

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京工业区夏冬季节二次有机气溶胶浓度估算及来源解析	刘静达, 安俊琳, 张玉欣, 师远哲, 林旭 (1733)
南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性	梁静舒, 安俊琳, 王红磊, 张玉欣, 王俊秀, 施双双, 王潇 (1743)
广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素	高元官, 张凯, 王体健, 陈志明, 耿红, 孟凡 (1753)
神农架大九湖大气中的多环芳烃	金梦云, 邢新丽, 柯艳萍, 郑煌, 胡天鹏, 孙焰, 丁洋, 李绘, 张泽洲, 祁士华 (1760)
沧州市春季 NMHCs 空间分布特征	段菁春, 周雪明, 张鹤丰, 谭吉华, 胡京南, 柴发合 (1769)
北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征	梁云平, 张大伟, 林安国, 马召辉, 郭晓东 (1775)
生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	邵珠泽, 郑国砥, 王元刚, 高定, 朱彦莉, 陈同斌, 聂二旗 (1783)
低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性	姜理英, 张迪, 郭海倩, 缪晶晶, 陈怡伶, 李慧 (1792)
运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析	武媛媛, 李如梅, 彭林, 端允, 王海京, 李颖慧, 白慧玲, 牟玲 (1799)
高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险: 以常州市为例	姚静波, 王明新, 齐今笛, 孙向武, 张文艺 (1807)
上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系	董小芳, 邓黄月, 张彦, 朱志鹏, 王琳, 郑祥民, 周立旻 (1817)
DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响	张允华, 楼狄明, 谭丕强, 胡志远 (1828)
我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价	张秋秋, 潘申龄, 刘伟, 张昱, 安伟 (1835)
基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估	王阳, 徐明芳, 耿梦梦, 黎明, 耿耕南 (1842)
北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险	张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 赵晓辉, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (1852)
长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素	孙语嫣, 白莹, 苏荣国, 石晓勇 (1863)
垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制	肖骁, 何小松, 高如泰, 席北斗, 张慧, 黄彩红, 李丹, 袁志业 (1873)
3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用	李立青, 胡楠, 刘雨情, 涂声亮, 陈华超 (1881)
三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响	陈成龙, 高明, 倪九派, 谢德体, 邓华 (1889)
NO ₃ ⁻ -N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响	姜应和, 李瑶, 张莹, 张翔凌 (1898)
湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响	李薛晓, 程思超, 方舟, 李先宁 (1904)
阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响	丁为俊, 于立亮, 陈杰, 成少安 (1911)
臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响	刘海龙, 付晶森, 郭雪峰, 柴建恬, 张忠民 (1918)
紫外线和次氯酸钠对 <i>Escherichia coli</i> 和 Poliovirus 的消毒作用	徐丽梅, 张崇森, 王晓昌, 吉铮, 周进宏 (1928)
不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用	王星星, 林建伟, 詹艳慧, 张志斌, 邢云青, 姜博汇, 储鸣 (1936)
树脂基纳米钛锆氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟	陈家凯, 聂广泽, 刘志英, 姚远, 徐炎华 (1947)
灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响	朱培颖, 李大鹏, 于胜楠 (1957)
城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律	桑浪涛, 石烜, 张彤, 付博文, 金鹏康 (1965)
11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋	周林军, 古文, 刘济宁, 石利利, 徐炎华 (1972)
反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性	金鹏康, 杨珍瑞, 李蓉, 李岩, 周立辉 (1982)
Fe ⁽⁰⁾ -活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素	吕永涛, 刘婷, 曾玉莲, 孙婷, 张瑶, 王磊 (1991)
两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较	李惠娟, 彭党聪, 陈国燕, 王博, 姚倩, 卓杨 (1997)
基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (2006)
温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响	范军辉, 郝瑞霞, 朱晓霞, 万京京, 刘思远, 王丽沙 (2012)
SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析	杨波, 徐辉, 冯修平, 李方, 田晴, 马春燕 (2021)
喹啉降解菌 <i>Ochrobactrum</i> sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用	徐伟超, 吴翠平, 张玉秀, 张琪, 张怡鸣 (2030)
锰氧化菌 <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制	万文结, 薛芷筠, 张泽文, 何冬兰 (2036)
温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (2044)
包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析	许晓毅, 尤晓露, 吕晨培, 王斌, 胡碧波 (2052)
强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落	曹知平, 吴静, 左剑恶, 王晓璐, 王翀, 王广启, 王凯军, 钱易 (2059)
三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征	秦红, 任庆水, 杨文航, 李昌晓 (2065)
川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素	田琳琳, 朱波, 汪涛, 赵原, 董宏伟, 任光前, 胡磊 (2074)
双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N ₂ O 排放的影响	伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 陈春兰, 王娟, 魏文学, 李勇 (2084)
生物炭介导的不同地表条件下土壤 N ₂ O 的排放特征	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (2093)
垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征	熊瑛, 王龙昌, 杜娟, 赵琳璐, 周泉, 张赛 (2102)
广东省土壤 Cd 含量空间分布预测	孙慧, 郭治兴, 郭颖, 袁宇志, 柴敏, 毕如田, 杨静 (2111)
宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价	张鹏岩, 康国华, 庞博, 郭依, 何坚坚, 秦明周 (2125)
腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响	王青清, 蒋珍茂, 王俊, 魏世强 (2136)
紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征	李秋言, 赵秀兰 (2146)
生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用	吴志娟, 毕二平 (2154)
两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制	王彤彤, 马江波, 曲东, 张晓媛, 郑纪勇, 张兴昌 (2161)
牛粪源蛭蛭及其生物炭对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 的吸附特性	杜文慧, 朱维琴, 潘晓慧, 沈旭阳, 陈思远, 陈可乐, 坎吉汗·木沙拉, 张杭君, 丁颖 (2172)
C ₃ N ₄ /BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制	鲍玥, 周旻昀, 邹骏华, 史宇滨, 万先凯, 史惠祥 (2182)
《环境科学》征稿简则 (2020) 《环境科学》征订启事 (2035) 信息 (1782, 1798, 1827)	

紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征

李秋言^{1,2}, 赵秀兰^{1,2*}

(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)

摘要: 在重庆合川区 and 铜梁区随机采集了 20 个紫色水稻土, 将其分成颗粒有机质 (0.053 ~ 2 mm, POM)、砂粒 (0.053 ~ 2 mm) 和细土 (<0.053 mm) 这 3 个组分, 通过比较不同组分的有机碳及重金属 (Cu、Zn、Pb、Cd) 含量和分布状况, 研究了紫色水稻土中 POM 对重金属的富集特征及其与土壤理化性质如 pH、CEC、黏粒和土壤有机碳 (SOC) 等的关系。结果表明, 采样区紫色水稻土的 POM 含量范围为 7.31 ~ 44.76 g·kg⁻¹, 平均值为 19.20 g·kg⁻¹, 有机碳含量为 96.61 ~ 263.17 g·kg⁻¹, 平均值为 151.34 g·kg⁻¹, 显著高于原土及其他组分, 对土壤有机碳的贡献率为 8.63% ~ 48.62%, 代表了一大部分土壤有机碳库。POM 中的 Cu、Zn、Pb 和 Cd 平均富集系数分别为 3.35、1.14、2.88 和 2.14, 显著高于其他组分, 表现出一定的富集作用, 对上述重金属的贡献率分别为 6.02%、2.22%、5.24% 和 3.21%, POM 对 Cu、Pb 的富集能力和贡献率均显著大于 Zn 和 Cd。相关分析结果表明, POM 含量与 SOC、pH、CEC、黏粒 (<0.002 mm) 呈显著或极显著正相关, SOC 是主要因素。POM-C 含量与总量分别与黏粒含量、SOC 呈显著相关。POM 中重金属总量与 SOC、pH、POM-C 总量呈显著或极显著正相关, SOC 是最关键因子; 与其他重金属相比, Zn 在 POM 中的总量与土壤性质的回归系数最高, 关系最为密切。

关键词: 颗粒有机质; 有机碳; 重金属; 紫色水稻土; 土壤性质

中图分类号: X131.3; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-2146-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201609143

Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil

LI Qiu-yan^{1,2}, ZHAO Xiu-lan^{1,2*}

(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. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China)

Abstract: Twenty purple paddy soil samples were collected from the Prefectures of Hechuan and Tongliang, Chongqing, and sieved into particulate organic matter (0.053-2 mm, POM), sand fraction (0.053-2 mm) and fine soil fraction (<0.053 mm). By comparing the concentration and distribution of soil organic carbon (SOC) and heavy metals among different components, the enrichment characteristics of POM for heavy metals (Cu, Zn, Pb and Zn) and its relationship with soil properties such as pH, CEC, clay content (<0.002 mm) and SOC were investigated. The result showed that the contents of POM fraction in purple paddy soils ranged from 7.31 to 44.76 g·kg⁻¹, with an average level of 19.20 g·kg⁻¹, while the carbon contents ranged from 96.61 to 263.17 g·kg⁻¹, which were significantly higher than those of their original soils and other two fractions. The contribution rates of organic carbon by POM to the total organic carbon of soils ranged from 8.63% to 48.62%, which accounted for a large pool of organic carbon. The average enrichment factors of POM fraction to Cu, Zn, Pb and Cd were 3.35, 1.14, 2.88 and 2.14, respectively. Compared with sand fraction and fine soil fraction, POM fraction showed a significantly higher contribution rate to heavy metals, which were 6.02%, 2.22%, 5.24% and 3.21%. In addition, the enrichment ability and contribution rate of POM to Cu and Pb were obviously greater than those of Zn and Cd. There was a significant positive correlation between content of POM fraction and soil properties such as SOC, pH, CEC and clay content, in which SOC was the key factor. The POM-C content and total amount were significantly correlated with SOC and clay content. The pH value, SOC and POM-C amount had a significant or extremely significant correlation with the amount of heavy metals in POM, in which SOC was the most critical one. Comparing with other heavy metals, the amount of zinc in POM had the highest regression coefficient and the closest relationship with soil properties.

Key words: particulate organic matter (POM); organic carbon; heavy metals; purple paddy soil; soil properties

土壤有机质 (SOM) 是土壤的重要组成成分, 是植物所需营养元素和微生物生命活动所需能量的来源^[1], 也是影响土壤重金属迁移转化和生物有效性的重要因子之一^[2], 关于土壤有机质与重金属的相互作用受到广泛关注^[3~6]。有研究表明, 土壤有机质对重金属迁移转化行为的影响不仅与有机质的数

量有关, 还与其组成有关^[7]。

土壤中有有机质很少单独存在, 近 90% 的有机质

收稿日期: 2016-09-19; 修订日期: 2016-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41471272)

作者简介: 李秋言 (1991 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染修复, E-mail: liqiuyan1991@live.com

* 通信作者, E-mail: zxl@swu.edu.cn

位于团聚体内^[8]. 其中与粒径 >0.05 mm 团聚体结合的有机质为颗粒有机质(POM),它是动植物残体向土壤腐殖质转化的活性中间产物^[9]. 与土壤中粒径更小的有机质相比,POM 具有易被微生物分解、周转快、腐殖化程度低、活性高等特点,是土壤的活性有机碳库,在土壤的生物学、化学和物理学方面起着重要作用,也是 SOM 中短期-中期养分有效性及土壤结构稳定性的核心要素^[10],可用于评价土壤有机碳库及土壤质量动态变化^[8,9]. 近年的研究还表明,POM 能够直接与土壤重金属发生络合和螯合作用,影响重金属在土壤及植物中的迁移转化过程,进而影响土壤重金属的积累及其生物有效性^[2]. 已有研究表明 POM 对重金属有明显的富集作用. 如 Besnard 等^[11]研究表明,在某 Cu 污染的葡萄园土壤中,POM 中的 Cu 含量是黏土的 4 倍; Balabane 等^[12]发现,在某重金属轻度污染的土壤中,POM 中 Zn、Pb 和 Cd 的浓度分别为原土壤的 3~8 倍、1~7 倍和 5~11 倍;章明奎等^[13]的研究也发现,POM 对 Cd、Pb 等 8 种重金属均有明显的富集作用,且对 Cu 和 Zn 的富集作用最为显著. 这些研究也反映了 POM 对土壤重金属的富集能力因土壤的不同有一定差异. 紫色水稻土集中分布于川渝丘陵区,是我国西南地区重要的水稻土资源之一^[14],但是关于其 POM 对重金属的富集能力及影响因素的报道甚少. 本文在重庆采集有代表性的紫色水稻土,通过测定不同颗粒组分中的有机质及重金属含量,研究其中 POM 对重金属的富集特性及其与土壤理化性质(pH、CEC、黏粒等)的关系,以期明确该区域土壤重金属的积累机制提供依据.

1 材料与方法

1.1 土壤样品的采集与制备

本研究的土壤样品采自重庆市合川区和铜梁区,这两个区位于重庆市西北部,地处川中方山丘陵区与川东平行岭谷区的过渡地带,属亚热带气候,气候温和,四季分明,雨量充沛,粮食作物以水稻为主,水稻土面积占两个区耕地面积的比例分别为 61.33% 和 48.04%. 所采集的紫色水稻土发育于中生代侏罗纪沙溪庙组灰棕紫沙泥岩母质(J_2s),这类母质在紫色土成土母质中分布面积较广. 水稻收获后按随机布点的方法分别在合川、铜梁采集稻田表层(0~20 cm)混合样 13 个和 7 个,每个点的间距为 3~5 km,采样点的分布见图 1. 为保证样品的代表性,在每个采样点用 S 形和梅花形布点法,采集 5~

10 个分样,混合成 1 个混合样. 去除土样中动植物残体后,在室内风干混匀,取其中一部分用于土壤 POM、砂粒及细土的分离,一部分过 2 mm 筛,供黏粒(<0.002 mm)和 pH 的测定,剩余样品过 0.25 mm 筛,供有机质、CEC 和重金属全量分析.

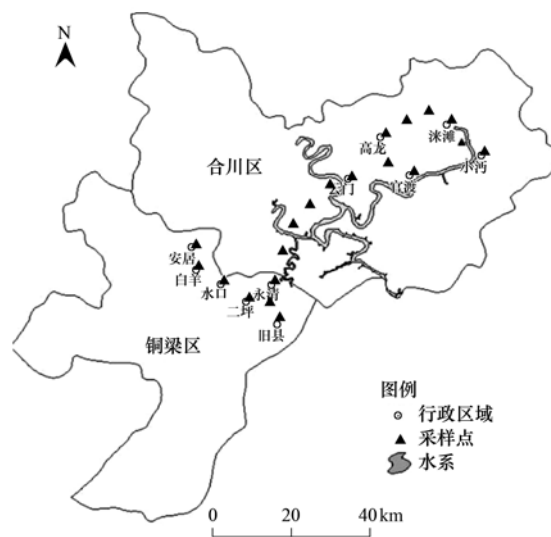


图 1 土壤采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of soil sampling sites

1.2 土壤颗粒组分的分离

参照章明奎^[13]、Balesdent 等^[15]的方法,分别称取 4 份风干混匀后的土样 250 g 置于 2 000 mL 塑料瓶中,加 1 000 mL 蒸馏水和若干玻璃珠,加盖后在往复机中于 25°C , $240\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下振荡 24 h 进行机械分散. 用 2 mm 与 0.053 mm 粒径的土筛分离样品,2~0.053 mm 的组分通过蒸馏水反复悬浮将 POM 与砂粒分离; <0.053 mm 的组分记为细土,通过离心浓集,其质量通过土壤总质量减去 >0.053 mm 各组分的质量得到,于 55°C 以下烘干各组分颗粒并称重,磨细后过 0.25 mm 筛备用.

1.3 土壤样品分析方法

原土、各组分样品 pH 用酸度计测定,CEC 用乙酸铵交换法测定,黏粒(<0.002 mm)含量用比重法测定,土壤和各组分有机碳含量采用重铬酸钾-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^[16]. 每个指标测定重复 3 次,重金属含量测定采用标准土样 GBW 07428 (GSS-14)进行质量控制.

1.4 数据处理方法

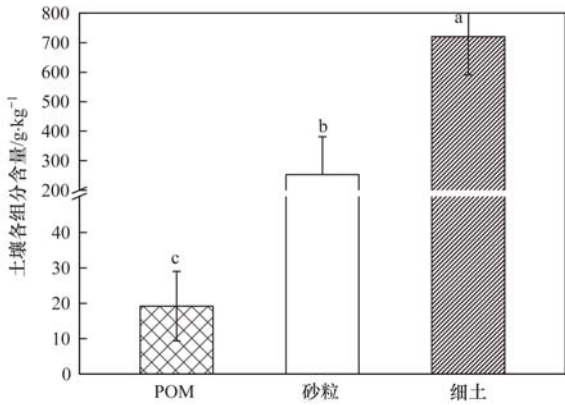
采用 Excel 2016、Origin 9.1 和 SPSS 19 进行有关数据的计算、方差分析及 t 检验分析、相关分析和作图,显著水平设为 0.05.

2 结果与讨论

2.1 紫色水稻土中的 POM 含量

采样区紫色水稻土 POM(0.053 ~ 2 mm)、砂粒(0.053 ~ 2 mm)和细土(<0.053 mm)的含量如图 2 所示. 3 个组分的含量范围分别为 7.31 ~ 44.76、106.03 ~ 491.28 和 496.88 ~ 878.31 g·kg⁻¹,平均值分别为 19.20、253.03 和 720.23 g·kg⁻¹,各组分的含量以细土最高,POM 最低,且不同组分间存在显著差异($P<0.05$),其中 POM 含量远低于细土和砂粒.有研究表明,土壤有机碳的累积最初发生在 POM-C 库而不是非 POM-C 库,如果土壤受到干扰,POM 会加快分解^[17, 18],因而不同土地利用方式其 POM 含量差异很大.表 1 显示了在各种土地利用方式下,林地和草地土壤 POM 含量较高而农地 POM 相对含量较低.本研究采集的紫色水稻土的 POM 含量低于表 1 中林地和草地,但高于蔬菜地和水稻土.

紫色水稻土 POM、砂粒和细土含量的变异系数分别为 0.51、0.51 和 0.18. 变异系数代表了土壤



不同小写字母表示土壤中各组分含量在 0.05 水平上差异显著,下同

图 2 紫色水稻土中各颗粒组分的含量

Fig. 2 Content of each particle fraction in purple paddy soil

特性的空间变异性,通常变异系数小于 0.1 时为弱变异,0.1 ~ 1 之间时为中等变异,大于 1 为强变异^[19],该采样区紫色水稻土 3 个组分含量均属中等变异,以砂粒和 POM 含量变异系数较大,表明砂粒和 POM 两个组分更容易受到外界因素的影响.

表 1 不同利用方式下土壤颗粒有机质含量¹⁾

Table 1 Contents of POM fraction in soils under different utilization types

土壤利用方式	含量范围 /g·kg ⁻¹	POM 中重金属富集系数				文献
		Cu	Zn	Pb	Cd	
再生灌溉下水稻土	10.64 ~ 14.67	5.07 ~ 8.62	—	5.17 ~ 6.01	2.37 ~ 6.01	[20]
林地	64.6	17.73	20.85	23.16	13.67	[13]
橘园	33.42	37.76	39.57	20.51	21.92	[13]
蔬菜地	3.2	50.14	173.88	36.37	35.09	[13]
草地	48	17.70	28.62	28.96	20.63	[13]
林地	60.9	—	—	—	—	[11]
距锌矿 750 m 耕种土	12	1.26	8.9	6.92	1.19	[21]
距锌矿 3 km 可耕种土	5.9	—	6.91	5.58	10.11	[12]
距锌矿 1 km 可耕种土	4.7	—	6.22	4.9	7.5	[12]

1) “—”表示未进行该项数据研究,下同

2.2 紫色水稻土的有机碳含量及 POM 的贡献

图 3(a) 为紫色水稻土及其细土、砂粒、POM 这 3 个组分中的有机碳含量. 紫色水稻土的有机碳(SOC)含量在 6.64 ~ 20.05 g·kg⁻¹之间,平均值为 11.86 g·kg⁻¹,变异系数为 0.28. 我国紫色水稻土有机碳含量一般在 11.60 ~ 14.50 g·kg⁻¹^[22],本研究中紫色水稻土有机碳含量位于该范围及以上的占 40%,说明该采样区的紫色水稻土有机碳含量处于较高水平. 所采土壤的有机碳含量属中等变异,可能与农田耕作及管理方式的不同有关.

将采集的水稻土进行颗粒组分分离,其有机碳的回收率在 92.6% ~ 108.9%,说明颗粒组分的分离对有机碳的损失较小. POM、细土和砂粒中有机

碳含量分别为 96.61 ~ 263.17、6.18 ~ 19.81 和 0.06 ~ 2.84 g·kg⁻¹,平均含量分别为 151.34、12.39 和 1.19 g·kg⁻¹,分别是其来源土壤的 12.76、1.04 和 0.10 倍,即 POM 中的有机碳(POM-C)含量显著高于原土($P<0.05$),砂粒中的有机碳含量显著低于原土,而细土与原土中的有机碳含量差异不显著($P>0.05$),表明 POM 对土壤有机碳有显著富集的作用,而砂粒组分中的有机碳含量存在亏损现象,这与 Zhang 等^[23]的结果相一致.

土壤各组分有机碳的质量分数为各组分有机碳的质量占土壤总有机碳质量的百分比,它反映土壤中有有机碳在各组分中的分布情况,也表征各组分对土壤有机碳的贡献率,而各组分有机碳质量为各组

分有机碳含量与该组分含量百分比的乘积,由此计算出的各组分对有机碳的贡献率^[24],结果见图 3(b). 3 个组分中,细土对有机碳的贡献率最高,范围在 50.13% ~ 87.65%,平均为 74.18%,这可能与该粒径组成的数量最大有关^[25, 26]. POM-C 对土壤有机碳的贡献率为 8.63% ~ 48.62%,平均

23.50%,说明尽管 POM 在土壤中的数量不多,但 POM-C 代表了一大部分土壤有机碳库^[27]. POM 是土壤有机质中的轻质组分,一般认为植物是 POM 的主要来源,具有可辨别的动植物残体、根部碎片、真菌菌丝、孢子和粪球等组成^[21, 28],这些物质都会导致 POM 中有机碳含量较高.

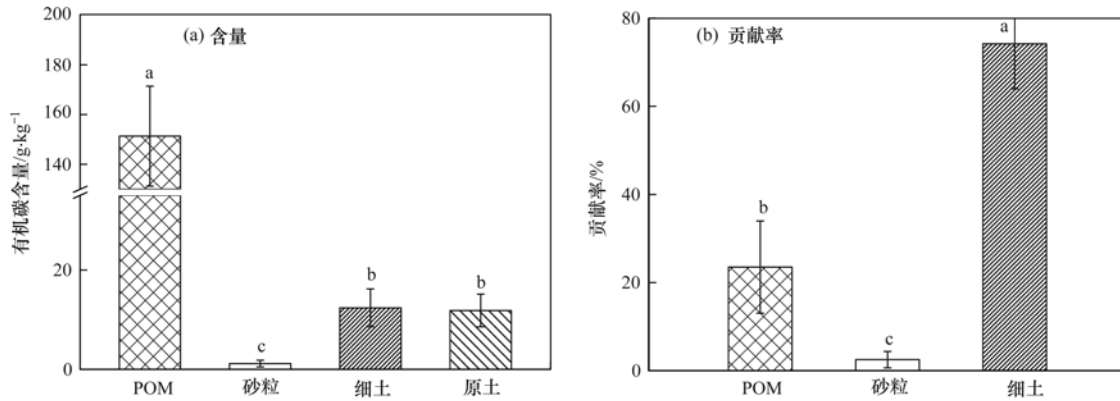


图 3 土壤中各组分颗粒有机碳含量及贡献率

Fig. 3 Content and contribution rate of organic matter in each particle fraction of soil

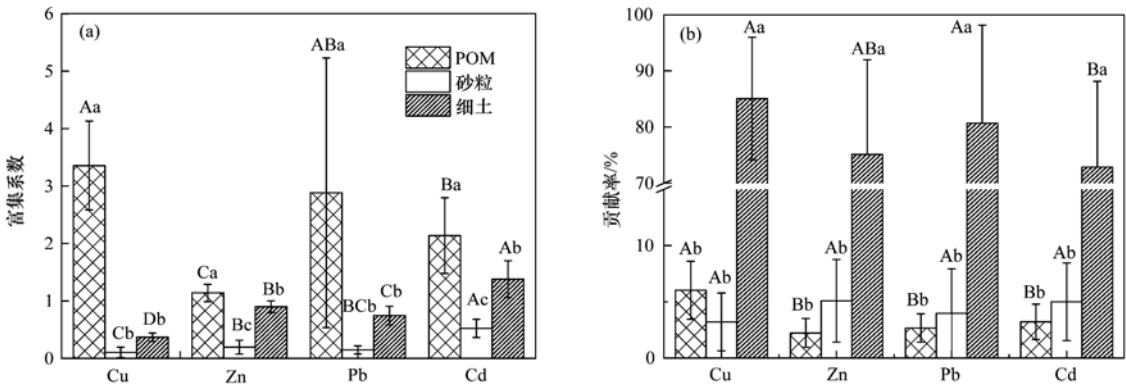
2.3 紫色水稻土重金属含量及其在 POM 中的分布

本研究采集的紫色水稻土中的重金属含量较低, Cu、Zn、Pb 和 Cd 的总含量分别为 9.92 ~ 22.12、44.38 ~ 87.93、4.19 ~ 42.25 和 0.09 ~ 0.17 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均未超出我国土壤环境质量二级标准 (GB 15618-1995) 范围.

各组分与土壤的重金属含量的比值为各组分对重金属的富集系数, 它反映各组分对重金属的富集情况. 某组分的富集系数大于 1, 即该组分重金属含量高于土壤, 说明该组分对重金属有富集作用, 且富集系数越大, 重金属在该组分中的富集作用越显著^[24]. 图 4(a) 为所测试的土壤各组分 4 种重金属的富集系数. Cu、Zn、Pb 和 Cd 的平均富集系数在 POM 组分中分别为 2.10 ~ 5.12、0.99 ~ 1.50、0.96 ~ 8.45、1.39 ~ 3.52, 在细土中分别为 0.23 ~ 0.49、0.72 ~ 1.03、0.55 ~ 1.04 和 0.95 ~ 2.20, 在砂粒中分别为 0.02 ~ 0.42、0.09 ~ 0.62、0.05 ~ 0.30 和 0.25 ~ 0.84, 即重金属在 POM 中均呈富集, 在部分细土中有富集, 在砂粒中均未出现富集状况. POM 对 Cu、Zn、Pb 和 Cd 富集的变异系数分别为 0.23、0.13、0.81、0.30, 均属中等变异, 以 Pb 的变异系数最大, 说明 POM 对 Pb 的富集较其他重金属更易受外界因素影响. 土壤 POM 对重金属的富集作用与其含丰富的活性基团如羧基、羟基、酚羟基等, 对重金属具有较强的吸附能力有关^[21, 29]. Guo 等^[30] 通过等温吸附试验证实了 POM 对重金属 Pb、Cu 和

Cd 具有高度的亲和性; Sebastia 等^[31] 研究指出, 土壤 POM 对重金属的富集主要归功于它的缓冲等化学特性. 图 4 还表明, POM 对 Cu、Pb 的富集能力大于 Zn 和 Cd, 其原因可能有以下 2 种: ① POM 对 Cu 和 Pb 的吸附过程不依赖于溶液离子强度, 主要是取决于内层复合物, 且主要通过羧基和羟基起作用^[30]; ② Cu 对 POM 组分的亲和性主要不取决于组分的粒径大小和有机碳的输入^[31]. Zn 在 POM 的富集程度最低, 可能与其吸附过程主要发生在外层复合物上有关. Zhang 等^[23] 和 Ashley^[32] 的研究也表明了 Cu 较 Zn 对有机质有更强的亲和性.

利用各组分中重金属总量 (各组分中重金属含量和相应组分质量分数的乘积) 与土壤中重金属总量的比值可以用于计算重金属在各组分中的分布 (即各组分重金属的贡献率)^[24], 结果见图 4(b). POM 中的 Cu、Zn、Pb 和 Cd 占土壤重金属全量的比例分别为 2.15% ~ 10.81%、1.02% ~ 6.06%、1.13% ~ 26.28% 和 1.18% ~ 6.69%, 平均值分别为 6.02%、2.22%、5.24% 和 3.21%, 均显著低于细土 ($P < 0.05$), 可能是由于细土组分在土壤中所占的比例大, 且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^[33, 34]. 本研究 POM 对土壤 Cu 和 Pb 的贡献率显著高于 Zn 和 Cd ($P < 0.05$), 说明 POM 对 Cu 和 Pb 具有更强的亲和性. 结果与富集系数的结果一致, 表明了重金属在



不同大写字母表示同一组分不同重金属含量在 0.05 水平上差异显著,小写字母表示同一重金属在土壤中各组分含量在 0.05 水平上差异显著

图 4 土壤不同颗粒组分中重金属的富集状况及贡献率

Fig. 4 Enrichment and contribution rate of heavy metals in each particle fraction of purple paddy soils

土壤中的分布及 POM 中的富集程度.

2.4 土壤性质对 POM 及其重金属富集状况的影响

2.4.1 对 POM 含量及其中有机碳的影响

POM 是新鲜植物残体腐殖化和稳定有机质腐解过程的中间产物,在土壤中停留时间短,气候、土壤类型和质地、植被类型、土地利用历史、人为干扰等因素都能够影响其在土壤中的含量. 土壤性质能够反映土壤所处的自然环境,对 POM 的组成及含量和周转有着深远的影响^[17, 35, 36]. 相关分析结果表明(表 2),SOC、pH、CEC 和黏粒含量与 POM 含量呈显著正相关,说明所测试的各项指标均能影响土壤中 POM 的形成,而 SOC 与 POM 含量相关系数最高,说明 SOC 是影响土壤 POM 的关键因子. 目前,对 pH、CEC 与 POM 含量间的关系研究较少,它们之间存在显著相关性的原因尚待研究,而黏粒含量与 POM 间的正相关关系可能与黏粒对土壤有机质的保护有关^[35],黏粒与有机质结合形成复合体或团聚体,起到隔离微生物的作用,降低了土壤有机质的矿化分解^[37].

表 2 土壤性质与 POM 含量相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation between soil properties and the content of POM fraction

项目	SOC	pH	CEC	黏粒
POM 含量	0.861 **	0.609 **	0.343 *	0.529 *
POM-C 含量	-0.031	-0.238	-0.313	-0.483 *
POM-C 总量	0.657 **	0.420	0.200	0.270

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, $n=20$, 下同

在 SOC、pH、黏粒含量和 CEC 这 4 个因素中,黏粒含量与 POM-C 含量呈显著正相关,同样也可用黏粒对土壤有机质的物理保护来解释. POM 作为

SOM 的暂存库,POM-C 总量是 SOC 中一部分活性有机碳,随着 SOC 的增加,POM 在土壤中的含量即在土壤中的比例增大,因此 POM-C 总量与 SOC 呈极显著正相关. 其他性质对 POM-C 总量的相关性不显著,可能是 POM 本身在土壤中所占的比例较小,对土壤性质变化的反映不明显所致.

2.4.2 对 POM 中重金属富集的影响

从表 3 看出,土壤 pH、CEC 与紫色水稻土的 Cu、Zn 和 Cd 总量呈显著或极显著关系,但与 Pb 总量的相关性不显著,黏粒 ($< 0.002\text{ mm}$)、SOC、POM-C 含量和 POM-C 总量与 4 种元素含量的相关性均不显著,表明 pH 和 CEC 是影响紫色水稻土 Cu、Zn 和 Cd 总量的主要因素. 土壤 pH 与重金属总量呈显著相关的原因与土壤 pH 越高,所带的负电荷愈多,对重金属的吸附能力越强有关^[38]. 而 CEC 与土壤中重金属总量表现出显著正相关,其原因与 CEC 愈高,所带的负电荷愈多,通过静电吸附作用所吸附的重金属就越多有关^[39].

土壤 pH 与 POM 的 Zn 和 Pb 含量呈显著或极显著关系;CEC 仅与 POM 中 Pb 含量呈极显著关系 ($P<0.01$),其他土壤性质与 POM 中重金属含量相关性均未达显著水平 ($P>0.05$),说明 pH、CEC 是影响 POM 中 Pb 含量的主要因素,这与郑顺安等^[39]结果一致,而对其他重金属含量影响不明显,可能是因为 pH 和 CEC 对这些重金属在 POM 中的吸附影响较小引起.

与土壤重金属总量一样,土壤 pH 与 POM 中 Cu、Zn 和 Cd 总量呈极显著正相关 ($P<0.01$),这可能是较高的 pH 使土壤 POM 带的电荷数量增加有关,土壤 pH 与 POM 中 Pb 总量的相关性不显著 ($P>0.05$),该结果与 Pb 含量关系相反,与对土壤

表 3 土壤性质与土壤及 POM 中重金属相关性分析

土壤性质	土壤重金属总量				POM 中重金属含量				POM 中重金属总量			
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd
pH	0.640 **	0.550 *	-0.141	0.570 **	0.303	0.484 *	-0.636 **	0.164	0.698 **	0.677 **	0.425	0.643 **
CEC	0.543 *	0.662 **	-0.095	0.691 **	0.047	0.442	-0.595 **	-0.105	0.326	0.369	0.178	0.280
黏粒	0.204	0.284	-0.068	0.378	-0.292	0.103	-0.154	0.034	0.435	0.513 *	0.489 *	0.544 *
SOC	0.037	0.090	0.319	0.071	-0.070	0.004	-0.251	0.215	0.777 **	0.805 **	0.823 **	0.840 **
POM-C 含量	-0.441	-0.290	0.367	-0.440	-0.028	-0.271	0.162	0.233	—	—	—	—
POM-C 总量	-0.039	-0.023	0.144	0.098	—	—	—	—	0.623 **	0.772 **	0.698 **	0.771 **

重金属总量相关一致,可能与 POM 在土壤中占的比例较小从而影响不明显有关,也可能与在较广的 pH 范围内 POM 对 Pb 的吸附率都处于较高水平有关^[29]. 与土壤重金属总量不同的是,黏粒含量与 POM 中的 Zn、Pb 和 Cd 总量呈显著正相关($P < 0.05$),SOC、POM-C 总量与 POM 中 Cu、Zn、Pb 和 Cd 总量呈极显著正相关($P < 0.01$),而 CEC 与 POM 中 4 种元素总量的相关性不显著($P > 0.05$). 从相关系数看,SOC 与 POM 中重金属总量的相关系数最高,说明 SOC 是影响土壤 POM 中重金属累积的最关键因子,其原因可能为土壤有机质中的腐殖质大部分以有机颗粒或有机膜被覆的形式与土壤中的黏土矿物、氧化物等无机颗粒相结合形成有机胶体和有机-无机复合胶体,由此增加了土壤的表面积和表面活性,使土壤的吸附能力随有机质的增加而提高^[39]. 逐步回归分析结果(见表 4)进一步表明,POM 中重金属总量的变化有 66.0% ~ 78.4% 与土壤 SOC 与 pH 的变化有关. 其中在 POM 中 Zn 的总量与土壤性质的回归系数最高,关系最为密切,说明 POM 对 Zn 的富集较其他重金属更大程度取决于土壤的性质,这与郑顺安等^[40]的研究结果一致.

表 4 POM 中重金属总量与土壤性质的多元回归分析¹⁾

Table 4 Multiple regression analysis between heavy metal amounts in POM and soil properties

重金属	回归方程	R^2
Cu	$y = 0.585x_1 - 0.449x_2$	0.740
Zn	$y = 0.631x_1 - 0.408x_2$	0.784
Pb	$y = 0.823x_1$	0.660
Cd	$y = 0.691x_1 - 0.348x_2$	0.781

1) x_1 、 x_2 分别代表 SOC、pH 值

3 结论

(1)紫色水稻土 POM(0.053 ~ 2 mm) 含量为 7.31 ~ 44.76 g·kg⁻¹,受 SOC、pH、黏粒含量和 CEC 的显著影响.

(2)紫色水稻土 POM-C(0.053 ~ 2 mm) 含量为 96.61 ~ 263.17 g·kg⁻¹,显著高于原土、砂粒及细土

中的有机碳含量,对土壤有机碳的贡献率在 8.63% ~ 48.62% 之间,能够代表一大部分土壤有机碳库. POM-C 含量和总量分别受黏粒、SOC 的影响.

(3)紫色水稻土 POM(0.053 ~ 2 mm) 对 Cu、Zn、Pb 和 Cd 均有富集作用,其中 Cu、Pb 的富集能力和贡献率均大于 Zn 和 Cd. POM 中重金属总量受 pH、SOC 和 POM-C 总量的显著影响,SOC 为关键因子,其中 Zn 在 POM 中的总量与土壤性质的关系最为密切.

参考文献:

[1] 王清奎,汪思龙,冯宗炜,等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 513-519.
Wang Q K, Wang S L, Feng Z W, *et al.* Active soil organic matter and its relationship with soil quality[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 513-519.

[2] Park J H, Lamb D, Paneerselvam P, *et al.* Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal (loid) contaminated soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 185(2-3): 549-574.

[3] Covelo E F, Vega F A, Andrade M L. Competitive sorption and desorption of heavy metals by individual soil components[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 140(1-2): 308-315.

[4] Kirkham M B. Cadmium in plants on polluted soils: effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments [J]. Geoderma, 2006, 137(1-2): 19-32.

[5] Heredia W, Peirano P, Borie G, *et al.* Soil organic matter-metal interactions in Chilean volcanic soils under different agronomic management[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2002, 33(13-14): 2083-2099.

[6] Impellitteri C A, Lu Y F, Saxe J K, *et al.* Correlation of the partitioning of dissolved organic matter fractions with the desorption of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn from 18 Dutch soils[J]. Environment International, 2002, 28(5): 401-410.

[7] 孙花,谭长银,黄道友,等. 土壤有机质对土壤重金属积累、有效性及形态的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2011, 34(4): 82-87.
Sun H, Tan C Y, Huang D Y, *et al.* Effects of soil organic matter on the accumulation availability and chemical speciation of heavy metal[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2011, 34(4): 82-87.

[8] 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.
Dou S, Li K, Guan S. A review on organic matter in soil

- aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, **48**(2): 412-418.
- [9] Marriott E E, Wander M. Qualitative and quantitative differences in particulate organic matter fractions in organic and conventional farming systems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**(7): 1527-1536.
- [10] Gosling P, Parsons N, Bending G D. What are the primary factors controlling the light fraction and particulate soil organic matter content of agricultural soils? [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, **49**(8): 1001-1014.
- [11] Besnard E, Chenu C, Balesdent J, *et al.* Fate of particulate organic matter in soil aggregates during cultivation[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, **47**(4): 495-503.
- [12] 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.
- [13] 章明奎. 砂质土壤不同粒径颗粒中有机碳、养分和重金属状况[J]. *土壤学报*, 2006, **43**(4): 584-591.
- Zhang M K. Distribution of organic carbon, nutrients and heavy metals in different size fractions in sandy soils [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, **43**(4): 584-591.
- [14] Zhao X L, Jiang T, Du B. Effect of organic matter and calcium carbonate on behaviors of cadmium adsorption-desorption on/from purple paddy soils[J]. *Chemosphere*, 2014, **99**: 41-48.
- [15] Balesdent J, Pétraud J P, Feller C. Some effects of ultrasonic vibrations on size-distribution of soil organic matter[J]. *Science du Sol*, 1991, **29**: 95-106.
- [16] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [17] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 等. 土壤颗粒有机质研究进展[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2009, **4**(4): 43-52.
- Xie J S, Yang Y S, Chen G S, *et al.* Advances on soil particulate organic matter[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2009, **4**(4): 43-52.
- [18] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4695-4704.
- Li J L, Jiang C S, Hao Q J. Impact of land use type on stability and organic carbon of soil aggregates in Jinyun mountain [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4695-4704.
- [19] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 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.
- Zheng S A, Zheng X Q, Liu S T, *et al.* Heavy metals enrichment in particulate organic matter from reclaimed water irrigated purple paddy soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26**(2): 246-250.
- [21] Labanowski J, Sebastia J, Foy E, *et al.* Fate of metal-associated POM in a soil under arable land use contaminated by metallurgical fallout in northern France [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **149**(1): 59-69.
- [22] 中国科学院成都分院土壤研究室. 中国紫色土[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [23] 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.
- [24] 史琼彬, 赵秀兰, 常同举, 等. 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[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1923-1930.
- Shi Q B, Zhao X L, Chang T J, *et al.* Effects of tillage on distribution of heavy metals and organic matter within purple paddy soil aggregates [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1923-1930.
- [25] 唐晓红, 邵景安, 黄雪夏, 等. 垄作免耕下紫色水稻土有机碳的分布特征[J]. *土壤学报*, 2007, **44**(2): 235-243.
- Tang X H, Shao J A, Huang X X, *et al.* Distribution of soil organic carbon in purple paddy field under long-term non-tillage ridge culture[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, **44**(2): 235-243.
- [26] 贾明云, 朱华铃, 李航. 光散射技术在土壤胶体颗粒相互作用研究中的应用[J]. *土壤学报*, 2010, **47**(2): 253-261.
- Jia M Y, Zhu H L, Li H. Application of light scattering technology in study on interactions between soil colloidal particles in suspension[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, **47**(2): 253-261.
- [27] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, **52**(3): 345-353.
- [28] 张瑞, 张贵龙, 姬艳艳, 等. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 277-282.
- Zhang R, Zhang G L, Ji Y Y, *et al.* Effects of different fertilizer application on soil active organic carbon [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 277-282.
- [29] 章明奎, 郑顺安, 王丽平. 土壤中颗粒状有机质对重金属的吸附作用[J]. *土壤通报*, 2007, **38**(6): 1100-1104.
- Zhang M K, Zheng S A, Wang L P. Adsorption of heavy metals by soil particulate organic matter[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, **38**(6): 1100-1104.
- [30] Guo X Y, Zhang S Z, Shan X Q, *et al.* Characterization of Pb, Cu, and Cd adsorption on particulate organic matter in soil[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry* 2006, **25**(9): 2366-2373.
- [31] Sebastia J, van Oort F, Lamy I. Buffer capacity and Cu affinity of soil particulate organic matter (POM) size fractions [J]. *European Journal of Soil Science*, 2008, **59**(2): 304-314.
- [32] Ashley J T F. Adsorption of Cu(II) and Zn(II) by estuarine, riverine and terrestrial humic acids[J]. *Chemosphere*, 1996, **33**(11): 2175-2187.
- [33] 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.
- Zhang L Y, Li L Q, Pan G X, *et al.* Effects of heavy metals pollution on paddy soil aggregates composition and heavy metals distribution[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(11): 2806-2812.
- [34] 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.
- Chen Y, Zhu X F, Ji H B, *et al.* Particle size distribution of heavy metals in soils around the Gold Mine of Detiangou-Qifengcha, Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(1): 219-228.
- [35] 李维福, 解宏图, 何红波, 等. 颗粒有机质的来源、测定及

- 其影响因素[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(11): 1849-1856.
- Li W F, Xie H T, He H B, *et al.* Soil particulate organic matter: origin, measurement, and factors affecting its functions [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, **26** (11): 1849-1856.
- [36] 徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 等. 缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 4009-4016.
- Xu P, Jiang C S, Hao Q J, *et al.* Effects of the different land use on soil labile organic matter and carbon management index in Junyun mountain[J]. Environmental Science, 2013, **34**(10): 4009-4016.
- [37] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 等. 土壤细颗粒对有机质的保护能力研究[J]. 土壤通报, 2005, **36**(5): 748-752.
- Liang A Z, Zhang X P, Yang X M, *et al.* A review on protection capacity of soil organic matter by fine particles [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, **36**(5): 748-752.
- [38] 林大松, 徐应明, 孙国红, 等. 土壤 pH、有机质和含水氧化物对镉、铅竞争吸附的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(2): 510-515.
- Lin D S, Xu Y M, Sun G H, *et al.* Effects of pH, organic matter and hydrous oxides on competitive adsorption of Cd^{2+} and Pb^{2+} by soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, **26**(2): 510-515.
- [39] 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.
- Zheng S A, Chen C, Zheng X Q, *et al.* A correlation between enrichment characteristics of lead in different particle-size fractions of soil aggregates and lead concentrations of leafy vegetables[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(3): 556-564.
- [40] 郑顺安, 王丽平, 章明奎. 非污染土壤中颗粒态有机质对重金属的富集作用[J]. 科技通报, 2008, **24**(4): 548-552, 558.
- Zheng S A, Wang L P, Zhang M K. Enrichment of heavy metals in particulate organic matter from non-polluted soils[J]. Bulletin of Science and Technology, 2008, **24**(4): 548-552, 558.

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuahu, Shennongjia, China	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China	ZHANG Qiu-qi, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper(II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO ₃ ⁻ -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe ⁽⁰⁾ -activated Carbon and Its Influencing Factors	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitrification Systems with Two Different Inhibition Strategies	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthen Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N ₂ O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N ₂ O Emissions from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetirizine to Loessial Soil Amended with Biochar	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb ²⁺ and Cd ²⁺ from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C ₃ N ₄ /BiOBr Composite Photocatalyst	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)