

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM_{2.5}污染防治的健康效益评估 张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震(513)

区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估 武文琪, 张凯山(523)

2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估 姚森, 张晗宇, 王晓琦, 杨书申(534)

广州市2020年春节烟花爆竹燃放对空气质量的影响 裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅(546)

长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性 夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青(556)

南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析 张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗(564)

天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征 丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂(574)

输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析 张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖(584)

洛阳市秋冬季PM_{2.5}中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价 齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青(595)

郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析 王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩(604)

基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案 李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦(616)

汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析 叶露, 邵菁菁, 俞华明(624)

兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估 郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强(634)

2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析 李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政(643)

珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价 王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩(653)

乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险 史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新(663)

乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系 王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴(673)

张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响 王维, 李叙勇(681)

三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因 杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷(688)

巢湖沉积物氮磷分布及污染评价 王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平(699)

巢湖南淝河口底泥污染特征及疏浚决策 杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌(712)

氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响 徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇(723)

降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响 陈敏, 许浩霆, 王雪竹, 肖尚斌(732)

典型喀斯特河流水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素 刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂飞, 刘文胜(740)

江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状 王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶(749)

尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征 黄福义, 朱永官, 苏建强(761)

涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析 郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生(766)

天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析 何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良(776)

秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响 张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏(786)

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性 张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟(796)

浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响 黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强(808)

松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应 于宗良, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟(819)

汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测 韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅(831)

两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物 李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢惠君, 胡振, 张建(842)

人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除 周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕(850)

紫外氯胺组合消毒供水系统中病毒微生物的分布特征 韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧(860)

高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除 孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江(867)

胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性 汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中(874)

电凝聚臭氧氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析 谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康(883)

微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制 陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒(891)

河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌(900)

南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价 陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗(909)

复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果 丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江(917)

石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田 李光辉, 成晴, 陈宏(925)

叶面喷施纳米MnO₂对水稻富集镉的影响机制 周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣(932)

典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价 王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞(941)

辣椒果实高中低镉积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较 邵晓庆, 贺章味, 徐卫红(952)

4种草本植物对镉的富集特征 陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄(960)

不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征 熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王莹燕, 王子芳, 高明(967)

降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响 高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎(977)

水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征 林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水(988)

铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响 葛艺, 徐国民, 徐绍辉, 徐艳(996)

臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物化合物的影响 李品, 周慧敏, 冯兆忠(1004)

颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述 李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷(1013)

《环境科学》征订启事(522) 《环境科学》征稿简则(722) 信息(748, 899, 924)

珠江三角洲海陆交互相沉积物中镉生物有效性与生态风险评价

王芳婷¹, 包科², 陈植华¹, 黄长生^{3*}, 张彩香¹, 赵信文³, 刘学浩³

(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(Cd)污染对人类健康构成威胁,开展Cd生物有效性研究及生态风险评价,有助于防治和减轻Cd的危害. 通过分析海陆交互相土壤中的Cd含量及形态,揭示了土壤Cd的富集特征及变化规律,通过累积指数法(I_{geo})、潜在生态危害指数法(E_r)和风险评估编码法(RAC),对Cd的环境生态风险进行了评价. 结果表明:①杂填土中Cd含量通常低于 $0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,素填土中Cd含量通常高于 $0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,海相沉积物Cd平均含量为 $0.36 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,5 m以浅海相沉积物中Cd含量通常比5 m以深更高,陆相沉积物中Cd含量显著低于海相沉积物,Cd平均含量为 $0.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;②人工填土层(Q_4^{ml})土壤Cd与CEC存在中度相关,相关系数为0.52($P < 0.05$),海相沉积物Cd含量与有机质含量存在低度相关,相关系数为0.49($P < 0.05$),镉全量及土壤理化性质均对土壤镉的形态分布的影响显著;③人工填土层和海相沉积物土壤地质累积指数以 $1 < I_{geo} < 2$ 为主,均属于中度污染,人工填土层和海相沉积物土壤潜在生态危害指数以 $80 < E_r < 160$ 为主,存在较高潜在生态危害,各钻孔土壤酸可提取态Cd在总Cd中所占的比例均值均大于50%,普遍存在极高潜在生态风险. 这些结果将为环境和农业决策提供良好的依据,为土壤污染调查和修复提供理论指导.

关键词: 土壤镉; 影响因素; Cd形态; 生态风险评价; 广州南沙

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0653-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007140

Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta

WANG Fang-ting¹, BAO Ke², CHEN Zhi-hua¹, HUANG Chang-sheng^{3*}, ZHANG Cai-xiang¹, ZHAO Xin-wen³, LIU Xue-hao³

(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 (Cd) pollution poses a threat to human health, and research on Cd bioavailability as well as its ecological risk assessment can help prevent and mitigate Cd hazards. The enrichment characteristics and variability of Cd were investigated in sea-land interaction soil fractions and the associated environmental and ecological risks were evaluated using the accumulation index (I_{geo}), potential ecological hazard index (E_r), and risk assessment coding (RAC). The results showed that: ① The Cd content of miscellaneous fill material was typically lower than $0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and that of plain fill was higher than $0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. The Cd content of marine sediment was significantly higher than that of continental sediments, averaging 0.36 and $0.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. The concentration of Cd in marine sediments buried at shallow depths ($< 5 \text{ m}$) was generally higher than at greater depths ($> 5 \text{ m}$). ② There was a moderate correlation between Cd and CEC in artificial fill (Q_4^{ml} ; correlation coefficient = 0.52, $P < 0.05$). There was a weak correlation between Cd and organic matter in the marine sediments (correlation coefficient = 0.49, $P < 0.05$). Total cadmium and the physical and chemical properties of soil had a significant influence on the fraction of soil cadmium. ③ The I_{geo} of artificially fill and marine sediment was dominated by the relationship $1 < I_{geo} < 2$, which indicated a moderate level of pollution. The E_r of artificial fill and marine sediment was mainly $80 < E_r < 160$, indicating a high potential ecological hazard. Soil acid-extractable Cd accounted for more than 50% of the total Cd in each drill hole, which generally indicated a very high potential ecological risk. These results provide a basis for environmental and agricultural decision-making and provide theoretical guidance for soil pollution investigations and remediation.

Key words: Soil cadmium; influencing factors; Cd fractions; ecological risk assessment; Nansha of Guangzhou city

我国土壤镉(Cd)污染耕地面积达 $1.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$,涉及11个省市的25个地区^[1]. 植物吸收污染土壤中的Cd并在植株体内大量积累,进而通过可食部分进入食物链^[2],人们长期过量地摄入Cd会使人体受到损伤^[3,4],越来越多的证据表明,环境中Cd的暴露与癌症发病率的增加有关^[5,6]. 珠三角由

于污灌、大气沉降、工矿企业固体废弃物堆积浸染以

收稿日期: 2020-07-14; 修订日期: 2020-08-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1800800); 中国地质调查局武汉地质调查中心广州多要素城市地质调查项目(DD20190291)

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

及农用物资使用使 Cd 不断输入至农田^[7],导致耕地 Cd 污染呈加剧趋势,珠江三角洲主要经济区土壤环境质量较差,大部分区域为三级土壤及劣三级土壤,面积达9 298.3 km²,毒害元素以 Cd、Hg、As、Cu 和 F 为主^[8]. 与此同时,珠三角地区农业活动频繁,降雨丰富,非饱和带和含水层系统中的地下水及土壤容易受降雨、灌溉和季节等活动影响^[9],从而影响 Cd 的富集及生物有效性. 许多有关 Cd 在土壤中的赋存形态及其生物有效性的研究表明,Cd 在土壤中的性状除与其总量有关外,主要取决于其在土壤环境中的赋存形态^[10,11],Cd 在生态系统和土壤环境中的赋存形态是决定其迁移转化速率快慢及其环境生态效应、生物有效性高低的最关键因素^[12,13],明确重金属在土壤环境中的形态意义重大. 另一方面,海陆交互沉积环境的 pH、Eh、水动力条件和有机质等因素相对陆相均有显著差异,通常对在陆相条件下稳定迁移的元素构成地球化学障,导致元素在海陆交互环境中发生沉淀而富集^[14]. 近年来有关土壤重金属 Cd 吸附-解吸、迁移转化的研究对象多为耕地表层土壤,往往忽略了不同沉积环境下土壤土体性质,而要防治和减轻珠江三角洲海陆交互带重金属 Cd 的危害,急需对不同沉积环境下土壤 Cd 生物有效性及生态风险进行评价.

本文以南沙核心区为研究区开展野外钻孔采样和实验室样品分析,目标是量化和揭示南沙区海陆交互不同土层中重金属 Cd 的空间分布格局,分析影响 Cd 全量及形态分布的因素,评价研究区海陆交互不同土层中土壤 Cd 的环境生态风险,以为环境和农业决策提供很好的依据,并为土壤污染调查和修复提供理论指导.

1 材料与方法

1.1 研究区域

钻孔采样点位于南沙区,是广东省广州市市辖区,位于广州市最南端,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. 南沙区网状水系发育,受人类活动干扰强烈. 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 1 646.9 mm,年雷暴日数为 78.3 d,属于强雷暴区. 主要由平原和丘陵岗地地貌组成,其中平原区分布面积广,约 540 km²,占南沙陆域面积的 94%,属于珠江三角沉积地貌单元,地形平坦,地势起伏小,海拔高程一般小于 3 m,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. 丘陵岗地地貌主要集中分布于黄山鲁、黄阁、大岗地区,最高海拔 295.3 m,分布面积小,约 30 km²,仅占南沙陆域面积的 6%.

1.2 样品采集与测试分析

为明确南沙区第四系海陆交互沉积物中 Cd 含量聚集差异及形态变化特征,本文选取了 6 个岩心进行分层取样,采样过程随工程钻探施工同步进行,采样点分布如图 1. 岩心取样包括人工填土层、海相沉积物和陆相沉积物,各采样点坐标及土样埋深见表 1.



图 1 南沙区采样点位置示意

Fig. 1 Location map of sampling points in Nansha District

表 1 钻孔岩心采样点坐标及土样埋深

Table 1 Borehole sampling point coordinates and soil sample burial depths

采样点编号	经度(E)	纬度(N)	土样埋深/m
NSGC03	113°22'59.90"	22°51'58.76"	0.7、1.15、1.7、2.5、5、10 和 15
NSGC10	113°25'42.00"	22°44'53.00"	0.1、0.35、0.7、1.15、1.7、2.5、5、10、15、25 和 34.2
NSGC12	113°27'51.90"	22°48'09.09"	0.1、0.35、1.15、1.7、2.5、5、10、15 和 19.8
NSGC21	113°30'46.32"	22°45'35.50"	0.1、0.35、0.7、1.15、1.7、2.5、5、10、15 和 22.7
NSGC23	113°33'38.45"	22°41'15.39"	0.1、0.35、1.15、2.5、5、10、15、20 和 23.5
NSGC31	113°38'36.18"	22°36'03.02"	0.1、0.35、0.7、5、10、15、25 和 32.3

所有土壤样品在实验室内自然风干,磨碎后过 2 mm 筛,测定物理化学指标,包括土壤的 pH

值、有机质、阳离子交换容量(CEC)以及 Cd 的全量和形态,部分土壤测定土壤机械组成. pH 值参

照文献[15],用酸度计测出,检出限 0.01; 有机质参照文献[16]测出,检出限 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; CEC 参照文献[17]测出; 土壤机械组成根据国际制土壤质地分类,将土粒分为以下 3 种:黏粒粒径 $< 0.002 \text{ mm}$,粉砂粒粒径 $0.002 \sim 0.02 \text{ mm}$,砂粒

粒径 $0.02 \sim 2 \text{ mm}$,参照文献[18]; Cd 全量参照文献[19],用等离子体质谱仪测定,检出限为 $0.02 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; Cd 的形态采用连续萃取法测定^[20],所用仪器为电感耦合等离子体质谱仪,具体操作方法见表 2.

表 2 研究区不同深度土壤中 Cd 的顺序提取方法^[20]

Table 2 Sequential extraction methods for Cd at different soils depth

步骤	形态	提取试剂	操作说明
L1	弱酸提取态	40 mL 0.11 mol·L ⁻¹ 乙酸溶液	16 h 往复自动振荡器振荡 [(180 ± 20) r·min ⁻¹ , (22 ± 5) °C], 20 min 离心机离心 (3 000g)
L2	可还原态	40 mL 0.5 mol·L ⁻¹ 盐酸羟胺溶液	16 h 往复自动振荡器振荡 [(180 ± 20) r·min ⁻¹ , (22 ± 5) °C], 20 min 离心机离心 (3 000g)
L3	可氧化态	10 mL 过氧化氢 (pH = 2 ~ 3) / 2 次, 50 mL 1 mol·L ⁻¹ 乙酸铵溶液	1 h 可调节式电热恒温水浴锅消化 / 2 次 [(85 ± 2) °C], 16 h 往复自动振荡器振荡 [(180 ± 20) r·min ⁻¹ , (22 ± 5) °C], 20 min 离心机离心 (3 000g)
L4	残渣态	盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸混合酸	可调节式电热恒温水浴锅水浴 (60 °C)
L0	水溶态	20 mL 纯净水 (pH = 7)	16 h 往复自动振荡器振荡 [(180 ± 20) r·min ⁻¹ , (22 ± 5) °C], 30 min 离心机离心 (4 500g)

1.3 评价方法

1.3.1 累积指数法 (I_{geo})

Müller 于 1969 年^[21]最初提出的地理累积指数 (geoindex, I_{geo}),对沉积物中的金属污染程度进行了评估,并广泛用于研究土壤、沉积物和粉尘中金属富集程度^[22-24]. I_{geo} 值由以下等式定义^[25]:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{C_n}{k B_n}$$

式中, C_n 表示样品中测量到的金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), B_n 表示金属的地球化学底值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 引入因子 k ($k = 1.5$) 是为了减小背景值可能变化的影响, 背景值可能是人为因素造成的. I_{geo} 由 7 类组成, 其中: $I_{\text{geo}} \leq 0$, 未受污染; $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$, 轻度污染; $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$, 中度污染; $2 < I_{\text{geo}} < 3$, 中度-重度污染; $3 \leq I_{\text{geo}} < 4$, 重度污染; $4 \leq I_{\text{geo}} < 5$, 重度-极度污染; $I_{\text{geo}} \geq 5$, 极度污染.

1.3.2 潜在生态危害指数法 (E_r)

潜在生态危害指数法 (potential ecological risk index, E_r) 以沉积学理论为基础, 最初由 Hakanson^[26] 提出, 不仅考虑了各元素的富集程度, 还考虑了其独特的毒性和综合生态危害^[27,28]. E_r 值计算方法如下^[29]:

$$E_r = \frac{C_i}{B_i} T_0$$

式中, T_0 为毒性因子, 假设 Cd 为 30, C_i 为土壤中 Cd 的测量含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), B_i 为土壤中 Cd 的地球化学背景含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 然后将 E_r 分为: 低危害 ($E_r < 40$)、中等危害 ($40 \leq E_r < 80$)、较高危害 ($80 \leq E_r < 160$)、高危害 ($160 \leq E_r < 320$)、非常高潜在生态危害 ($E_r \geq 320$)^[29,30].

1.3.3 风险评估编码法

Perin 等^[31]于 1985 年提出了风险评估编码法 (risk assessment code, RAC), 目前该方法已广泛应用于土壤 (沉积物) 潜在环境风险评估^[32]. RAC 法以化学形态分析为基础, 一般根据其可能被生物利用部分所占比例, 判定其所具有的环境风险性, 具体由以下公式定义^[33]:

$$\text{RAC} = \frac{A_i}{T_i} \times 100\%$$

式中, A_i 表示土壤 Cd 形态中酸可提取态含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), T_i 表示土壤 Cd 总量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 风险评估编码法 (RAC) 将重金属生态风险分为 5 级: 比值小于 1%, 为无风险; 比值 1% ~ 10%, 为低风险; 比值 11% ~ 30%, 为中等风险; 比值 31% ~ 50%, 为高风险; 比值大于 50%, 为极高风险.

1.4 数据分析

使用 Excel 2010 (Redmond, WA, USA) 进行描述性统计分析, 变异系数 (CV) 是标准差与均值的比值, 它反映了某一属性在每个采样点的平均变异程度. 一般认为总样本在 CV 小于 10% 时空间变异性较低, 在 10% ~ 100% 时空间变异性一般, 在 CV 大于 100% 时空间变异性较强^[34]. 使用 IBM SPSS Statistics (20.0.0 版本) 进行相关性分析.

2 结果与分析

2.1 海陆交互土壤基本理化性质

钻孔揭示的第四系沉积物类型及其特征如下: 人工填土 (Q_4^{ml}) 分为素填土和杂填土, 均是以粉质黏土为主, 干强度中等. 海相沉积物 (Q_4^{m}) 主要揭示两类: ① 灰色淤泥质粉质黏土, 饱和、流塑-软塑、

有砂质感,切面稍光滑,干强度低,局部为淤泥质粉砂;②灰色淤泥层,饱和、流塑-软塑、局部含有较多牡蛎壳或贝壳碎屑。冲-洪积层(Q^{al+pl})主要揭示3类:①灰色黏土,湿、可塑、切面光滑、干强度高;②灰色和褐黄色砾砂,主要成分为石英,磨圆度好、呈次圆状、分选性好;③灰白色中砂,主要成分为石英,磨圆度好、呈次圆状、分选性好。残积层(Q^{el})主要揭示两类:①褐黄色和褐红色砂质黏性土,湿、坚硬、成分以粉质黏土为主,含较多石英砂砾;②青灰-橘红色砾质黏性土,硬塑、局部可见少量未风化石英颗粒,干强度高(图2)。

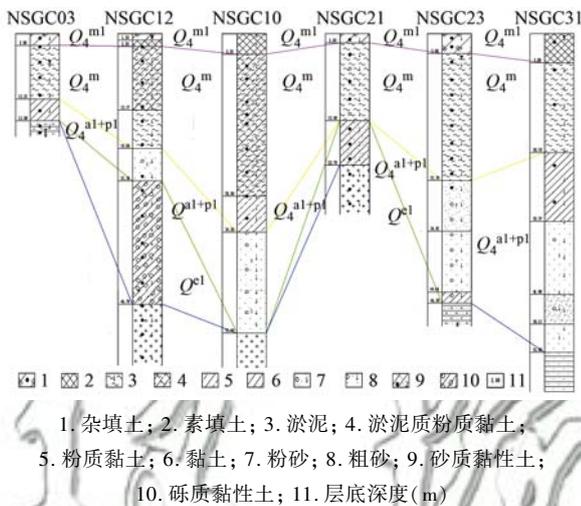


图2 海相沉积物剖面示意

Fig. 2 Profile of marine sediments

研究区内的6个钻孔揭示的人工填土层(Q_4^{ml})为地表至地表以下埋深1.6~5.0m,海相沉积物(Q_4^m)为埋深1.6~5.0m至埋深11.25~34.2m,两种土层采集的样本数分别为24组和25组,为分析两层土壤基本理化性质之间的差异性,绘制了四分位距(interquartile range, IQR)箱图(图3),结果显示,海相沉积物阳离子交换量(CEC)与有机质含量普遍高于人工填土层,其中 Q_4^{ml} 和 Q_4^m 土壤CEC变异系数分别为43.8%和30.0%, Q_4^{ml} 和 Q_4^m 土壤有机质变异系数分别为60.9%和42.95%。土壤机械组成中,人工填土层黏土含量(<0.002 mm)及粉砂含量(0.002 mm~ 0.02 mm)均低于海相沉积物,砂含量(0.02 mm~ 2 mm)显著高于海相沉积物。 Q_4^{ml} 与 Q_4^m 土壤CEC、有机质与土壤机械组成空间变异性均属于一般,人工填土层土壤基本理化性质空间变异性稍强。陆相沉积物采集的样本数为5组,CEC与有机质均低于人工填土和海相沉积物,均值分别为 7.86 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 6.74 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤机械组成中粒径 <0.002 mm的颗粒平均占17.9%,粒径 0.002 ~ 0.02 mm的颗粒平均占18.2%,粒径 0.02 ~ 2 mm的颗粒平均占63.9%。

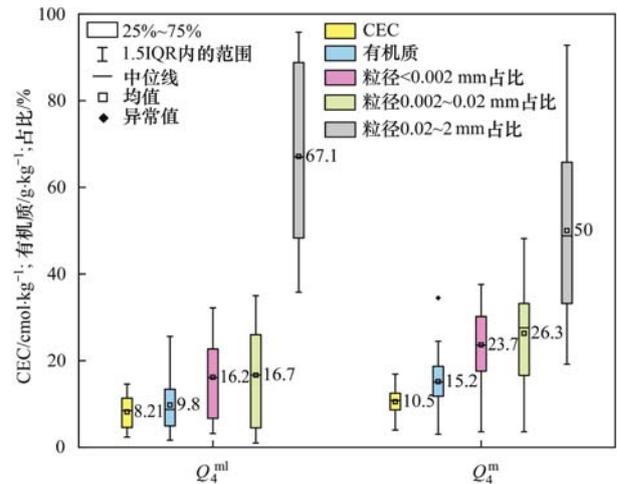


图3 Q_4^{ml} ($n=24$)和 Q_4^m ($n=25$)不同地层CEC、有机质及土壤机械组成对比箱图

Fig. 3 Comparison box diagram of CEC, organic matter, and soil machinery composition between Q_4^{ml} ($n=24$) and Q_4^m ($n=25$)

mm~2 mm的颗粒平均占63.9%。

2.2 海陆交互相沉积物Cd的富集特征

各钻孔不同埋深Cd含量如图4所示,人工填土层共有24组,Cd含量为 0.07 ~ 0.77 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量为 0.37 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数51%,其中Cd含量低于 0.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土样有10组,主要取自编号NSGC03、NSGC21和NSGC23的钻孔,岩土类型为杂填土,其主要成分除粉质黏土外,还有碎石、砖块等;而Cd含量超过 0.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土样有14组,主要取自编号NSGC12、NSGC10和NSGC31的钻孔,岩土类型为素填土,主要成分为粉质黏土,是南沙区发展种植业主要耕作土。钻孔中共有25组土样为海相沉积物,Cd含量为 0.08 ~ 0.65 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量为 0.36 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数44%,5m以浅海相沉积物中Cd含量通常比5m以深更高。陆相沉积物中Cd含量显著低于海相沉积物,Cd含量为 0.03 ~ 0.24 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量为 0.10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数73%。

2.3 海陆交互相土壤Cd形态特征

学界一致认为,土壤重金属对人类和环境的危害作用不仅取决于其总含量,而且主要取决于其存在的化学成分。重金属离子进入土壤后,大部分与其中的无机、有机组分发生吸附、络合和沉淀等作用,形成弱酸提取态、可还原态和可氧化态等形式,只有少部分以水溶态存在,水溶态可有效地影响土壤微生物的代谢活性^[35,36]。各组分对总含量的贡献率如图5,在所有岩心剖面中弱酸提取态Cd占比最高,为25.8%~72.5%,均值为55.6%,变异系数为15.4%,属中等空间变异性;其次是可还原态Cd,占比为13.1%~37.2%,均值为23.9%,变异系数为25.1%,属中等空间变异性;水溶态占比最小,仅占

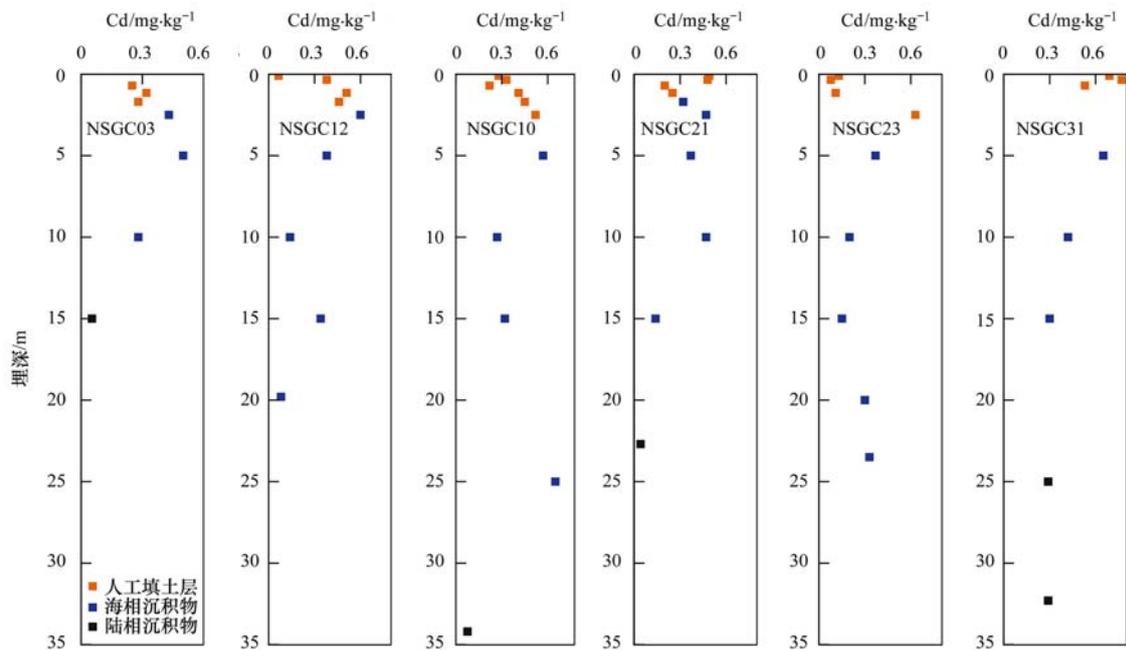


图4 各钻孔海陆交互土壤 Cd 含量散点图

Fig. 4 Soil Cd content diagram of each borehole

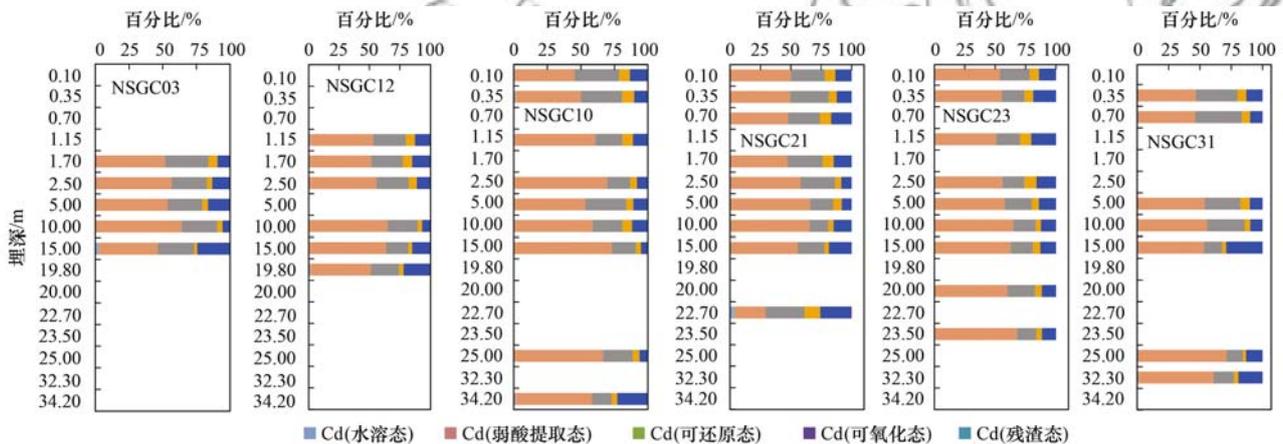


图5 各岩心重金属 Cd 元素形态百分比堆积

Fig. 5 Accumulation of Cd fractions percentage in each core

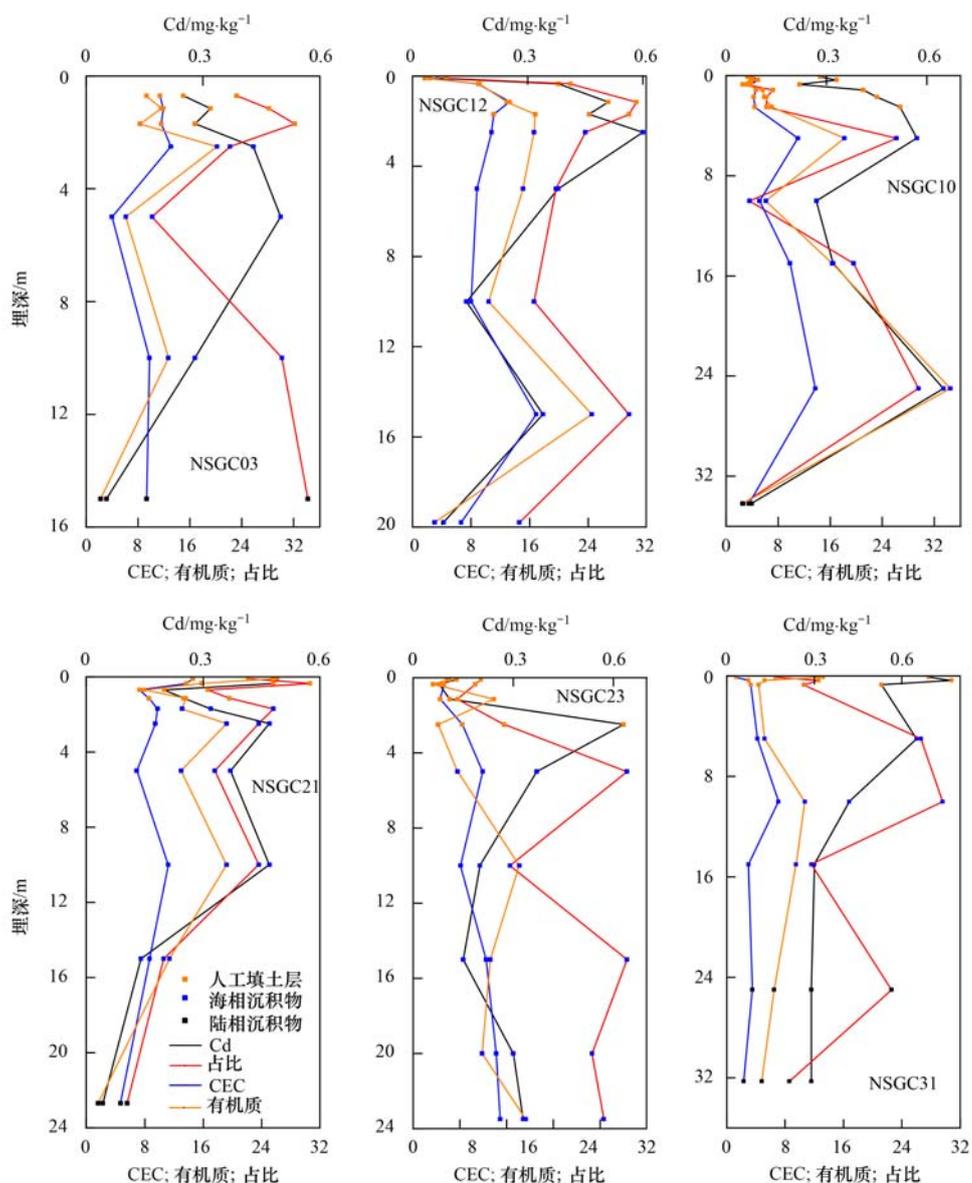
0.1%~3.2%, 变异系数为 78%, 同样属于中等空间变异性, 但比其它 4 种形态变异性强。环境中重金属的水溶态和弱酸结合态对环境的变化较为敏感, 活动性较强, 更易迁移, 而可还原态、可氧化态和残渣态在环境中的性质相对稳定, 其活动性较弱, 因此, 用水溶态、弱酸提取态之和的比例来表征元素的不稳定性, 称为不稳定 Cd。南沙区人工填土层及海相沉积物中不稳定 Cd 占总 Cd 的比例范围是 29%~73%, 平均占比 56.3%, 沉积物中的 Cd 具有很强的活性。

3 讨论

3.1 影响 Cd 含量及形态分布的因素

窦磊等^[37]在多目标地球化学调查工作成果的基础上对海陆相沉积的元素含量特征进行了归纳, 发现偏海相的沉积环境下大部分元素含量较高, 而

以陆相为主的沉积环境中元素含量偏低。大多数人认为 pH 变化是影响 Cd 迁移转化的最重要因素之一^[10], 但由于本次钻孔采集样品中测试土壤样品酸碱度基本呈中性-弱碱性, pH 与 Cd 含量相关系数虽然均为负值, 相关性却不显著。南沙区内各钻孔土样 Cd 含量、黏土百分比、阳离子交换量 (CEC) 和有机质变化情况如图 6 所示, 人工填土层土壤 Cd 含量变化曲线与 CEC 接近, 二者存在中度相关, 相关系数为 0.52 ($P < 0.05$), 与土壤有机质含量和黏土、粉砂占比相关性不显著, CEC 与有机质存在中度相关, 与黏土占比和粉砂占比存在高度相关, 相关系数分别为 0.76、0.91 和 0.91, ($P < 0.01$)。海相沉积物以弱碱性为主, Cd 含量与 pH 相关性不显著, 其变化曲线与有机质含量和粉砂占比较接近, 存在低度相关, 相关系数分别为 0.49 和 0.39 ($P < 0.05$),



CEC 单位为 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$; 有机质单位为 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 占比对应 $D < 0.002 \text{ mm}$, 单位为%

图 6 各钻孔土样 Cd 总量与黏土百分比、阳离子交换量 (CEC) 和有机质含量对比

Fig. 6 Comparison of total Cd in soils alongside clay percentage, cationic exchange capacity (CEC), and organic matter content

与 CEC 相关性不显著。

人工填土层土壤弱酸提取态 Cd、可还原态 Cd 和可氧化态 Cd 均与 Cd 总量存在中度相关 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.65、0.58 和 0.69, 与 CEC、有机质含量、黏土占比和粉砂占比等土壤基本理化性质相关性不显著 (图 7)。海相沉积物土壤弱酸提取态 Cd、可还原态 Cd 和可氧化态 Cd 均与 Cd 总量存在中度相关 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.76、0.79 和 0.75, 弱酸提取态 Cd 与 CEC、黏土占比和粉砂占比均存在低度相关 ($P < 0.05$), 相关系数分别为 0.36、0.46 和 0.47, 与有机质含量存在中度相关 ($P < 0.01$), 相关系数 0.55。以上结果说明, 南沙区土壤 Cd 物质来源整体上与土壤基本理化性质相关性差, 受岩土本身 Cd 含量控制较小, 主要来

源于外源人类工程活动, 例如施肥、污水灌溉或具高强度 Cd 含量的铅锌多金属矿区冶炼等。Cd 总量对土壤 Cd 的形态分布具有很大的影响, 土壤理化性质对 Cd 总量的影响不大, 但对 Cd 有效态的影响显著, 这与前人研究结果一致。例如, 张炜华等^[38]的研究表明, 重金属有效态与重金属总量呈正相关性, 且重金属有效态受土壤性质的影响。季辉等^[39]的研究表明, 土壤重金属有效态与重金属总量呈显著相关关系, 但是重金属总量又不能完全解释重金属有效态含量, 重金属有效态含量还取决于土壤 pH 和有机质含量等因素^[40]。

3.2 研究区 Cd 的生态风险评价

从沉积物中重金属的含量可以判断研究区受污染的程度, 研究沉积物重金属的柱状样在不同层位

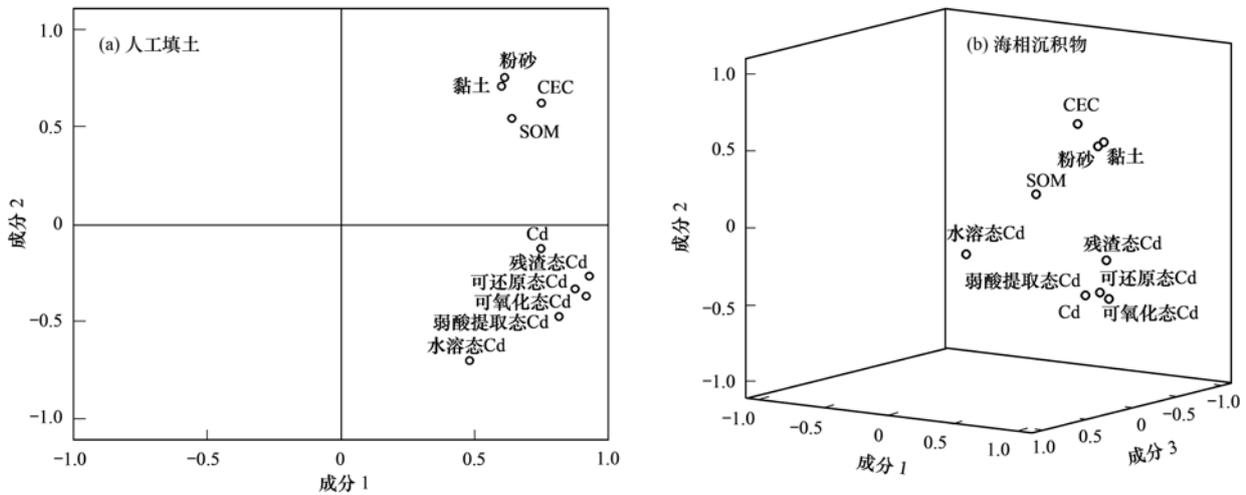


图 7 人工填土和海相沉积物因子分析成分

Fig. 7 Component diagram of the factor analysis of artificial fill and marine sediment

的含量分布,可了解所研究区域重金属的污染历史,把柱状样重金属含量与未污染区背景值进行对照,则可反映出不同历史阶段人类活动对所研究区域重金属的输送量的变化情况,对沉积物中重金属进行环境风险评价,可以了解重金属对环境和生物的潜在危害性.采用地质累积指数法(I_{geo})和潜在生态危害指数法对研究区第四系沉积物进行环境风险评价,土壤中 Cd 的地球化学背景含量取珠江沉积物的含量,为 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [41].结果显示,人工填土层(Q_4^{ml})0~0.2 m 土壤 Cd 地质累积指数(I_{geo})变异系数高,离散程度较深层土壤更大,深层 Q_4^{ml} 土壤地质累积指数以 $1 < I_{geo} < 2$ 为主,主要为中度污染.且 Q_4^{ml} 潜在生态危害指数以 $80 < E_r < 160$ 为主,其次是 $160 < E_r < 320$,存在较高危害或高危害,不存在 $E_r > 320$ 的非常高潜在生态危害(图 8).海相沉积物层(Q_4^m)埋深 5 m 以浅的土壤 Cd 地质累积指数以 $1 < I_{geo} < 2$ 以及 $2 < I_{geo} < 3$ 为主,分别属于中度污

染及中度-重度污染,其潜在生态危害指数以 $80 < E_r < 160$ 为主;埋深大于 5 m 的土壤 Cd 地质累积指数以 $1 < I_{geo} < 2$ 为主,其次是 $0 < I_{geo} < 1$,分别属于中度污染和轻度污染,其潜在生态危害指数以 $80 < E_r < 160$ 为主,存在较高潜在生态危害(图 9).

特定化学形态的重金属强烈影响其化学行为,重金属可以因形态中某一个或几个方面不同而表现出不同的毒性和环境行为,重金属在环境中的移动性、被有机体吸收和产生的毒害作用,无论在环境中还是在生物体内,都是表征和了解重金属形态的依据[42].环境学者认为土壤重金属的有效态为其环境生物有效态及环境有效态,即土壤重金属能被生物吸收利用或产生毒害效应的重金属形态.本文通过风险评估编码法(RAC)来评价南沙区海陆交互沉积物潜在环境风险,各钻孔 Cd 形态中酸可提取态(包括水溶态)在总 Cd 中所占的比例(质量分数)如表 3 所示,NSGC03、NSGC12 和 NSGC23 采集

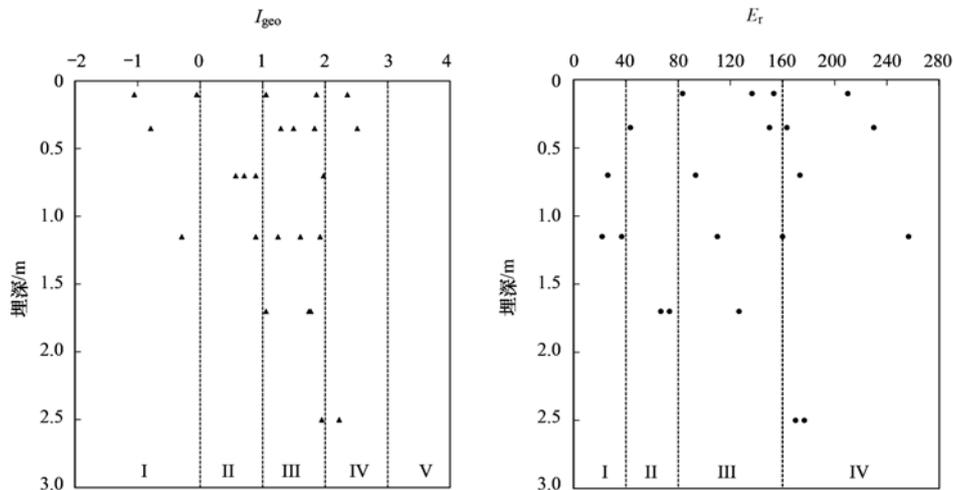


图 8 南沙区 Q_4^{ml} 不同埋深地质累积指数(I_{geo})和潜在生态危害指数(E_r)

Fig. 8 Geological accumulation index (I_{geo}) and potential ecological risk index (E_r) values at different buried depths in Q_4^{ml}

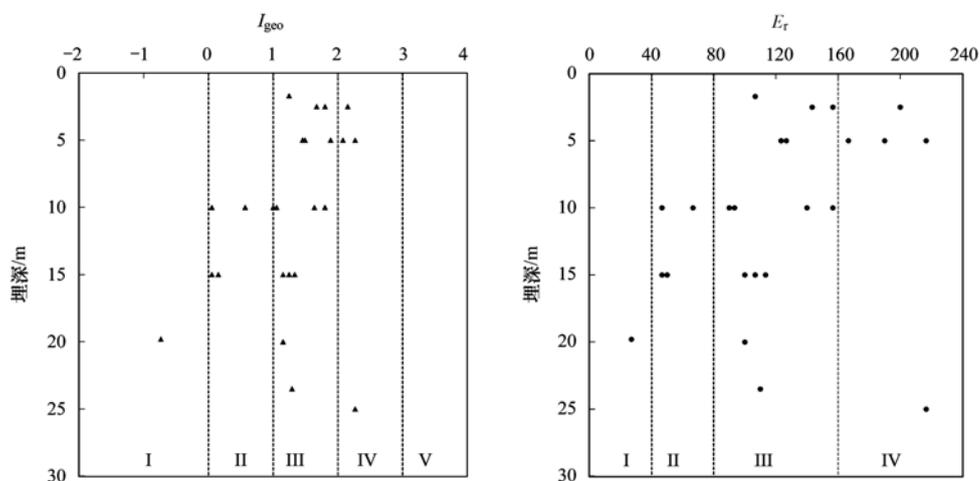


图9 南沙区 Q_4^m 不同埋深地质累积指数 (I_{geo}) 和潜在生态危害指数 (E_r)

Fig. 9 Geological accumulation index (I_{geo}) and potential ecological risk index (E_r) values at different buried depths in Q_4^m

表3 各钻孔酸可提取态占全 Cd 比例描述统计量/%

Table 3 Descriptive statistics of the proportion of acid soluble Cd in each drill hole/%

项目	NSGC03 ($n=4$)	NSGC12 ($n=6$)	NSGC10 ($n=8$)	NSGC21 ($n=8$)	NSGC23 ($n=9$)	NSGC31 ($n=5$)
最大值	64.14	64.85	72.98	65.89	67.91	55.68
最小值	51.67	51.22	45.36	47.09	50.93	46.17
均值	56.44	56.68	59.68	54.90	58.84	51.12
中值	54.98	54.49	59.73	52.88	57.87	53.19
标准差	4.77	5.56	9.12	7.10	5.19	3.93
变异系数	8.45	9.80	15.29	12.94	8.83	7.68

的土样酸可提取态所占比例最小值均大于 50%，均存在极高潜在环境风险；NSGC10、NSGC21 和 NSGC31 采集的土样酸可提取态所占比例最小值分别为 45.36%、47.09% 和 46.17%，属于高风险，大多数为极高风险。此外，所有钻孔酸可提取态占全 Cd 比例变异系数为 7.68%~15.29%，空间变异性较低至一般，表明样本不仅存在极高潜在环境风险，同时这种风险在南沙区海陆交互相沉积物中存在普遍性。

4 结论

(1) 海相沉积物阳离子交换量 (CEC) 与有机质含量普遍高于人工填土层，陆相沉积物 CEC 与有机质均低于人工填土和海相沉积物。杂填土中 Cd 含量通常低于 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，素填土中 Cd 含量通常高于 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，海相沉积物 Cd 平均含量为 $0.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，5 m 以浅海相沉积物中 Cd 含量通常比 5 m 以深更高，陆相沉积物中 Cd 含量显著低于海相沉积物，Cd 平均含量为 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(2) 南沙区土壤 Cd 物质来源整体上与土壤基本理化性质相关性差，人工填土层土壤 Cd 与 CEC 存在中度相关，相关系数为 0.52 ($P < 0.05$)，海相沉积物 Cd 含量与有机质含量存在低度相关，相关系

数为 0.49 ($P < 0.05$)。Cd 全量对土壤 Cd 的形态分布具有很大的影响，土壤理化性质对 Cd 全量的影响不大，但对 Cd 有效态的影响显著。

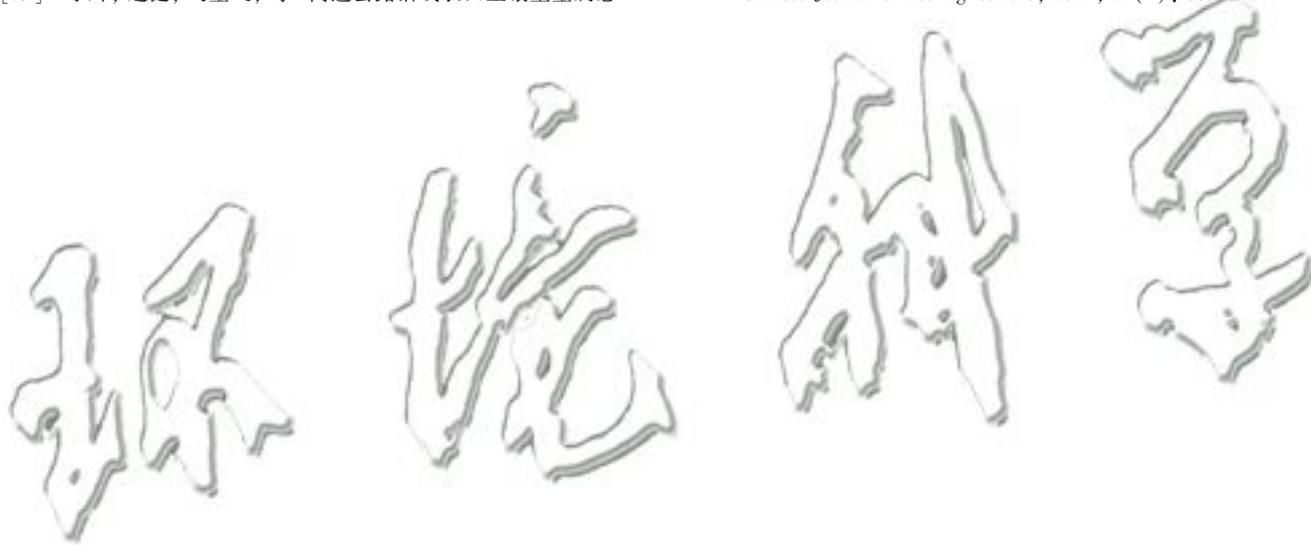
(3) 地质累积指数 (I_{geo}) 显示人工填土层 (Q_4^m) 主要为中度污染，海相沉积物层 (Q_4^m) 埋深 5 m 以浅属于中度污染及中度-重度污染，埋深大于 5 m 的土壤属于中度污染和轻度污染。潜在生态危害指数 (E_r) 显示 Q_4^m 存在较高危害或高危害， Q_4^m 存在较高潜在生态危害。风险评估编码法 (RAC) 显示，南沙区海陆交互相沉积物不仅大多存在极高潜在环境风险，同时这种风险具有普遍性。

参考文献:

- [1] 范世奇. 水肥处理对土壤 Cd 赋存形态及作物吸收特征的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [2] Peng C, Wang M E, 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.
- [3] 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), doi: 10.1038/s41598-017-07690-y.
- [4] 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.

- [5] Menke A, Muntner P, Silbergeld E K, *et al.* Cadmium levels in urine and mortality among U. S. adults [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2009, **117**(2): 190-196.
- [6] Satarug S, Garrett S H, Sens M A, *et al.* Cadmium, environmental exposure, and health outcomes[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2010, **118**(2): 182-190.
- [7] 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.
- [8] 国土资源部中国地质调查局. 中华人民共和国多目标区域地球化学图集: 广东省珠江三角洲经济区[M]. 北京: 地质出版社, 2011.
- [9] 杜佳, 王永红, 黄清辉, 等. 珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 625-632.
Du J, Wang Y H, Huang Q H, *et al.* Temporal and spatial characteristics of heavy metals in suspended particulate matter in Pearl River Estuary and its influencing factors [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2), doi: 10.3390/ijerph16193637.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 王芳婷, 陈植华, 包科, 等. 海陆交互带土壤及河流沉积物中镉含量及形态分布特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4581-4589.
Wang F T, Chen Z H, Bao K, *et al.* Content and distribution of cadmium in soil and fluvial sediments in the sea land interaction zone[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4581-4589.
- [13] Dijkstra J J, Meeussen J C L, Comans R N J. Leaching of heavy metals from contaminated soils: an experimental and modeling study[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(16): 4390-4395.
- [14] 唐志敏. 珠江水系对冲积平原区土壤环境质量的影响[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- [15] NY/T 1121.2-2006, 土壤检测 第 2 部分: 土壤 pH 的测定[S].
- [16] NY/T 1121.6-2006, 土壤检测 第 6 部分: 土壤有机质的测定[S].
- [17] NY/T 295-1995, 中性土壤阳离子交换量和交换性盐基的测定[S].
- [18] NY/T 1121.3-2006, 土壤检测 第 3 部分: 土壤机械组成的测定[S].
- [19] GB/T 14506.30-2010, 硅酸盐岩石化学分析方法 第 30 部分: 44 个元素量测定[S].
- [20] 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].
- [21] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river[J]. *Geology Journal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [22] Roudposhti G M, Karbassi A, Baghvand A. A pollution index for agricultural soils[J]. *Archives of Agronomy And Soil Science*, 2016, **62**(10): 1411-1424.
- [23] Li F, Cai Y, Zhang J D. Spatial characteristics, health risk assessment and sustainable management of heavy metals and metalloids in soils from central China[J]. *Sustainability*, 2018, **10**(1), doi: 10.3390/su10010091.
- [24] Huang J H, Li F, Zeng G M, *et al.* Integrating hierarchical bioavailability and population distribution into potential eco-risk assessment of heavy metals in road dust: a case study in Xiandao District, Changsha city, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **541**: 969-976.
- [25] Shi P, Xiao J, Wang Y F, *et al.* Assessment of ecological and human health risks of heavy metal contamination in agriculture soils disturbed by pipeline construction[J]. *International Journal of Environmental Research And Public Health*, 2014, **11**(3): 2504-2520.
- [26] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [27] Zhang Z Y, Li J Y, Mamat Z, *et al.* Sources identification and pollution evaluation of heavy metals in the surface sediments of Bortala River, Northwest China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, **126**: 94-101.
- [28] Saeedi M, Jamshidi-Zanjani A. Development of a new aggregative index to assess potential effect of metals pollution in aquatic sediments[J]. *Ecological Indicators*, 2015, **58**: 235-243.
- [29] Liu Y Z, Xiao T F, Baveye P C, *et al.* Potential health risk in areas with high naturally-occurring cadmium background in southwestern China [J]. *Ecotoxicology And Environmental Safety*, 2015, **112**: 122-131.
- [30] 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), doi: 10.1007/s10661-016-5744-y.
- [31] Perin G, Craboledda L, Lucchese L, *et al.* Heavy metal speciation in the sediments of Northern Adriatic Sea. A new approach for environmental toxicity determination [A]. In: Lakkas T D (Ed.). *Heavy Metals in the Environment* [M]. Edinburgh; CEP Consultants, 1985.
- [32] 庞文品, 秦樊鑫, 吕亚超, 等. 贵州兴仁煤矿区农田土壤重金属化学形态及风险评估[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(5): 1468-1478.
Pang W P, Qin F X, Lv Y C, *et al.* Chemical speciations of heavy metals and their risk assessment in agricultural soils in a coal mining area from Xingren County, Guizhou Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(5): 1468-1478.
- [33] 陆泗进, 王业耀, 何立环. 风险评价代码法对农田土壤重金属生态风险的评价[J]. *环境化学*, 2014, **33**(11): 1857-1863.
Lu S J, Wang Y Y, He L H. Ecological risk of heavy metals in agricultural soils assessed by risk assessment code [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, **33**(11): 1857-1863.
- [34] Han Y M, Du P X, Cao J J, *et al.* Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **355**(1-3): 176-186.
- [35] Li Q S, Wu Z F, Chu B, *et al.* Heavy metals in coastal wetland sediments of the Pearl River Estuary, China[J]. *Environmental*

- Pollution, 2007, **149**(2): 158-164.
- [36] Chen S J, Gao X J, Mai B X, *et al.* Polybrominated diphenyl ethers in surface sediments of the Yangtze River Delta: levels, distribution and potential hydrodynamic influence [J]. Environmental Pollution, 2006, **144**(3): 951-957.
- [37] 窦磊, 杜海燕, 黄宇辉, 等. 珠江三角洲经济区农业地质与生态地球化学调查成果综述 [J]. 中国地质调查, 2015, **2**(4): 47-55.
Dou L, Du H Y, Huang Y H, *et al.* Main research achievements of agro-geological and eco-geochemical research in Pearl River Delta Economic Zone, Guangdong province, China [J]. Geological Survey of China, 2015, **2**(4): 47-55.
- [38] 张伟华, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 厦门某国道旁土壤重金属赋存形态及生物有效性 [J]. 地球与环境, 2019, **47**(2): 151-160.
Zhang W H, Hu G R, Yu R L, *et al.* Speciation and bioavailability of heavy metals in soils near a national highway in Xiamen [J]. Earth and Environment, 2019, **47**(2): 151-160.
- [39] 季辉, 赵健, 冯金飞, 等. 高速公路沿线农田土壤重金属总量和有效态含量的空间分布特征及其影响因素分析 [J]. 土壤通报, 2013, **44**(2): 477-483.
Ji H, Zhao J, Feng J F, *et al.* Spatial distribution characteristics of total and available heavy metal contents and their influencing factors in farmland soils along expressway [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, **44**(2): 477-483.
- [40] 黄迪, 杨燕群, 肖选虎, 等. 土壤重金属生物有效性评价技术进展 [J]. 现代化工, 2019, **39**(S1): 89-94, 98.
Huang D, Yang Y Q, Xiao X H, *et al.* Technology for measuring bioavailability of heavy metals in soil [J]. Modern Chemical Industry, 2019, **39**(S1): 89-94, 98.
- [41] 迟清华, 鄢明才. 应用地球化学元素丰度数据手册 [M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [42] 周卫红, 张静静, 邹萌萌, 等. 土壤重金属有效态含量检测与监测现状、问题及展望 [J]. 中国生态农业学报, 2017, **25**(4): 605-615.
Zhou W H, Zhang J J, Zou M M, *et al.* The detection and monitoring of available heavy metal content in soil: a review [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, **25**(4): 605-615.



CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, WANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangshai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangshai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)