

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.10  
第41卷 第10期

目次

青岛春节期间大气污染特征及烟花燃放一、二次贡献分析 ..... 方天歌, 姚小红, 孟赫, 陈春强 (4345)

基于在线观测的天津市 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及来源解析 ..... 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 元洁, 唐逸, 杨宁, 郑乃源, 陈魁 (4355)

2017~2018年北京大气 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性无机离子特征 ..... 李欢, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4364)

北京南部城区 PM<sub>2.5</sub> 中碳质组分特征 ..... 董贵明, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4374)

成都市冬季3次灰霾污染过程特征及成因分析 ..... 冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 徐雪梅, 熊文朋, 梅林德, 钱骏, 刘政 (4382)

南京北郊黑碳气溶胶分布特征及来源 ..... 谢锋, 林煜棋, 宋文怀, 鲍孟盈, 章炎麟 (4392)

2019年10~12月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估 ..... 朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 鲁宁, 许荣, 刘冰, 李健军 (4402)

保定市大气污染变化趋势及特征 ..... 苟银寅, 张凯, 李金娟, 吕文丽, 竹双, 黎洁, 何珊珊, 郑悦, 支敏康 (4413)

郑州市 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势 ..... 卢轩, 张瑞芹, 韩跃钢 (4426)

郑州市少数民族运动会期间 O<sub>3</sub> 及 VOCs 污染特征的演变和评估 ..... 赵金帅, 于世杰, 王楠, 马双良, 王维思, 尹沙沙, 李一丹, 张栋, 张瑞芹 (4436)

我国木器涂料及汽车涂料中挥发性有机物特征 ..... 柯云婷, 孙宇航, 成海荣, 刘锐源, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (4446)

典型脱硫工艺对燃煤锅炉烟气颗粒物的影响 ..... 张进生, 吴建会, 吕瑞鹤, 宋丹林, 黄凤霞, 张裕芬, 冯银厂 (4455)

不同居民燃煤炉具大气污染物排放差异性及其减排分析 ..... 张熠晨, 薛陈利, 刘杰, 钟连红, 薛亦峰 (4462)

天津市2017年移动源高时空分辨率排放清单 ..... 刘庚, 孙世达, 孙露娜, 金嘉欣, 房键旭, 宋鹏飞, 王婷, 吴琳, 毛洪钧 (4470)

四川省基于第二次污染源普查数据的人为源大气污染源排放清单及特征 ..... 徐晨曦, 陈军辉, 李媛, 何敏, 冯小琼, 韩丽, 刘政, 钱骏 (4482)

抗大气复合污染的城市森林植物初步筛选 ..... 李品, 卫妍妍, 冯兆忠 (4495)

宝鸡市绿植叶片重金属空间分布及污染特征 ..... 张军, 梁青芳, 高煜 (4504)

潮汕地区入海河流及水生生物中 PPCPs 分布特征及风险评估 ..... 秀措, 王尘辰, 吕永龙, 陆轶峰, 王聪, 张梦, 曹祥会 (4514)

泉州山美水库及入库河流沉积物中多溴二苯醚的时空分异和降解分析 ..... 韩文亮, 刘豫, 冯凯文 (4525)

长江上游典型山地农业小流域浅层地下水硝态氮时空变异特征及影响因素 ..... 江南, 周明华, 李红, 李子阳, 章熙峰, 朱波 (4539)

沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征 ..... 王宏, 徐娅玲, 张奇, 林超文, 翟丽梅, 刘海涛, 蒲波 (4547)

基于 DPeRS 模型的海河流域面源污染潜在风险评估 ..... 冯爱萍, 王雪蕾, 徐逸, 黄莉, 吴传庆, 王昌佐, 王洪亮 (4555)

降水空间异质性和非点源关键源区识别面积变化的影响 ..... 高晓曦, 左德鹏, 马广文, 徐宗学, 胡小红, 李佩君 (4564)

硅藻群落指示的近50年来大理西湖湖泊生态系统演变规律 ..... 张晨雪, 徐敏, 董一凡, 王荣, 方凤满 (4572)

海陆交互带土壤及河流沉积物中镉含量及形态分布特征 ..... 王芳婷, 陈植华, 包科, 赵信文, 孟宪萌, 黄长生 (4581)

内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算 ..... 王志超, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 杨建林, 秦一鸣, 李河 (4590)

透水/不透水格局特征对汇水单元径流污染的影响 ..... 姜智绘, 廖云杰, 谢文霞, 李佳, 房志达, 赵洪涛, 李叙勇 (4599)

铁铜双金属有机骨架 MIL-101(Fe, Cu) 活化双氧水降解染料性能 ..... 梁贺, 刘锐平, 安晓强, 刘会娟 (4607)

纳米 Cu<sup>0</sup>@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 活化 PMS 降解对-硝基苯酚的协同反应机制 ..... 石清清, 蒲生彦, 杨犀 (4615)

紫外活化过硫酸盐降解水中三氯蔗糖动力学和机制 ..... 余韵, 陆金鑫, 吕贞, 彭明国, 徐彬煜, 杜尔登, 郑璐 (4626)

污水生物处理工艺低温下微生物种群结构 ..... 尚越飞, 王申, 宗倪, 杜海洲, 张鑫, 齐焱, 杨敏 (4636)

不同 DN 与 PN-ANAMMOX 耦合工艺处理中晚期垃圾渗滤液的微生物群落分析 ..... 陆明羽, 李祥, 黄勇, 殷记强, 方文焯 (4644)

全程自养颗粒污泥快速启动及混合营养型脱氮性能分析 ..... 齐泽坤, 王建芳, 钱飞跃, 刘雨馨, 乔伟, 李小蝶 (4653)

不同低碳氮比废水中好氧颗粒污泥的长期运行稳定性 ..... 袁强军, 张宏星, 陈芳媛 (4661)

潮土细菌及真菌群落对化肥减量配施有机肥和秸秆的响应 ..... 吴宪, 王蕊, 胡荷, 修伟明, 李刚, 赵建宁, 杨殿林, 王丽丽, 王欣奕 (4669)

不同轮作模式下作物根际土壤养分及真菌群落组成特征 ..... 孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 康建宏 (4682)

酒糟生物炭短期施用对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响 ..... 张萌, 刘彦伶, 魏全全, 苟久兰 (4690)

稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响 ..... 陈友德, 赵杨, 高杜娟, 罗先富, 崔婷, 童中权, 吴家梅 (4701)

解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防控土壤氮挥发 ..... 杨亚红, 薛莉霞, 孙波, 张宝, 庄绪亮, 庄国强, 白志辉 (4711)

外源磷对镉胁迫下水稻生长及镉累积转运的影响 ..... 霍洋, 仇银燕, 周航, 胡雨丹, 邓鹏辉, 魏宾纭, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (4719)

水稻不同生育期 As 胁迫下 As 累积关键生育期 ..... 邓鹏辉, 蔡雅琴, 周航, 刘雅, 杨文俊, 辜娇峰, 廖柏寒 (4726)

铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价 ..... 周艳, 万金忠, 李群, 黄剑波, 张胜田, 龙涛, 邓绍坡 (4733)

浙江省台州市电子垃圾拆解地多溴联苯醚浓度水平分布特征和迁移趋势 ..... 魏抱楷, 柳晨, 王英, 金军 (4740)

重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析 ..... 王锐, 邓海, 严明书, 何忠库, 周皎, 梁绍标, 曾琴琴 (4749)

重庆市畜禽粪便及菜田土壤中四环素类抗生素生态风险评价 ..... 彭秋, 王卫中, 徐卫红 (4757)

《环境科学》征订启事 (4435) 《环境科学》征稿简则 (4445) 信息 (4606, 4625, 4732)

# 海陆交互带土壤及河流沉积物中镉含量及形态分布特征

王芳婷<sup>1</sup>, 陈植华<sup>1</sup>, 包科<sup>2</sup>, 赵信文<sup>3</sup>, 孟宪萌<sup>1</sup>, 黄长生<sup>3\*</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074; 2. 长江水利委员会河湖保护与建设运行安全中心, 武汉 430015; 3. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205)

**摘要:** 镉污染对人类健康构成威胁, 研究土壤中镉的空间分布可以用来评估对人类和环境构成的风险. 通过分析海陆交互带不同埋深土壤中的重金属镉(Cd)含量及形态, 揭示了土壤重金属镉的富集特征及变化规律. 结果表明: ①广州南沙区地表水中 Cd 质量浓度均低于 $0.0001 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 河流沉积物的理化性质以上横沥水道为界呈现空间差异, 重金属 Cd 主要沉积在上横沥以北, 总 Cd 均值为 $2.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 上横沥水道及以南河流沉积物总 Cd 为 $0.062 \sim 0.39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 对海洋环境危害小; ②土壤剖面 Cd 含量随土壤埋深增加逐渐减小, 埋深 $0 \sim 20$ 、 $20 \sim 50$ 、 $50 \sim 90$ 、 $90 \sim 140$  和  $140 \sim 200 \text{ cm}$  等 5 层剖面 Cd 含量中值依次为 $0.51$ 、 $0.50$ 、 $0.45$ 、 $0.42$  和  $0.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 且离散程度随埋深增加逐渐减小, pH 小于 5 的土壤中 Cd 在垂向上的迁移量及迁移深度显著增加; ③土壤中残渣态 Cd 约占 40%, 随埋深变化趋势基本持平, 弱酸提取态 Cd 占比中值与 pH 的变化一致, 均随剖面埋深的增加而增大; 可还原态 Cd 占比中值与铁、锰含量的变化一致, 随剖面埋深的增加而减小. 这些结果对城市周边农田土壤 Cd 污染的区域防治、污染土壤治理修复具有重要的指导意义.

**关键词:** 土壤镉含量; 空间分布; 影响因素; Cd 形态; 南沙

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)10-4581-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202003033

## Content and Distribution of Cadmium in Soil and Fluvial Sediments in the Sea-Land Interaction Zone

WANG Fang-ting<sup>1</sup>, CHEN Zhi-hua<sup>1</sup>, BAO Ke<sup>2</sup>, ZHAO Xin-wen<sup>3</sup>, MENG Xian-meng<sup>1</sup>, HUANG Chang-sheng<sup>3\*</sup>

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Safety Center for River and Lake Protection, Construction and Operation, Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Wuhan 430015, China; 3. Wuhan Geological Survey Center, China Geological Survey, Wuhan 430205, China)

**Abstract:** Cadmium pollution poses a threat to human health. The examination of spatial distribution of Cd in soils can be used to assess the risks posed to humans and the environment. The enrichment characteristics and variation rules of heavy metal cadmium in the soil were revealed by analyzing the concentration and fractions of Cd in the soil at different depths in the sea-land interaction zone. The results showed that: ① the concentration of Cd in the surface water of Nansha was lower than  $0.0001 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , and the physical and chemical properties of river sediments showed spatial differences with the boundary of "Shang Heng-li River". Cd was mainly deposited in the north of the "Shang Heng-li River", with the mean total Cd of  $2.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . The total Cd in the sediment of the "Shang Heng-li River" and the rivers south of it were  $0.062\sim 0.39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , which caused minimal harm to the marine environment. ② The content of Cd in the soil profile gradually decreased with an increase in soil burial depth. The median content of Cd in the five layers, including  $0\sim 20 \text{ cm}$ ,  $20\sim 50 \text{ cm}$ ,  $50\sim 90 \text{ cm}$ ,  $90\sim 140 \text{ cm}$ , and  $140\sim 200 \text{ cm}$ , were  $0.51$ ,  $0.50$ ,  $0.45$ ,  $0.42$ , and  $0.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively, and the dispersion degree gradually decreased with an increase in buried depth; the vertical migration amount and migration depth of Cd increased significantly in soils with pH less than 5. ③ The residual Cd in the soil accounted for approximately 40%, and the trend was typically flat with a change in buried depth. The median proportion of acid soluble Cd was consistent with the change in pH and increased with an increase in the buried depth of the profile, while the median proportion of reducible Cd was consistent with the change in iron and manganese content, and decreased with an increase in buried depth of section. These results have important guiding significance for the regional prevention and control of Cd pollution in farmland surrounding cities and the treatment and remediation of polluted soil.

**Key words:** soil cadmium content; spatial distribution; influencing factors; Cd fractions; Nansha

河流在接受和运输污染物方面发挥着重要作用,因为它们一方面是接受点源(工业、采矿)和非点源(城市生活、农业、大气降水)污染物的水域,另一方面,它们是大河或大海的源头<sup>[1]</sup>.自20世纪80年代以来,随着中国珠江三角洲经济的快速发展,大量的重金属污染物被排放到当地的河流中<sup>[2-4]</sup>.2000年以来,报道了多起珠江支流重金属污染突发事件<sup>[5,6]</sup>.河流沉积物和相关湿地是潜在有毒元素

(PTEs)等污染物的净汇,在不同的洪涝-枯水期,这些沉积物也可能成为污染物的来源<sup>[7]</sup>.土壤重金属

收稿日期: 2020-03-03; 修订日期: 2020-04-09

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190291); 国家重点研发计划项目(2018YFC1800800); 国家自然科学基金项目(51979252)

作者简介: 王芳婷(1991~),女,博士研究生,主要研究方向为重金属污染土壤修复和区域环境调查, E-mail: ftwang1991@cug.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: cshuang@cug.edu.cn

通过食物链对人体健康构成威胁<sup>[8,9]</sup>,镉(Cd)由于其从土壤到植物的高迁移率和较强的生物毒性,是各种重金属元素中极为重要的污染物<sup>[10]</sup>.土壤中重金属的过量输入以其毒性、持久性和生物富集性受到了全世界的广泛关注<sup>[11]</sup>,土壤重金属污染已成为全球公认的环境问题<sup>[12]</sup>.我国土壤环境状况总体不容乐观,文献[13]显示,镉污染物超标点位占630万km<sup>2</sup>内调查点位的7.0%.我国镉污染农田面积达到2800km<sup>2</sup>,有污灌区土壤镉含量达到了生产“镉米”的程度<sup>[14]</sup>,年产镉超标农产品数量超过150万t<sup>[15]</sup>.

为了评估人类和环境的潜在风险,人们越来越关注环境中土壤重金属的空间分布<sup>[16-18]</sup>,污染物的空间分布已被用来识别一个地区的污染状况.近年来有关土壤重金属Cd吸附-解吸和迁移转化的研究,多是从农学和化学等角度考虑,研究对象多为耕地表层土壤,但从地质角度讲,表层耕作层与深层土壤土体性质存在着很大差异<sup>[19]</sup>.此外,沉积物中重金属总量不能预测该金属的生物利用度和毒性,重金属生物可利用性、生物毒性更大程度上取决于形态分布<sup>[20]</sup>,生物有效量逐渐成为土壤污染评价与风险预测的重要依据<sup>[21,22]</sup>.

本研究以广州南沙核心区为研究区开展野外采样和实验室样品分析,目标是:①量化和揭示南沙区河流沉积物及土壤中重金属镉(Cd)的空间分布格局;②量化镉元素的活性,揭示影响土壤中Cd活性的因素,以期为城市周边农田土壤Cd污染的区域防治和污染土壤治理修复提供依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

广州市南沙新区是我国第6个国家级新区,位于广州市最南端、珠江虎门水道西岸,地处珠江出海口和大珠江三角洲地理几何中心,是珠江流域通向海洋的通道,总面积约803km<sup>2</sup>.区域属于亚热带季风性海洋气候,年平均气温22.2℃,年平均雨量1646.9mm,年雷暴日数为78.3d,属于强雷暴区.南沙核心区地貌类型有低丘、海陆交互相平原和滩涂.低丘主要分布在黄山鲁,为区内最高点,海拔295.3m;海陆交互相平原分布在黄阁和横沥一带,地层特征为上部为淤泥或淤泥质土(砂),下部为河流沉积的砂层;海湾滩涂、海涂也叫滩涂,主要集中在区内东南的万顷沙、龙穴岛和新垦的沿岸,地形呈带状,与海岸平行延伸,宽广平缓.南沙新区依托珠三角地区,珠三角地区作为我国重要的经济带,也是最早的经济开放开发区,近几十年来经济快速

发展<sup>[17]</sup>.2017年3月,国家提出粤港澳大湾区发展规划,南沙是大湾区的几何中心,也是广州发展“一带一路”以及海上丝绸之路的支点,在大湾区中肩负着粤港澳国际化战略平台的重任.

### 1.2 样品采集与前处理

为明确南沙区河流沉积物和土壤中的镉含量聚集差异及形态变化特征,本研究分别以水平方向和垂直方向在研究区内采集样品,采样点分布如图1.

#### 1.2.1 河流沉积物及地表水采样

河流沉积物及地表水采样点共14个.采集地表水样14组,河流沉积物12组.采样点遍布流经南沙区的所有水道,包括:珠江口、蒲州水道、洪奇沥水道、下横沥水道、上横沥水道、珠江、狮子洋、莲花山水道、沙湾水道、容桂水道、潭州水道和顺德水道.

#### 1.2.2 深层土壤(0~200cm)及地下水采样

为了掌握陆相-海相主剖面线上Cd的分布规律,在研究区布设一条NW至SE向剖面,共计14个深层土壤采样点.采样点主要选择在园地土层较厚地带采样,避开明显点源污染的地段、新近搬运的堆积土、垃圾土和田埂,离开主干公路、铁路100m以上.深层土壤采用手摇钻取样,每个剖面采集土壤样品埋深为0~2m,分为0~20、20~50、50~90、90~140和140~200cm共5组样品,用全新密封袋装取送实验室处理.浅层地下水采用陶土头加手压泵取样,采集的水样用润洗过的塑料瓶装取送实验室分析.

#### 1.2.3 大气降水采样

大气降水采样容器为聚乙烯塑料小桶,上口直径40cm,高20cm.采样器具在第一次使用前,用10%盐酸(或硝酸)浸泡一昼夜,用自来水洗至中性,再用去离子水冲洗多次晾干,加盖保存.采样时将采样器放置在相对高度1.2m以上,降雨开始时打开盖子开始采集降水的全过程样,并记录采样时间、地点及降水量.

### 1.3 样品测试分析

所有水样带回实验室以后参照地下水水质检验方法<sup>[23]</sup>及饮用天然矿泉水检验方法<sup>[24]</sup>测定物理化学指标,包括水体的pH值、TOC、浊度、色度、电导率、氧化还原电位、硬度、暂时硬度、永久硬度、溶解性总固体、游离CO<sub>2</sub>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、Fe<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、F<sup>-</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、高锰酸盐指数以及重金属镉的含量.所有土壤样品带回实验室以后测定物理化学指标,包括土壤的pH值、有机质、容重、电导率、阳离子交换容量(CEC)、N、P、K<sup>[25]</sup>、盐分以及重金属镉的全量和形态,部分土壤测定土壤机械组成<sup>[26]</sup>,

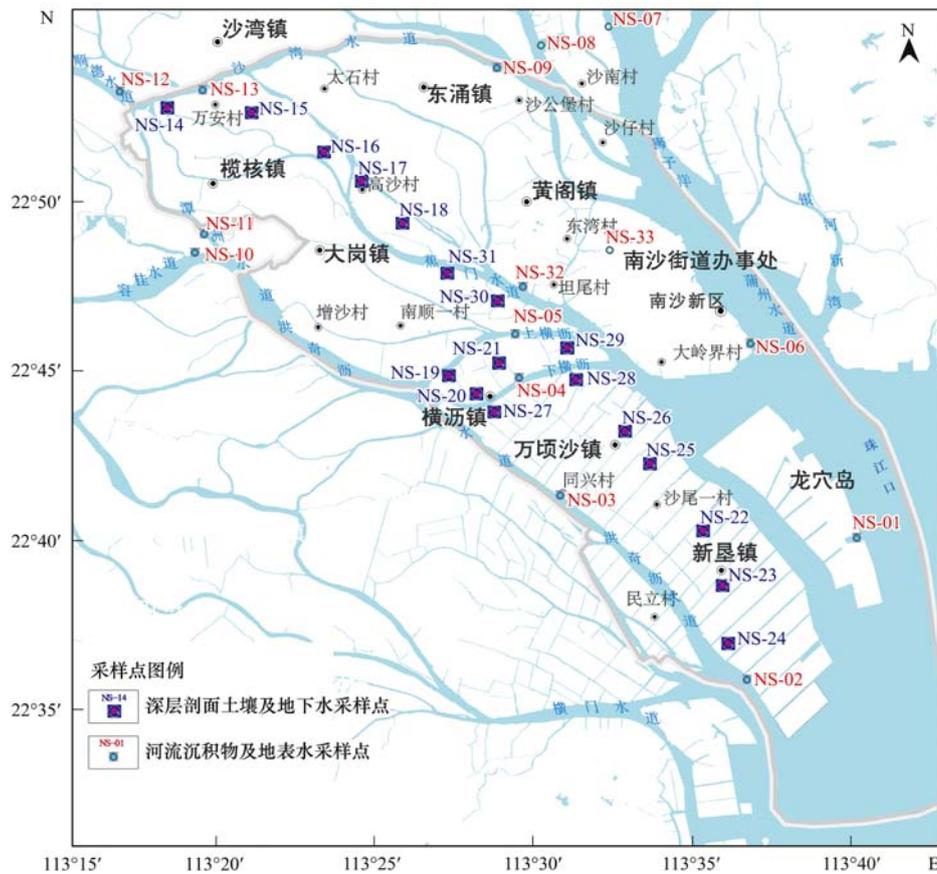


图1 南沙区采样点位置示意

Fig. 1 Location of sampling points in Nansha District

根据国际制土壤质地分类,将土粒分为以下3种:黏粒( $<0.002\text{ mm}$ )、粉砂粒( $0.002\text{ mm}\sim 0.02\text{ mm}$ )和砂粒( $0.02\text{ mm}\sim 2\text{ mm}$ )。用原子吸收光谱法(atomic absorption spectroscopy, AAS)测定水样阳离子( $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 和 $\text{Na}^+$ )含量,阴离子含量( $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{NO}_3^-$ )用高效液相色谱(HPLC)仪测定,阴阳离子电荷平衡之差 $<5\%$ 。用电感耦合等离子体质谱法测定水土样品中的总镉,采用连续萃取法测定土壤中镉的形态<sup>[27]</sup>。

#### 1.4 多元统计与空间分析方法

使用 Microsoft Office documents Excel 2010 (Redmond, WA, USA) 及 IBM SPSS Statistics (20.0.0 版本) 进行描述性统计和相关分析。使用 RockWare Aq·QA 1.1.1 [1.1.5.1] 版本进行水化学类型分析。利用 MAPGIS 6.7 软件,采用 Kring 泛克里格法建立的 GRD 数学模型进行离散数据网格化,通过高等级平滑等值线处理绘制等值线图,清晰显示研究重金属 Cd 的深层土壤剖面分布格局。

## 2 结果与分析

### 2.1 水化学类型及特征

南沙区大气降水为  $\text{HCO}_3\text{-Cl-Ca}$  型水(图 2),溶

解性总固体为  $23\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , pH 值为 5.97。大气降水中主要阴离子含量  $\text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ , 主要阳离子含量  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+$ , 降水酸度主要受阳离子  $\text{Ca}^{2+}$  和阴离子  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  的影响。地表水 pH 为 7.05~7.76, 均值为 7.52, 根据地理位置的不同分为珠江口地表水和河道地表水, 珠江口地表水水化学类型为 Cl-Na 型水, 其中 NS-06 溶解性总固体为  $586\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , NS-01 溶解性总固体为  $3\ 086\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 河道地表水为  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  型水或  $\text{HCO}_3\text{-CaMg}$  型水, 溶解性总固体为  $158\sim 231\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 根据地表水环境质量标准<sup>[28]</sup>, 所采地表水总氮含量普遍超过  $2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 达到 V 类标准, 其余基本项目符合 I~II 类标准。南沙浅层地下水 pH 值以中性为主, pH 均值为 7.24, 地下水类型以  $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$  型水为主, 自 NW 至 SE 地下水溶解性总固体含量显著增高, 阴阳离子中  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  及  $\text{Na}^+$  显著增高,  $\text{Ca}^{2+}$  及  $\text{SO}_4^{2-}$  含量显著降低。其中 NS-30、NS-22、NS-19、NS-20、NS-27 和 NS-21 溶解性总固体范围为  $1\ 000\sim 3\ 000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 属于微咸水; 最靠近 SE 部的浅层地下水 NS-24 溶解性总固体达  $4\ 095\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 属于咸水。

### 2.2 河流沉积物特征

南沙区地表水中 Cd 质量浓度均低于  $0.000\ 1$

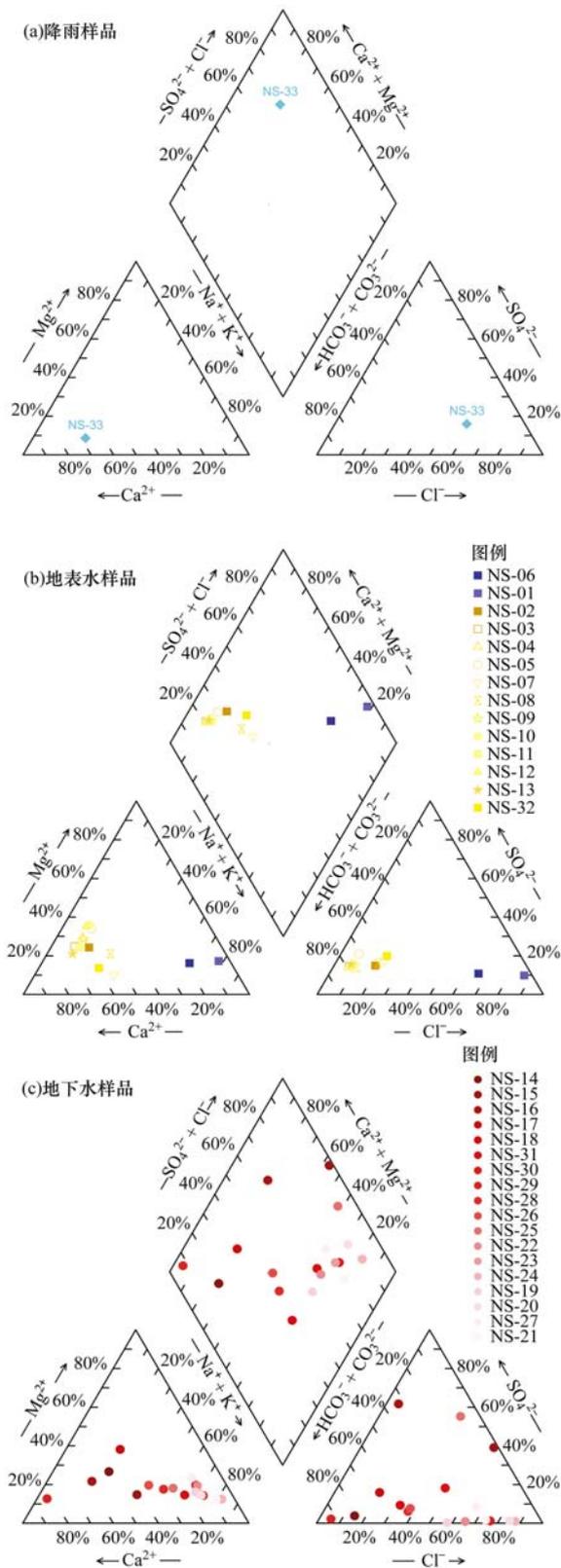


图2 大气降雨样品、地表水样品、地下水样品 Piper 三线图

Fig. 2 Piper trigram of rainfall, surface water, and groundwater samples

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,符合文献[28, 29]的标准 ( $\text{Cd}\leq 0.001\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ). 河流沉积物的理化性质以上横沥水道为界呈现空间差异(表1). 上横沥水道以北的河道沉积物为中性至弱碱性, pH 均值为 7.9, 有机质含量

很高, 均值为  $26.56\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , CEC 均值为  $9.2\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 总 Cd 均值为  $2.71\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 上横沥水道及以南河流沉积物为碱性, pH 均值为 8.8, 有机质含量相对较低, 均值为  $2.67\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , CEC 均值为  $2.98\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 总 Cd 含量较低, 为  $0.062\sim 0.39\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 均值为  $0.21\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 其中洪奇沥水道入海口、蒲州水道入海口及龙穴岛东入海口的河流沉积物 Cd 含量分别为  $0.23$ 、 $0.16$  和  $0.062\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 符合文献[30]中的第一类标准 ( $\text{Cd}\leq 0.5\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). 此外, 沙湾水道上游沉积物 Cd 含量为  $3.15\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 下游增加至  $4.32\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 上下游 pH 分别为 7.24 和 8.95, pH 增高能吸附更多的 Cd. 上横沥 pH 高达 9.04, 但 Cd 含量仅  $0.069\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 且上横沥水道以南河流沉积物均为碱性, 目前吸附的 Cd 含量较少, 表明上横沥水道及以南河流沉积物还有能吸附 Cd 的很大容量, 南沙区河流沉积物对海洋环境危害小, 对于海洋环境保护是有利的.

### 2.3 深层土壤特征

调查选取由 NW 向 SE 的 7 组深层剖面土壤进行土壤机械组成分析, 其中 NS-29 土壤质地为砂土, 砂粒占比 90% 以上, 土壤质地为砂土, 粒间孔隙大, 毛管作用弱, 通气透水性强, 内部排水通畅, 不易积聚还原性有害物质, 有机质分解快, CEC 与 SOM 均较低, pH 值呈弱碱性. 其余 6 组剖面在南沙区比较典型, 主要为黏土、黏壤土, 土壤机械组成变化相近(图3), 主要表现为 0~20 cm 及 20~50 cm 的土壤机械组成比例相似, 均属于壤质黏土, 往地表深处黏粒含量减少, 砂粒含量增多, 140~200 cm 以黏壤土为主, 少量为砂质黏壤土及砂质壤土; 土壤 pH 值 0~20 cm 通常较低, 大多呈弱酸性至中性, 5 层剖面由浅至深 pH 值中值分别为 6.57、7.45、7.68、7.95 和 7.99, 越往深处 pH 逐渐升高, 离散程度依次显著降低(图4), 地下水 pH 值基本在 0~20 cm 与 140~200 cm 埋深土壤 pH 之间(图5), 蕉门水道以北地下水埋深通常大于 1m, 地下水 pH 值与 90~140 cm 土壤 pH 值比较接近, 蕉门水道以南地下水埋深通常小于 0.5 cm, 地下水 pH 值与 20~50 cm 土壤 pH 值比较接近; 阳离子交换量(CEC)在 0~20 cm 较高, 5 层剖面由浅至深 CEC 中值分别为 15.35、15.05、13.00、11.25 和 10.85  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 越往深处 CEC 逐渐降低. 在 0~90 cm 深度的土壤有机质(SOM)含量大于 90~200 cm 深度的有机质. 土壤剖面 Cd 含量为  $0.18\sim 0.79\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 往地表深处 Cd 含量有降低趋势, 5 层剖面由浅至深 Cd 含量中值依次为 0.51、0.50、0.45、0.42 和 0.33  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 且离散程度逐渐减小, 表层耕作层 pH 值

表 1 各采样点河流沉积物基本化学特征

Table 1 Basic chemical characteristics of river sediments at each sampling point

采样点编号	河道	Cd /mg·kg <sup>-1</sup>	pH	CEC /cmol·kg <sup>-1</sup>	有机质 /g·kg <sup>-1</sup>
NS-06	珠江口(蒲州水道入海口)	0.16	8.93	2.58	1.87
NS-01	珠江口(龙穴岛东入海口)	0.062	8.89	2.41	1.81
NS-02	洪奇沥水道入海口	0.23	8.7	2.87	2.73
NS-03	洪奇沥水道	0.39	8.55	3.88	3.96
NS-04	下横沥水道	0.36	8.45	3.56	3.55
NS-05	上横沥水道	0.069	9.04	2.6	2.11
NS-32	蕉门水道	3.9	7.61	12.3	32.1
NS-10	容桂水道	2.23	7.2	12.6	55.2
NS-11	潭州水道	0.39	8.73	4.61	3.69
NS-12	顺德水道	2.26	7.82	7.27	20.6
NS-13	沙湾水道	3.15	7.24	16.2	38.3
NS-09	沙湾水道	4.32	8.95	2.22	9.48

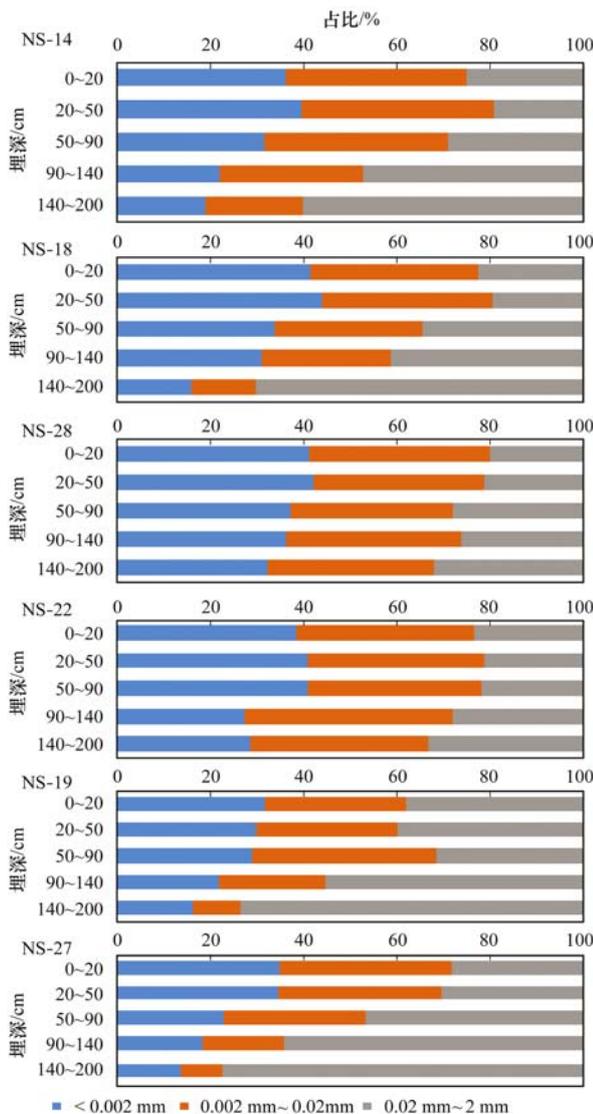


图 3 6 组剖面土壤机械组成百分比随深度变化条形图

Fig. 3 Bar chart of 6 groups of soil mechanical composition changes with depth

通常较低,为 4.4 ~ 7.5,均值为 6.3,表层耕作层土壤 Cd 含量超过文献[31]中农用地土壤污染风险筛选值( $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )<sup>[32]</sup>.

### 3 讨论

#### 3.1 影响总 Cd 分布特征的因素

为研究重金属 Cd 由陆相至海相深层土壤剖面分布格局,利用 MAPGIS 软件,将 NS-14 ~ NS-24 等 14 组剖面不同分层的土壤 Cd 含量采用 Kring 泛克里格法建立的 GRD 数学模型进行离散数据网格化,经高等级平滑等值线处理后绘制深层土壤剖面总 Cd 含量等值线示意图(图 6),由陆相至海相土壤中 Cd 含量有增加趋势,与 pH 值的变化相对应,靠近海相部分地下水 TDS 增加,pH 增大.由陆相至海相沉积物颗粒变细,镉元素含量在垂向上的变化规律与岩心沉积物粒度的变化有较好地对应,呈现为以砂性土为主的粗粒级沉积物中元素含量偏低,而在以黏性土为主的细粒级沉积物中元素富集规律<sup>[33]</sup>.

土壤对镉的吸附-解吸受土壤类型、土壤溶液组成及土壤化学及矿物学特性影响,包括 pH 值<sup>[34]</sup>、有机质含量<sup>[35]</sup>、阳离子交换量和铁锰氧化物含量等<sup>[36]</sup>.研究区深层土壤 pH、CEC 和 SOM 等基本化学性质与土壤机械组成中的黏土、粉砂和砂粒含量有极显著统计学差异.黏土占比与土壤 pH 呈中等负相关,相关系数为 -0.684,与 CEC、SOM 呈强相关,相关系数分别为 0.893、0.776;粉砂占比与土壤 pH 呈中等负相关,相关系数为 -0.647,与 CEC、SOM 呈强相关,相关系数分别为 0.867、0.861.海陆交互带土壤机械组成影响了土壤 pH、CEC 和 SOM 等基本化学性质,从而改变了 Cd 的迁移转化.本研究发现,区内 pH 对 Cd 的吸附-解吸有显著影响.尽管整体上土壤 Cd 含量随土壤埋深的增加而降低,但变化趋势可细分为两类(图 7),第一类土壤 Cd 含量在 0 ~ 20 cm 达到最大,并随埋深的增加依次降低,第二类表层土壤 Cd 含量低于 20 ~ 50 cm,土壤 Cd 含量在 20 ~ 50 cm 出现拐点,然

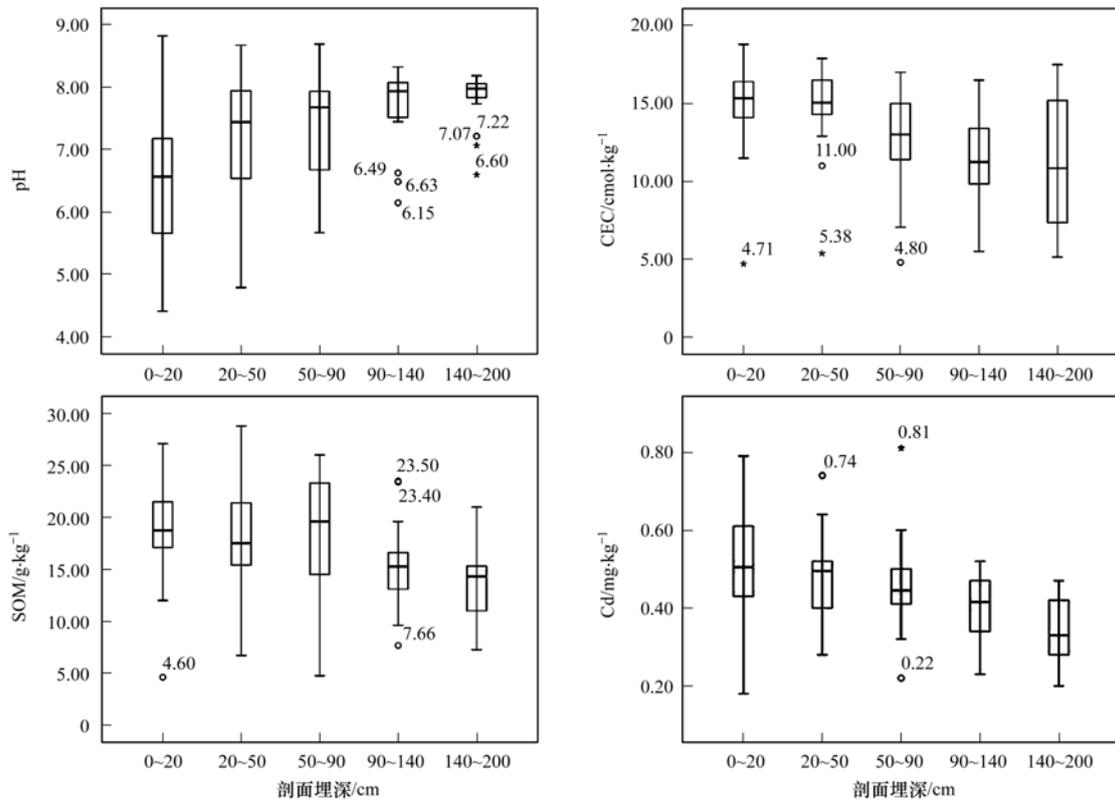


图 4 深层剖面不同深度土壤 pH、CEC、SOM 和 Cd 含量箱图

Fig. 4 Box diagram of soil pH, CEC and SOM at different depths in deep profiles

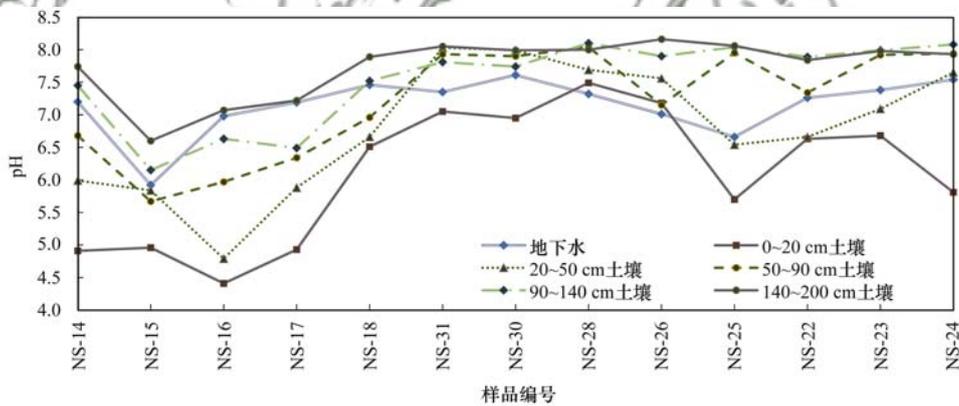


图 5 地下水 pH 与不同层土壤 pH 折线图

Fig. 5 Broken line comparison between groundwater pH and soil pH of different layers

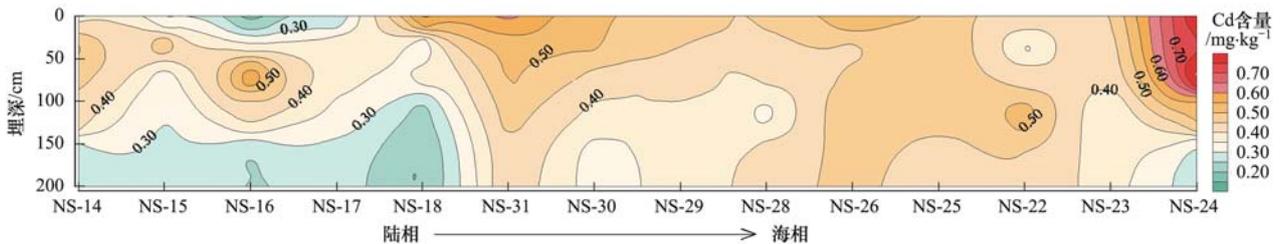


图 6 陆相至海相深层土壤剖面总 Cd 含量等值线示意

Fig. 6 Contour map of total Cd content in deep soil profiles from continental to Marine facies

后随埋深的增加依次降低。两种变化趋势的差异可以用 pH 值的差异来解释<sup>[37]</sup>，尽管两类土壤 pH 值均随土壤埋深的增加而增大，但第一类表层土壤 pH 值基本大于 6，而第二类 0~20 cm 土壤呈酸性，pH 均小于

5，浅层土壤对 Cd 的吸附量有限，导致 Cd 在垂向上的迁移量及迁移深度显著增加。

### 3.2 Cd 形态变化规律

如图 8 所示，河流沉积物吸附的 Cd 主要沉积

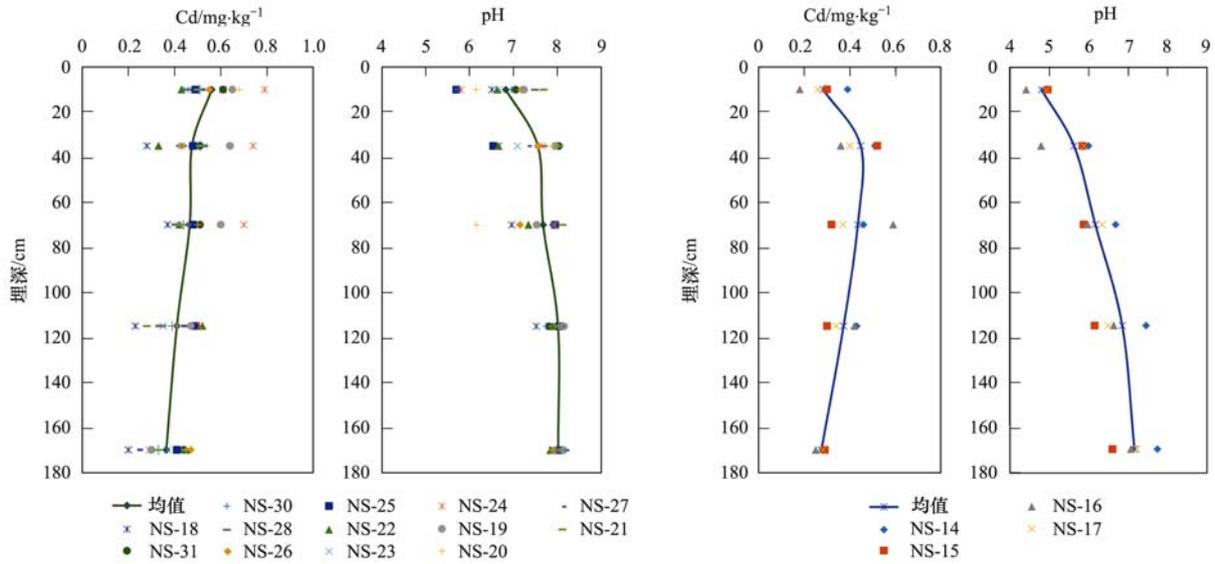


图7 深层土壤剖面 Cd 含量及 pH 随土壤埋深的两种变化趋势对比

Fig. 7 Comparison of two variation trends of Cd content and pH in deep soil profile

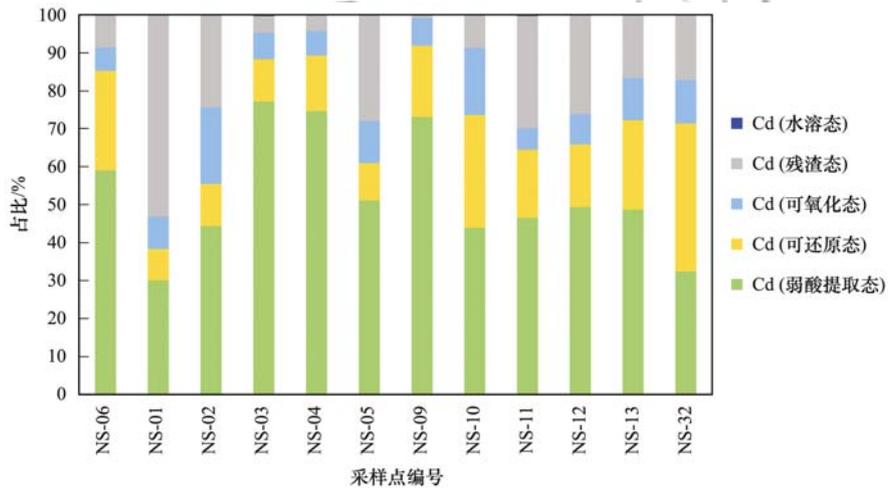


图8 各采样点河流沉积物 Cd 形态占比堆积柱状图

Fig. 8 Column chart of percentage accumulation of Cd fractions in river sediments at each sampling point

在上横沥以北,总 Cd 均值为  $2.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其中水溶态 Cd 占比极少,弱酸提取态 Cd 平均约占 49.6%,可还原态 Cd 平均占 23.4%,可氧化态 Cd 平均占 11.1%,残渣态 Cd 平均占 17.1%,水溶态及弱酸提取态组成的不稳定态占比高;上横沥及以南水道的河流沉积物中总 Cd 含量均值为  $0.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,水溶态 Cd 同样占比极少,弱酸提取态 Cd 平均约占 56.1%,可还原态 Cd 平均占 13.5%,可氧化态 Cd 平均占 9.9%,残渣态 Cd 平均占 20.3%.

土壤 Cd 中残渣态占比最大,其次是弱酸提取态、可还原态和可氧化态,水溶态占比最小,为 0.01%~1.97%,均值为 0.33%,其中埋深 0~20、20~50、50~90、90~140 和 140~200 cm 等 5 层剖面 Cd 含量均值分别为  $0.55\%$ 、 $0.47\%$ 、 $0.19\%$ 、 $0.13\%$  和  $0.15\%$ ,远小于其他 4 种形态的 Cd,因此不在图 9

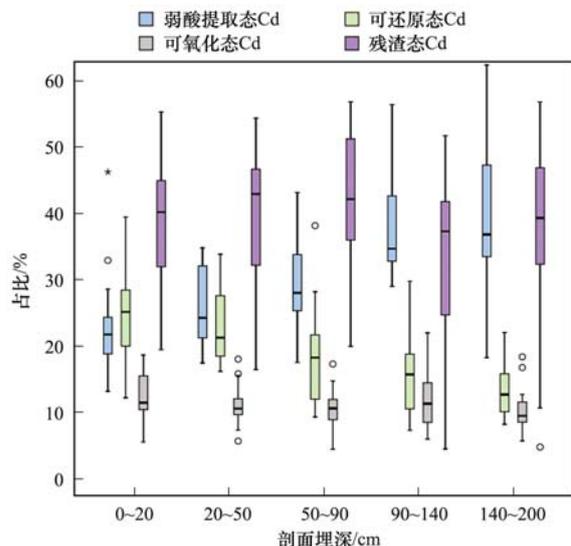


图9 深层剖面不同深度土壤 Cd 各形态箱图

Fig. 9 Box diagram of soil Cd fractions at different depths in deep profiles

中展示。土壤中残渣态 Cd 与可氧化态 Cd 变化趋势基本持平,残渣态 Cd 占比中值由表层至深层分别为 40.2%、43%、42.2%、37.3% 和 39.3%,可氧化态 Cd 占比中值由表层至深层分别为 11.5%、10.6%、10.6%、11.3% 和 9.5%;弱酸提取态 Cd 占比中值随剖面埋深的增加而增大,0~20 cm 弱酸提取态 Cd 占比中值为 21.8%,140~200 cm 升至 36.8%,与图 5 中 pH 的变化一致<sup>[38]</sup>;可还原态 Cd 占比中值随剖面埋深的增加而减小,0~20 cm 可还原态 Cd 占比中值为 25.2%,140~200 cm 降至 12.7%,与铁、锰含量的变化一致。

#### 4 结论

(1) 河流沉积物的理化性质以上横沥水道为界呈现空间差异,整体上北高南低,且上横沥水道及以南河流沉积物还有能吸附 Cd 的很大容量,南沙区河流沉积物对海洋环境危害小,有利于海洋环境保护。

(2) 0~2 m 土壤剖面 Cd 含量为 0.18~0.79 mg·kg<sup>-1</sup>,由陆相至海相土壤颗粒变细,Cd 含量有增加趋势。往地表深处 Cd 含量有降低趋势,离散程度逐渐减小。研究区内 pH 对 Cd 的吸附-解吸有显著影响,pH 小于 5 的土壤中 Cd 在垂向上的迁移量及迁移深度显著增加。

(3) 土壤 Cd 中残渣态占比最大,其次是弱酸提取态、可还原态和可氧化态,水溶态占比最小。土壤中残渣态 Cd 约占 40%,随埋深变化趋势基本持平,弱酸提取态 Cd 占比中值与 pH 的变化一致,均随剖面埋深的增加而增大;可还原态 Cd 占比中值与铁、锰含量的变化一致,随剖面埋深的增加而减小。

#### 参考文献:

- [1] Liao J B, Chen J, Ru X, *et al.* Heavy metals in river surface sediments affected with multiple pollution sources, South China: Distribution, enrichment and source apportionment[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, **176**: 9-19.
- [2] 韩志轩, 王学求, 迟清华, 等. 珠江三角洲冲积平原土壤重金属元素含量和来源解析[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(9): 3455-3463.  
Han Z X, Wang X Q, Chi Q H, *et al.* Occurrence and source identification of heavy metals in the alluvial soils of Pearl River Delta region, South China[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(9): 3455-3463.
- [3] 李勇, 余天虹, 赵志忠, 等. 珠三角土壤镉含量时空分布及风险管理[J]. *地理科学*, 2015, **35**(3): 373-379.  
Li Y, Yu T H, Zhao Z Z, *et al.* Prediction and risk management on geochemical accumulation of soil cadmium based on time-space model in Zhujiang River Delta[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, **35**(3): 373-379.
- [4] Zhou H Y, Peng X T, Pan J M. Distribution, source and enrichment of some chemical elements in sediments of the Pearl River Estuary, China[J]. *Continental Shelf Research*, 2004, **24**(16): 1857-1875.
- [5] Dou M, Zuo Q T, Zhang J P, *et al.* Influence of changes in hydrodynamic conditions on cadmium transport in tidal river network of the Pearl River Delta, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(9): 7501-7516.
- [6] Song M W, Huang P, Li F, *et al.* Water quality of a tributary of the Pearl River, the Beijiang, southern China; implications from multivariate statistical analyses[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **172**(1-4): 589-603.
- [7] Shaheen S M, Rinklebe J, Frohne T, *et al.* Redox effects on release kinetics of arsenic, cadmium, cobalt, and vanadium in Wax Lake Deltaic freshwater marsh soils[J]. *Chemosphere*, 2016, **150**: 740-748.
- [8] Peng C, Wang M, Chen W P. Modelling cadmium contamination in paddy soils under long-term remediation measures: Model development and stochastic simulations[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **216**: 146-155.
- [9] Xie Y F, Chen T B, Lei M, *et al.* Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: Accuracy and uncertainty analysis[J]. *Chemosphere*, 2011, **82**(3): 468-476.
- [10] Li Q Q, Wang C Q, Dai T F, *et al.* Prediction of soil cadmium distribution across a typical area of Chengdu Plain, China[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 7115.
- [11] Dong R Z, Jia Z M, Li S Y. Risk assessment and sources identification of soil heavy metals in a typical county of Chongqing Municipality, Southwest China[J]. *Process Safety And Environmental Protection*, 2018, **113**: 275-281.
- [12] Huang Y, Li T Q, Wu C X, *et al.* An integrated approach to assess heavy metal source apportionment in peri-urban agricultural soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **299**: 540-549.
- [13] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. *国土资源通讯*, 2014, (8): 26-29.
- [14] 罗琼, 王昆, 许靖波, 等. 我国稻田镉污染现状·危害·来源及其生产措施[J]. *安徽农业科学*, 2014, **42**(30): 10540-10542.  
Luo Q, Wang K, Xu J B, *et al.* Cadmium pollution situation, harm, source and production measures in paddy field of China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2014, **42**(30): 10540-10542.
- [15] 张红振, 骆永明, 章海波, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究 V. 镉在土壤-作物系统中的富集规律与农产品质量安全[J]. *土壤学报*, 2010, **47**(4): 628-638.  
Zhang H Z, Luo Y M, Zhang H B, *et al.* Study on soil environmental quality guidelines and standards V. Modeling of cadmium uptake in soil-crop systems for human food safety in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, **47**(4): 628-638.
- [16] 宋波, 王佛鹏, 周浪, 等. 广西高镉异常区水田土壤 Cd 含量特征及生态风险评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2443-2452.  
Song B, Wang F P, Zhou L, *et al.* Cd content characteristics and ecological risk assessment of paddy soil in high cadmium anomaly area of Guangxi[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2443-2452.
- [17] 孙慧, 郭治兴, 郭颖, 等. 广东省土壤 Cd 含量空间分布预测[J]. *环境科学*, 2017, **38**(5): 2111-2124.  
Sun H, Guo Z X, Guo Y, *et al.* Prediction of distribution of soil Cd concentrations in Guangdong province, China[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 2111-2124.
- [18] Li B, Xiao R, Wang C Q, *et al.* Spatial distribution of soil

- cadmium and its influencing factors in peri-urban farmland; a case study in the Jingyang District, Sichuan, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, **189**(1): 21.
- [19] 刘德龙. 重金属镉在上海浅地层中的纵向迁移吸附试验及模拟研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [20] 王锐, 胡小兰, 张永文, 等. 重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1864-1870.  
Wang R, Hu X L, Zhang Y W, *et al.* Bioavailability and influencing factors of soil Cd in the major farming areas of Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1864-1870.
- [21] He S R, Lu Q, Li W Y, *et al.* Factors controlling cadmium and lead activities in different parent material-derived soils from the Pearl River Basin[J]. *Chemosphere*, 2017, **182**: 509-516.
- [22] Chakraborty P, Babu P V R, Sarma V V. A study of lead and cadmium speciation in some estuarine and coastal sediments[J]. *Chemical Geology*, 2012, **294-295**: 217-225.
- [23] DZ/T 0064. 60-1993, 地下水水质检验方法 分光光度法测定亚硝酸根[S].
- [24] GB 8538-2016, 食品安全国家标准 饮用天然矿泉水检验方法[S].
- [25] DZ/T 0279. 1-2016, 区域地球化学样品分析方法 第 1 部分: 三氧化二铝等 24 个成分测定 粉末压片—X 射线荧光光谱法[S].  
DZ/T 0279. 1-2016, Analysis methods for regional geochemical sample-Part 1: determination of aluminum oxide etc. 24 components by pressed power pellets-X-ray fluorescence spectrometry[S].
- [26] NY/T 1121. 3-2006, 土壤检测 第 3 部分: 土壤机械组成的测定[S].
- [27] GB/T 25282-2010, 土壤和沉积物 13 个微量元素形态顺序提取程序[S].  
GB/T 25282-2010, Soil and sediment— Sequential extraction procedure of speciation of 13 trace elements[S].
- [28] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].  
GB 3838-2002, Environmental quality standards for surface water[S].
- [29] GB 3097-1997, 海水水质标准[S].  
GB 3097-1997, Marine water quality standard[S].
- [30] GB 18668-2002, 海洋沉积物质量[S].  
GB 18668-2002, Marine sediment quality[S].
- [31] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].  
GB 15618-2018, Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land[S].
- [32] 王锐, 张风雷, 徐妹妹, 等. 土壤重金属污染风险筛选值划分方法: 以 Cd 为例[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 5082-5089.  
Wang R, Zhang F L, Xu S S, *et al.* Method of dividing the value of soil heavy metal pollution risk screening: using Cd as an example[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 5082-5089.
- [33] 唐志敏, 侯青叶, 游远航, 等. 珠三角平原区第四系剖面重金属分布特征及其影响因素[J]. *地球科学进展*, 2017, **32**(8): 885-898.  
Tang Z M, Hou Q Y, You Y H, *et al.* Distribution characteristics and influencing factors of heavy metals in pearl river delta quaternary boreholes[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, **32**(8): 885-898.
- [34] 甲卡拉铁, 喻华, 冯文强, 等. 淹水条件下不同氮磷钾肥对土壤 pH 和镉有效性的影响研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(11): 3414-3421.  
Jia K L T, Yu H, Feng W Q, *et al.* Effect of different N, P and K fertilizers on soil pH and available Cd under waterlogged conditions[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(11): 3414-3421.
- [35] 周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 等. 几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 4011-4019.  
Zhou G Y, Jiang H M, Yang J C, *et al.* Effects of different organic materials on bio-availability of Cd, Pb in a contaminated greenhouse soil[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 4011-4019.
- [36] Loganathan P, Vigneswaran S, Kandasamy J, *et al.* Cadmium sorption and desorption in soils: a review[J]. *Critical Reviews In Environmental Science and Technology*, 2012, **42**(5): 489-533.
- [37] 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 等. 不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 4030-4043.  
Qin Y L, Xiong S J, Xu W H, *et al.* Effect of Nano zeolite on chemical fractions of Cd in soil and uptake by Chinese cabbage at different soil pH and cadmium levels [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 4030-4043.
- [38] Wang F T, Huang C S, Chen Z H, *et al.* Distribution, ecological risk assessment, and bioavailability of cadmium in soil from Nansha, Pearl River Delta, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16**(19): 3637.

## CONTENTS

Analysis of Pollution Characteristics and Primary, Secondary Contributions of Firework Burnings in Qingdao During the Spring Festival .....	FANG Tian-ge, YAO Xiao-hong, MENG He, <i>et al.</i> (4345)
Characterization and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> Based on the Online Observation in Tianjin .....	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Li-wei, <i>et al.</i> (4355)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> in Beijing During 2017-2018 .....	LI Huan, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4364)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM <sub>2.5</sub> in Southern Beijing .....	DONG Gui-ming, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4374)
Characteristics and Formation Mechanism of Three Haze Pollution Processes in Chengdu in Winter .....	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, YIN Han-mei, <i>et al.</i> (4382)
Distribution Characteristics and Source of Black Carbon Aerosols in the Northern Suburbs of Nanjing .....	XIE Feng, LIN Yu-chi, SONG Wen-huai, <i>et al.</i> (4392)
Assessment of Emergency Emission Reduction Effect During the Heavy Air Pollution Episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and Its Surrounding Area(“2+26” Cities) from October to December 2019 .....	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, WANG Wei, <i>et al.</i> (4402)
Variational Trend and Characteristics of Air Pollution in Baoding City .....	GOU Yin-yin, ZHANG Kai, LI Jin-juan, <i>et al.</i> (4413)
Emission Inventory of VOCs Components in Zhengzhou and Their Ozone Formation Potential .....	LU Xuan, ZHANG Rui-qin, HAN Luo-kai (4426)
Evolution and Evaluation of O <sub>3</sub> and VOCs in Zhengzhou During the National Traditional Games of Ethnic Minorities Period .....	ZHAO Jin-shuai, YU Shi-jie, WANG Nan, <i>et al.</i> (4436)
Characteristics of Volatile Organic Compounds in Wood Coatings and Automotive Coatings in China .....	KE Yun-ting, SUN Yu-hang, CHENG Hai-rong, <i>et al.</i> (4446)
Influence of Typical Desulfurization Process on Flue Gas Particulate Matter of Coal-fired Boilers .....	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, LÜ Rui-he, <i>et al.</i> (4455)
Investigation on the Emission Difference of Air Pollutants from Common Residential Coal Stoves and Suggestions for Emission Reduction .....	ZHANG Yi-chen, XUE Chen-li, LIU Jie, <i>et al.</i> (4462)
Mobile Source Emission Inventory with High Spatiotemporal Resolution in Tianjin in 2017 .....	LIU Geng, SUN Shi-da, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (4470)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollution Sources Based on Second Pollution Source Census Data in Sichuan Province .....	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (4482)
Preliminary Screening for the Urban Forest Against Combined Air Pollution .....	LI Pin, WEI Yan-yan, FENG Zhao-zhong (4495)
Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Plant Leaves in Baoji City .....	ZHANG Jun, LIANG Qing-fang, GAO Yu (4504)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Aquatic Organisms in Chaoshan Coastal Area along the South China Sea .....	XIU Cuo, WANG Chen-chen, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (4514)
Spatiotemporal Differentiation and Degradation Analysis of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments of Shanmei Reservoir and Its Inflowing River, Quanzhou, China .....	HAN Wen-liang, LIU Yu, FENG Kai-wen (4525)
Spatial-temporal Variations and the Regulators of Nitrate Status in Shallow Groundwater of the Typical Mountainous Agricultural Watershed in the Upper Reaches of the Yangtze River .....	JIANG Nan, ZHOU Ming-hua, LI Hong, <i>et al.</i> (4539)
Emission Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Typical Agricultural Small Watershed in Tuojiang River Basin .....	WANG Hong, XU Ya-ling, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4547)
Assessment of Potential Risk of Diffuse Pollution in Haihe River Basin Based Using DPERS Model .....	FENG Ai-ping, WANG Xue-lei, XU Yi, <i>et al.</i> (4555)
Impact of Spatial Heterogeneity of Precipitation on the Area Change in Critical Source Area of Non-point Sources Pollution .....	GAO Xiao-xi, ZUO De-peng, MA Guang-wen, <i>et al.</i> (4564)
Sedimentary Diatom Records Reveal the Succession of Ecosystem in Lake Xihu, Dali over the Past 50 Years .....	ZHANG Chen-xue, XU Min, DONG Yi-fan, <i>et al.</i> (4572)
Content and Distribution of Cadmium in Soil and Fluvial Sediments in the Sea-Land Interaction Zone .....	WANG Fang-ting, CHEN Zhi-hua, BAO Ke, <i>et al.</i> (4581)
Occurrence Characteristics and Quality Estimation of Microplastics in Drainage Ditches in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia .....	WANG Zhi-chao, YANG Fan, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (4590)
Influence of Pervious/Impervious Pattern on Runoff and Pollution in Parcel-based Catchment .....	JIANG Zhi-hui, LIAO Yun-jie, XIE Wen-xia, <i>et al.</i> (4599)
Activating Efficiency of Iron-copper Bimetallic Organic Framework MIL-101(Fe, Cu) Toward H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> for Degradation of Dyes .....	LIANG He, LIU Rui-ping, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (4607)
Synergistic Reaction Mechanism of Cu <sup>0</sup> @Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Activated PMS for Degradation of <i>p</i> -nitrophenol .....	SHI Qing-qing, PU Sheng-yan, YANG Xi (4615)
Kinetics and Mechanism of Sucralose Degradation in Water Using UV-activated Persulfate Process .....	YU Yun, LU Jin-xin, LÜ Zhen, <i>et al.</i> (4626)
Microbial Community Structure for Sewage Wastewater Treatment Plants in Winter .....	SHANG Yue-fei, WANG Shen, ZONG Ni, <i>et al.</i> (4636)
Microbial Community Analysis of Different DN and PN-ANAMMOX Coupling Modes for Mature Landfill Leachate Treatment .....	LU Ming-yu, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4644)
Analysis of Rapid Start-up and Mixed Nutritional Nitrogen Removal Performance of Complete Autotrophic Granular Sludge .....	QI Ze-kun, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4653)
Long-term Stability of Aerobic Granular Sludge Under Low Carbon to Nitrogen Ratio .....	YUAN Qiang-jun, ZHANG Hong-xing, CHEN Fang-yuan (4661)
Response of Bacterial and Fungal Communities to Chemical Fertilizer Reduction Combined with Organic Fertilizer and Straw in Fluvo-aquic Soil .....	WU Xian, WANG Rui, HU He, <i>et al.</i> (4669)
Characteristics of Soil Nutrients and Fungal Community Composition in Crop Rhizosphere Under Different Rotation Patterns .....	SUN Qian, WU Hong-liang, CHEN Fu, <i>et al.</i> (4682)
Effects of Short-term Application of Moutai-flavor Vinasse Biochar on Nitrogen Availability and Bacterial Community Structure Diversity in Yellow Soil of Guizhou Province .....	ZHANG Meng, LIU Yan-ling, WEI Quan-quan, <i>et al.</i> (4690)
Effects of Different Rotation Patterns of Oil-Rice on Methane and Nitrous Oxide Emissions in Rice Fields .....	CHEN You-de, ZHAO Yang, GAO Du-juan, <i>et al.</i> (4701)
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> Biofertilizer Mitigating Soil Ammonia Volatilization .....	YANG Ya-hong, XUE Li-xia, SUN Bo, <i>et al.</i> (4711)
Effects of Exogenous Phosphorus on Rice Growth and Cadmium Accumulation and Transportation Under Cadmium Stress .....	HUO Yang, QIU Yin-yan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4719)
Key Stage of As Accumulation in Rice Under As Stress at Different Growth Stages .....	DENG Peng-hui, CAI Ya-qin, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4726)
Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Corn Grains from a Pb-Zn Mining Area .....	ZHOU Yan, WAN Jin-zhong, LI Qun, <i>et al.</i> (4733)
Polybrominated Diphenyl Ether in E-waste Dismantling Sites in Taizhou City, Zhejiang Province: Concentration, Distribution, and Migration Trend .....	WEI Bao-kai, LIU Chen, WANG Ying, <i>et al.</i> (4740)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils in Southern Youyang County, Chongqing .....	WANG Rui, DENG Hai, YAN Ming-shu, <i>et al.</i> (4749)
Ecological Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Livestock Manure and Vegetable Soil of Chongqing .....	PENG Qiu, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong (4757)