

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第4期

Vol.38 No.4

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

西宁近郊大气氮干湿沉降研究	许稳, 金鑫, 罗少辉, 冯兆忠, 张霖, 潘月鹏, 刘学军 (1279)
兰州春夏季 PM ₁₀ 碳组分昼夜变化特征与来源分析	马丽, 余晔, 王博, 赵素平, 李刚 (1289)
海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征	王璐, 刘子锐, 温天雪, 苗红妍, 王跃思 (1298)
2015年北京城区大气 PM _{2.5} 中 NH ₄ ⁺ 、NO ₃ ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 及前体气体的污染特征	丁萌萌, 周健楠, 刘保献, 王焱, 张博韬, 石爱军, 杨懂艳, 常森 (1307)
北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险	齐丽, 任玥, 刘爱民, 黄业茹, 赵震, 王江, 李泓 (1317)
北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征	胡亚东, 马安周, 吕鹏翼, 张杨, 庄国强 (1327)
基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析	李笑语, 吴琳, 邹超, 张意, 毛洪钧, 荆博宇 (1340)
过渡金属掺杂对铜锡烧绿石催化碳烟燃烧性能的影响	李曦峰, 孙宇琦, 王仲鹏, 牟宗刚, 崔兆杰 (1348)
南水北调中线北京段水质状况分析	徐华山, 赵磊, 孙昊苏, 任玉芬, 丁涛, 常帅, 王海东, 李森, 果钊 (1357)
三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征	杨兵, 何丙辉, 王德宝 (1366)
基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应	李琳琳, 张依章, 唐常源, 郑磊, 孟伟, 卢少勇, 敦宇 (1376)
抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征	王琳杰, 余辉, 牛勇, 牛远, 张有林, 刘倩, 吉正元 (1384)
千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素	俞焰, 刘德富, 杨正健, 张佳磊, 徐雅倩, 刘晋高, 严广寒 (1393)
高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征	王靖淇, 王书平, 张远, 林佳宁, 高欣, 臧小苗, 赵茜 (1403)
三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响	戴文芳, 郭永豪, 郁维娜, 熊金波 (1414)
沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化	金赞芳, 龚嘉临, 施伊丽, 金漫彤, 李非里 (1423)
广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征	丁洋, 黄焕芳, 李绘, 罗杰, 郑煌, 孙焰, 杨丹, 张原, 祁士华 (1431)
太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价	边博, 周燕, 张琴 (1442)
锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果	朱广伟, 李静, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军, 张运林, 秦伯强 (1451)
超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除	杨海燕, 王灿, 鄢忠森, 李冬平, 赵焱, 瞿芳术, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1460)
UV/SPS 降解水中三氯生的效能及动力学	李青松, 李学艳, 姚宁波, 骆靖宇, 李国新, 陈国元, 高乃云 (1467)
真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素	韩慧丽, 王宏杰, 董文艺 (1477)
g-C ₃ N ₄ 协同光催化还原 Cr(VI) 及氧化磺基水杨酸	李莉莉, 陈翠柏, 兰华春, 刘菲, 安晓强 (1483)
锆改性硅藻土吸附水中磷的研究	范艺, 王哲, 赵连勤, 吴德意 (1490)
3 种常规消毒方法对磺胺类抗性基因削减效果的比较	郑吉, 周振超, 陈芳, 陈涛, 魏媛媛, 韩玥, 陈红 (1497)
典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1506)
SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响	吕文洲, 张树林, 乔宇祥, 刘英 (1513)
分散染料 neocron black (NB) 的生物降解特性	杨波, 丁凤友, 徐辉, 李方, 田晴, 马春燕 (1520)
多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能	南亚萍, 周国标, 袁林江 (1529)
生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程	付昆明, 周厚田, 苏雪莹, 王会芳 (1536)
厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析	曹雁, 王桐屿, 秦玉洁, 韩彬, 任君怡 (1544)
内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响	何正坤, 宋博宇, 朱南文, 董军 (1551)
矿化垃圾中 Fe(III) 还原耦合 CH ₄ 厌氧去除特性	王立立, 何婷, 龙焰, 刘常宝 (1558)
应用铅同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析	孙境蔚, 于瑞莲, 胡恭任, 苏光明, 王晓明 (1566)
畜禽粪便有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异	何梦媛, 董同喜, 茹淑华, 苏德纯 (1576)
山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析	葛蔚, 程琪琪, 柴超, 曾路生, 吴娟, 陈清华, 朱祥伟, 马东 (1587)
江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素	王建伟, 张彩香, 潘真真, 廖小平, 刘媛, 吕曲, 汤蜜 (1597)
基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析	蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 袁红朝, 王久荣, 李巧云, 葛体达, 吴金水 (1606)
秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响	陈珊, 丁咸庆, 祝贞科, 王娟, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (1613)
生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响	张阳阳, 胡学玉, 邹娟, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (1622)
淹水水稻土消耗 N ₂ O 能力及机制	王玲, 邢肖毅, 秦红灵, 刘毅, 魏文学 (1633)
不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放	李惠娟, 彭党聪, 刘文博, 姚倩, 卓杨 (1640)
施用不同污泥堆肥品对土壤温室气体排放的影响	杨雨滢, 易建婷, 张成, 陈宏, 木志坚 (1647)
不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响	迟苏琳, 徐卫红, 熊仕娟, 王卫中, 秦余丽, 赵婉伊, 张春来, 李彦华, 李桃, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1654)
不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制	彭琴, 李哲, 梁东丽, 王梦柯, 郭璐 (1667)
褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用	刘仕翔, 黄益宗, 罗泽娇, 黄永春, 蒋航 (1675)
不同形态磺胺类药物在根-土界面的空间分布及毒性评价	金彩霞, 司晓薇, 王万峰, 王春峰, 王子英, 张琴文, 王婉 (1683)
三峡库区消落带沉积物对鱼体富集率的影响	孙松, 李楚娴, 张成, 王永敏, 王定勇 (1689)
重庆市居民头发重金属富集特征及相关性分析	何明靖, 李琦, 王登祥, 赵佳渊, 杨婷 (1697)
16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (1704)
石墨烯掺杂聚苯胺阳极提高微生物燃料电池性能	黄力华, 李秀芬, 任月萍, 王新华 (1717)
美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定	容跃 (1726)
《环境科学》征稿简则 (1505)	
《环境科学》征订启事 (1682)	
信息 (1339, 1459, 1612)	

不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响

迟荪琳¹, 徐卫红^{1*}, 熊仕娟¹, 王卫中¹, 秦余丽¹, 赵婉伊¹, 张春来¹, 李彦华¹, 李桃¹, 张进忠¹, 熊治庭², 王正银¹, 谢德体¹

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 武汉大学资源环境学院, 武汉 430079)

摘要: 通过室内培养试验及土培试验研究了不同镉水平(1、5、10 和 15 mg·kg⁻¹)下纳米沸石和普通沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响. 结果表明, 室内培养试验中, 施用沸石(5、10 和 20 g·kg⁻¹)均显著提高了不同镉(1、5、10 和 15 mg·kg⁻¹)处理中的土壤 pH 和土壤 CEC 值, 降低了土壤可交换态镉含量, 增加了碳酸盐结合态、铁锰氧化态、有机态和残渣态镉含量, 以纳米沸石(20 g·kg⁻¹)对土壤可交换态镉的降低效果最好. 土壤 pH、土壤 CEC 与土壤可交换态镉含量呈极显著负相关($P < 0.01$), 与铁锰氧化态镉含量均呈极显著正相关($P < 0.01$). 土培试验中, 在 1 mg·kg⁻¹ 和 5 mg·kg⁻¹ Cd 条件下, 施用沸石(5、10 和 20 g·kg⁻¹)使土壤可交换态镉 FDC 降低了 6.4% ~ 63.2%, 使大白菜地上部去离子水提取态镉和乙醇提取态镉的分配比例分别降低了 2.1% ~ 56% 和 11.8% ~ 100%, 相同沸石使用量下的降低效果以纳米沸石优于普通沸石. 在 1 mg·kg⁻¹ Cd 条件下, 大白菜地上部镉形态的 FDC 与土壤 CAB-F 和 OM-F 的 FDC 有显著相关性($P < 0.05$); 在 5 mg·kg⁻¹ Cd 条件下, 大白菜地上部镉形态的 FDC 主要与土壤 OM-F 和 RES-F 形态的 FDC 存在显著相关性($P < 0.05$).

关键词: 土壤镉污染; 纳米沸石; 土壤 pH; 土壤 CEC; 土壤-植物 Cd 形态分布

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)04-1654-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.201610095

Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels

CHI Sun-lin¹, XU Wei-hong^{1*}, XIONG Shi-juan¹, WANG Wei-zhong¹, QIN Yu-li¹, ZHAO Wan-yi¹, ZHANG Chun-lai¹, LI Yan-hua¹, LI Tao¹, ZHANG Jin-zhong¹, XIONG Zhi-ting², WANG Zheng-yin¹, XIE De-ti¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Soil incubation experiment and pot experiment were carried out to investigate the influence of nano zeolite (NZ) and ordinary zeolite (OZ) on the soil pH, cation exchange capacity, concentration of soil Cd, soil Cd fraction and Cd uptake by Chinese cabbage when exposed to different Cd pollution levels(1, 5, 10 and 15 mg·kg⁻¹). The results of soil incubation experiment showed that the nano zeolite and ordinary zeolite dose(5, 10 and 20 g·kg⁻¹) increased the soil pH and cation exchange capacity, and decreased the concentration of soil exchangeable Cd, while increased the concentration of Cd in carbonate, Fe-Mn oxide, organic matter and residual fraction. The lowest EX-Cd was observed in the high nano zeolite (20 g·kg⁻¹) treatment. The soil pH and cation exchange capacity was extremely negatively correlated with the concentration of soil exchangeable Cd ($P < 0.01$), and extremely positively correlated with the concentration of soil Fe-Mn oxide Cd ($P < 0.01$). The results of pot experiment showed that the FDC of exchangeable Cd in soil decreased by 6.4% - 63.2%, and the FDC of water-extractable and ethanol-extractable Cd in Chinese cabbage decreased by 2.1% - 56% and 11.8% - 100% with zeolite application, respectively. Moreover, the reduction effect of nano zeolite on Cd concentration in soil and plant was better than that of ordinary zeolite. The FDC of Cd fraction in shoot of Chinese cabbage showed correlation with the FDC of carbonate Cd and organic matter Cd in soil ($P < 0.05$) when exposed to 1 mg·kg⁻¹ Cd pollution. Moreover, correlation was also found in the FDC of organic matter Cd and residual Cd in soil ($P < 0.05$) under 5 mg·kg⁻¹ Cd pollution.

Key words: soil Cd contamination; nano zeolite; soil pH; soil CEC; distribution of Cd fractions in plant and soil

含镉工业废渣的大量排放、污水灌溉以及农药化肥等的施用造成了农田土壤镉污染^[1], 因此, 选择经济高效的土壤镉污染修复技术成为研究的热点. 与客土、换土等物理工程及植物修复等方法相比, 原位钝化修复技术成本低、操作简单、见效快适合在实际应用中进行大面积污染治理. 土壤

原位钝化修复技术是通过向土壤中施用碱性物

收稿日期: 2016-10-17; 修订日期: 2016-11-19

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项(Nycytx-25); 国家自然科学基金项目(20477032); 国家科技支撑计划项目(2007BAD87B10)

作者简介: 迟荪琳(1991~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染植物修复技术, E-mail: chisunlin@163.com

* 通信作者, E-mail: xuwei_hong@163.com

质、磷酸盐矿物、铁锰氢氧化物、沸石和植物残渣等使重金属在土壤中发生沉淀、吸附及络合等作用而改变形态,降低在土壤中的迁移性和生物有效性^[2,3]。其中,沸石由于其有较大的比表面积和阳离子交换量,较低的价格,广泛的来源而在土壤镉污染钝化修复的研究中得到关注^[4~6]。已有研究表明,沸石能够显著降低镉在土壤的移动性,并降低玉米^[7]、大麦^[8]、番茄^[9]等作物各器官的镉含量。而传统普通沸石在重金属污染水平过高的土壤中修复能力有限,并且高施用量会对抑制植物生长^[10]。因此,对沸石进行人工改性成为研究的热点^[11,12]。

已有大量报道改性后的沸石能有效降低污水中的重金属含量^[13,14]。改性后的纳米沸石相比普通沸石具有更大的比表面积和阳离子交换量,在污水中对镉的修复效果显著优于普通沸石^[15],而目前将纳米沸石用于土壤重金属修复以及对植物体内重金属吸收积累的研究鲜见报道。我国沸石资源丰富,其在大面积土壤重金属的修复有着广泛的应用前景。因此,本文通过室内土壤处理试验研究 1、5、10 和 15 mg·kg⁻¹ 镉处理的土壤中,施加不同量(0、5、10 和 20 g·kg⁻¹)的纳米沸石和普通沸石随时间变化对土壤 pH、土壤 CEC 及镉含量和形态的影响,并通过土培试验研究 1 mg·kg⁻¹ 和 5 mg·kg⁻¹ 镉处理的土壤中施加 0、5、10 和 20 g·kg⁻¹ 的普通沸石和纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收积累的影响,探讨纳米沸石和普通沸石对土壤镉的修复机制,以期对土壤镉污染修复技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为酸性紫色土,采自重庆市九龙坡含谷蔬菜基地。土壤基本理化性质为 pH 4.93, CEC 17.93 cmol(+)·kg⁻¹, 土壤全 N、有机质分别为 0.66 g·kg⁻¹ 和 15.2 g·kg⁻¹, 碱解 N、有效 P、速效 K 分别为 112.2、57.0、170.3 mg·kg⁻¹, 全镉 0.307 mg·kg⁻¹。纳米沸石(NZ)和普通沸石(OZ)采自河北省某矿厂,粒径分别为 60~70 nm 和 100 目(149 μm),比表面积分别为 656 m²·g⁻¹、233 m²·g⁻¹, pH 分别为 9.2、9.4, CEC 分别为 264 cmol(+)·kg⁻¹、183 cmol(+)·kg⁻¹, 全镉含量分别为 0.964 mg·kg⁻¹、0.425 mg·kg⁻¹。土培供试作物为大白菜(*Brassica pekinensis* L.), 品种为新晋菜三号。

1.2 试验方案

1.2.1 室内土壤处理试验

本试验设置 4 个镉污染水平,7 个沸石处理,无镉污染无沸石添加为空白,共 29 个处理,每个处理 3 个重复。称取 160 g 过 2 mm 筛风干土分装于 300 mL 的烧杯中,按处理分别添加 CdCl₂·2.5H₂O 溶液,充分拌匀,使土壤 Cd 污染水平为 1、5、10 和 15 mg·kg⁻¹。调节土壤含水量为 17%,于气候培养箱中平衡 3 周(25℃±1℃恒温,光周期 12 h,空气湿度 70%),每隔 2 d 用称重法保持水分含量为田间最大持水量的 70%。平衡 3 周后,取样作为 0 d 样品。按处理在土壤中添加纳米沸石(NZ)和普通沸石(OZ),添加量为 0、5、10 和 20 g·kg⁻¹,充分拌匀。于气候培养箱中继续处理 30 d,分别于处理的第 1、4、7、14、21 和 28 d 取样。每次取土样约 15 g,风干过 1 mm 筛,测定土壤镉形态含量、土壤 pH 和 CEC。

1.2.2 土培试验

试验于 2014 年 9 月 15 日~12 月 1 日在西南大学资源环境学院玻璃温室内进行。试验共设 2 个镉污染水平,7 个沸石处理,无镉无沸石添加为空白,共 15 个处理,每个处理 3 个重复,随机排列。将 2.5 kg 过 2 mm 筛的风干土装于塑料桶(直径×高=17 cm×20 cm)中,按处理分别添加不同浓度的镉(以 CdCl₂·2.5H₂O 溶液的形式添加),使其最终镉水平分别为 1 mg·kg⁻¹ 和 5 mg·kg⁻¹,并加入底肥(N 180 mg·kg⁻¹、P₂O₅ 100 mg·kg⁻¹、K₂O 150 mg·kg⁻¹,以尿素、NH₄H₂PO₄ 和 KCl 的形式加入),充分拌匀后平衡 3 周。然后按处理分别施加 0、5、10 和 20 g·kg⁻¹ 的 NZ 和 OZ,放置 5 d 后,每盆分别移栽 6 株长势一致的大白菜幼苗。幼苗移栽 30 d 后,每盆定苗 3 株,40 d 后收获。培养期间保持土壤含水量为田间最大持水量的 70%。将大白菜用自来水洗净后用去离子水冲洗,分别记录大白菜地上部和根部鲜重,取样测定植株镉形态。植株于 105℃ 下杀青 15 min,在 65℃ 下烘干至恒重,计算干重,后将烘干植株磨碎,测定地上部和根部的镉含量。植株收获后,挑出土壤中的植物根系后混匀,四分法采集土样,风干过 1 mm 筛,测定土壤镉含量和镉形态。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤和沸石基本理化性质测定

土壤基本理化性质按常规方法测定^[16],沸石阳离子交换量采用常规的 BaCl₂-三乙醇胺法测定;纳米沸石粒径采用原子力显微镜(Dimension Icom

Atomic Force Microscope, Bruker, USA) 测定; 沸石比表面积测定参考 Liu 等^[17]的方法.

1.3.2 土壤和植株镉含量测定

土壤和沸石全镉含量测定采用 $\text{HNO}_3\text{-HCl-HClO}_4$ 消解, 植株镉含量测定采用 $\text{HNO}_3\text{:HClO}_4 = 4:1$ 的混合酸消解, 原子吸收分光光度法测定 (Perkin Elmer SIMMA 6000, Norwalk, USA), 检测限为 $0.005 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 采用国家标准与技术研究所提供的土壤标准物质 (GBW # 08303)、植株标准物质 (GBW # 08513) 对测定结果进行质量监控. 所有土壤样品的镉回收率均高于 95%, 相对标准偏差 (RSD) 的精度在 10% 以内. 所有植物样品的 Cd 回收率均高于 95%, 相对标准偏差 (RSD) 的精度在 10% 以内.

1.3.3 土壤和植株镉形态分级测定

土壤镉形态分级采用五步连续提取法^[18], 提取剂及提取顺序为 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ MgCl}_2$ 溶液提取可交换态 (EX-F), $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaAc}$ 溶液提取碳酸盐结合态 (CAB-F), $0.04 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 溶液提取铁锰氧化态 (FMO-F), $0.02 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ HNO}_3$ 和 6 mL 30% H_2O_2 提取有机态 (OM-F), 10 mL 王水和 3 mL 高氯酸提取残渣态 (RES-F).

植株镉形态测定采用连续浸取法浸取 Cd^[19], 提取剂及提取顺序为 80% 乙醇 (E-F)、去离子水 (W-F)、 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钠溶液 (NaCl-F)、2% 醋酸 (HAc-F)、 $0.6 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸 (HCl-F) 和残留态镉 (R-F). 每种镉形态的提取液蒸干后, 用体积比为 5:1 的 $\text{HNO}_3\text{:HClO}_4$ 混合液消解. 土壤和植株镉测定的质控方法参见 1.3.2 节.

1.4 数据处理

采用 SPSS 23.0 进行数据方差分析, Microsoft Excel 2010 进行数据处理和作图.

2 结果与分析

2.1 不同镉水平下土壤 Cd 形态变化

由表 1~4 可知, 在 0、5、10、20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 沸石处理的 1d 后, 土壤中镉主要以可交换态 (EX-F) 存在, 其分配比例 (指土壤中镉的某种形态与总镉含量的比值) (FDC) 为 57.14%~65.03%; 有机态 (OM-F) 含量最低, 其 FDC 为 0.31%~0.61%. 培养至 28 d 时, 0、5、10、20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 沸石处理土壤中镉形态的 FDC 分别为: EX-F (66.01%) > CAB-F (11.38%) > FMO-F (10.71%) > RES-F (8.07%) > OM-F (3.84%); EX-F (59.13%) > FMO-F (13.80%) >

CAB-F (12.48%) > RES-F (9.33%) > OM-F (5.26%); EX-F (55.70%) > FMO-F (15.99%) > CAB-F (13.24%) > RES-F (9.44%) > OM-F (5.64%) 和 EX-F (52.68%) > FMO-F (17.86%) > CAB-F (15.69%) > RES-F (9.06%) > OM-F (4.72%).

在 5、10、20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 沸石处理下, 不同镉条件下的土壤各镉形态 (EX-F、CAB-F、FMO-F、OM-F、RES-F) 含量及土壤镉总量差异达到显著水平, 土壤 EX-F 和 FMO-F 镉含量在纳米沸石和普通沸石之间的差异也达到显著水平; 在相同 Cd 水平和沸石用量条件下, 纳米沸石处理的土壤 EX-F 含量低于普通沸石. 随培养时间的增加, EX-F 含量逐渐下降, 土壤 CAB-F、FMO-F、OM-F 和 RES-F 含量逐渐升高; 至培养结束时, 土壤中镉各形态含量以 EX-F > FMO-F > CAB-F > RES-F > OM-F.

由表 1~4 还可以看出, 在不同土壤 Cd 水平下, 施用沸石培养 21~28 d 后, 土壤 EX-F 含量比培养 1 d 时下降了 9.09%~13.44%, 且随沸石施用量的增加降低幅度增大; FMO-F、OM-F、RES-F 含量则比培养 1 d 时增加了 23.01%~34.07%、362.50%~616.67% 和 12.70%~22.41%, 均以 10 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 沸石施用量效果较好; CAB-F 含量在沸石中低施用量 (5、10 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 时降低了 16.51%~19.84%, 而在沸石高施用量 (20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 增加了 24.03%. 在相同施用量下, 相比普通沸石, 纳米沸石对土壤不同镉形态及含量的影响更为显著, 如在培养 28 d 时, 纳米沸石处理下土壤 EX-F 的含量比普通沸石低 11.41%~22.75%, 土壤 FMO-F 含量高 33.33%~41.30%.

不同沸石施用量、镉水平与土壤镉形态的相关性见表 5.

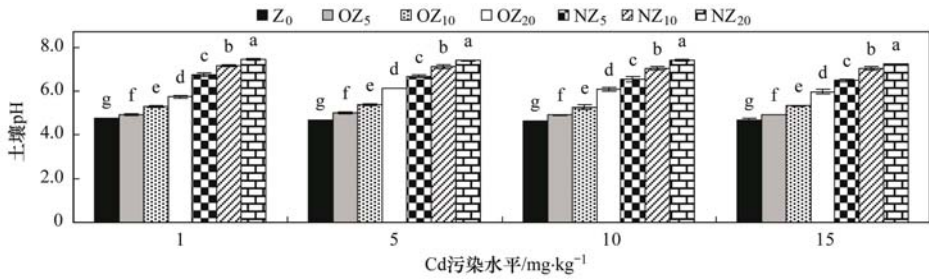
2.2 不同镉水平下土壤 pH 值变化

由图 1 可知, 施用沸石显著增加了镉污染土壤 pH 值, 土壤 pH 值在纳米沸石和普通沸石间和不同施用量间的差异均达到了显著水平 ($P < 0.05$). 与对照相比, 施用沸石分别使 1、5、10、15 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd 污染土壤的 pH 值增加了 3.7%~57.0%、7.6%~59.2%、6.4%~60.6% 和 5.1%~55.1%, 对中浓度 (5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd) 镉污染土壤中的 pH 提高效果较好, 且随沸石施用量的增加而显著增加. 在相同条件下, 施用纳米沸石的土壤 pH 值比施用普通沸石的土壤 pH 值增加了 20.8%~37.0%, 高施用量 (20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 纳米沸石的土壤 pH 最高, 比对照增加了 52.6%~61.6%.

表 1 0 g·kg⁻¹ 沸石施用量时不同镉水平下土壤镉形态及含量随培养时间的变化¹⁾

Table 1 Change of cadmium fractions with the culture time in different Cd polluted soils without application of zeolite							
培养时间/d	Cd 水平 /mg·kg ⁻¹	土壤 Cd 各形态及含量/mg·kg ⁻¹					土壤 Cd 总量 /mg·kg ⁻¹
		EX-F	CAB-F	FMO-F	OM-F	RES-F	
1	1	0.56 ± 0.20d	0.25 ± 0.03d	0.02 ± 0.00d	0.00 ± 0.00c	0.26 ± 0.03d	1.09 ± 0.25d
	5	3.33 ± 0.17c	1.00 ± 0.13c	0.37 ± 0.03c	0.00 ± 0.00c	0.32 ± 0.03c	5.02 ± 0.35c
	10	7.45 ± 0.30b	1.43 ± 0.16b	0.83 ± 0.11b	0.06 ± 0.01b	0.77 ± 0.07b	10.54 ± 0.65b
	15	10.33 ± 0.30a	1.97 ± 0.18a	1.18 ± 0.13a	0.09 ± 0.01a	0.86 ± 0.07a	14.43 ± 0.69a
4	1	0.26 ± 0.03d	0.46 ± 0.07d	0.19 ± 0.01d	0.06 ± 0.00d	0.28 ± 0.01d	1.25 ± 0.13d
	5	1.57 ± 0.33c	1.86 ± 0.16c	0.44 ± 0.06c	0.12 ± 0.01c	0.46 ± 0.03c	4.45 ± 0.58c
	10	3.88 ± 0.37b	4.20 ± 0.24b	0.77 ± 0.08a	0.21 ± 0.03a	0.73 ± 0.04a	9.79 ± 0.76b
	15	8.09 ± 0.16a	6.06 ± 0.11a	0.63 ± 0.13b	0.12 ± 0.03b	0.41 ± 0.03b	15.31 ± 0.45a
7	1	0.24 ± 0.04d	0.12 ± 0.01c	0.14 ± 0.01d	0.06 ± 0.01c	0.44 ± 0.06c	1.00 ± 0.14d
	5	2.36 ± 0.16c	0.74 ± 0.08b	0.68 ± 0.08c	0.19 ± 0.04b	1.03 ± 0.07b	5.00 ± 0.44c
	10	6.25 ± 0.23b	1.05 ± 0.11a	1.18 ± 0.13b	0.24 ± 0.03ab	1.32 ± 0.17a	10.04 ± 0.66b
	15	10.89 ± 0.18a	0.99 ± 0.13a	1.47 ± 0.13a	0.30 ± 0.01a	1.32 ± 0.03a	14.97 ± 0.48a
14	1	0.26 ± 0.04d	0.18 ± 0.01d	0.15 ± 0.01d	0.00 ± 0.00c	0.36 ± 0.01d	0.95 ± 0.08c
	5	2.66 ± 0.28c	0.61 ± 0.13c	0.68 ± 0.13c	0.24 ± 0.03b	0.92 ± 0.04c	5.11 ± 0.61b
	10	5.46 ± 0.25b	0.81 ± 0.10b	1.23 ± 0.18b	0.61 ± 0.03a	1.18 ± 0.13b	9.29 ± 0.69a
	15	9.22 ± 0.10a	1.33 ± 0.17a	1.46 ± 0.20a	0.65 ± 0.01a	1.40 ± 0.17a	14.06 ± 0.74a
21	1	0.12 ± 0.01d	0.11 ± 0.01d	0.26 ± 0.03d	0.11 ± 0.03d	0.24 ± 0.03d	0.84 ± 0.11d
	5	2.59 ± 0.17c	0.60 ± 0.07c	0.76 ± 0.11c	0.24 ± 0.04c	0.56 ± 0.06c	4.75 ± 0.45c
	10	6.07 ± 0.14b	1.39 ± 0.14b	1.30 ± 0.20b	0.48 ± 0.13b	0.76 ± 0.11b	10.00 ± 0.72b
	15	9.67 ± 0.37a	1.74 ± 0.20a	1.81 ± 0.07a	0.67 ± 0.11a	1.05 ± 0.10a	14.94 ± 0.85a
28	1	0.39 ± 0.14d	0.09 ± 0.00d	0.13 ± 0.01d	0.02 ± 0.00d	0.26 ± 0.01d	0.89 ± 0.17d
	5	2.90 ± 0.27c	0.37 ± 0.03c	0.68 ± 0.13c	0.23 ± 0.03c	0.63 ± 0.06c	4.81 ± 0.51c
	10	6.56 ± 0.20b	1.25 ± 0.13b	1.11 ± 0.08b	0.36 ± 0.06b	0.72 ± 0.06b	10.00 ± 0.52b
	15	10.10 ± 0.21a	1.73 ± 0.11a	1.33 ± 0.17a	0.55 ± 0.06a	0.82 ± 0.04a	14.53 ± 0.59a

1) 表中所列数据为平均值 ± 标准误差, 同一列数据后的不同小写字母表示不同镉处理之间的差异达到显著性水平 ($P < 0.05$), 下同



不同小写字母表示土壤 pH 在同一个镉污染水平下不同沸石处理间的差异显著性 ($P < 0.05$)

图 1 不同镉污染水平下沸石处理对土壤 pH 值的影响

Fig. 1 Effect of zeolite treatment on soil pH under different levels of Cd

2.3 不同镉水平下土壤阳离子交换量(CEC)变化

由图 2 可知,施用纳米沸石和普通沸石均显著提高了不同镉污染土壤的 CEC ($P < 0.05$),且随沸石施用量的增加而增幅越大. 与对照(Z_0)相比,施用沸石使 1、5、10 和 15 mg·kg⁻¹ Cd 污染土壤的 CEC 分别增加了 4.8% ~ 23.8%、5.3% ~ 20.7%、4.9% ~ 20.3% 和 12.2% ~ 22.9%,且随施用量的增加而增加. 相同施用量的纳米沸石比普通沸石处理的土壤 CEC 高 0.6% ~ 9.9%,且以纳米沸石高量

(20 g·kg⁻¹) 处理最高. 值得注意的是,在中高浓度镉(10 和 15 mg·kg⁻¹ Cd)污染土壤中,土壤 CEC 在不同施用量的普通沸石间无显著差异 ($P > 0.05$),而纳米沸石低施用量(5 g·kg⁻¹)和高施用量(20 g·kg⁻¹)处理间存在显著差异 ($P < 0.05$).

2.4 土壤 pH 值、土壤 CEC 与土壤镉形态含量的相关性

如表 6 所示,在 5、10 和 15 mg·kg⁻¹ Cd 污染水平下,土壤 pH、土壤 CEC 与土壤可交换态镉含量均

表 2 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 沸石施用量时不同镉水平下土壤镉形态及含量随培养时间的变化Table 2 Change of cadmium fractions with the culture time in different Cd polluted soils with application of $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ zeolite

培养时间 /d	Cd 水平 /mg·kg ⁻¹	土壤 Cd 各形态及含量/mg·kg ⁻¹					
		EX-F		CAB-F		FMO-F	
		NZ	OZ	NZ	OZ	NZ	OZ
1	1	0.54 ± 0.06d	0.54 ± 0.03d	0.26 ± 0.03d	0.28 ± 0.04d	0.01 ± 0.00d	0.02 ± 0.00d
	5	2.88 ± 0.07c	3.36 ± 0.07c	1.17 ± 0.07c	1.20 ± 0.08c	0.55 ± 0.06c	0.53 ± 0.03c
	10	6.67 ± 0.08b	7.38 ± 0.24b	1.56 ± 0.07b	1.46 ± 0.07b	1.39 ± 0.10b	0.96 ± 0.07b
	15	8.38 ± 0.27a	9.83 ± 0.78a	1.87 ± 0.18a	1.71 ± 0.08a	1.87 ± 0.04a	1.44 ± 0.08a
4	1	0.12 ± 0.01d	0.06 ± 0.00d	0.32 ± 0.03d	0.26 ± 0.03d	0.24 ± 0.03c	0.15 ± 0.01b
	5	1.36 ± 0.06c	1.50 ± 0.03c	1.64 ± 0.14c	1.91 ± 0.08c	0.71 ± 0.11b	0.67 ± 0.07a
	10	3.19 ± 0.06b	3.85 ± 0.10b	3.50 ± 0.25b	4.17 ± 0.21b	1.08 ± 0.10a	0.66 ± 0.07a
	15	5.77 ± 0.08a	7.14 ± 0.17a	6.23 ± 0.11a	7.23 ± 0.25a	1.12 ± 0.10a	0.73 ± 0.01a
7	1	0.14 ± 0.01d	0.17 ± 0.01d	0.12 ± 0.01c	0.21 ± 0.01c	0.28 ± 0.03d	0.15 ± 0.01d
	5	1.89 ± 0.10c	2.88 ± 0.20c	0.43 ± 0.03b	0.98 ± 0.10a	0.96 ± 0.13c	0.82 ± 0.08c
	10	5.24 ± 0.07b	5.75 ± 0.20b	1.09 ± 0.14a	0.72 ± 0.06b	1.96 ± 0.16b	1.38 ± 0.13b
	15	8.89 ± 0.13a	10.65 ± 0.33a	1.29 ± 0.16a	0.80 ± 0.11ab	2.43 ± 0.17a	1.63 ± 0.06a
14	1	0.09 ± 0.01d	0.24 ± 0.04d	0.20 ± 0.03c	0.30 ± 0.03b	0.26 ± 0.01d	0.21 ± 0.01d
	5	2.13 ± 0.14c	2.54 ± 0.10c	0.86 ± 0.10b	0.42 ± 0.06b	1.09 ± 0.10c	0.81 ± 0.08c
	10	4.81 ± 0.17b	5.87 ± 0.23b	1.07 ± 0.13ab	1.06 ± 0.16a	2.14 ± 0.16b	1.25 ± 0.06b
	15	8.47 ± 0.23a	9.06 ± 0.20a	1.32 ± 0.16a	0.97 ± 0.14a	2.65 ± 0.07a	1.69 ± 0.13a
21	1	0.03 ± 0.00d	0.13 ± 0.01d	0.21 ± 0.03d	0.15 ± 0.01c	0.28 ± 0.03d	0.25 ± 0.06d
	5	2.07 ± 0.16c	2.55 ± 0.20c	0.74 ± 0.08c	0.82 ± 0.11b	1.18 ± 0.08c	0.85 ± 0.06c
	10	4.57 ± 0.23b	5.85 ± 0.16b	1.64 ± 0.24b	1.33 ± 0.14a	2.04 ± 0.13b	1.34 ± 0.16b
	15	8.20 ± 0.25a	9.63 ± 0.30a	1.54 ± 0.13a	1.21 ± 0.01a	1.91 ± 0.08a	2.04 ± 0.11a
28	1	0.35 ± 0.01d	0.26 ± 0.01d	0.13 ± 0.01d	0.12 ± 0.01d	0.18 ± 0.01d	0.20 ± 0.01d
	5	2.31 ± 0.14c	2.90 ± 0.27c	0.50 ± 0.03c	0.69 ± 0.07c	0.98 ± 0.13c	0.75 ± 0.04c
	10	5.47 ± 0.13b	6.41 ± 0.16b	1.53 ± 0.10b	1.31 ± 0.10b	1.80 ± 0.08b	1.20 ± 0.07b
	15	8.26 ± 0.16a	10.07 ± 0.30a	1.61 ± 0.14a	1.67 ± 0.16a	1.73 ± 0.06a	1.54 ± 0.07a
LSD0.05							
Cd 水平		0.579		0.321		0.393	
沸石种类		0.075		0.011		0.019	
Cd 水平 X 沸石种类		0.047		0.007		0.012	

培养时间 /d	Cd 水平 /mg·kg ⁻¹	土壤 Cd 各形态及含量/mg·kg ⁻¹				土壤 Cd 总量/mg·kg ⁻¹	
		OM-F		RES-F		NZ	OZ
		NZ	OZ	NZ	OZ		
1	1	0.00 ± 0.00b	0.00 ± 0.00c	0.21 ± 0.03c	0.26 ± 0.03b	1.02 ± 0.11d	0.84 ± 0.10d
	5	0.01 ± 0.00b	0.00 ± 0.00c	0.38 ± 0.07b	0.39 ± 0.07b	4.99 ± 0.27c	5.09 ± 0.25c
	10	0.00 ± 0.00b	0.05 ± 0.01b	0.85 ± 0.06a	0.76 ± 0.03a	10.47 ± 0.31b	9.85 ± 0.42b
	15	0.19 ± 0.01a	0.20 ± 0.01a	0.87 ± 0.06a	0.89 ± 0.10a	12.68 ± 0.57a	13.18 ± 1.06a
4	1	0.09 ± 0.01c	0.15 ± 0.01c	0.26 ± 0.04b	0.32 ± 0.03c	1.03 ± 0.13d	0.62 ± 0.08d
	5	0.19 ± 0.01b	0.25 ± 0.01b	0.55 ± 0.06a	0.47 ± 0.07bc	4.45 ± 0.38c	4.33 ± 0.27c
	10	0.24 ± 0.03b	0.22 ± 0.03a	0.69 ± 0.08a	0.72 ± 0.06a	8.70 ± 0.52b	8.90 ± 0.47b
	15	0.42 ± 0.06a	0.07 ± 0.00a	0.55 ± 0.06a	0.52 ± 0.06b	14.09 ± 0.41a	15.17 ± 0.49a
7	1	0.05 ± 0.00c	0.03 ± 0.00c	0.41 ± 0.04c	0.42 ± 0.04c	1.00 ± 0.10d	0.56 ± 0.08d
	5	0.26 ± 0.03b	0.22 ± 0.03b	1.09 ± 0.14b	0.96 ± 0.06b	4.63 ± 0.42c	4.90 ± 0.47c
	10	0.29 ± 0.03b	0.30 ± 0.03a	1.27 ± 0.08ab	1.38 ± 0.10a	9.85 ± 0.48b	8.15 ± 0.51b
	15	0.49 ± 0.07a	0.33 ± 0.03a	1.42 ± 0.06a	1.47 ± 0.11a	14.52 ± 0.58a	13.41 ± 0.64a
14	1	0.01 ± 0.00c	0.15 ± 0.01c	0.37 ± 0.04c	0.36 ± 0.06c	0.93 ± 0.10d	0.90 ± 0.16d
	5	0.25 ± 0.04b	0.29 ± 0.04b	0.87 ± 0.08b	0.98 ± 0.10b	5.20 ± 0.47c	4.06 ± 0.38c
	10	0.54 ± 0.04a	0.57 ± 0.06a	1.27 ± 0.10a	1.23 ± 0.11a	9.83 ± 0.59b	8.75 ± 0.61b
	15	0.69 ± 0.13a	0.61 ± 0.03a	1.43 ± 0.06a	1.43 ± 0.07a	14.56 ± 0.64a	12.33 ± 0.57a
21	1	0.14 ± 0.01c	0.14 ± 0.01d	0.26 ± 0.03d	0.28 ± 0.04d	0.92 ± 0.10d	0.67 ± 0.14d
	5	0.36 ± 0.03b	0.32 ± 0.03c	0.55 ± 0.06c	0.60 ± 0.07c	4.90 ± 0.41c	4.54 ± 0.47c
	10	0.52 ± 0.04b	0.56 ± 0.07b	0.71 ± 0.04b	0.86 ± 0.07b	9.48 ± 0.20b	9.08 ± 0.59b
	15	0.89 ± 0.14a	0.93 ± 0.06a	0.88 ± 0.08a	1.10 ± 0.13a	13.42 ± 0.69a	13.81 ± 0.61a
28	1	0.01 ± 0.00c	0.03 ± 0.00d	0.29 ± 0.01c	0.25 ± 0.04c	0.96 ± 0.06d	0.61 ± 0.08d
	5	0.30 ± 0.01b	0.25 ± 0.06c	0.71 ± 0.04b	0.65 ± 0.06b	4.80 ± 0.35c	4.59 ± 0.49c
	10	0.62 ± 0.06a	0.46 ± 0.06b	0.82 ± 0.08b	0.84 ± 0.06ab	10.24 ± 0.45b	9.38 ± 0.44b
	15	0.73 ± 0.06a	0.80 ± 0.07a	1.04 ± 0.10a	1.09 ± 0.17a	13.37 ± 0.51a	14.08 ± 0.76a
LSD0.05							
Cd 水平		0.104		0.065		2.316	
沸石种类		0.005		0.009		0.211	
Cd 水平 X 沸石种类		0.003		0.005		0.057	

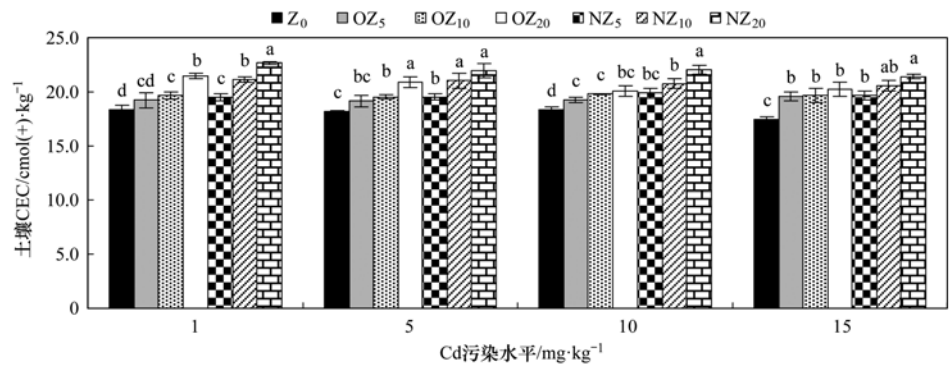
表 3 10 g·kg⁻¹沸石施用量时不同镉水平下土壤镉形态及含量随培养时间的变化

Table 3 Change of cadmium fractions with the culture time in different Cd polluted soils with application of 10 g·kg ⁻¹ zeolite							
培养时间 /d	Cd 水平 /mg·kg ⁻¹	土壤 Cd 各形态及含量/mg·kg ⁻¹					
		EX-F		CAB-F		FMO-F	
		NZ	OZ	NZ	OZ	NZ	OZ
1	1	0.51 ± 0.04d	0.57 ± 0.07d	0.30 ± 0.07d	0.34 ± 0.07c	0.03 ± 0.00c	0.04 ± 0.01d
	5	2.96 ± 0.11c	3.21 ± 0.08c	1.18 ± 0.13c	0.96 ± 0.16b	0.41 ± 0.04c	0.55 ± 0.08c
	10	6.32 ± 0.10b	7.14 ± 0.17b	1.66 ± 0.18b	1.51 ± 0.13a	1.58 ± 0.16b	0.94 ± 0.10b
	15	8.52 ± 0.13a	10.03 ± 0.25a	2.43 ± 0.11a	1.68 ± 0.23a	1.32 ± 0.24a	1.42 ± 0.11a
4	1	0.20 ± 0.01d	0.05 ± 0.01d	0.42 ± 0.03d	0.15 ± 0.01d	0.18 ± 0.03c	0.17 ± 0.01b
	5	1.21 ± 0.04c	1.55 ± 0.08c	1.82 ± 0.11c	1.90 ± 0.13c	0.77 ± 0.08b	0.62 ± 0.11a
	10	3.39 ± 0.14b	3.83 ± 0.11b	3.91 ± 0.40b	4.15 ± 0.18b	1.17 ± 0.13a	0.64 ± 0.11a
	15	6.00 ± 0.16a	6.99 ± 0.20a	6.56 ± 0.18a	7.08 ± 0.27a	1.15 ± 0.08a	0.70 ± 0.10a
7	1	0.12 ± 0.01d	0.18 ± 0.01d	0.05 ± 0.00c	0.17 ± 0.01b	0.22 ± 0.03d	0.23 ± 0.03d
	5	1.72 ± 0.06c	2.22 ± 0.18c	0.57 ± 0.08b	0.53 ± 0.07a	1.10 ± 0.13c	0.87 ± 0.11c
	10	4.60 ± 0.13b	6.01 ± 0.28b	0.95 ± 0.27b	0.54 ± 0.07a	2.11 ± 0.10b	1.41 ± 0.13b
	15	8.44 ± 0.10a	9.95 ± 0.11a	1.70 ± 0.16a	0.59 ± 0.11a	1.93 ± 0.13a	2.07 ± 0.13a
14	1	0.07 ± 0.01d	0.23 ± 0.01d	0.20 ± 0.01c	0.30 ± 0.01c	0.18 ± 0.01d	0.15 ± 0.03c
	5	1.79 ± 0.10c	2.46 ± 0.11c	0.84 ± 0.11bc	0.40 ± 0.07c	1.08 ± 0.20c	0.87 ± 0.16b
	10	4.66 ± 0.14b	5.13 ± 0.08b	1.38 ± 0.18ab	1.16 ± 0.11b	2.34 ± 0.07b	1.32 ± 0.10b
	15	6.99 ± 0.14a	9.19 ± 0.16a	1.74 ± 0.44a	0.67 ± 0.13a	2.97 ± 0.18a	1.95 ± 0.28a
21	1	0.09 ± 0.01d	0.15 ± 0.01d	0.18 ± 0.01d	0.18 ± 0.01c	0.26 ± 0.01d	0.24 ± 0.01d
	5	1.97 ± 0.04c	2.38 ± 0.27c	0.70 ± 0.07c	0.88 ± 0.11b	1.30 ± 0.08c	0.99 ± 0.16c
	10	4.67 ± 0.13b	6.48 ± 0.33b	1.65 ± 0.10b	1.32 ± 0.11a	2.10 ± 0.21b	1.54 ± 0.08b
	15	7.65 ± 0.10a	9.63 ± 0.17a	2.13 ± 0.11a	0.88 ± 0.13b	2.43 ± 0.07a	2.21 ± 0.23a
28	1	0.39 ± 0.05d	0.32 ± 0.08d	0.11 ± 0.03d	0.05 ± 0.00c	0.21 ± 0.04c	0.17 ± 0.04d
	5	2.30 ± 0.08c	2.71 ± 0.11c	0.74 ± 0.13c	0.78 ± 0.23b	0.96 ± 0.14b	0.80 ± 0.07c
	10	4.57 ± 0.23b	6.33 ± 0.33b	1.51 ± 0.11b	1.27 ± 0.13a	2.13 ± 0.13a	1.34 ± 0.04b
	15	8.10 ± 0.21a	9.31 ± 0.14a	2.24 ± 0.08a	1.36 ± 0.10a	1.37 ± 0.18a	1.78 ± 0.24a
LSD0.05							
Cd 水平		1.141		0.488		0.332	
沸石种类		0.055		0.027		0.023	
Cd 水平 X 沸石种类		0.089		0.015		0.015	
培养时间 /d	Cd 水平 /mg·kg ⁻¹	土壤 Cd 各形态及含量/mg·kg ⁻¹				土壤 Cd 总量/mg·kg ⁻¹	
		OM-F		RES-F		NZ	OZ
		NZ	OZ	NZ	OZ		
1	1	0.00 ± 0.00b	0.00 ± 0.00b	0.25 ± 0.06b	0.26 ± 0.06c	1.09 ± 0.17d	1.21 ± 0.21d
	5	0.01 ± 0.00b	0.01 ± 0.00b	0.38 ± 0.10b	0.35 ± 0.06c	4.94 ± 0.38c	5.08 ± 0.38c
	10	0.03 ± 0.01b	0.02 ± 0.00b	0.77 ± 0.07a	0.77 ± 0.07b	10.36 ± 0.52b	10.38 ± 0.47b
	15	0.27 ± 0.07a	0.12 ± 0.01a	0.93 ± 0.11a	1.09 ± 0.13a	13.47 ± 0.66a	14.34 ± 0.74a
4	1	0.05 ± 0.00b	0.15 ± 0.04ab	0.35 ± 0.03b	0.44 ± 0.04b	1.20 ± 0.10d	0.96 ± 0.13d
	5	0.18 ± 0.03a	0.13 ± 0.01b	0.52 ± 0.06ab	0.45 ± 0.06b	4.50 ± 0.33c	4.65 ± 0.40c
	10	0.18 ± 0.04a	0.28 ± 0.08a	0.59 ± 0.11a	0.64 ± 0.08a	9.24 ± 0.82b	9.54 ± 0.58b
	15	0.19 ± 0.04a	0.15 ± 0.01ab	0.48 ± 0.10ab	0.51 ± 0.07ab	14.38 ± 0.57a	15.43 ± 0.65a
7	1	0.07 ± 0.01c	0.05 ± 0.00d	0.38 ± 0.04c	0.46 ± 0.01c	0.84 ± 0.10d	1.09 ± 0.07d
	5	0.19 ± 0.01b	0.13 ± 0.01c	0.97 ± 0.03b	1.05 ± 0.10b	4.55 ± 0.31c	4.80 ± 0.48c
	10	0.42 ± 0.04a	0.29 ± 0.01b	1.45 ± 0.10a	1.41 ± 0.17a	9.53 ± 0.64b	9.66 ± 0.66b
	15	0.46 ± 0.07a	0.36 ± 0.03a	1.41 ± 0.13a	1.51 ± 0.07a	13.94 ± 0.58a	14.48 ± 0.45a
14	1	0.10 ± 0.03c	0.12 ± 0.01d	0.38 ± 0.03c	0.40 ± 0.01a	0.93 ± 0.10d	1.20 ± 0.08d
	5	0.36 ± 0.07b	0.30 ± 0.01c	0.96 ± 0.14b	1.06 ± 0.11a	5.03 ± 0.62c	5.09 ± 0.44c
	10	0.48 ± 0.08b	0.48 ± 0.08b	1.23 ± 0.03a	1.34 ± 0.04a	10.09 ± 0.51b	9.43 ± 0.42b
	15	0.67 ± 0.13a	0.66 ± 0.07a	1.43 ± 0.07a	1.43 ± 1.61a	13.80 ± 0.96a	13.90 ± 2.25a
21	1	0.06 ± 0.01d	0.07 ± 0.01c	0.27 ± 0.01c	0.28 ± 0.01d	0.86 ± 0.04d	0.92 ± 0.07d
	5	0.33 ± 0.03c	0.35 ± 0.06b	0.60 ± 0.11b	0.56 ± 0.11c	4.90 ± 0.34c	5.16 ± 0.71c
	10	0.67 ± 0.03b	0.47 ± 0.07b	0.72 ± 0.06b	0.83 ± 0.11b	9.81 ± 0.52b	10.64 ± 0.71b
	15	0.77 ± 0.04a	0.86 ± 0.03a	1.06 ± 0.16a	1.23 ± 0.10a	14.04 ± 0.48a	14.81 ± 0.65a
28	1	0.01 ± 0.00d	0.03 ± 0.00c	0.29 ± 0.08c	0.26 ± 0.07b	1.01 ± 0.20d	0.83 ± 0.20d
	5	0.27 ± 0.08c	0.27 ± 0.04b	0.66 ± 0.07b	0.57 ± 0.13b	4.93 ± 0.51c	5.13 ± 0.58c
	10	0.64 ± 0.06b	0.50 ± 0.03a	0.76 ± 0.08b	0.95 ± 0.13a	9.61 ± 0.49b	10.39 ± 0.65b
	15	1.16 ± 0.11a	0.53 ± 0.03a	1.04 ± 0.13a	1.19 ± 0.14a	13.91 ± 0.72a	14.17 ± 0.65a
LSD0.05							
Cd 水平		0.159		0.137		3.021	
沸石种类		0.008		0.015		0.279	
Cd 水平 X 沸石种类		0.006		0.009		0.084	

表 4 20 g·kg⁻¹沸石施用量时不同镉水平下土壤镉形态及含量随培养时间的变化

Table 4 Change of cadmium fractions with the culture time in different Cd polluted soils with application of 20 g·kg⁻¹ zeolite

培养时间 /d	Cd 水平 /mg·kg ⁻¹	土壤 Cd 各形态及含量/mg·kg ⁻¹					
		EX-F		CAB-F		FMO-F	
		NZ	OZ	NZ	OZ	NZ	OZ
1	1	0.60 ± 0.03d	0.64 ± 0.06d	0.24 ± 0.04d	0.33 ± 0.06c	0.09 ± 0.01d	0.04 ± 0.01d
	5	2.76 ± 0.27c	3.41 ± 0.28c	1.31 ± 0.08c	1.10 ± 0.13b	0.96 ± 0.14c	0.65 ± 0.08c
	10	5.96 ± 0.06b	6.41 ± 0.08b	1.64 ± 0.14b	1.56 ± 0.07a	1.69 ± 0.24b	1.16 ± 0.16b
	15	7.81 ± 1.00a	9.24 ± 0.37a	2.72 ± 0.06a	1.43 ± 0.06a	1.70 ± 0.35a	1.75 ± 0.14a
4	1	0.11 ± 0.01d	0.15 ± 0.01d	0.30 ± 0.03d	0.34 ± 0.01d	0.13 ± 0.01c	0.13 ± 0.01c
	5	1.15 ± 0.07c	1.69 ± 0.14c	1.51 ± 0.11c	1.98 ± 0.18c	0.84 ± 0.04b	0.66 ± 0.10b
	10	3.17 ± 0.04b	4.86 ± 0.66b	3.49 ± 0.35b	4.95 ± 0.14b	1.49 ± 0.18a	0.51 ± 0.04ab
	15	5.37 ± 0.33a	5.98 ± 0.33a	6.47 ± 0.13a	6.41 ± 0.08a	1.39 ± 0.14a	0.85 ± 0.10a
7	1	0.11 ± 0.01d	0.15 ± 0.01d	0.15 ± 0.01d	0.15 ± 0.01b	0.26 ± 0.01d	0.22 ± 0.01b
	5	1.71 ± 0.03c	2.21 ± 0.07c	0.74 ± 0.08c	0.75 ± 0.08a	1.18 ± 0.04c	0.86 ± 0.14b
	10	4.29 ± 0.24b	6.22 ± 0.34b	1.31 ± 0.04b	0.85 ± 0.16a	2.32 ± 0.10b	1.57 ± 0.44a
	15	7.69 ± 0.14a	9.54 ± 0.25a	1.69 ± 0.14a	0.86 ± 0.07a	3.10 ± 0.13a	2.14 ± 0.18a
14	1	0.09 ± 0.01d	0.28 ± 0.01d	0.28 ± 0.03c	0.23 ± 0.03c	0.15 ± 0.01d	0.11 ± 0.01d
	5	2.11 ± 0.07c	2.25 ± 0.14c	0.94 ± 0.13b	0.37 ± 0.10bc	1.10 ± 0.11c	1.05 ± 0.06c
	10	5.24 ± 0.08b	5.59 ± 0.33b	1.35 ± 0.01a	1.17 ± 0.13a	2.40 ± 0.21b	1.64 ± 0.11b
	15	8.42 ± 0.10a	8.68 ± 0.13a	1.54 ± 0.11a	0.52 ± 0.06b	2.25 ± 0.16a	1.36 ± 0.1a
21	1	0.08 ± 0.00d	0.15 ± 0.01d	0.19 ± 0.01c	0.19 ± 0.01d	0.38 ± 0.01d	0.28 ± 0.01d
	5	1.84 ± 0.13c	2.43 ± 0.06c	0.91 ± 0.08b	0.98 ± 0.08c	1.39 ± 0.14c	1.02 ± 0.06c
	10	4.31 ± 0.27b	8.32 ± 0.06b	1.87 ± 0.11a	1.39 ± 0.16b	2.31 ± 0.10b	1.63 ± 0.08b
	15	7.19 ± 0.20a	9.43 ± 0.07a	1.96 ± 0.16a	0.47 ± 0.07a	3.72 ± 0.04a	2.95 ± 0.20a
28	1	0.30 ± 0.01d	0.22 ± 0.01d	0.09 ± 0.00d	0.13 ± 0.01d	0.22 ± 0.06c	0.20 ± 0.03d
	5	2.09 ± 0.13c	2.56 ± 0.10c	0.84 ± 0.07c	0.58 ± 0.08c	1.15 ± 0.08b	0.91 ± 0.08c
	10	4.50 ± 0.34b	6.55 ± 0.11b	1.66 ± 0.17b	1.46 ± 0.16b	2.26 ± 0.16a	1.45 ± 0.18b
	15	7.50 ± 0.51a	9.31 ± 0.10a	2.11 ± 0.14a	2.00 ± 0.24a	2.76 ± 0.38a	2.23 ± 0.21a
LSD0.05							
Cd 水平		1.373		0.568		0.490	
沸石种类		0.039		0.029		0.022	
Cd 水平 X 沸石种类		0.064		0.034		0.055	
培养时间 /d	Cd 水平 /mg·kg ⁻¹	土壤 Cd 各形态及含量/mg·kg ⁻¹				土壤 Cd 总量/mg·kg ⁻¹	
		OM-F		RES-F		NZ	OZ
		NZ	OZ	NZ	OZ		
1	1	0.00 ± 0.00b	0.00 ± 0.00b	0.25 ± 0.06b	0.26 ± 0.06b	1.18 ± 0.14d	1.27 ± 0.18d
	5	0.01 ± 0.00b	0.00 ± 0.00b	0.37 ± 0.07b	0.35 ± 0.06b	5.41 ± 0.57c	5.51 ± 0.55c
	10	0.02 ± 0.00b	0.03 ± 0.01b	0.86 ± 0.07a	0.83 ± 0.06ab	10.17 ± 0.40b	9.99 ± 0.38b
	15	0.30 ± 0.03a	0.30 ± 0.13a	0.85 ± 0.08a	1.30 ± 0.40a	13.38 ± 1.53a	14.02 ± 1.09a
4	1	0.09 ± 0.01b	0.18 ± 0.01a	0.31 ± 0.01b	0.36 ± 0.10b	0.94 ± 0.08d	1.16 ± 0.16d
	5	0.20 ± 0.03ab	0.15 ± 0.03a	0.49 ± 0.11ab	0.61 ± 0.04a	4.19 ± 0.23c	5.09 ± 0.49c
	10	0.27 ± 0.08a	0.18 ± 0.04a	0.66 ± 0.07a	0.54 ± 0.08ab	9.08 ± 0.65b	11.04 ± 0.98b
	15	0.14 ± 0.03ab	0.22 ± 0.04a	0.57 ± 0.11a	0.56 ± 0.07ab	13.94 ± 0.08a	14.02 ± 0.62a
7	1	0.08 ± 0.00b	0.07 ± 0.01b	0.43 ± 0.01c	0.45 ± 0.08c	1.03 ± 0.06d	1.04 ± 0.14d
	5	0.17 ± 0.03b	0.33 ± 0.06a	1.12 ± 0.14b	1.03 ± 0.07b	4.92 ± 0.33c	5.18 ± 0.42c
	10	0.32 ± 0.04a	0.36 ± 0.07a	1.27 ± 0.11ab	1.30 ± 0.17ab	9.51 ± 0.54b	10.30 ± 1.17b
	15	0.41 ± 0.08a	0.44 ± 0.04a	1.44 ± 0.07a	1.52 ± 0.16a	14.33 ± 0.57a	14.50 ± 0.71a
14	1	0.07 ± 0.00c	0.07 ± 0.01c	0.39 ± 0.04c	0.46 ± 0.10c	0.98 ± 0.10d	1.15 ± 0.14d
	5	0.35 ± 0.06b	0.27 ± 0.04b	0.94 ± 0.06b	1.08 ± 0.14b	5.44 ± 0.31c	5.02 ± 0.48c
	10	0.48 ± 0.08b	0.56 ± 0.07a	1.28 ± 0.06a	1.33 ± 0.13ab	10.75 ± 0.45b	10.29 ± 0.76b
	15	0.70 ± 0.07a	0.66 ± 0.06a	1.35 ± 0.18a	1.55 ± 0.10a	13.26 ± 0.25a	13.77 ± 0.44a
21	1	0.05 ± 0.01d	0.12 ± 0.01c	0.25 ± 0.00c	0.30 ± 0.13c	0.95 ± 0.04d	1.04 ± 0.18d
	5	0.32 ± 0.06c	0.36 ± 0.07b	0.60 ± 0.20bc	0.56 ± 0.07bc	5.06 ± 0.61c	5.35 ± 0.34c
	10	0.58 ± 0.13b	0.45 ± 0.06b	0.77 ± 0.08ab	0.79 ± 0.16ab	9.84 ± 0.69b	12.58 ± 0.51b
	15	0.85 ± 0.08a	1.00 ± 0.13a	1.16 ± 0.20a	1.14 ± 0.17a	14.88 ± 0.68a	14.99 ± 0.64a
28	1	0.01 ± 0.00d	0.02 ± 0.00c	0.27 ± 0.01c	0.27 ± 0.06c	0.89 ± 0.08d	0.84 ± 0.11d
	5	0.26 ± 0.07c	0.25 ± 0.06b	0.61 ± 0.13bc	0.65 ± 0.08b	4.95 ± 0.48c	4.95 ± 0.41c
	10	0.58 ± 0.06b	0.56 ± 0.07a	0.94 ± 0.10ab	0.87 ± 0.08ab	9.94 ± 0.82b	10.89 ± 0.61b
	15	0.82 ± 0.04a	0.47 ± 0.06a	1.16 ± 0.20a	0.92 ± 0.11a	14.35 ± 1.27a	14.93 ± 0.72a
LSD0.05							
Cd 水平		0.177		0.242		3.272	
沸石种类		0.009		0.027		0.17	
Cd 水平 X 沸石种类		0.024		0.045		0.073	



不同小写字母表示土壤 CEC 在同一个镉污染水平下不同沸石处理间的差异显著性($P < 0.05$)

图 2 不同镉污染水平下沸石处理对土壤 CEC 的影响

Fig. 2 Effect of zeolite treatment on soil CEC under different levels of Cd

表 5 不同沸石施用量、镉水平与土壤镉形态的相关性¹⁾

Table 5 Correlation among zeolite dose, cadmium level and cadmium fraction in soil

镉形态	沸石施用量		镉水平	
	纳米沸石	普通沸石	纳米沸石	普通沸石
EX-F	-0.119	-0.021	0.962 **	0.972 **
CAB-F	0.070	-0.006	0.656 **	0.527 **
FMO-F	0.276 **	0.177 *	0.835 **	0.843 **
OM-F	0.069	0.074	0.697 **	0.637 **
RES-F	0.047	0.068	0.730 **	0.696 **

1) * 表示相关水平 $P < 0.05$, ** 表示相关水平 $P < 0.01$,下同

表 6 土壤 pH、CEC 与土壤镉形态含量间的相关系数(r)¹⁾

Table 6 Correlation coefficient (r) of soil pH and CEC with the concentration of Cd fractions in the soil

镉形态	土壤 pH				土壤 CEC			
	C_{Cd1}	C_{Cd5}	C_{Cd10}	C_{Cd15}	C_{Cd1}	C_{Cd5}	C_{Cd10}	C_{Cd15}
EX-F	0.180	-0.986 **	-0.894 **	-0.927 **	-0.363	-0.827 *	-0.823 *	-0.828 *
CAB-F	0.227	0.471	0.962 **	0.829 *	0.135	0.669	0.879 **	0.665
FMO-F	0.714	0.959 **	0.976 **	0.968 **	0.823 *	0.880 **	0.903 **	0.891 **
OM-F	-0.744	0.576	0.893 **	0.598	-0.301	0.211	0.743	0.453
RES-F	0.712	0.235	0.237	0.356	0.228	-0.069	0.546	0.648

1) C_{Cd1} 、 C_{Cd5} 、 C_{Cd10} 和 C_{Cd15} 表示土壤镉污染含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); * 表示相关水平 $P < 0.05$, ** 表示相关水平 $P < 0.01$,下同

2.5 大白菜地上部镉形态分配

由图 3 可知,与低镉($1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ Cd}$)处理相比,在 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ Cd}$ 处理的大白菜地上部镉形态中仅去离子水提取态(W-F)和氯化钠提取态(NaCl-F)分配比例明显增加,醋酸提取态(HAc-F)分配比例则明显下降,其它形态 FDC 变化不明显. $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ Cd}$ 条件下各镉形态 FDC 大小为: NaCl-F ($46.9\% \sim 63.5\%$) $>$ HAc-F ($23.5\% \sim 32.0\%$) $>$ W-F($6.6\% \sim 11.2\%$) $>$ R-F($1.0\% \sim 7.1\%$) $>$ HCl-F ($0.0\% \sim 4.9\%$) $>$ E-F($0.0\% \sim 3.3\%$); $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ Cd}$ 条件下为: NaCl-F ($63.1\% \sim 70.8\%$) $>$ HAc-F ($13.0\% \sim 24.5\%$) $>$ W-F($6.5\% \sim 18.3\%$) $>$ R-F($1.1\% \sim$

呈极显著负相关($P < 0.01$),同时与铁锰氧化态镉含量均呈极显著正相关($P < 0.01$).但在 $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ Cd}$ 污染水平下,土壤 pH 与各镉形态间无显著相关性,土壤 CEC 仅与铁锰氧化态镉含量存在显著正相关($P < 0.05$).此外,在 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ Cd}$ 污染水平下土壤 pH 与碳酸盐结合态和有机态镉含量达到极显著正相关($P < 0.01$),而在 $15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ Cd}$ 污染土壤中仅与碳酸盐结合态镉的相关性达到显著水平($P < 0.05$);在 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 镉污染土壤中的 CEC 与碳酸盐结合态含量呈极显著正相关($P < 0.01$).

5.9%) $>$ E-F($0.0\% \sim 1.9\%$)、 HCl-F ($0.0\% \sim 2.0\%$).无论在 $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ Cd}$ 还是在 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ Cd}$ 污染条件下,大白菜地上部镉主要以氯化钠提取态存在,盐酸提取态镉分配比例相对较低.施用纳米沸石和普通沸石分别使去离子水提取态 FDC 显著降低 $13.6\% \sim 56\%$ 和 $2.1\% \sim 24.6\%$,使乙醇提取态的 FDC 显著降低 100% 和 $11.8\% \sim 100\%$;分别使醋酸提取态的 FDC 显著提高了 $1.8\% \sim 83.7\%$ 和 $2.3\% \sim 23.4\%$.

2.6 大白菜根际土壤镉形态及含量

如表 7 和图 4 所示,施用沸石有效降低了土培大白菜根际土壤有效态镉含量和分配比例(FDC),

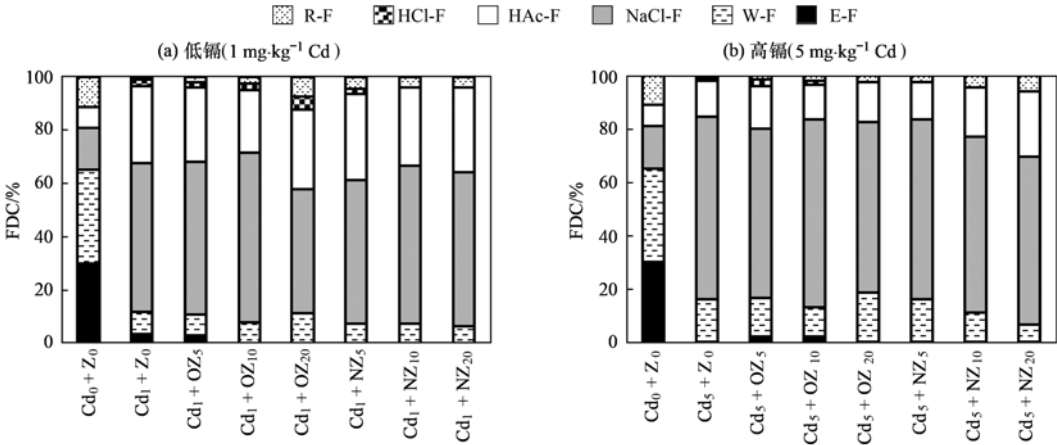


图3 低镉(1 mg·kg⁻¹ Cd)和高镉(5 mg·kg⁻¹ Cd)条件下沸石用量对大白菜地上部镉形态分布的影响

Fig. 3 Effects of zeolite doses on Cd distribution of chemical forms in shoots of cabbage in soils with lower (1 mg·kg⁻¹ Cd) and higher (5 mg·kg⁻¹ Cd) Cd levels

且随施用量的增加土壤可交换态镉含量呈下降的趋势. 在 1 mg·kg⁻¹ Cd 下, 大白菜土壤镉主要以残渣态 RES-F 存在, 其 FDC 为 30.5% ~ 44.1%, 而在 5 mg·kg⁻¹ Cd 下, 土壤镉主要以可交换态存在, 其 FDC 为 23.0% ~ 33.2%. 在 1 和 5 mg·kg⁻¹ Cd 条件下, 施用沸石使大白菜土壤可交换态镉 FDC 降低了 6.4% ~ 63.2% (Cd₅ + OZ₁₀ 降幅为 0.8%), 相同条件下纳米沸石处理比普通沸石低 1.1% ~ 40.0%. 同时, 施用沸石整体上使碳酸盐结合态、铁锰氧化态镉含量有所增加, 而有机态和残渣态镉分别在低镉和高镉条件下呈降低的变化. 在 1 mg·kg⁻¹ Cd

下, 施用纳米沸石和普通沸石分别使大白菜土壤铁锰氧化态镉含量增加了 47.7% ~ 131.8% 和 39.4% ~ 106.8%. 在 5 mg·kg⁻¹ Cd 下, 施用纳米沸石和普通沸石分别使大白菜土壤铁锰氧化态镉含量分别增加了 144.5% ~ 151.9% 和 26.2% ~ 97.7%. 纳米沸石和普通沸石使碳酸盐结合态分别增加了 22.0% ~ 42.0% 和 0.0% ~ 6.0% (1 mg·kg⁻¹ Cd)、34.5% ~ 66.5% 和 22.7% ~ 38.9% (5 mg·kg⁻¹ Cd). 此外, 在 5 mg·kg⁻¹ Cd 污染水平下, 施用纳米沸石和普通沸石使土壤有机态镉含量较对照分别增加了 54.7% ~ 72.1% 和 61.6% ~ 105.8%.

表7 不同镉污染水平下沸石用量对大白菜根际土壤镉形态含量的影响/mg·kg⁻¹

Table 7 Effect of zeolite doses on fractions of Cd in rhizosphere of Chinese cabbage at different Cd levels/mg·kg⁻¹

处理	EX-F	CAB-F	FMO-F	OM-F	RES-F
Cd ₀ + Z ₀	0.085 ± 0.010d	0.039 ± 0.005a	0.057 ± 0.020d	0.011 ± 0.005f	0.120 ± 0.010d
Cd ₁ + Z ₀	0.295 ± 0.025a	0.050 ± 0.020a	0.132 ± 0.015c	0.107 ± 0.010ab	0.256 ± 0.030c
Cd ₁ + OZ ₅	0.291 ± 0.029a	0.032 ± 0.015a	0.184 ± 0.020b	0.089 ± 0.005bc	0.287 ± 0.014c
Cd ₁ + OZ ₁₀	0.285 ± 0.020a	0.018 ± 0.015a	0.214 ± 0.011b	0.046 ± 0.015e	0.306 ± 0.030bc
Cd ₁ + OZ ₂₀	0.145 ± 0.015bc	0.053 ± 0.025a	0.273 ± 0.025a	0.060 ± 0.005de	0.355 ± 0.011ab
Cd ₁ + NZ ₅	0.185 ± 0.009b	0.057 ± 0.020a	0.306 ± 0.029a	0.071 ± 0.010cd	0.267 ± 0.016c
Cd ₁ + NZ ₁₀	0.167 ± 0.025b	0.061 ± 0.065a	0.221 ± 0.010b	0.103 ± 0.005ab	0.299 ± 0.041bc
Cd ₁ + NZ ₂₀	0.113 ± 0.020cd	0.071 ± 0.020a	0.195 ± 0.015b	0.110 ± 0.005a	0.387 ± 0.025a
Cd ₀ + Z ₀	0.085 ± 0.010f	0.039 ± 0.005c	0.057 ± 0.020e	0.011 ± 0.005d	0.120 ± 0.010f
Cd ₅ + Z ₀	1.577 ± 0.027a	0.537 ± 0.018b	0.611 ± 0.052d	0.362 ± 0.018c	1.660 ± 0.052a
Cd ₅ + OZ ₅	1.488 ± 0.026bc	0.746 ± 0.033ab	0.771 ± 0.073d	0.560 ± 0.055b	1.368 ± 0.110b
Cd ₅ + OZ ₁₀	1.551 ± 0.041ab	0.659 ± 0.018ab	0.970 ± 0.034c	0.584 ± 0.017b	0.945 ± 0.034c
Cd ₅ + OZ ₂₀	1.400 ± 0.043d	0.710 ± 0.120ab	1.208 ± 0.023b	0.623 ± 0.038ab	0.834 ± 0.084cd
Cd ₅ + NZ ₅	1.429 ± 0.021cd	0.722 ± 0.246ab	1.319 ± 0.070b	0.585 ± 0.053b	0.734 ± 0.088de
Cd ₅ + NZ ₁₀	1.196 ± 0.062e	0.760 ± 0.014ab	1.494 ± 0.099a	0.660 ± 0.126ab	0.648 ± 0.032e
Cd ₅ + NZ ₂₀	1.132 ± 0.011e	0.894 ± 0.073a	1.539 ± 0.145a	0.745 ± 0.002a	0.608 ± 0.089e

2.7 植株 Cd 形态与土壤镉形态的相关性

由表 8 可知, 在低 Cd (1 mg·kg⁻¹) 污染水平

下, 土壤 CAB-F 与大白菜地上部 NaCl-F、HAc-F、HCl-F 呈显著或极显著负相关, 与大白菜地上部

W-F、E-F、R-F 呈显著正相关;而土壤 OM-F 表现出相反的趋势,即土壤 OM-F 与大白菜地上部 NaCl-F、HAc-F 呈显著正相关,与大白菜地上部 W-F、E-F、R-F 呈显著负相关. 在高 Cd ($5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 污染水平下,土壤 OM-F 与大白菜地上部 NaCl-F、HAc-F 呈极显著正相关,与大白菜地上部 W-F、E-F 呈极显著负相关($P < 0.01$);土壤

RES-F 与大白菜地上部 NaCl-F、HAc-F 呈显著负相关,与大白菜地上部 W-F、E-F 呈极显著正相关($P < 0.01$). 在高 Cd ($5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 污染水平下,大白菜地上部 HAc-F 与土壤 EX-F 呈显著负相关,与土壤 FMO-F 呈显著正相关;大白菜地上部 HCl-F 与土壤 EX-F 呈显著正相关,与土壤 FMO-F 呈显著负相关.

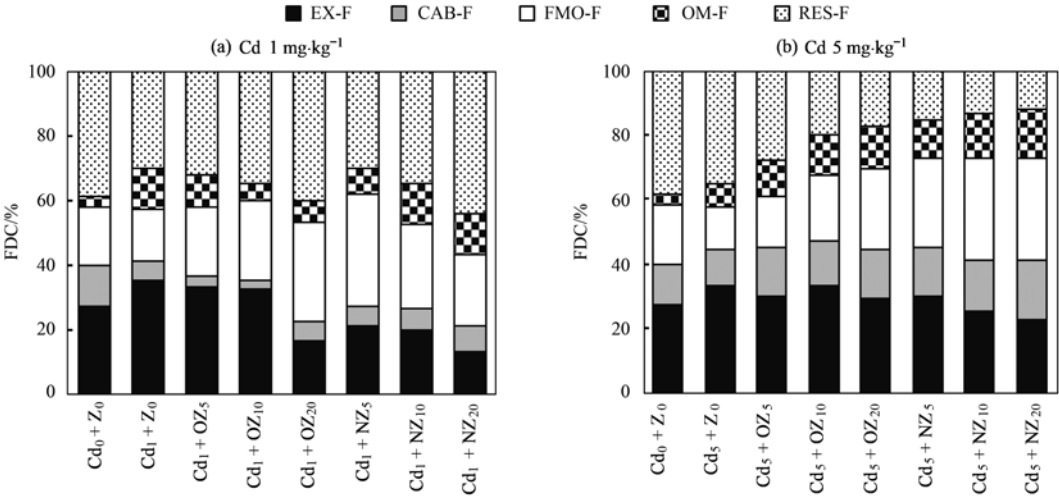


图 4 不同镉污染水平下沸石用量土壤镉形态分配比例 (FDC)

Fig. 4 Effect of zeolite doses on Cd fraction distribution coefficient (FDC) in soils with different Cd levels

表 8 大白菜镉形态 FDC 与土壤镉形态 FDC 间的相关系数 (r)

Table 8 Correlation coefficient (r) between the FDC of Cd fractions in Chinese cabbage and the FDC of Cd fractions in soil

土壤镉形态	大白菜镉形态											
	Cd(1 mg·kg ⁻¹)						Cd(5 mg·kg ⁻¹)					
	NaCl-F	HAc-F	W-F	HCl-F	E-F	R-F	NaCl-F	HAc-F	W-F	HCl-F	E-F	R-F
EX-F	0.021	-0.339	0.119	0.091	0.217	-0.337	0.275	-0.581 *	0.075	0.600 *	-0.134	-0.591 *
CAB-F	-0.817 **	-0.536 *	0.761 *	-0.532 *	0.754 **	0.770 **	0.308	0.838 **	-0.585 *	-0.263	-0.430	0.013
FMO-F	0.236	0.447	-0.345	0.415	-0.464	0.093	0.213	0.615 *	-0.404	-0.703 **	-0.315	0.159
OM-F	0.606 **	0.710 *	-0.649 *	-0.233	-0.561 **	-0.688 **	0.756 **	0.810 **	-0.854 **	-0.081	-0.822 **	-0.487
RES-F	-0.257	-0.160	0.223	-0.183	0.148	0.467	-0.602 *	-0.712 **	0.706 **	0.368	0.674 **	0.282

3 讨论

大量研究表明,土壤 pH 和土壤阳离子交换量 (CEC) 是影响土壤重金属有效性的两大重要因素^[20,21]. 本研究也发现,通过施用沸石能够显著提高不同镉污染条件下的土壤 pH 值和 CEC,同时,土壤 pH 和 CEC 与土壤可交换态镉的含量呈负相关,与王秀丽等^[4]和李明遥等^[22]的研究结果相似. 这是由于,沸石为碱金属和碱土金属的架状铝硅酸盐矿物,含有大量 Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 等离子,能够与土壤溶液中 H⁺ 和 Al³⁺ 离子发生交换反应,使土壤 pH 升高,而增加了土壤中黏土矿物、有机质表面和水合氧化物的负电荷,使得土壤 CEC 增大,增强对 Cd²⁺ 的吸附能力^[22]. 此外, Mahabadi 等^[5] 的研

究也发现,施用沸石增加了土壤 pH 和 CEC,进而改变土壤的导水率和渗透系数,使土壤对镉的固定吸附作用加强,进而降低镉在土壤中的迁移性. 同时, Oste 等^[24]和 Singh 等^[25]的研究也表明,沸石可使土壤 pH 增加,促使土壤中的镉与沸石进行表面络合,促进沸石对镉的吸附. 本研究还发现施用沸石有利于促进土壤可交换态镉向铁锰氧化态的转化. 这是由于沸石本身含有 Mg、Fe、Al、Mn 等元素,在增加土壤 pH 的同时,增强了土壤中 CdOH⁺ 与吸附点位的亲和,使镉离子和铁锰氧化物及碳酸盐的结合增强^[26]. 与普通沸石相比,纳米沸石的粒度减小至纳米级尺寸,具有更大的比表面积,进而使其具有更丰富的表面电荷和可交换的表面离子等,同时纳米沸石的骨架结构更加完整,孔道更短而规则,使反应位

点更易于与重金属等反应物接触,活性的利用率大幅提高^[27],更加有利于土壤镉生物活性的形态由高向低转化。

本试验中,施用沸石后土壤可交换态镉含量得到有效降低,但仍以较高比例存在,同时,土壤镉形态随培养时间变化发生重新分配,不同培养时间的镉形态不同,至 28 d 时镉形态变化仍未达到平衡。这是由于试验中镉是以活性较高的溶液形式加入土壤,自然条件下土壤镉由活性态向非活性态的转化较为缓慢,且外源添加的镉浓度越高,转化进程会越慢^[28]。王秀丽等^[4]和李明遥等^[22]的研究也表明,在分别经沸石处理 50 d 和 60 d 后,镉污染土壤中有有效态镉含量较对照显著降低,但仍主要以可交换态存在。Lu 等^[28]也有类似的研究报道,在黏土、砂土和壤土这 3 种土壤中外源添加重金属 Cd、Cu 等,其在处理的前 3 h、3 h~3 d 和 3 d~3 周时进行了重新分配,8 周后,重金属仍主要以可交换态形式存在,且形态变化均未达到平衡。相关性结果显示,使用沸石后,土壤 pH、土壤 CEC 与土壤可交换态镉含量呈极显著负相关($P < 0.01$),说明沸石可通过提高土壤 pH、土壤 CEC,达到钝化土壤镉的作用,降低活性高的土壤可交换态镉含量,进而减少镉对植物的毒害。

与室内培养试验结果类似,土培试验也发现在不同镉污染水平下,施用沸石在不同程度上降低了土壤镉含量,尤其是可交换态镉含量。植物对镉的吸收取决于镉在土壤中的有效态含量,其中一个重要因素是土壤中可交换态镉的含量^[26,29,30]。与 Ding 等^[31]的研究结果相似,本研究也发现植株镉不同形态与土壤镉形态间存在一定的相关关系,相关性结果显示,在高 Cd ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 污染水平下,土壤 RES-F 还与大白菜地上部 NaCl-F、HAc-F 呈显著负相关,与大白菜地上部 W-F、E-F 呈极显著正相关($P < 0.01$);大白菜地上部 HAc-F 与土壤 EX-F 呈显著负相关,与土壤 FMO-F 呈显著正相关;大白菜地上部 HCl-F 与土壤 EX-F 呈显著正相关,与土壤 FMO-F 呈显著负相关,而这些相关性并未在低 Cd ($1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 污染中发现,说明土壤镉形态与大白菜地上部镉形态之间的相关性可能与土壤镉污染浓度有关,但其具体原因和机制还需要进一步研究。因此,施用沸石显著降低了大白菜镉含量,同等使用量下以纳米沸石效果更好。原因可能是改性后的纳米沸石相比普通沸石具有更大的比表面积和阳离子交换量,对镉的修复效果显著优于普通沸石^[15]。

通过分析重金属在植物体内的存在形态可以研究植物对重金属的积累和耐性机制^[32,33]。乙醇和去离子水提取态生物毒性和移动性最高,氯化钠提取态的毒性与移动性中等,醋酸与盐酸提取态生物毒性与移动性均最低^[19]。国内外已有不少关于沸石对植物镉吸收影响的报道^[7,9,33,34],但关于沸石对植物镉形态的影响鲜见报道^[35],而关于纳米沸石的研究更是尚未发现。本试验中,施用沸石后,大白菜植株镉形态主要以 NaCl-F 提取态存在,但各形态镉的含量和总镉提取量均显著降低,且随着沸石施用量的增加,从而从总体水平上降低了镉对大白菜的毒害作用。同等使用量下纳米沸石降低大白菜体内各形态镉的含量和总镉提取量效果明显优于普通沸石。对番茄、辣椒、黄瓜等许多作物的研究均发现,氯化钠提取态是作物体内镉的主要存在形态,其次多为醋酸提取态^[36~38]。无论施用沸石与否,氯化钠提取态镉在大白菜植株体内均含量较高,表明镉在大白菜体内主要与蛋白质结合,因此蛋白质的合成对大白菜中镉积累有重要影响^[19,39]。

4 结论

(1)室内土壤处理试验中纳米沸石和普通沸石的施用显著增加了土壤 pH 和 CEC 值,并使土壤可交换态镉的含量显著降低。以 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 施用量的纳米沸石对可交换态镉含量的降低效果最好。土壤 pH、土壤 CEC 与土壤可交换态镉含量呈极显著负相关($P < 0.01$)。

(2)土培条件下,在 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 污染土壤中 Cd 主要以可交换态存在,在 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 污染土壤中 Cd 主要以可交换态和碳酸盐结合态存在。在 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 条件下,大白菜地上部镉形态的 FDC 与土壤 CAB-F 和 OM-F 的 FDC 有显著相关性($P < 0.05$);在 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 条件下,大白菜地上部镉形态的 FDC 主要与土壤 OM-F 和 RES-F 形态的 FDC 存在显著相关性($P < 0.05$)。

(3)纳米沸石和普通沸石显著降低了大白菜去离子水和乙醇提取态镉的分配比例。比较供试的两种沸石对土壤可交换性 Cd 和大白菜各部位 Cd 形态的降低效果,纳米沸石比普通沸石具有更大的优势。

参考文献:

- [1] Wu L H, Tan C Y, Liu L, *et al.* Cadmium bioavailability in surface soils receiving long-term applications of inorganic fertilizers and pig manure[J]. *Geoderma*, 2012, **173-174**(2): 224-230.

- [2] 李剑睿, 徐应明, 林大松, 等. 农田重金属污染原位钝化修复研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(4): 721-728.
Li J R, Xu Y M, Lin D S, *et al.* *In situ* immobilization remediation of heavy metals in contaminated soils: a review[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(4): 721-728.
- [3] Abbaspour A, Kalbasi M, Hajrasulih S, *et al.* Effect of organic matter and salinity on ethylenediaminetetraacetic acid-extractable and solution species of cadmium and lead in three agricultural soils[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2008, **39**(7-8): 983-1005.
- [4] 王秀丽, 梁成华, 马子惠, 等. 施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1437-1444.
Wang X L, Liang C H, Ma Z H, *et al.* Effects of phosphate and zeolite on the transformation of Cd speciation in soil [J]. Environmental Science, 2015, **36**(4): 1437-1444.
- [5] Mahabadi A A, Hajabbasi M A, Khademi H, *et al.* Soil cadmium stabilization using an iranian natural zeolite [J]. Geoderma, 2007, **137**(3-4): 388-393.
- [6] Andejcovičová S, Sudagar A, Rocha J, *et al.* The effect of natural zeolite on microstructure, mechanical and heavy metals adsorption properties of metakaolin based geopolymers [J]. Applied Clay Science, 2016, **126**: 141-152.
- [7] Hamidpour M, Afyuni M, Kalbasi M, *et al.* Mobility and plant-availability of Cd (II) and Pb (II) adsorbed on zeolite and bentonite[J]. Applied Clay Science, 2010, **48**(3): 342-348.
- [8] Chlopecka A, Adriano D C. Influence of zeolite, apatite and Fe-oxide on Cd and Pb uptake by crops[J]. Science of the Total Environment, 1997, **207**(2-3): 195-206.
- [9] 李鹏, 安志装, 赵同科, 等. 天然沸石对土壤镉及番茄生物量的影响[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(6-7): 1147-1151.
Li P, An Z Z, Zhao T K, *et al.* Effects of natural zeolite addition on Cd in soil and tomato biomass[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, **20**(6-7): 1147-1151.
- [10] Rebedea I. An investigation into the use of synthetic zeolites for in situ land reclamation[D]. Liverpool: Liverpool John Moores University, 1997. 295-304.
- [11] Barragán P P, Macedo M M G, Olguín M T. Cadmium sorption by sodium and thiourea-modified zeolite-rich tuffs[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, doi: 10.1016/j.jes.2016.03.015
- [12] Terzano R, Spagnuolo M, Medici L, *et al.* Microscopic single particle characterization of zeolites synthesized in a soil polluted by copper or cadmium and treated with coal fly ash[J]. Applied Clay Science, 2007, **35**(1-2): 128-138.
- [13] Visa M. Synthesis and characterization of new zeolite materials obtained from fly ash for heavy metals removal in advanced wastewater treatment[J]. Powder Technology, 2016, **294**: 338-347.
- [14] Choi H J, Yu S W, Kim K H. Efficient use of Mg-modified zeolite in the treatment of aqueous solution contaminated with heavy metal toxic ions [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2016, **63**: 482-489.
- [15] Taty-costodes V C, Fauduet H, Porte C, *et al.* Removal of Cd (II) and Pb (II) ions, from aqueous solutions, by adsorption onto sawdust of *Pinus sylvestris* [J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, **105**(1-3): 121-142.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 12-22, 107-195, 335-336.
- [17] Liu X M, Li H, Li R, *et al.* Combined determination of surface properties of nano-colloidal particles through ion selective electrodes with potentiometer [J]. Analyst, 2013, **138**(4): 1122-1129.
- [18] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Analytical Chemistry, 1979, **51**(7): 844-851.
- [19] Alarcón A L, Madrid R, Romojaro F, *et al.* Calcium forms in leaves of muskmelon plants grown with different calcium compounds[J]. Journal of Plant Nutrition, 1998, **21**(9): 1897-1912.
- [20] Shi W Y, Shao H B, Li H, *et al.* Progress in the remediation of hazardous heavy metal-polluted soils by natural zeolite [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **170**(1): 1-6.
- [21] 谢飞, 梁成华, 孟庆欢, 等. 添加天然沸石和石灰对土壤镉形态转化的影响[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(8): 3505-3510.
Xie F, Liang C H, Meng Q H, *et al.* Effects of natural zeolite and lime on form transformation of cadmium in soil[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, **8**(8): 3505-3510.
- [22] 李明遥, 张妍, 杜立宇, 等. 生物炭与沸石混施对土壤 Cd 形态转化的影响[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(3): 248-252.
Li M Y, Zhang Y, Du L Y, *et al.* Influence of biochar and zeolite on the fraction transform of cadmium in contaminated soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, **28**(3): 248-252.
- [23] Merrikhpour H, Jalali M. Comparative and competitive adsorption of cadmium, copper, nickel, and lead ions by Iranian natural zeolite[J]. Clean Technologies & Environmental Policy, 2013, **15**(2): 303-316.
- [24] Oste L A, Lexmond T M, Van Riemsdijk W H. Metal immobilization in soils using synthetic zeolites [J]. Journal of Environmental Quality, 2002, **31**(3): 813-21.
- [25] Singh B, Alloway B J, Bocheau F J M. Cadmium sorption behavior of natural and synthetic zeolites[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2000, **31**(17-18): 2775-2786.
- [26] Lombi E, Zhao F J, Zhang G, *et al.* In situ fixation of metals in soils using bauxite residue: chemical assessment [J]. Environmental Pollution, 2002, **118**(3): 435-443.
- [27] 胡元元. 微波辅助合成纳米沸石及其表面与孔道性质研究[D]. 上海: 复旦大学, 2012. 1-2.
Hu Y Y. Surface and channel properties of nanozeolites synthesized under microwave irradiation [D]. Shanghai: Fudan University, 2012. 1-2.
- [28] Lu A X, Zhang S Z, Shan X Q. Time effect on the fractionation of heavy metals in soils[J]. Geoderma, 2005, **125**(3-4): 225-234.
- [29] Yang Y M, Ren Z R, Zhao Z J, *et al.* Bioaccumulation and translocation of cadmium in cole (*Brassica campestris* L.) and celery (*Apium graveolens*) grown in the polluted oasis soil, Northwest of China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, **23**(8): 1368-1374.
- [30] Wang X, Liu Y G, Zeng G M, *et al.* Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Beckmeria nivea* (L.) Gaud[J]. Environmental and Experimental Botany, 2008, **62**(3): 389-

- 395.
- [31] Ding Y Z, Feng R W, Wang R G, *et al.* A dual effect of Se on Cd toxicity: evidence from plant growth, root morphology and responses of the antioxidative systems of paddy rice[J]. *Plant and Soil*, 2014, **375**(1-2): 289-301.
- [32] Wei S H, Zhou Q X. Phytoremediation of cadmium-contaminated soils by *rorippa globosa* using two-phase planting (5 pp) [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2006, **13**(3): 151-155.
- [33] 邹紫今, 周航, 吴玉俊, 等. 羟基磷灰石 + 沸石对稻田土壤中铅镉有效性及糙米中铅镉累积的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(1): 45-52.
- Zou Z J, Zhou H, Wu Y J, *et al.* Effects of hydroxyapatite plus zeolite on bioavailability and rice bioaccumulation of Pb and Cd in soils [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2016, **35**(1): 45-52.
- [34] 王宝琳, 王翠苹, 余力, 等. 电气石和沸石对土壤-小麦幼苗系统中重金属行为的影响[J]. *环境化学*, 2013, **32**(9): 1700-1705.
- Wang B L, Wang C P, Wu L, *et al.* Effects of tourmaline and zeolite on the behaviors of heavy metals in soil-wheat seedling system [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, **32**(9): 1700-1705.
- [35] 熊仕娟, 徐卫红, 谢文文, 等. 纳米沸石对土壤 Cd 形态及大白菜 Cd 吸收的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4630-4641.
- Xiong S J, Xu W H, Xie W W, *et al.* Effect of nano zeolite on chemical fractions of Cd in soil and its uptake by cabbage [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4630-4641.
- [36] 熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 等. 外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 286-294.
- Xiong S J, Liu J, Xu W H, *et al.* Effect of exogenous selenium on accumulation and chemical forms of cadmium in cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 286-294.
- [37] 陈贵青, 张晓璟, 徐卫红, 等. 不同 Zn 水平下辣椒体内 Cd 的积累、化学形态及生理特性[J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1657-1662.
- Chen G Q, Zhang X J, Xu W H, *et al.* Effect of different zinc levels on accumulation and chemical forms of cadmium, and physiological characterization in *Capsicum annuum* L. [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(7): 1657-1662.
- [38] Xin J L, Huang B F, Dai H W, *et al.* Characterization of cadmium uptake, translocation, and distribution in young seedlings of two hot pepper cultivars that differ in fruit cadmium concentration [J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2014, **21**(12): 7449-7456.
- [39] 周坤, 刘俊, 徐卫红, 等. 铁对番茄镉积累及其化学形态的影响[J]. *园艺学报*, 2013, **40**(11): 2269-2279.
- Zhou K, Liu J, Xu W H, *et al.* Effect of iron on accumulation and chemical forms of cadmium in tomato [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2013, **40**(11): 2269-2279.

CONTENTS

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City	XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, <i>et al.</i> (1279)
Day-Night Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in PM ₁₀ During Spring and Summer of Lanzhou	MA Li, YU Ye, WANG Bo, <i>et al.</i> (1289)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan	WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1298)
Pollution Characteristics of NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ in PM _{2.5} and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing	DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1307)
Pollution Characteristics of PCDD/Fs in Ambient Air and Exposure Risk Assessment Around a Municipal Solid Waste Incinerator in Beijing	QI Li, REN Yue, LIU Ai-min, <i>et al.</i> (1317)
Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles (PM _{2.5}) of Beijing and Baoding	HU Ya-dong, MA An-zhou, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (1327)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Artery and Collector Roads in Nanjing Based on Real-time Traffic Data	LI Xiao-yu, WU Lin, ZOU Chao, <i>et al.</i> (1340)
Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals	LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, <i>et al.</i> (1348)
Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project	XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, <i>et al.</i> (1357)
Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (1366)
Modeling of Water Quality Response to Land-use Patterns in Taizi River Basin Based on Partial Least Squares	LI Lin-lin, ZHANG Yi-zhang, TANG Chang-yuan, <i>et al.</i> (1376)
Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer	WANG Lin-jie, YU Hui, NIU Yong, <i>et al.</i> (1384)
Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors	YU Yan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (1393)
Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaoh River Through High-throughput Sequencing	WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1403)
Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay	DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, <i>et al.</i> (1414)
Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface	JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, <i>et al.</i> (1423)
Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland	DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, <i>et al.</i> (1431)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake	BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin (1442)
Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China	ZHU Guang-wei, LI Jing, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (1451)
Identification and PAC Adsorption of Foulants Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water	YANG Hai-yan, WANG Can, YAN Zhong-sen, <i>et al.</i> (1460)
Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate	LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, <i>et al.</i> (1467)
Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO ₃ ²⁻	HAN Hui-li, WANG Hong-jie, DONG Wen-yi (1477)
Simultaneous Photocatalytic Reduction of Cr(VI) and Oxidation of SSA by Carbon Nitride	LI Li-li, CHEN Cui-hai, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (1483)
Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water	FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, <i>et al.</i> (1490)
Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes	ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, <i>et al.</i> (1497)
Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1506)
Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater	LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, <i>et al.</i> (1513)
Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment	YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, <i>et al.</i> (1520)
Function of Polyphosphate Kinase Gene in Biological Phosphate Removal During the Wastewater Treatment Process	NAN Ya-ping, ZHOU Guo-biao, YUAN Lin-jiang (1529)
Short-cut Nitrification Recovery and Its Transformation into CANON Process in a Biofilm Reactor	FU Kun-ming, ZHOU Hou-tian, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (1536)
Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor	CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills	HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, <i>et al.</i> (1551)
Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(III) Reduction in Aged Refuse	WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, <i>et al.</i> (1558)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Tracing Sources by Pb & Sr Isotope in the Soil Profile of Woodland in Quanzhou	SUN Jing-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1566)
Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure	HE Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (1576)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong	GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, <i>et al.</i> (1587)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jiangnan Plain	WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, <i>et al.</i> (1597)
Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil	CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil	CHEN Shan, DING Xian-qing, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (1613)
Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil	ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, <i>et al.</i> (1622)
N ₂ O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism	WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (1633)
Non-CO ₂ Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, <i>et al.</i> (1640)
Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil	YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1647)
Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels	CHI Sun-lin, XU Wei-hong, XIONG Shi-juan, <i>et al.</i> (1654)
Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism	PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (1667)
Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedlings	LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, <i>et al.</i> (1675)
Forms Distribution and Ecotoxicity of Three Forms of Sulfonamides in Root-Soil Interface of Maize	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Wan-feng, <i>et al.</i> (1683)
Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	SUN Song, LI Chu-xian, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1689)
Bioaccumulation and Correlation of Heavy Metals in Human Hairs From Urban and Rural Areas of Chongqing	HE Ming-jing, LI Qi, WANG Deng-xiang, <i>et al.</i> (1697)
Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (1704)
Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Doped Graphene Anode	HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (1717)
Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States	RONG Yue (1726)