

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铎, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期
Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析	刘春景, 吕建毅, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳 (3375)
基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟	庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏 (3386)
基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨	王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰 (3396)
厦门港大气 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平 (3404)
南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征	张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇 (3416)
晋中盆地主要城市冬季 PM _{2.5} 传输特征分析	王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣 (3423)
鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析	孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳峰 (3439)
济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP	王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋 (3451)
长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析	罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧 (3463)
2019 年 7 月石家庄市 O ₃ 生成敏感性控制策略解析	朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇 (3473)
华北平原 AOD 时空演化与影响因素	郭霖, 孟飞, 马明亮 (3483)
基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系	郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康 (3494)
基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征	王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威 (3508)
近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析	陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏 (3523)
高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素	杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强 (3532)
三峡水库不同支流库湾蓄水区溶解氧分层特性及差异性	纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽 (3543)
典型喀斯特城市湖泊溶解性有机质成分特征及来源解析	倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康 (3552)
骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估	黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕 (3562)
千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素	王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军 (3575)
泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征	张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮 (3587)
降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响	周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕 (3597)
典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价	储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏 (3608)
筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响	王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜 (3623)
天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识	刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德 (3635)
地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制	彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪 (3645)
北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析	门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵 (3656)
微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响	胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明 (3664)
不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响	任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟 (3672)
微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd ²⁺ 吸附机制	马文艳, 裴鹏刚, 高歌, 孙约兵 (3682)
不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素	连宁海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水 (3692)
Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能	印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨根, 何世颖, 薛利红 (3699)
一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析	李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送 (3708)
丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性	高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程阳阳, 彭永臻 (3718)
2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测	徐勇, 郑志威, 郭振东, 宴世卿, 黄雯婷 (3730)
近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估	陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明 (3741)
土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响	何宇, 盛茂根, 王轲, 王霖娇 (3752)
长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价	张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁 (3763)
煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性	尚誉, 桑楠 (3773)
燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价	李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚 (3781)
广州市南沙区第四剖面镉富集特征及生物有效性	王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏 (3789)
黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准	徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀 (3799)
土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测	张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南 (3811)
添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响	鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利 (3825)
不同稻作系统土壤的 CH ₄ 产生潜力与产生途径	沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华 (3835)
东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程	马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮 (3844)
同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐潞, 马飞 (3854)
岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较	肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛 (3865)
紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异响应	王智慧, 蒋先军 (3876)
有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响	肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全 (3884)
《环境科学》征订启事 (3403) 《环境科学》征稿简则 (3462) 信息 (3493, 3655, 3834)	

广州市南沙区第四系剖面镉富集特征及生物有效性

王芳婷¹, 包科², 黄长生^{1*}, 赵信文¹, 顾涛¹, 曾敏¹

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205; 2. 长江水利委员会河湖保护与建设运行安全中心, 武汉 430010)

摘要: 了解土壤重金属镉的分布格局及富集规律, 掌握其活性及影响因素, 对保障农用地和建设用地土壤环境安全, 改善土壤环境质量至关重要. 测试南沙区第四系剖面重金属 Cd 含量, 采用地质累积指数 (I_{geo}) 和潜在生态风险指数法 (E_r) 对污染水平进行评价, 采用因子分析 (FA-MLR) 方法, 确定镉元素全量及各形态与土壤理化性质的相关性. 结果表明, 土壤 pH 值的差异导致镉含量随深度呈现不同的变化趋势, 酸性环境中深层土壤镉的迁移量及纵向迁移深度更大; 第四系沉积物镉含量随深度的变化趋势呈双峰分布, 镉含量分别在 20 ~ 25 m 和 5 ~ 10 m 达到峰值, 该段岩心沉积物多为海相沉积物的淤泥和淤泥质黏土, 阳离子交换量及有机质均较高; 以黏性土为主的细粒级沉积物中镉元素 I_{geo} 和 E_r 明显高于以砂性土为主的粗粒级沉积物; pH 变化对镉迁移转化的影响不完全体现在对镉全量的影响上, 更重要的是改变了镉的有效态, 从而影响了镉的生物有效性; 由水溶态、离子交换态和碳酸盐态组成的不稳定镉约占总镉的 37.92% ~ 49.10%, 土壤镉有较强的不稳定性. 今后需要进一步研究与人类健康风险有关的重金属镉的迁移和毒性.

关键词: 镉; 重金属形态; 污染评价; 生物有效性; 广州市南沙区

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3789-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109122

Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China

WANG Fang-ting¹, BAO Ke², HUANG Chang-sheng^{1*}, ZHAO Xin-wen¹, GU Tao¹, ZENG Min¹

(1. Wuhan Geological Survey Center, China Geological Survey, Wuhan 430205, China; 2. Safety Center for River and Lake Protection, Construction and Operation, Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China)

Abstract: Comprehending the distribution pattern and enrichment rule of the heavy metal cadmium (Cd) in soil and grasping its activity and influencing factors is crucial for guaranteeing the soil environment safety of agricultural and construction land and improving the overall quality of the soil environment. The concentration of heavy metal Cd in the quaternary profile of Nansha was measured, and the pollution level was evaluated using the geographical accumulation index (I_{geo}) and potential ecological risk index (E_r). Then, we determined the correlation between the total amount of Cd and the physicochemical properties of the soil using factor analysis (FA-MLR). The results showed that the average content of Cd in shallow soil (0-20 cm) in the Nansha area was $0.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the soil was mainly weakly acidic and neutral. The average content of Cd in deep soil (150-200 cm) was $0.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the soil was mainly neutral. At the same time, the variation coefficient of Cd content in shallow soil was significantly greater than that in deep soil, and Cd content tended to be consistent with the increase in depth. The Cd content of quaternary sediments showed a bimodal distribution with depth, reaching a peak at 20-25 m and 5-10 m, respectively, whereas the core sediments in this section were mostly marine sediments of silt and silty clay, with high cation exchange capacity and organic matter. The I_{geo} and E_r of Cd in the fine-grained sediments dominated by clayey soil were significantly higher than those in the coarse-grained sediments dominated by sandy soil. The difference in soil pH value led to the different trend of Cd content with depth; the migration amount and vertical migration depth of Cd in deep soil were greater in the acidic environment. The influence of pH change on the migration and transformation of Cd was not completely reflected in the influence on the total amount of Cd, but more importantly, it changed the effective state of Cd, thus affecting the bioavailability of Cd. The unstable Cd composed of water-soluble, ion-exchangeable, and carbonate states accounted for 37.92%-49.10% of the total Cd, resulting in a strong instability of soil Cd. Further investigation on the migration and toxicity of heavy metals associated with human health risks is needed in future studies.

Key words: cadmium; heavy metal form; pollution assessment; bioavailability; Nansha District, Guangzhou

工业化/城市化(如工业、农业和交通)和自然地质过程都会导致一些农田土壤中重金属的富集^[1,2]. 土壤重金属通过食物链对人体健康构成威胁^[3,4], 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^[5]. 土壤 Cd 污染将造成水稻和蔬菜等农产品的质量下降和产量降低, 并且严重威胁到人类的身心健康. 我国土壤环境状况总体不容乐观, 随着我国工业农业的发展, 由于化肥和农药的大量施用, 工业废水和污泥的农业利用, 以及重金属大气沉降的日益增加, 土壤中 Cd 的含量明显增加, 文献[6]显示, Cd 污染物点位超标率达到 7.0%. 我国 Cd 污染

农田面积达到 2 800 km², 有污灌区土壤 Cd 含量达到了生产“镉米”的程度^[7], 年产 Cd 超标农产品数量超过 150 万 t^[8]. 近年来, 为了评估对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^[5,9~11], 污染物的空间分布已被用来识别一个地区的污染状况, 查明影响因素可作为采取减轻污染措施的证据^[12]. 前人研究探讨了土壤类型及理化性质^[13,14]、水环境^[15]、大气沉积^[16]和人类活

收稿日期: 2021-09-14; 修订日期: 2021-11-09

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20221734, DD20190291)

作者简介: 王芳婷(1991~), 女, 博士, 主要研究方向为土壤重金属污染与防治, E-mail: ftwang1991@cug.edu.cn

* 通信作者, E-mail: cshuang@cug.edu.cn

动^[17,18]对土壤 Cd 富集^[19]、吸附-解吸和迁移转化^[20~23]的影响.然而,不同因素的影响程度往往是区域性的,并且这些研究更多地关注耕地表层土壤,往往忽略了不同沉积环境下土壤和沉积物的理化性质,因此有必要对这些因素对土壤和沉积物中 Cd 污染的影响程度和范围进行更深入的分析.另一方面,土壤重金属总量虽能反映土壤重金属富集程度,但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-生物有效性^[24],生物有效性逐渐成为土壤污染评价与风险预测的重要依据^[19].

珠江三角洲地区是我国重要的经济带,也是最早的经济开放开发区,近几十年来,这一地区在经济快速发展的同时积累了大量环境问题,其中重金属污染因面积广和持续时间长而备受关注,广州市南沙区也在其中^[25].本研究以南沙核心区为研究对象开展野外采样和实验室样品分析,目标是:①量化和揭示南沙区土壤重金属 Cd 在第四系剖面的分布;②利用地质累积指数(I_{geo})评估重金属污染情况;③利用因子分析-多元统计分析确定 Cd 元素生物有效性的主要影响因素.

1 材料与方法

1.1 研究区域与野外采样

南沙是广东省广州市市辖区,2012 年 10 月,南沙新区成为全国第 6 个国家级新区.位于广州市最南端、珠江虎门水道西岸,是西江、北江和东江三江汇集之处,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 803 km²,常住人口 69 万人.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.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 295.3 m;海陆交互相平原分布在黄阁、横沥一带,上部地层特征为淤泥或淤泥质土(砂),下部为河流

沉积的砂层;海湾滩涂、海涂(也叫滩涂)主要集中分布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.

为了掌握陆相-海相主剖面线上影响 Cd 行为的关键控制因子,在研究区布设一条 NW 至 SE 向剖面,共包括 6 个深层土壤采样点(图 1).剖面的布设沿着河道的方向由陆地延伸至海洋,采样点均位于三角洲平原,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 100 m 以上.分别采用手摇钻采集 0~2 m 土壤,并去除与采样工具接触部分的土壤,每个剖面共采集 5 组样品,采样深度分别为 0~20、20~50、50~100、100~150 和 150~200 cm,将样品用全新密封袋装取,送实验室测试.



图 1 南沙区钻孔及剖面采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of borehole and section sampling sites in Nansha area

钻孔岩心取样采取分层取样的方法,即按照沉积物类型或岩性将剖面分层,每一层中再视层厚等间距取样,岩心的深度到半风化基岩为止(图 2),用全新密封袋装取,送实验室测试.各岩心的深度及采样数量见表 1.

表 1 研究区钻孔位置及采样情况

Table 1 Drilling location and sampling

岩心号	经度(E)	纬度(N)	钻孔位置	钻孔深度/m	采样数/个	沉积环境
NSGC27	113°29'02.12"	22°48'17.61"	南沙区黄阁镇	74.42	24	上三角洲平原相
NSGC05	113°30'39.18"	22°43'18.91"	南沙区横沥镇	37.75	17	上三角洲平原相
NSGC11	113°34'34.12"	22°39'56.88"	南沙区万顷沙镇	52.33	23	下三角洲平原相
NSGC39	113°36'51.94"	22°41'31.25"	龙穴岛	87.09	21	三角洲前缘相

1.2 样品分析方法

对各样品进行实验室分析,主要获取了土壤酸碱度、阳离子交换容量(CEC)、土壤有机质含量(SOM)、Cd 含量和 Cd 的 7 种形态含量.

土壤酸碱度测试遵照规范 LY/T1239-1999,用离子选择电极法/pH 计测定;CEC 和 SOM 含量均遵照规范 LY/T1239-1999,分别用乙酸铵交换法和重铬酸钾容量法测定;Cd 遵照规范 DZ/T0279.3-

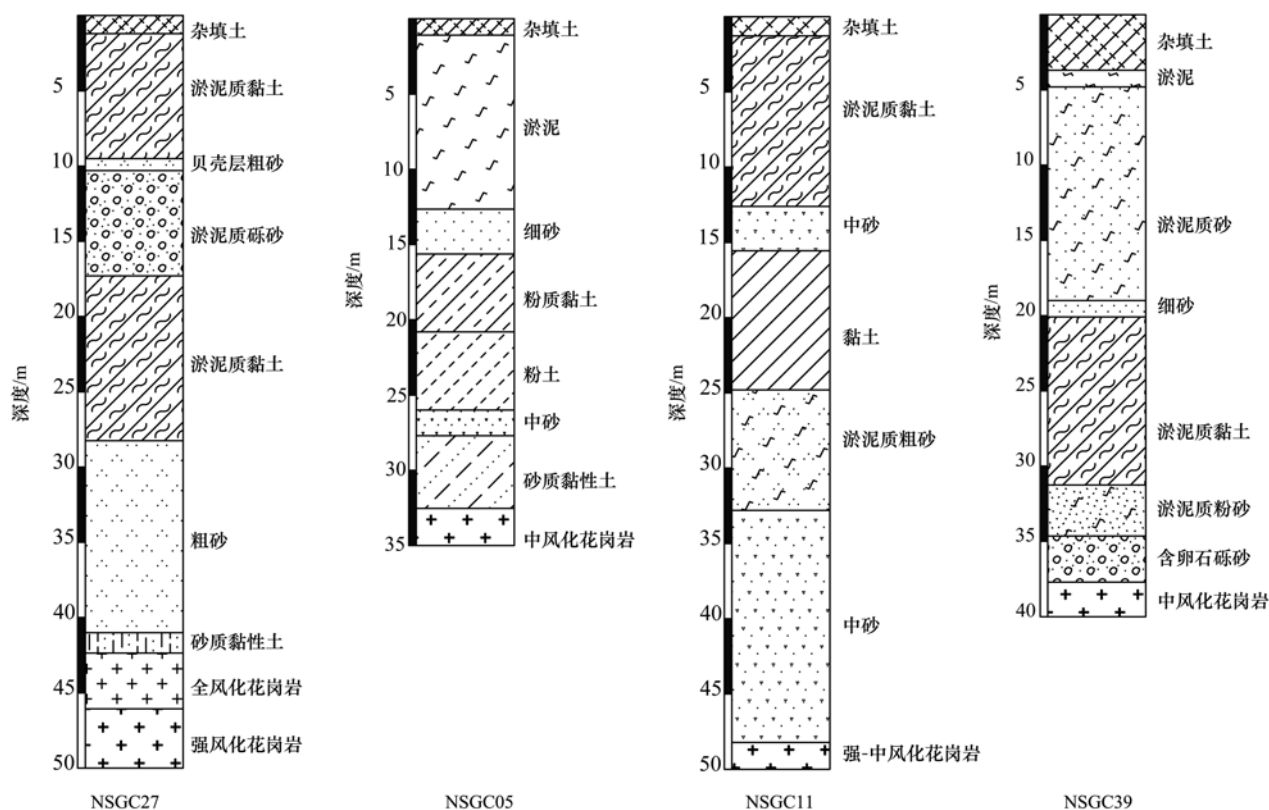


图2 各钻孔岩心柱状

Fig. 2 Core histogram of each borehole

2016, 采用电感耦合等离子体质谱法/热电 X2 测定; Cd 元素的形态分析遵照《生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)》(DD 2005-03), 采取电感耦合等离子体发射光谱法/热电 ICAP6300 分析元素的水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、铁锰氧化物态、强有机结合态和残渣态等 7 种赋存形态^[26]. Cd 不同形态分析的准确度以土壤中 Cd 元素全量($Cd_{全}$)为标准, 与各形态之和($Cd_{总}$)对比, 计算其相对偏差(RE), $RE = (Cd_{全} - Cd_{总}) \times 100\% / Cd_{全}$, 要求 $RE \leq 40\%$. 形态分析的准确度采用同一份样品重复测定 3 次, 计算各形态重复分析的相对标准偏差(relative standard deviation, RSD), 要求 $RSD \leq 30\%$. 该分析由国土资源部长沙矿产资源监督检测中心完成, 所有元素的形态分析均满足要求.

1.3 评价方法

1.3.1 地质累积指数法(I_{geo})

Müller^[27]最初提出的地质累积指数(I_{geo})对沉积物中的金属污染程度进行了评估. I_{geo} 值由以下公式定义:

$$I_{geo} = \log_2(C_n / k B_n)$$

式中, C_n 为样品中测量到的金属含量($mg \cdot kg^{-1}$), B_n 为金属的地球化学背景值($mg \cdot kg^{-1}$), 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: 0 级($I_{geo} < 0$), 未受污染; 1 级($0 \leq I_{geo} < 1$), 未受污染至中度污染; 2 级($1 \leq I_{geo} < 2$), 中度污染; 3 级($2 \leq I_{geo} < 3$), 中度污染至强污染; 4 级($3 \leq I_{geo} < 4$), 强污染; 5 级($4 \leq I_{geo} < 5$), 强污染到极强污染; 6 级($I_{geo} \geq 5$), 极强污染^[28].

1.3.2 潜在生态风险指数法(E_r)

E_r 以沉积学理论为基础, 最初由 Hakanson^[29]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风险^[30,31]. 潜在生态风险指数(E_r)计算方法如下^[32]:

$$E_r = (C_i / B_i) \times T_0$$

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($mg \cdot kg^{-1}$), B_i 为土壤中 Cd 的地球化学背景值($mg \cdot kg^{-1}$). 然后将 E_r 分为: 低风险($E_r < 40$)、中等风险($40 \leq E_r < 80$)、较高风险($80 \leq E_r < 160$)、高风险($160 \leq E_r < 320$)、非常高潜在生态风险($E_r \geq 320$)^[9,32].

1.4 多元统计与空间分析方法

采用 Excel 2016 对数据进行描述性统计分析, 利用统计软件 SPSS22.0 量化每种指标之间的相关性^[33].

2 结果与分析

2.1 Cd 元素含量的垂向分布特征

2.1.1 0~2 m 土壤剖面 Cd 含量特征

广东省土壤 Cd 背景值为 $0.056 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [34], 《土壤重金属风险评价筛选值 珠江三角洲》(DB44/T 1415-2014) 显示珠江三角洲土壤环境背景值增加了一倍, 为 $0.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而南沙核心区冲积层 150~200 cm 土壤 $\omega(\text{Cd})$ 均值为 $0.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比珠江三角洲土壤环境背景值增加了 3 倍, 多以中性为主; 浅层土壤 (0~20 cm) 的 $\omega(\text{Cd})$ 高于 150~200 cm 土壤的, 均值达 $0.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 多以弱酸性-中性为主. 各剖面不同埋深 Cd、pH 值、CEC 和 SOM 含量变化情况如图 3 所示, 土壤 Cd 含量整体上随深度的增加而越低, 这与 CEC 和 SOM 含量逐渐降低相一致, 与 pH 值呈增高趋势相反. 变异系数 (CV) 反映了某一属性在各采样点的平均变异程度 [35], 浅层土壤 (0~20 cm) Cd 含量变异系数较 20 cm 以深土壤变异系数更大, Cd 分布不均, 深部不同剖面在同一埋深的 Cd 含量趋于一致, 尤其是在 150~200 cm 处更为明显, 随着深度的增加, pH 值和 SOM 的变异程度也逐渐减小, 这是由于浅层土壤受降雨及人类工程活动影响较大. Cd 含量随深度变化的趋势大致可以分为 3 类, 形成这 3 种不同变化趋势的主要原因在于 pH 值的差异: ① NS113PM 的 Cd 含量随着土壤埋深的不断增大而依次降低, 在 150~200 cm 埋深处达到 Cd 含量最低值, 其变化趋势与 NS118PM 比较类似, 这是因为 NS113PM 和 NS118PM 两个剖面 0~20 cm 土壤 pH 大于 7.5, 碱性环境的土壤会使 Cd 转变为碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态,

形成沉淀络合物, 也会导致溶液中 OH^- 与土壤颗粒表面基团发生反应, 土壤表面负电荷增多, Cd^{2+} 在土壤表面吸附位点上的竞争减小, 土壤对 Cd^{2+} 的吸附能力增强, 大部分外源输入的 Cd 主要被截留在 0~20 cm 的表层; ② NS96PM 和 NS509PM 剖面中 0~20、20~50 和 50~100 cm 这 3 层中 Cd 含量比较一致, 说明土壤 Cd 被 0~20 cm 的表层截流量有限, 部分 Cd 通过垂向迁移进入了 20~100 cm 的土壤中, Cd 的垂向迁移程度稍高于第一类土壤, 当深度大于 1 m 时, Cd 含量降低; ③ NS197PM 和 NS506PM 具有相同的变化趋势, 在 0~20 cm 的 Cd 含量通常最低, 在 20~50 cm 通常达到 Cd 含量最高值, 之后随着深度的增加逐渐降低, 说明 0~20 cm 的表层土壤只能吸附少量的 Cd, Cd 在垂向上的迁移量及迁移深度均显著增加, 这是因为这两个剖面 0~20 cm 土壤 pH 小于 5.5, 酸性环境中的 Cd 会被解吸出来, pH 值越低, 吸附过程可逆性越高, Cd^{2+} 较难被吸附在土壤颗粒表面, 使得 Cd 离子纵向迁移进入深层土壤, 20~50 cm 土壤为中性, Cd 含量达到峰值.

2.1.2 第四系沉积物剖面 Cd 含量特征

4 个钻孔岩心第四系沉积物中 Cd 全量大多高于广东省土壤 Cd 背景值 ($0.056 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 其中 NSGC27 岩心 $\omega(\text{Cd})$ 范围为 $55 \sim 388 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, NSGC05 岩心 $\omega(\text{Cd})$ 范围为 $28 \sim 560 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, NSGC11 岩心 $\omega(\text{Cd})$ 范围为 $54 \sim 664 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, NSGC39 岩心 $\omega(\text{Cd})$ 范围为 $29 \sim 573 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd 相对于地壳丰度富集明显, 各钻孔 Cd 均值及中值均显著高于全国土壤 Cd 背景值、广东土壤 Cd 背景值、Cd 的地壳丰度和珠江沉积物中的 Cd [26] (表

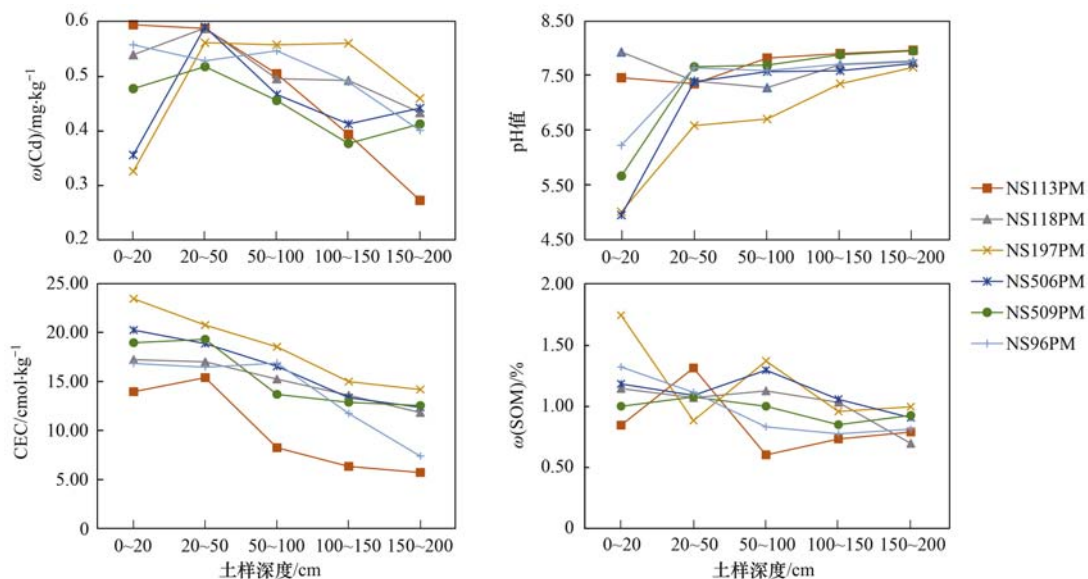


图 3 各剖面不同埋深 Cd、pH 值、CEC 和 SOM 含量对比

Fig. 3 Comparison of Cd, pH, cationic exchange capacity, and organic matter content in different sections

2).

各个钻孔中 Cd 元素与沉积物化学性质相关性分析显示, 钻孔 NSGC27、NSGC05、NSGC11 和 NSGC39 中 Cd 元素与 CEC 的相关系数分别为 0.912、0.76、0.805 和 0.82 ($P < 0.001$), 呈极强正相关关系, 与 SOM 的相关系数分别为 0.503、0.741、0.499 和 0.552 ($P < 0.001$), 呈强正相关关系. 前人研究认为 pH 变化是影响 Cd 迁移转化的最重要因素之一^[36], 但研究区采集样品中测试沉积物样品酸碱度基本呈中性-弱碱性(表层土壤除外), 导致 pH 值与 Cd 全量相关系数均为负值, 但相关性不显著. 因此, pH 值对区内 Cd 元素空间分布影响不显著, CEC 与 SOM 是影响 Cd 全量的主要化学因素. Cd 元素含量整体上随深度的增加有降低的趋势, 埋深 0 ~ 10 m 岩心沉积物中 $\omega(\text{Cd})$ 普遍较高, 一般大于 $300 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最高的甚至达到了 $664 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 埋深 30 m 以下岩心沉积物中 Cd 元素含量普遍较低, 一般小于 $180 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 4). Cd 含量随深度的变化趋势呈双峰分布, 与 CEC 和 SOM 的变化趋势一致, 分别在接近 9 m 和 22 m 左右的位置达到峰值, 尤其以 NSGC27 和 NSGC39 的变化特征最为显著. 主要原因在于岩心沉积物类型发生了变化, 岩心在 20 ~ 25 m 多为黏土和淤泥质黏土, CEC 及 SOM 均较高, Cd 含量达到峰值; 上部沉积粗砂、中砂和细砂等, CEC 及 SOM 降低, Cd 含量降低;

在 5 ~ 10 m 多为海相沉积物的淤泥、淤泥质黏土, CEC 及 SOM 均较高, Cd 含量达到另一个峰值. 总的来说, 呈现为以砂性土为主的粗粒级沉积物中 Cd 元素含量偏低, 而在以淤泥质黏土为主的细粒级沉积物中 Cd 元素富集的规律, 表明海相沉积环境有助于 Cd 元素富集.

表 2 各岩心及其他地区 Cd 含量				
Table 2 Cadmium contents in the different cores and other areas				
项目	NSGC27 (24)	NSGC05 (17)	NSGC11 (23)	NSGC39 (21)
最小值/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	55	28	54	29
最大值/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	388	560	664	573
平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	209	273	299	238
中位数/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	160	305	286	165
标准差/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	126	170	167	148
变异系数/%	60.1	62.4	57.7	62.5

1) 括号内为样品数; 全国土壤 Cd 背景值为 $97 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 广东土壤 Cd 背景值为 $56 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, Cd 的地壳丰度为 $80 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 珠江沉积物 Cd 背景值为 $90 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

2.2 沉积物中 Cd 的形态特征

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, 形成碳酸盐、腐殖酸、铁锰氧化物结合态和 SOM 硫化物结合态等形式, 少部分以水溶态和离子交换态存在, 分析 4 个钻孔剖面沉积物样品中各类不同形态 Cd 对总 Cd

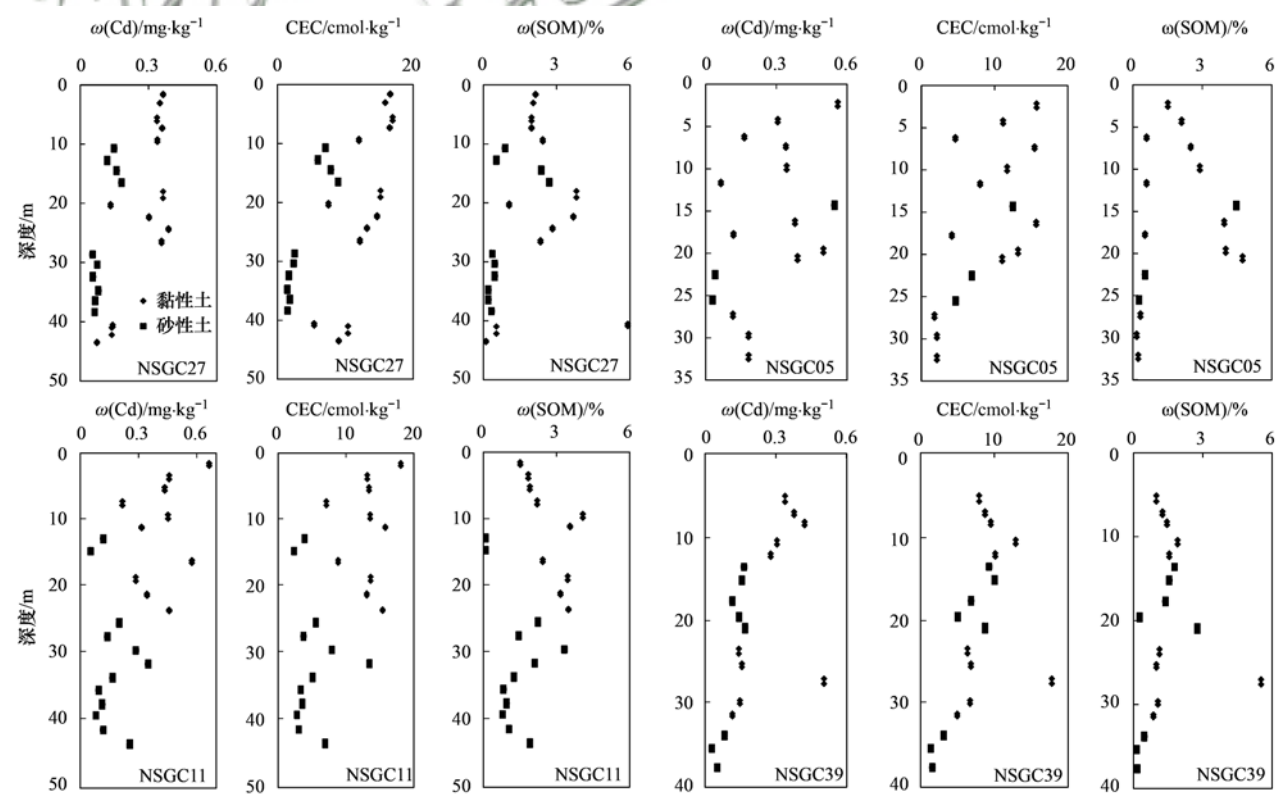


图 4 钻孔岩心 Cd 含量、CEC 和 SOM 分布

Fig. 4 Cd content, cation exchange capacity, and organic matter distribution in the drilled cores

含量的贡献率发现(图5),NSGC27和NSGC39岩心Cd的形态分布特征较为相似,各形态的比例分布较稳定,前文有关第四系沉积物剖面Cd含量特征的分析中指出,NSGC27和NSGC39的Cd全量变化特征比较相似,分别在接近9 m和22 m左右的位置达到峰值,反映了NSGC27和NSGC39具有相同的物质来源.在所有岩心剖面中水溶态占比普遍较低,多小于2%,在NSGC27中的40.7 m深处和NSGC11的16.2 m和18.8 m深处出现水溶态异常值,在NSGC27和NSGC11中pH值多大于7.0,而NSGC27的40.7 m深处pH值低至3.51,水溶态含量为0.07 mg·kg⁻¹,占Cd全量的50.45%;NSGC11的16.2 m和18.8 m深处pH值分别为4.03和4.21,水溶态

含量分别为0.188 mg·kg⁻¹和0.074 mg·kg⁻¹,分别占Cd全量的33.38%和26.54%.变异系数可以反映统计数据的波动幅度,从各岩心Cd元素形态变异系数来看(表3),水溶态变异系数平均水平高,其离散程度更大,NSGC27和NSGC11分别高达321.79%和264.81%,其余形态变异系数较稳定,初步反映了水溶态Cd的不稳定性,且沉积物酸碱度对水溶态Cd的占比影响显著.离子交换态Cd占比较为均一,NSGC27、NSGC05、NSGC11和NSGC39的离子交换态占比均值分别为22.13%、20.31%、22.69%和25.65%,水溶态和离子交换态组成的有效态Cd占总Cd的比例较高,范围是21.75%~26.54%,说明沉积物中Cd有较强的有效性.

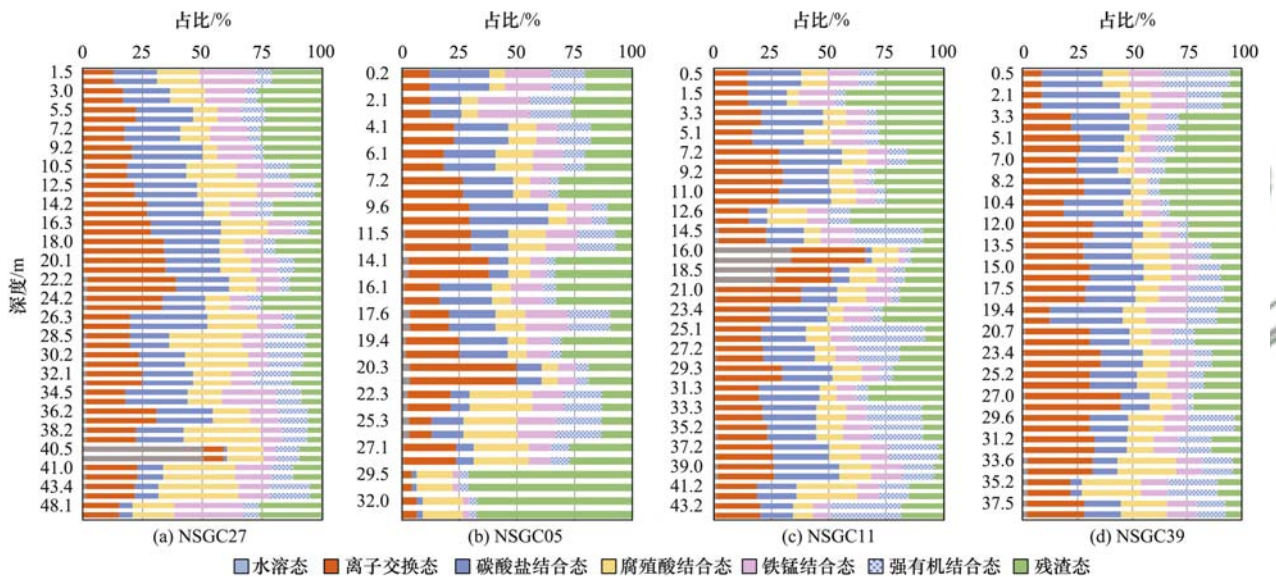


图5 各岩心重金属Cd元素形态分布
Fig. 5 Morphological distribution of heavy metal Cd in each core

表3 各岩心Cd形态均值及变异系数

形态	各形态占比(均值)/%				变异系数/%			
	NSGC27	NSGC05	NSGC11	NSGC39	NSGC27	NSGC05	NSGC11	NSGC39
水溶态	3.07	1.44	3.15	0.89	321.79	83.19	264.81	70.9
离子交换态	22.13	20.31	22.69	25.65	31.5	51.47	25.69	32.81
碳酸盐结合态	20.43	16.17	19.86	20.95	35.29	53.01	32.56	33.04
腐殖酸结合态	18.06	13.37	11.56	12.93	42.07	47.76	35.56	44.02
铁锰氧化物结合态	13.01	11.86	10.22	10.82	42.07	45.07	29.66	33.37
强有机结合态	8.83	10.2	12.3	11.39	43.99	57.61	79.45	59.94
残渣态	14.46	26.66	20.22	17.36	53.79	65.73	53.56	59.92

2.3 Cd元素污染评估

应用地质累积指数(I_{geo})及潜在生态风险指数(E_r)对研究区进行污染评估,采样点位于珠江三角洲海陆交互作用沉积区,这里选取珠江沉积物作为金属的地球化学背景值^[28],进一步揭示Cd在广州市南沙区沉积物中的富集程度.各钻孔不同深度沉积物地质累积指数(I_{geo})及潜在生态风险指数(E_r)

如图6所示,结果表明:①人工填土 I_{geo} 多在1~2之间,呈中度污染,人工填土的 E_r 均大于80,存在较高潜在生态风险;NSGC39中部分人工填土 E_r 大于160,存在高潜在生态风险,该钻孔受填海造地影响更大,人工填土多来源于珠江口海相沉积物,Cd的含量高,人工填土层厚度及Cd的潜在生态风险普遍大于其他钻孔,说明南沙区就地取材填海造地存

在一定的生态环境安全隐患; ②埋深小于 10m 的第四系沉积物中 I_{geo} 多在 1~2 之间, 呈中度污染, 往深部污染程度呈现逐渐减弱趋势, I_{geo} 多小于 1, 以未受污染至中度污染为主; ③珠江三角洲第四系沉积环境的变化造成了沉积物粒度的交替变化, Cd 元素 I_{geo} 与岩心沉积物粒度的变化有较好的对应, 以黏性土为主的细粒级沉积物中 Cd 元素 I_{geo} 明显高于以砂性土为主的粗粒级沉积物, 黏性土中的 E_r 多大于 80, 存在较高潜在生态风险, 砂性土中的 E_r 多小于

80, 存在中等风险或低风险; ④第四系沉积环境以及河流搬运过程制约着河流沉积物中元素的分布, Cd 的高含量区主要分布于西、北江三角洲沉积区, 东江三角洲沉积区和潭江三角洲沉积区基本上是 Cd 的背景区^[37], NSGC05 和 NSGC11 接受更多来自西江和北江河流搬运沉积物质的堆积, NSGC27 和 NSGC39 则相对接受更多东江沉积物质堆积, 导致 NSGC05 和 NSGC11 的 Cd 含量较高, 污染程度高于 NSGC27 和 NSGC39.

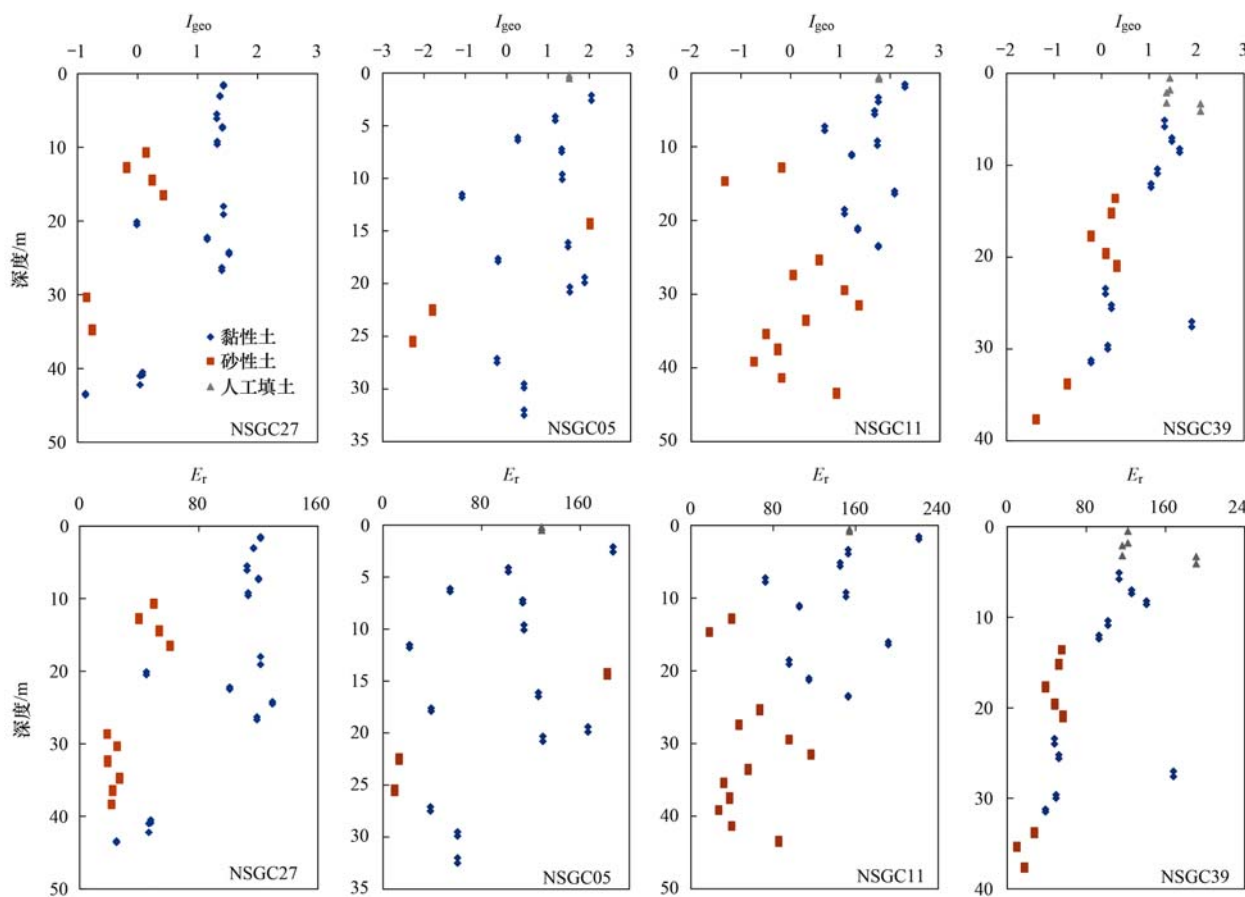


图 6 各钻孔地质累积指数 (I_{geo}) 和潜在生态风险指数 (E_r)

Fig. 6 Geological accumulation index (I_{geo}) and potential ecological risk index (E_r) for each borehole

3 讨论

有研究发现, 以淤泥质黏土为主的细粒级沉积物相比以砂性土为主的粗粒级沉积物中 Cd 元素含量更高, 海相沉积环境有助于 Cd 元素富集^[38]. 而在陆相沉积物中, 物源的不同也影响着 Cd 的富集规律, NSGC05 和 NSGC11 的 Cd 含量较高, 空间变异系数大, NSGC27 和 NSGC39 的 Cd 含量相对较低, 空间变异系数相对较小, 反映了河流搬运过程中河流沉积物质对元素分布的制约^[39].

沉积物中 Cd 的赋存形态决定了 Cd 的生物有效性, 水溶态和离子交换态可有效地影响土壤微生物的代谢活动而被称为有效态金属, 环境中重金属

的水溶态、离子交换态以及碳酸盐结合态对环境的变化较为敏感, 活动性较强, 在中性条件下可释放出来, 易于迁移和吸收, 因此, 将水溶态、离子交换态及碳酸盐结合态之和称为不稳定 Cd, 用其比例来表征元素的不稳定性^[40]. 南沙区 NSGC27、NSGC05、NSGC11 和 NSGC39 中不稳定 Cd 占总 Cd 比例的均值分别为 45.45%、37.92%、46.56% 和 49.10%, 表明土壤中 Cd 有较强的不稳定性. 将沉积物中 Cd 全量、有效态 Cd、不稳定态 Cd 和不同赋存形态的 Cd 进行因子分析发现 (表 4), 尽管水溶态 Cd 是有效态 Cd 和不稳定 Cd 的组成因子, 但由于南沙区水溶态 Cd 含量极少, 变异系数大, 其与有效态 Cd 和不稳定 Cd 的相关系数没有统一的规律. 总 Cd 与有效态 Cd

呈强正相关关系,总 Cd 与不稳定 Cd 有极强正相关关系,也就是说,广州市南沙区土壤有效态 Cd 和不稳定 Cd 有相对稳定的占比, Cd 的生物有效性受到 Cd 总量的制约.

表 4 各岩心 Cd 全量、活动态和有效态相关系数

	NSGC27			NSGC05			NSGC11			NSGC39		
	Cd	有效态 Cd	不稳定 Cd	Cd	有效态 Cd	不稳定 Cd	Cd	有效态 Cd	不稳定 Cd	Cd	有效态 Cd	不稳定 Cd
Cd	1.00	0.780	0.893	1.00	0.773	0.891	1.00	0.679	0.898	1.00	0.787	0.977
有效态 Cd	0.780	1.00	0.916	0.773	1.00	0.920	0.679	1.00	0.908	0.787	1.00	0.885
不稳定 Cd	0.893	0.916	1.00	0.891	0.920	1.00	0.898	0.908	1.00	0.977	0.885	1.00
水溶态	-0.06	0.266	0.030	0.555	0.876	0.696	0.345	0.877	0.635	0.390	0.674	0.478
离子交换态	0.827	0.917	0.928	0.782	0.999	0.928	0.841	0.892	0.962	0.790	1.00	0.887
碳酸盐结合态	0.846	0.653	0.902	0.774	0.478	0.783	0.749	0.121	0.526	0.895	0.457	0.819
腐殖酸结合态	0.756	0.397	0.534	0.843	0.640	0.671	0.831	0.747	0.869	0.843	0.592	0.809
铁锰氧化物结合态	0.773	0.314	0.430	0.778	0.331	0.541	0.795	0.170	0.484	0.674	0.243	0.582
强有机结合态	0.796	0.527	0.620	0.622	0.174	0.364	-0.004	-0.202	-0.164	0.388	-0.084	0.233
残渣态	0.932	0.655	0.746	0.800	0.539	0.558	0.893	0.339	0.633	0.868	0.777	0.869

有研究发现, 0~2 m 深层土壤中不同 pH 值会引起 Cd 含量随深度呈现不同的变化趋势(图 3). 但在钻孔沉积物中 pH 变化与 Cd 全量变化相关性不显著,与 Cd 水溶态和离子交换态之间的相关系数绝对值均大于 0.6($P<0.01$),也就是说,pH 变化与二者之间均呈显著性负相关,水溶态与离子交换态 Cd 占比随着 pH 的增大而降低(图 7). 这是由于水土系统中固液相间 Cd 的分布主要受固液界面吸附-解吸反应控制,土壤 pH 值的变化会改变 Cd 在碳酸盐结合态和交换态之间的转化,在中性和碱性 pH 范围内, Cd^{2+} 沉淀为碳酸盐矿物,随着 pH 值的降低又能够从土壤中重新释放出来^[41,42]. 以上结果说

明,pH 变化对 Cd 迁移转化的影响不完全体现在对 Cd 全量的影响上,更重要的是改变了 Cd 的有效态,从而影响了 Cd 的生物有效性. 除此以外,土壤对 Cd 的吸附-解吸受土壤类型、土壤溶液组成、土壤化学及矿物学特性影响,例如 SOM 含量^[43] 和 CEC 等^[44]. 钻孔 NSGC27 和 NSGC39 剖面沉积物中 Cd 离子交换态与 CEC 存在高度相关,相关系数分别为 0.763 和 0.747($P<0.05$). 离子强度的增加会促进电解质阳离子与 Cd^{2+} 的竞争吸附,减少自由 Cd^{2+} 的活动性,形成低价、低吸附亲和力的 Cd 离子对(如 CdCl^+)^[45],这对 Cd 在田间土壤中的生物有效性和迁移率有一定的影响.

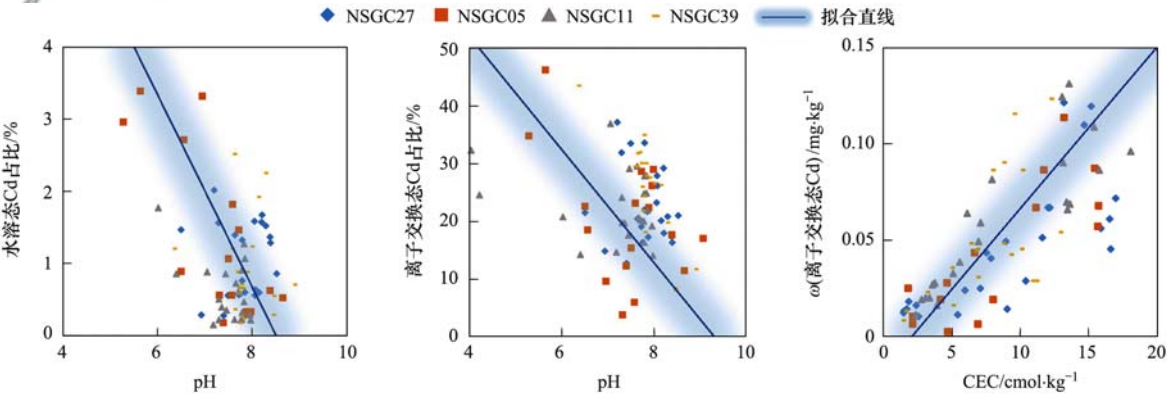


图 7 钻孔中水溶态 Cd 和离子交换态 Cd 随 pH 值和 CEC 变化

Fig. 7 Changes in water-soluble Cd and ion-exchangeable Cd with pH and CEC in boreholes

4 结论

(1)南沙核心区浅层土壤(0~20 cm)的 $\omega(\text{Cd})$ 均值达 $0.54\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤多以弱酸性-中性为主,冲积层 150~200 cm 土壤的 $\omega(\text{Cd})$ 均值为 $0.42\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤多以中性为主.同时,浅层土壤 Cd 含量变异系数明显大于 20 cm 以深土壤,随着深度的增加 Cd 含量趋于一致.

(2)在所有岩心剖面中水溶态比例均较低,离子交换态比例较高,有效态 Cd 和不稳定 Cd 占总 Cd 的比例范围分别为 21.75%~26.54% 和 37.92%~49.10%,土壤中 Cd 有较强的有效性和不稳定性.

(3)pH 变化是影响 Cd 迁移转化的最重要因素之一,南沙区土壤中不同 pH 值会引起 Cd 含量随深度呈现不同的变化趋势,但区内第四系沉积物中 pH 变化对 Cd 迁移转化的影响不完全体现在对 Cd 全

量的影响上,更重要的是改变了 Cd 的有效态,从而影响了 Cd 的生物有效性。

参考文献:

- [1] Wang M E, Liu R, Chen W P, *et al.* Effects of urbanization on heavy metal accumulation in surface soils, Beijing[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **64**: 328-334.
- [2] Li F, Huang J H, Zeng G M, *et al.* Toxic metals in topsoil under different land uses from Xiandao District, middle China: distribution, relationship with soil characteristics, and health risk assessment[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(16): 12261-12275.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 中国环保产业, 2014. 10-11.
- [7] 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 Sciences*, 2014, **42**(30): 10540-10542.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Zu Y Q, Bock L, Schvartz C, *et al.* Mobility and distribution of lead, cadmium, copper and zinc in soil profiles in the peri-urban market garden of Kunming, Yunnan Province, China [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2014, **60**(1): 133-149.
- [11] Wang D F, Wei Z Y, Tang S M, *et al.* Distribution of selenium and cadmium in soil-rice system of selenium-rich area in Hainan, China[J]. *Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2014, **27**(S5): 1633-1639.
- [12] Ağca N, Özdel E. Assessment of spatial distribution and possible sources of heavy metals in the soils of Sariseki-Dörtöl District in Hatay Province (Turkey) [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **71**(3): 1033-1047.
- [13] 王芳婷, 陈植华, 包科, 等. pH 值对海陆交互土壤镉纵向迁移转化的影响[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(1): 335-341.
- Wang F T, Chen Z H, Bao K, *et al.* Effects of pH on vertical migration of cadmium in the sea land interaction zone[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(1): 335-341.
- [14] Liu G N, Wang J, Xue W, *et al.* Effect of the size of variable charge soil particles on cadmium accumulation and adsorption [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, **17**(12): 2810-2821.
- [15] Medina I. Determination of diffusion coefficients for supercritical fluids[J]. *Journal of Chromatography A*, 2012, **1250**: 124-140.
- [16] Gallon C, Ranville M A, Conaway C H, *et al.* Asian industrial lead inputs to the north pacific evidenced by lead concentrations and isotopic compositions in surface waters and aerosols [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(23): 9874-9882.
- [17] Filippelli G M, Morrison D, Cicchella D. Urban geochemistry and human health[J]. *Elements*, 2012, **8**(6): 439-444.
- [18] Csavina J, Landázuri A, Wonaschütz A, *et al.* Metal and metalloid contaminants in atmospheric aerosols from mining operations[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2011, **221**(1-4): 145-157.
- [19] 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.
- [20] Li T Q, Jiang H, Yang X E, *et al.* Competitive sorption and desorption of cadmium and lead in paddy soils of Eastern China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **68**(6): 1599-1607.
- [21] Zhu H H, Chen C, Xu C, *et al.* Effects of soil acidification and liming on the phytoavailability of cadmium in paddy soils of central subtropical China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 99-106.
- [22] Zhou T, Wu L H, Luo Y M, *et al.* Effects of organic matter fraction and compositional changes on distribution of cadmium and zinc in long-term polluted paddy soils [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **232**: 514-522.
- [23] Zeng H Y, Chen L H, Zhou X H, *et al.* Cadmium accumulation in winter crops and the assessment of paddy soil phytoremediation in Southern China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(17): 17173-17182.
- [24] 周国华. 土壤重金属生物有效性研究进展[J]. *物探与化探*, 2014, **38**(6): 1097-1106.
Zhou G H. Recent progress in the study of heavy metal bioavailability in soil [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, **38**(6): 1097-1106.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geology Journal*, 1969, **2**: 108-118.
- [28] 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.
- [29] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Varol M. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **195**: 355-364.
- [34] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 87-101.
- [35] 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.
- [36] 张会民, 徐明岗, 吕家珑, 等. pH 对土壤及其组分吸附和解吸镉的影响研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2005, **24**(S1): 320-324.
- Zhang H M, Xu M G, Lu J L, *et al.* A review of studies on effects of pH on cadmium sorption and desorption in soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, **24**(S1): 320-324.
- [37] 罗小玲, 郭庆荣, 谢志宜, 等. 珠江三角洲地区典型农村土壤重金属污染现状分析[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(3): 485-489.
- Luo X L, Guo Q R, Xie Z Y, *et al.* Study on heavy metal pollution in typical rural soils in Pearl River Delta area [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(3): 485-489.
- [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), doi: 10.3390/ijerph16193637.
- [39] 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): 625-632.
- [40] Wang L, Cui X F, Cheng H G, *et al.* A review of soil cadmium contamination in China including a health risk assessment [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(21): 16441-16452.
- [41] Ardestani M M, Van Gestel C A M. Sorption and pH determine the long-term partitioning of cadmium in natural soils [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(18): 18492-18501.
- [42] Shen B B, Wang X M, Zhang Y, *et al.* The optimum pH and Eh for simultaneously minimizing bioavailable cadmium and arsenic contents in soils under the organic fertilizer application [J]. Science of the Total Environment, 2020, **711**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135229.
- [43] Hamid Y, Tang L, Hussain B, *et al.* Organic soil additives for the remediation of cadmium contaminated soils and their impact on the soil-plant system: a review [J]. Science of the Total Environment, 2020, **707**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136121.
- [44] Bai J H, Ye X F, Jia J, *et al.* Phosphorus sorption-desorption and effects of temperature, pH and salinity on phosphorus sorption in marsh soils from coastal wetlands with different flooding conditions[J]. Chemosphere, 2017, **188**: 677-688.
- [45] 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.

CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model	PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing	ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatial-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data	WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period	Ji Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths	WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst	HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province	XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil	XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)