%,表明团聚体分级过程导致的土壤损失较少. 两种耕作方式下,各粒径团聚体质量分数均按以下顺序递减: ($<0.05 \text{ mm}$) $>$ ($0.05 \sim 0.25 \text{ mm}$) $>$ ($0.25 \sim 1 \text{ mm}$) $>$ ($1 \sim 2 \text{ mm}$),即团聚体主要分布在 $<0.05 \text{ mm}$ 和 $0.05 \sim 0.25 \text{ mm}$ 粒径中,以 $<0.05 \text{ mm}$ 粒径所占百分比最高,达 41.7%~45.8%,这与 Besnard 等^[19]的研究结果一致. 两种耕作方式下,除常规平作下 $0.05 \sim 0.25 \text{ mm}$ 与 $0.25 \sim 1 \text{ mm}$ 无显著差

异外,其余粒径的团聚体的分布比例均存在显著差异. 与水旱轮作处理相比,常规平作使 0.25 ~ 1 mm 和 1 ~ 2 mm 团聚体的质量分数显著提高,而 < 0.05

mm 和 0.05 ~ 0.25 mm 两个粒径团聚体的质量分数显著降低,表明常规平作可提高水稻土中大粒径团聚体的比例,有助于改善紫色水稻土的结构.

表 1 两种耕作方式下各粒径土壤团聚体的质量分数分布¹⁾/%

Table 1 Particle size distribution of aggregates in purple paddy soil under two tillage methods/%

耕作方式	1 ~ 2 mm	0.25 ~ 1 mm	0.05 ~ 0.25 mm	< 0.05 mm
FPF	8.63 ± 1.22aC ²⁾	21.53 ± 5.09aB	25.25 ± 2.15bB	41.69 ± 1.74bA
PR	4.29 ± 1.80bD	13.93 ± 2.70bC	32.97 ± 5.04aB	45.81 ± 2.35aA

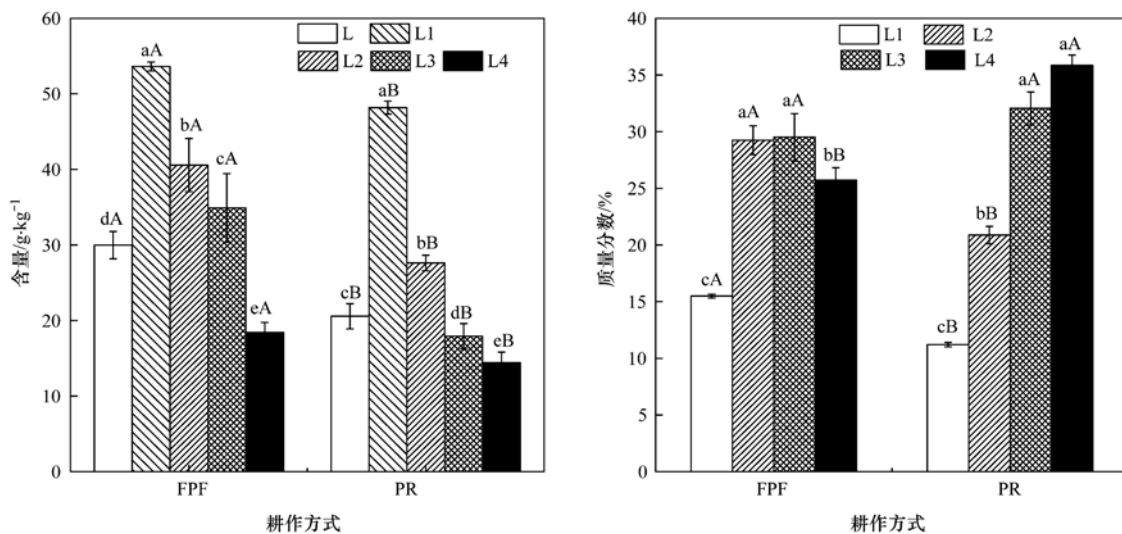
1) 结果表示为平均值 ± 标准误,下同; 2) 不同小写字母表示同一粒径不同耕作方式下差异显著,不同大写字母表示在同一耕作方式下不同粒径间差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 耕作方式对不同粒径土壤团聚体中有机质含量及其分布的影响

两种耕作方式下,土壤和各粒径团聚体中有机质含量如图 1 所示. 常规平作下土壤有机质含量显著高于水旱轮作,与昌龙然等^[20]的研究结果一致,表明常规平作较水旱轮作更有利于土壤有机质的积累. 从图 1 还看出,两种耕作方式下各粒径团聚体有机质含量均随团聚体粒径的减小而降低,不同粒径间有机质含量存在极显著差异 ($P < 0.01$). 与水旱轮作相比,常规平作下 1 ~ 2、0.25 ~ 1、0.05 ~ 0.25 和 < 0.05 mm 粒径团聚体有机质含量分别提高 25.55%、97.25%、48.04% 和 11.25%,均达显著水平 ($P < 0.05$),表明常规平作有助于提高各粒径团聚体有机质含量,其中以 0.25 ~ 1 mm 和 0.05 ~ 0.25 mm 两个粒径团聚体的提高幅度更大.

各粒级团聚体有机质的质量分数为各粒级团聚体有机质的质量占土壤总有机质质量的百分比,它

反映土壤中有有机质在各粒级团聚体中的分布情况,而各粒径团聚体有机质质量为各粒径团聚体有机质含量与该粒径团聚体百分比的乘积,由此计算出的各粒级团聚体有机质的质量分数如图 1 所示. 常规平作和水旱轮作方式下,各粒径团聚体有机质的质量分数分别表现为 (0.05 ~ 0.25 mm) ≈ (0.25 ~ 1 mm) > (< 0.05 mm) > (1 ~ 2 mm) 和 (< 0.05 mm) > (0.05 ~ 0.25 mm) > (0.25 ~ 1 mm) > (1 ~ 2 mm),表明两种耕作方式下有机质在不同粒径团聚体中的分布不同. 与水旱轮作相比,常规平作方式下,在 1 ~ 2 mm 和 0.25 ~ 1 mm 粒径团聚体中有机质的质量分数分别提高了 38.18% ($P < 0.01$) 和 40.11% ($P < 0.01$),而 0.05 ~ 0.25 mm 和 < 0.05 mm 团聚体中有机质的质量分数分别降低了 8.61% 和 39.36% ($P < 0.01$),表明常规平作处理促进有机质在大粒径团聚体中的分布,这与其对土壤团聚体粒径分布的影响一致.



L 表示各处理土壤, L1、L2、L3、L4 分别表示各处理土壤中 1 ~ 2、0.25 ~ 1、0.05 ~ 0.25、< 0.05 mm 团聚体; 不同小写字母表示同一耕作方式下不同粒径差异显著,不同大写字母表示在同一粒径不同耕作方式下间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 1 两种耕作方式下土壤和各粒径土壤团聚体中有机质含量及其质量分数

Fig. 1 Contents and the mass fraction of organic matter in different size of soil aggregates under two tillage methods

2.3 耕作方式对不同粒径团聚体重金属含量及其分布的影响

耕作方式对各粒径团聚体重金属含量的影响因元素和团聚体粒径大小的不同而异,如图2所示,随团聚体粒径的减小,紫色水稻土中的 Fe、Zn 含量逐渐增高,Mn 和 Cu 含量呈先增大后降低的变化趋

势,以粒径 0.05 ~ 0.25 mm 团聚体的含量最高,而 Cd 和 Pb 含量在常规平作中以粒径 0.05 ~ 0.25 mm 的团聚体的含量最高,在水旱轮作中则随土壤团聚体粒径的减小逐渐增高的趋势. 耕作方式对紫色水稻土中 Fe、Mn、Cu、Zn 和 Cd 含量的影响不显著. 与水旱轮作相比,常规平作条件下,1 ~ 2 mm 和

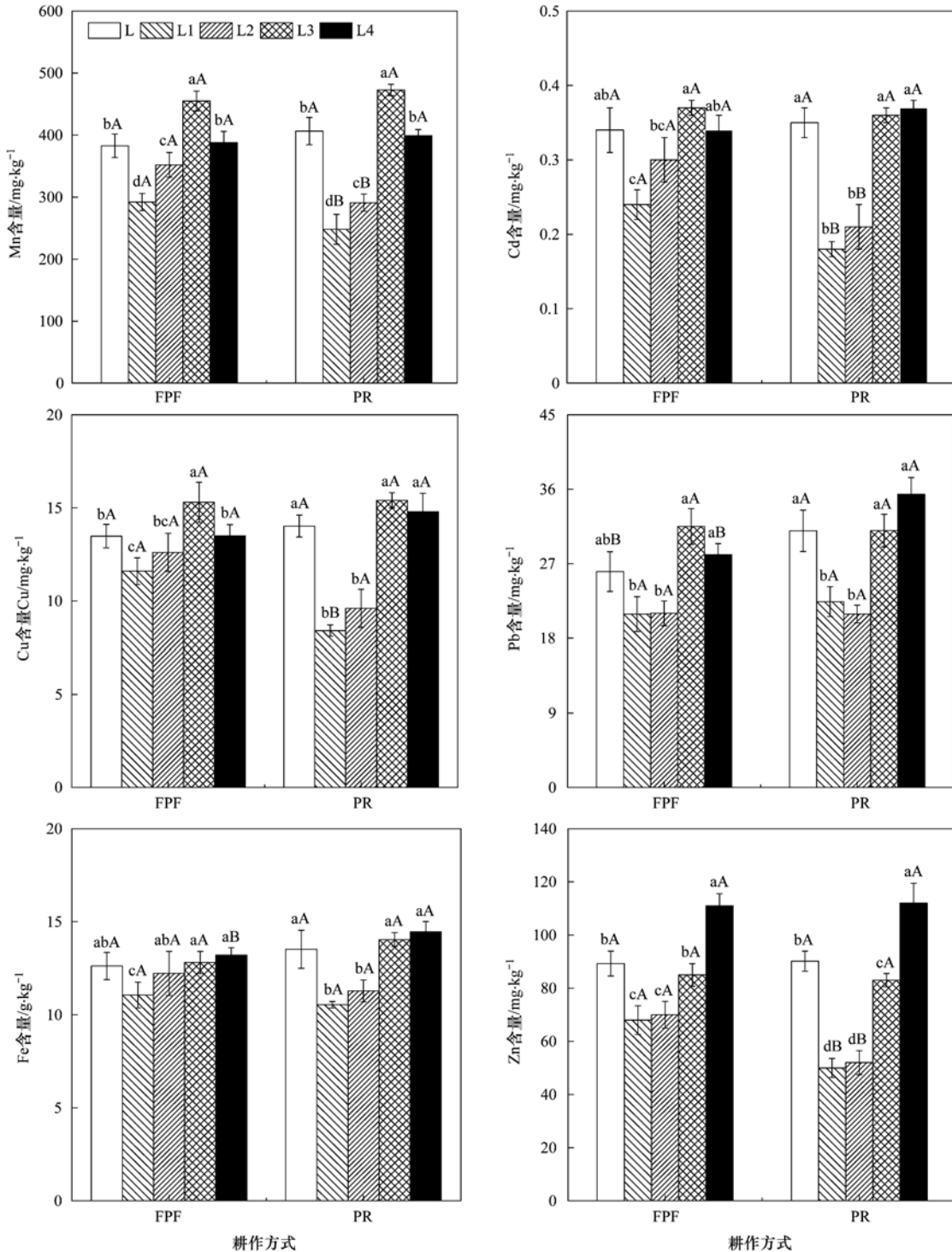


图2 两种耕作方式下各粒级土壤中重金属含量

Fig. 2 Contents of heavy metals in aggregates with different particle sizes in purple paddy soils under two tillage methods

0.25 ~ 1 mm 粒径中的 Cd、Zn 和 Mn 含量显著提高, Pb 和 Fe 含量差异不显著, 0.05 ~ 0.25 mm 中, 6 种元素含量的差异均不显著, 而 < 0.05 mm 粒径中, 各元素含量下降, 但除 Pb 和 Fe 含量显著降低外, 其余元素含量变化不显著, 结果显示常规平作主要提高了 1 ~ 2 mm 和 0.25 ~ 1 mm 粒径团聚体中的 Cd、Zn 和 Mn 含量。

金属累积系数为各粒级团聚体中金属的含量与总含量的比值, 在某一粒级中, 若比值大于 1, 表示金属在该粒级团聚体中富集, 反之则表示该粒级中金属出现亏缺^[5]。从表 2 中看出, 1 ~ 2、0.25 ~ 1、0.05 ~ 0.25 和 < 0.05 mm 粒径团聚体各重金属的累积系数分别为 0.51 ~ 0.88、0.58 ~ 0.97、0.92 ~ 1.21 和 0.98 ~ 1.24, 呈现出随粒径的减小而增大的变化趋势, 表明重金属元素在较大粒径团聚体中亏缺、在较小粒径团聚体中富集的现象。与水旱轮作相比, 常规平作条件下 Fe、Mn、Cu、Zn、Pb 和 Cd 在 1 ~ 2 mm 中的积累系数分别提高 12.43%、25.05%、43.63%、37.39%、11.01% 和 37.25%, 在 0.25 ~ 1 mm 粒径团聚体中的富集系数分别提高 16.07%、28.47%、36.51%、35.99%、19.55% 和 47.06%, 均达显著水平, 而在 0.25 ~ 0.05 mm 和

< 0.05 mm 粒径中的变化不显著, 表明常规平作有助于重金属元素在大粒径团聚体中积累。

用各粒级团聚体重金属总量(各粒径团聚体重金属含量和相应粒径团聚体质量分数的乘积)与土壤重金属总量的比值计算重金属在各粒径团聚体中的分布, 结果见表 2。两种耕作方式下 6 种重金属元素在各粒径团聚体中的分布呈随粒径的减小而增大的趋势, 与目前的许多研究结果一致^[21,22], 也与各粒径团聚体质量分数的变化趋势相同。与水旱轮作相比, 常规平作下 Fe、Mn、Cu、Zn、Pb 和 Cd 在 1 ~ 2 mm 中的分布分别提高 93.50%、108.10%、143.91%、134.28%、86.83% 和 126.32%, 在 0.25 ~ 1 mm 粒径团聚体中的分布分别提高 74.43%、86.25%、101.96%、98.48%、74.42% 和 116.59%, 而在 0.25 ~ 0.05 mm 中的分布分别降低 23.86%、23.18%、21.23%、21.32%、8.28% 和 20.33% 和 < 0.05 mm 粒径中 9.41%、7.71%、14.15%、9.83%、14.90% 和 13.42%, 均达显著水平, 同样表明常规平作比水旱轮作更有助于重金属在 1 ~ 2 mm 和 0.25 ~ 1 mm 的大粒径团聚体中分布, 降低重金属在 < 0.05 mm 和 0.05 ~ 0.25 mm 两个小粒径团聚体中的分布。

表 2 两种耕作方式下各粒级土壤中重金属的分配比例

Table 2 Distribution of heavy metals among soil aggregates with different particle sizes under two tillage methods

元素	项目	累积系数				不同粒径团聚体中的分布/%			
		1 ~ 2 mm	0.25 ~ 1 mm	0.05 ~ 0.25 mm	< 0.05 mm	1 ~ 2 mm	0.25 ~ 1 mm	0.05 ~ 0.25 mm	< 0.05 mm
Fe	FPF	0.88 ± 0.08a ¹⁾	0.97 ± 0.04a	1.02 ± 0.06a	1.05 ± 0.07a	7.74 ± 0.48a	21.35 ± 2.08a	26.23 ± 3.28a	44.68 ± 1.33a
	PR	0.78 ± 0.02b	0.83 ± 0.06b	1.04 ± 0.05a	1.07 ± 0.08a	4.00 ± 0.06b	12.24 ± 0.65b	34.45 ± 0.90b	49.32 ± 1.89b
Mn	FPF	0.76 ± 0.11a	0.92 ± 0.06a	1.19 ± 0.07a	1.01 ± 0.03a	6.68 ± 0.33a	20.04 ± 1.12a	30.43 ± 1.06a	42.85 ± 1.94a
	PR	0.61 ± 0.06b	0.72 ± 0.04b	1.16 ± 0.09a	0.98 ± 0.06a	3.21 ± 0.31b	10.76 ± 0.53b	39.61 ± 0.76b	46.43 ± 1.13b
Cu	FPF	0.86 ± 0.04a	0.93 ± 0.02a	1.14 ± 0.03	1.00 ± 0.07a	7.61 ± 0.47a	20.62 ± 2.67a	29.23 ± 2.07a	42.54 ± 1.87a
	PR	0.60 ± 0.05b	0.68 ± 0.05b	1.10 ± 0.04	1.06 ± 0.04a	3.12 ± 0.04b	10.21 ± 1.08b	37.11 ± 0.97b	49.55 ± 5.34b
Zn	FPF	0.76 ± 0.05a	0.78 ± 0.03a	0.95 ± 0.12a	1.24 ± 0.05a	6.63 ± 0.41a	17.01 ± 1.23a	24.25 ± 1.54a	52.11 ± 2.14a
	PR	0.55 ± 0.09b	0.58 ± 0.06b	0.92 ± 0.08a	1.24 ± 0.07a	2.83 ± 0.14b	8.57 ± 0.74b	30.82 ± 1.33b	57.79 ± 3.84b
Pb	FPF	0.80 ± 0.11a	0.81 ± 0.05a	1.21 ± 0.09a	1.08 ± 0.06a	6.95 ± 1.46a	17.39 ± 3.73a	30.59 ± 5.98a	45.07 ± 5.34a
	PR	0.72 ± 0.03a	0.67 ± 0.07b	1.00 ± 0.05b	1.14 ± 0.02a	3.72 ± 0.66b	9.97 ± 1.46b	33.35 ± 3.45b	52.96 ± 6.01b
Cd	FPF	0.71 ± 0.04a	0.88 ± 0.08a	1.09 ± 0.07a	1.00 ± 0.06a	6.45 ± 1.22a	19.97 ± 3.59a	29.08 ± 3.56a	44.57 ± 2.57a
	PR	0.51 ± 0.07b	0.60 ± 0.10b	1.06 ± 0.06a	1.09 ± 0.08a	2.85 ± 0.21b	9.22 ± 1.49b	36.50 ± 1.13b	51.48 ± 5.65b

1) 不同小写字母表示同一粒径不同耕作方式下差异显著 ($P < 0.05$)

3 讨论

3.1 耕作方式对紫色土不同粒径团聚体分布的影响

土壤团聚体一般被划分为大团聚体 (> 0.25 mm) 和微团聚体 (< 0.25 mm)^[4], 目前, 有关的研究集中在长期保护性耕作如少耕和免耕对土壤团聚体

粒径分布的影响上。研究表明, 少耕和免耕可显著提高土壤中大团聚体的比例, 减少微团聚体的比例, 使土壤形成良好的结构^[23,24]。本研究发现, 与水旱轮作相比, 常规平作下 1 ~ 2 mm 和 0.25 ~ 1 mm 粒径团聚体的质量分数提高, 而 0.05 ~ 0.25 mm 和 < 0.05 mm 团聚体的质量分数降低(表 1), 这也表

明常规平作有助于提高水稻土大团聚体的比例,其原因可能有以下3种:①常规平作对水稻土的扰动频率较小,降低了大团聚体的周转速率^[25];②胶结物质在土壤团聚体形成过程中有着十分重要的作用,而土壤有机质是土壤团聚体的胶结物质,水旱轮作下较低的土壤有机质含量造成团聚体胶结物质亏缺,使得土壤团聚体更易浸泡分散而产生更多微团聚体^[26];③水旱轮作条件下的干湿交替过程降低了大团聚体对机械干扰的抵抗能力,提高了土壤微团聚体比例^[27].

3.2 耕作方式对紫色土不同粒径团聚体中有机质含量及其分布的影响

耕作方式是影响土壤有机质含量的重要因素之一.研究表明,与常规耕作相比,保护性耕作对土壤的干扰少,减少了土壤有机质的暴露,降低了土壤有机质的降解,从而有利于有机质在土壤及不同粒径团聚体中积累^[28].本研究也表明,常规平作下土壤有机质含量均显著高于水旱轮作(图1),这与常规平作下冬水休闲,淹水时间长有利于有机质的积累,而水旱轮作下干湿交替过程中翻耕频率较常规平作高,土壤微生物活性高,加速了土壤有机质的矿化,不利于有机质积累有关^[29].

土壤有机质是一类结构和组成非常复杂的复合体,其在各粒径团聚体中的分布不均,对农业管理措施的响应也不一样.窦森等^[30]指出,大粒径团聚体中有机质以物理保护为主,植物来源的有机质较多,周转较快,对管理措施反应敏感. Kabiri 等^[31]发现保护性耕作可提高大团聚体有机质的含量和分布,降低微团聚体中有机质的含量和分布.图2表明,与水旱轮作相比,常规平作使各粒径团聚体有机质含量均提高,但提高的幅度以0.25~1 mm和0.05~0.25 mm两个粒径团聚体最大,说明这两个粒径团聚体有机质含量对耕作的反应更敏感.土壤中,与粒径大于0.05 mm的砂粒结合的有机质为颗粒有机质(POM),与土壤黏粒和粉粒复合的有机质为土壤矿质结合有机质,其腐殖化程度高,比较稳定^[32].本研究中,常规平作和水旱轮作下,有机质在粒径>0.05 mm团聚体中的分布分别为74.26%和64.13%,前者较后者提高了15.8%,表明紫色水稻土中,有机质以POM形式存在为主,常规平作较水旱轮作更有利于有机质在大粒径团聚体中积累,提高土壤POM的含量和分布.耕作方式下有机质在不同粒径团聚体中分布的变化与土壤团聚体粒径分布的变化趋势一致.即常规平作下,1~2 mm和

0.25~1 mm粒径团聚体有机质的质量分数较水旱轮作高,0.05~0.25 mm和<0.05 mm团聚体有机质的质量分数较水旱轮作低,说明常规平作提高紫色水稻土POM含量和分布主要是通过提高粒径为2~0.25 mm的POM实现的.

3.3 耕作方式对不同粒径土壤团聚体中重金属含量及其分布的影响

重金属在土壤中的迁移转化受土壤性质如pH、有机质含量和CEC等的影响,一切影响土壤性质的农业措施均会改变土壤重金属的积累和转化行为^[33].关于耕作方式对土壤重金属含量的影响已有大量研究,但不同研究者获得的结果不同.汤文光等^[34]的研究表明,长期翻耕和长期旋耕能显著提高土壤中Cd含量;Düring等^[35]发现,免耕下表层土壤中Cd和Zn含量均高于常规翻耕;Houx等^[36]指出,在玉米-大豆年度轮作和大豆连作系统中,长期免耕对土壤中Fe和Mn含量影响明显,对Cu、Co、B、Mo和Ni等含量的影响不明显.本研究却表明,耕作方式对紫色水稻土Fe、Mn、Cu、Zn和Cd含量的影响不显著,表明耕作方式对土壤重金属含量的影响十分复杂.

如前所述,由于与有机物和矿物质的结合方式不同,不同粒径团聚体的重金属在土壤微环境中的空间分异性及生物有效性等方面存在差异.金属累积系数和重金属在团聚体中的分布随团聚体粒径的减小而增大的变化趋势表明,本研究所测试的6种重金属元素呈现在大团聚体中亏缺而在微团聚体中富集的现象(表2),这与微团聚体具有较大的比表面积和较高含量的黏粒矿物、铁锰氧化物等特性,从而有较高的吸附性能,对重金属的亲和能力强有关^[5,37];此外,微团聚体在土壤中的分解时间长,与重金属的作用时间也长,也导致其富集较高量重金属^[38].常规平作下1~2 mm和0.25~1 mm粒径团聚体中的Cd、Zn和Mn含量,以及该粒径下所有金属的累积系数和分布均显著提高,而其余粒径团聚体Cd、Zn和Mn含量和各粒径团聚体Fe和Pb含量、0.25~0.05 mm和<0.05 mm粒径各元素的累积系数变化不显著,但0.25~0.05 mm和<0.05 mm粒径各元素的分布比例下降,说明常规平作有助于重金属元素在1~2 mm和0.25~1 mm粒径团聚体中积累.

为弄清不同粒径团聚体中重金属与有机质的关系,本研究对二者的关系进行了相关分析,结果如表3所示.团聚体中重金属含量与有机质的含量呈显

著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 负相关, 而团聚体中重金属总量与有机质的总量呈显著或极显著正相关, 这可能与耕作方式对团聚体中重金属的总量和有机质的总量有相同的影响有关。李恋卿等^[39] 在研究植被恢复过程中土壤颗粒中的有机质与重金属间的关系时, 将土壤颗粒中重金属与有机质含量间的关系确定为强度关系, 而将土壤颗粒中重金属与有机质总量间的关系确定为容量关系。同一耕作方式下, 重金属与有机质的强度关系和容量关系的斜率表现均为 $Mn > Zn > Pb > Cu > Fe > Cd$, 表明 6 种重金属中, Mn 对土壤有机质的变化反应最敏感, Cd 的反应最不敏感。同一重金属元素, 重金属与有机质的强度关系和容量关系的斜率均表现水旱轮作大于常规平作, 表明重金属对有机质的变化在水旱轮作下较常规平作的反应更敏感, 这可能与常规平作下各粒径团聚体的有机质含量高有关。常规耕作提高 1~2 mm 和 0.25~1 mm 粒径团聚体中有机质的含量和分配比例, 也提高了该粒径团聚体 Cd、Zn 和 Mn 含量, 所有金属的累积系数和分布, 说明大粒径团聚体的有机质对重金属的富集具有一定的促进作用, 而常规平作提高了 1~2 mm 和 0.25~1 mm 粒径团聚体中 Cd、Zn 和 Mn 含量, 对其他重金属含量的影响不显著, 可能与不同重金属对有机质的吸附作用敏感性不一致有关^[39], 产生的原因有待进一步研究。

表 3 不同粒径团聚体中重金属与有机质的相关关系¹⁾

Table 3 Correlation between heavy metals and organic matter in aggregates with different particle sizes

元素类型	项目	含量间的关系		总量间的关系	
		<i>r</i>	<i>k</i>	<i>r</i>	<i>k</i>
Fe	FPF	-0.552 *	-0.053	0.542 *	0.4117
	PR	-0.869 **	-0.115	0.959 **	1.298
Mn	FPF	-0.618 *	-2.917	0.568 *	13.250
	PR	-0.838 **	-5.627	0.954 **	38.240
Cu	FPF	-0.456	-0.058	0.571 *	0.450
	PR	-0.849 **	-0.207	0.942 **	1.484
Zn	FPF	-0.901 **	-1.227	0.371	2.534
	PR	-0.791 **	-1.557	0.889 **	9.957
Pb	FPF	-0.504 *	-0.239	0.469	0.824
	PR	-0.683 **	-0.350	0.927 **	3.179
Cd	FPF	-0.608 *	-0.003	0.536 *	0.011
	PR	-0.750 **	-0.006	0.957 **	0.006

1) ** 表示在 0.01 水平上显著相关, * 表示在 0.05 水平上显著相关, $r_{(14,0.05)} = 0.497$, $r_{(14,0.01)} = 0.623$

4 结论

(1) 两种耕作方式下, 紫色水稻土团聚体质量

分数均随粒径的减小而增大, 团聚体的粒径组成以 0.05~0.25 mm 和 <0.05 mm 粒径为主。常规平作显著提高紫色水稻土大团聚体 (0.25~2 mm) 的质量分数, 而降低微团聚体 (<0.25 mm) 的质量分数。

(2) 紫色水稻土团聚体中的有机质含量随粒径的增大而提高, 常规平作显著提高土壤和各粒径团聚体中有机质含量, 并使各粒径团聚体有机质质量向 1~2 mm 和 0.25~1 mm 团聚体中聚集, 水旱轮作下则使有机质向 0.05~0.25 mm 和 <0.05 mm 的团聚体中聚集。

(3) 耕作方式对紫色水稻土 Fe、Mn、Cu、Zn 和 Cd 含量的影响不显著, 但与水旱轮作相比, 常规平作可提高 1~2 mm 和 0.25~1 mm 粒径团聚体 Cd、Zn 和 Mn 的含量和重金属在其中的分布。

(4) 同一耕作方式下, 土壤团聚体中重金属对其中有机质变化的敏感程度为 $Mn > Zn > Pb > Cu > Fe > Cd$, 而同一重金属, 水旱轮作处理下团聚体中的重金属较常规平作对有机质变化的反应更敏感。

参考文献:

- [1] Krishna A K, Govil P K. Soil contamination due to heavy metals from an industrial area of Surat, Gujarat, Western India [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, **124** (1-3): 263-275.
- [2] Harrison-Kirk T, Beare M H, Meenken E D, et al. Soil organic matter and texture affect responses to dry/wet cycles: changes in soil organic matter fractions and relationships with C and N mineralisation [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, **74**: 50-60.
- [3] 吴曼, 徐明岗, 徐绍辉, 等. 有机质对红壤和黑土中外源铅镉稳定化过程的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2011, **30** (3): 461-467.
- [4] 路雨楠, 徐殿斗, 成杭新, 等. 土壤团聚体中重金属富集特征研究进展 [J]. 土壤通报, 2014, **45** (4): 1008-1013.
- [5] 张良运, 李恋卿, 潘根兴, 等. 重金属污染可能改变稻田土壤团聚体组成及其重金属分配 [J]. 应用生态学报, 2009, **20** (11): 2806-2812.
- [6] Zhang M K, Ke Z X. Copper and Zinc enrichment in different size fractions of organic matter from polluted soils [J]. Pedosphere, 2004, **14** (1): 27-36.
- [7] Quenea K, Lamy I, Winterton P, et al. Interactions between metals and soil organic matter in various particle size fractions of soil contaminated with waste water [J]. Geoderma, 2009, **149** (3-4): 217-223.
- [8] Balabane M, van Oort F. Metal enrichment of particulate organic matter in arable soils with low metal contamination [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, **34** (10): 1513-1516.
- [9] 龚仓, 马玲玲, 成杭新, 等. 典型农耕地黑土和沼泽土团聚体颗粒中重金属的分布特征解析 [J]. 生态环境学报, 2012,

- 21(9): 1635-1639.
- [10] Wang H, Guan D S, Zhang R D, *et al.* Soil aggregates and organic carbon affected by the land use change from rice paddy to vegetable field [J]. *Ecological Engineering*, 2014, **70**: 206-211.
- [11] Six J, Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **68**: A4-A9.
- [12] Cates A M, Ruark M D, Hedtcke J L, *et al.* Long-term tillage, rotation and perennialization effects on particulate and aggregate soil organic matter[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, **155**: 371-380.
- [13] Mohamed I, Ahamadou B, Li M, *et al.* Fractionation of copper and cadmium and their binding with soil organic matter in a contaminated soil amended with organic materials[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, **10**(6): 973-982.
- [14] 莫永亮, 胡荣桂, 赵劲松, 等. 冬水田转稻麦轮作对小麦生长季温室气体排放的影响[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(10): 2675-2683.
- [15] 张同树, 程尧. 我国富水区域水旱轮作与农业持续发展[J]. *农业技术经济*, 1998, (2): 52-54.
- [16] 范明生, 江荣风, 张福锁, 等. 水旱轮作系统作物养分管理策略[J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(2): 424-432.
- [17] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1993, **57**(4): 1071-1076.
- [18] 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.
- [19] Besnard E, Chenu C, Robert M. Influence of organic amendments on copper distribution among particle-size and density fractions in Champagne vineyard soils[J]. *Environmental Pollution*, 2001, **112**(3): 329-337.
- [20] 昌龙然, 谢德体, 慈恩, 等. 稻田垄作免耕对根际土壤有机碳及颗粒态有机碳的影响[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2012, **37**(11): 49-53.
- [21] Zhang H B, Luo Y M, Makino T, *et al.* The heavy metal partition in size-fractions of the fine particles in agricultural soils contaminated by waste water and smelter dust [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **248-249**: 303-312.
- [22] 郑顺安, 陈春, 郑向群, 等. 污染土壤不同粒级团聚体中铅的富集特征及其与叶类蔬菜铅吸收之间的相关性[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(3): 556-564.
- [23] Andruschkewitsch R, Koch H J, Ludwig B. Effect of long-term tillage treatments on the temporal dynamics of water-stable aggregates and on macro-aggregate turnover at three German sites [J]. *Geoderma*, 2014, **217-218**: 57-64.
- [24] 李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, **21**(2): 378-386.
- [25] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(14): 2099-2103.
- [26] 易亚男, 尹力初, 张蕾, 等. 施肥对不同地下水位水稻土团聚体组成及有机碳分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, **27**(5): 144-148, 153.
- [27] Mikha M M, Rice C W. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 2004, **68**(3): 809-816.
- [28] 王勇, 姬强, 刘帅, 等. 耕作措施对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(7): 1365-1373.
- [29] 常同举, 崔孝强, 阮震, 等. 长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2381-2391.
- [30] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. *土壤学报*, 2011, **48**(2): 412-418.
- [31] Kabiri V, Raiesi F, Ghazavi M A. Six years of different tillage systems affected aggregate-associated SOM in a semi-arid loam soil from Central Iran [J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, **154**: 114-125.
- [32] 龚伟, 颜晓元, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对小麦-玉米作物系统土壤颗粒有机碳和氮的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(11): 2375-2381.
- [33] Mench M J. Cadmium availability to plants in relation to major long-term changes in agronomy systems [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1998, **67**(2-3): 175-187.
- [34] 汤文光, 肖小平, 唐海明, 等. 长期不同耕作与秸秆还田对土壤养分库容及重金属 Cd 的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(1): 168-176.
- [35] Düring R A, Hoß T, Gath S. Depth distribution and bioavailability of pollutants in long-term differently tilled soils [J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, **66**(2): 183-195.
- [36] Houx J H, Wiebold W J, Fritsch F B. Long-term tillage and crop rotation determines the mineral nutrient distributions of some elements in a Vertic Epiaqualf [J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, **112**(1): 27-35.
- [37] 陈岩, 朱先芳, 季宏兵, 等. 北京市得田沟和崎峰茶金矿周边土壤中重金属的粒径分布特征[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(1): 219-228.
- [38] 郑顺安, 郑向群, 刘书田, 等. 再生水灌溉下紫色水稻土颗粒态有机质中重金属的富集特征[J]. *水土保持学报*, 2012, **26**(2): 246-250.
- [39] 李恋卿, 潘根兴, 张平究, 等. 植被恢复对退化红壤表层土壤颗粒中有机碳和 Pb、Cd 分布的影响[J]. *生态学报*, 2001, **21**(11): 1769-1774.

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)
$\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ 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 middendorfii</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@reces. 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@reces. 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