

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

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

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单 梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)

上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征 高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)

京津冀地区主要排放源减排对 PM_{2.5} 污染改善贡献评估 吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)

北京冬季 PM_{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析 乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)

2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析 路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)

利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染源 刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)

南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析 迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)

喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性 张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)

生物滴滤塔净化含硫混合废气 叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)

西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析 房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)

城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力 秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)

三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征 王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)

隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素 赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)

白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析 王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)

唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价 吴婷婷, 王明猛, 陈旭锋, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)

三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征 邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)

电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)

九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)

厦门筲箕湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价 杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)

龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价 李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)

碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村镇高铁锰地下水效能与机制 孙楠, 谌燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)

高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势 张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)

预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验 杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)

Cu-Al₂O₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物 徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)

过硫酸钾氧化去除 Cu(CN)₂ 中的氰污染物 王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)

微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能 全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)

桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征 李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)

基于 A²/O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价 张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)

污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响 马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)

全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性 齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)

饥饿对硫自养反硝化反应器生物群落结构的影响 李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曜 (1109)

快速启动厌氧氨氧化工艺 闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)

一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式 完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)

侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响 马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)

厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究 陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)

有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响 戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)

过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制 白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)

不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果 董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)

全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤 杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)

纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应 衣俊, 程金平 (1173)

血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征 李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)

纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)

利用 *in vitro* 方法研究不同铁矿对土壤微生物可给性的影响 钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)

不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制 温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)

施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变 刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)

施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究 王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)

模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响 陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)

土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO₂ 浓度和温度升高的响应 刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)

岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)

板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响 宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)

酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响 姜继超, 尧倩 (1272)

《环境科学》征稿简则(1092) 《环境科学》征订启事(1158) 信息(1166,1261,1271)

纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响

秦余丽¹,熊仕娟¹,徐卫红^{1*},赵婉伊¹,王卫中¹,陈永勤¹,迟荪琳¹,陈序根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: 通过土培试验研究了纳米沸石(NZ)和普通沸石(OZ)对2个品种白菜生长、抗氧化酶活性,镉形态和含量的影响. 结果表明,施用沸石明显提高了大白菜地上部和根部过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)活性,使大白菜地上部、植株总干重分别增加了4.5%~96.5%、3.4%~88.4%. 施用纳米沸石和普通沸石有效降低了2个品种大白菜地上部和根部镉含量,且降低幅度随沸石施用量的增加而增加. 低镉($1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ Cd}$)条件下,山东四号和新晋菜三号大白菜可食部位(地上部)镉含量较对照($\text{Cd}_1 + \text{Z}_0$)分别降低了1.0%~75.0%、19.5%~68.9%(除 $\text{Cd}_1 + \text{OZ}_5/\text{OZ}_{10}$ 处理). 高镉水平($5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ Cd}$)条件下,山东四号和新晋菜三号大白菜可食部位(地上部)镉含量较对照($\text{Cd}_5 + \text{Z}_0$)分别降低了7.2%~53.2%(除 $\text{Cd}_5 + \text{OZ}_{10}$ 处理)、0.7%~63.0%. 与普通沸石相比较,纳米沸石处理大白菜可食部位(地上部)镉含量降低10.5%~65.7%. 在镉污染土壤上($1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ Cd}$),施用纳米沸石和普通沸石使山东四号品种大白菜可食部位(地上部)镉提取总量分别降低了12.4%~68.8%和13.2%~55.6%(除 $\text{Cd}_5 + \text{OZ}_5$ 处理),使新晋菜三号大白菜可食部位(地上部)镉提取总量分别降低了9.4%~71.5%和3.1%~38.7%(除 $\text{Cd}_1 + \text{OZ}_5$ 处理),且随着施用量的增加,降低幅度更大.

关键词: 纳米沸石; 抗氧化酶; 镉形态及含量; 大白菜

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-1189-12 DOI: 10.13227/j.hjks.201608110

Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage

QIN Yu-li¹, XIONG Shi-juan¹, XU Wei-hong^{1*}, ZHAO Wan-yi¹, WANG Wei-zhong¹, CHEN Yong-qin¹, CHI Sun-lin¹, CHEN Xu-gen¹, ZHANG Jin-zhong¹, XIONG Zhi-ting², WANG Zheng-yin¹, XIE De-ti¹

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

Abstract: Pot experiment was carried out to investigate the influence of nano zeolite (NZ) and ordinary zeolite (OZ) on the growth, activities of antioxidant enzyme, Cd fraction and Cd concentration in two varieties of Chinese cabbage. The results showed that the activities of SOD, CAT and POD in the shoot and root of two varieties increased, and the dry weight of shoot and the total dry weight of Chinese cabbage increased by 4.5%~96.5% and 3.4%~88.4%, respectively. The application of zeolite effectively reduced the Cd concentration of shoot and root in the two varieties of Chinese cabbage, and the reduction range increased with the increase of the application amount of zeolite. Under the low Cd condition ($1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ Cd}$), the Cd concentration of edible parts (shoots) in SD4 variety and XJC3 variety decreased by 1.0%~75.0% and 19.5%~68.9% (except the $\text{Cd}_1 + \text{OZ}_5/\text{OZ}_{10}$ processing), respectively. Under the high Cd condition ($5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ Cd}$), the Cd concentration of the edible parts (shoots) in SD4 variety and XJC3 variety decreased by 7.2%~53.2% (except $\text{Cd}_5 + \text{OZ}_{10}$ processing) and 0.7%~63.0%, respectively. The Cd concentrations of the edible parts (shoots) in tow varieties of Chinese cabbage in the nano zeolite treatments decreased by 10.5%~65.7% compared with the ordinary zeolite treatments. In Cd contaminated soils ($1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ Cd}$), the total extraction amount of Cd in the edible parts (shoots) of SD4 variety reduced by 12.4%~68.8% and 13.2%~55.6% (except of $\text{Cd}_5 + \text{OZ}_5$ processing), and the total extraction amount of Cd in the edible parts (shoots) of XJC3 variety reduced by 9.4%~71.5% and 3.1%~38.7% (except of $\text{Cd}_1 + \text{OZ}_5$ processing), respectively. The application amount of nano zeolite (NZ) and ordinary zeolite (OZ) was more, the reduction range of the total extraction amount of Cd in the edible parts (shoots) of two varieties of Chinese cabbage was greater.

Key words: nano zeolite; antioxidant enzyme; Cd fraction and Cd concentration; Chinese cabbage

收稿日期: 2016-08-16; 修订日期: 2016-09-23

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: 秦余丽(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤重金属污染植物修复技术, E-mail:18202306447@163.com

* 通信作者, E-mail: xuwei_hong@163.com

镉(cadmium, Cd)是一种积累性的剧毒重金属元素,具有很强的致畸、致癌、致突变性作用,可通过食物链方式进入生物体而危害人和动物的健康.对中国 26 个城市土壤样品的重金属含量分析发现,各金属平均含量均超过了土壤环境背景值,其中以镉污染最为严重,是背景值的 91.4 倍^[1]. 由于中国人多地少,难于大规模地进行土地休耕而用于污染修复,因此,选择经济高效的治理和修复方法是解决问题的关键. 原位钝化修复不仅经济高效,且对环境污染小,符合我国农业可持续发展的需要,受到了土壤、环境学家的广泛关注^[2].

天然沸石具有孔道结构,具备良好的过滤功能和离子交换性能,对重金属 Pb、Hg、Cd、Cr 和 Ni 等有很强的吸附能力. 国内外大量研究已证实,添加沸石可降低土壤重金属镉的活性,从而降低镉的生物有效性^[3]. 许多研究也发现,沸石在重金属镉污染土壤修复中有良好的修复效果^[4-8]. 但由于传统普通沸石结构性质存在孔道易堵塞等缺陷,影响了沸石的离子交换能力和表面吸附能力,使沸石在土壤镉污染修复中表现出一定的局限性^[9,10]. 为进一步提高沸石的吸附能力和离子交换能力,一些研究者对沸石进行改性或改型处理^[11]. 纳米沸石特殊的结构使其具有更大的比表面积和离子交换能力,孔道更短而规则,不会出现普通沸石孔道内易被水分子和其它离子半径大小不同的 Na⁺、K⁺、Ca²⁺和 Mg²⁺ 等离子占据,造成沸石孔道堵塞,使孔道不畅通等缺点,在重金属修复方面具有普通沸石无法匹敌的优越性^[12]. 马玮艺等^[13] 研究结果也发现纳米沸石对镉的固定效果最好.

我国沸石资源丰富,保有储量达 27.8 亿 t,资源总量大于 100 亿 t,居世界前三位,沸石在重金属修复方面有着广泛的应用前景. 选取沸石作为修复材料具有很大的实用价值. 值得进一步思考的是,普通沸石对重金属离子的吸附固定能力存在一定的局限性,当重金属污染水平过高时,沸石的修复能力则降低甚至反而增强重金属的生物有效性. 而纳米沸石与普通沸石相比,颗粒更细小而均匀,具有更大的比表面积和阳离子交换量,理论上其对重金属具有更大的吸附能力和吸附容量,在土壤重金属污染修复方面应更具优势,而目前将纳米沸石用于土壤重金属修复的研究鲜见报道. 因此,通过盆栽试验研究在不同镉污染水平(1 mg·kg⁻¹和 5 mg·kg⁻¹ Cd)土壤上,纳米沸石和普通沸石不同施用量(0、5、10 和 20 g·kg⁻¹)对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形

态及含量的影响,探讨纳米沸石和普通沸石对土壤镉的修复机制,以期为土壤镉污染修复技术提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

大白菜(*Brassica pekinensis* L.)品种为山东四号、新晋菜三号. 供试土壤采自重庆市九龙坡含谷蔬菜基地,为酸性紫色土. 土壤基本理化性质参考文献^[14].

纳米沸石和普通沸石均采自河北省灵寿县某一矿厂. 纳米沸石(NZ)和普通沸石(OZ)的粒径分别为 60~70 nm 和 100 目. 纳米沸石和普通沸石 pH、阳离子交换量、比表面积、全镉含量参考文献^[14].

1.2 试验方案

本试验于 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. 分别称取 2.5 kg 风干土分装于 17 cm×20 cm 的暗色塑料桶中. 向土壤中分别添加不同浓度的 Cd(1 mg·kg⁻¹和 5 mg·kg⁻¹, CdCl₂·2.5H₂O 的形式加入),同时加入底肥(N 180 mg·kg⁻¹、P₂O₅ 100 mg·kg⁻¹、K₂O 150 mg·kg⁻¹,以尿素、磷酸二氢铵和氯化钾的形式加入),充分拌匀后,于温室中平衡 3 周. 然后分别拌入纳米沸石(NZ)和普通沸石(OZ),添加量为 0、5、10 和 20 g·kg⁻¹. 所有试验处理为: Cd₀+Z₀(自然对照), Cd₁+Z₀(加镉对照), Cd₁+OZ₅, Cd₁+OZ₁₀, Cd₁+OZ₂₀, Cd₁+NZ₅, Cd₁+NZ₁₀, Cd₁+NZ₂₀, Cd₅+Z₀(加镉对照), Cd₅+OZ₅, Cd₅+OZ₁₀, Cd₅+OZ₂₀, Cd₅+NZ₅, Cd₅+NZ₁₀, Cd₅+NZ₂₀. 加沸石 5 d 后,每盆土分别移栽 6 株长势均匀的大白菜幼苗,每隔 2 d 用重量法测定土壤含水量,并加水使土壤含水量保持田间持水量的 70%. 每个处理 3 个重复,随机排列. 幼苗移栽 30 d 后 3 株大白菜去测定分析抗氧化酶活性,最后每盆土定苗 3 株. 移栽 40 d 后收获. 将大白菜洗净后用去离子水冲洗,将大白菜根和地上部分开并分别记录鲜重. 植株于 105℃ 下杀青 15 min,在 65℃ 下烘干至恒重,计算植株干重,后将烘干植株打样磨碎,测得根和地上部镉含量.

1.3 分析方法

1.3.1 土壤和沸石基本理化性质

土壤和沸石理化指标采用常规方法测定^[14]; 纳米沸石粒径采用原子力显微镜(Dimension Icom Atomic Force Microscope, Bruker, USA)测定.

1.3.2 植株镉形态分级和含量分析

大白菜地上部各镉形态分级采用连续浸取法测定^[15]. 植株镉含量测定采用 $\text{HNO}_3:\text{HClO}_4$ 法消煮, 原子吸收分光光度法 (Perkin Elmer SIMMA 6000, Norwalk, USA) 测定. 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植株标准物质 (GBW # 08513) 对测定结果进行质量监控. 所有植物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.

1.3.3 抗氧化酶活性测定

过氧化物酶 (POD) 活性测定采用愈创木酚法, 过氧化氢酶 (CAT) 活性测定采用比色法, 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性测定采用氮蓝四唑法^[16].

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理和作图, SPSS 23.0 进行数据方差分析, 显著差异水平为 $P < 0.05$.

2 结果与分析

2.1 大白菜生物量

如表 1 所示, 与对照 ($\text{Cd}_0 + \text{Z}_0$) 相比, 加镉对照 ($\text{Cd}_1/\text{Cd}_5 + \text{Z}_0$) 处理使新晋菜三号地上部、根部和总植株干重分别提高了 34.3% ~ 75.7%、105.9% ~ 182.4% 和 41.8% ~ 77.2%, 而高镉 ($5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ Cd}$) 对照地上部和总植株干重比低镉 ($1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ Cd}$) 对照分别提高了 30.9% 和 25.0%. 山东四号在低镉 ($\text{Cd}_1 + \text{Z}_0$) 处理条件下根部生长受抑制, 生物量降低 3.3%, 但外源镉明显促进了地上部的生长, 使地上部、总植株干重分别增加了 20.5%、18.4%, 而高镉 ($\text{Cd}_5 + \text{Z}_0$) 处理条件下生长则受到抑制, 根部和总植株干重分别降低了 30.8% 和 1.2%.

施用沸石 ($\leq 10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 促进了山东四号大白菜的生长, 且纳米沸石对大白菜生长的促进效果优于普通沸石. 以 $5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 纳米沸石处理对大白菜生物量的增加最为明显. 与 $\text{Cd}_1 + \text{Z}_0$ 相比, $\text{Cd}_1 + \text{NZ}_5$ 处理地上部、根和总植株生物量分别增加了 38.0%、20.5% 和 36.7%; 与 $\text{Cd}_5 + \text{Z}_0$ 相比, $\text{Cd}_5 + \text{NZ}_5$ 地上部、根部及植株总生物量分别增加了 79.8%、54.0% 和 78.2%. $5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 纳米沸石处理使大白菜各部位生物量比 $5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 普通沸石处理增加了 8.2% ~ 47.0%. 但随着沸石用量的增加, 大白菜生物量呈降低的变化趋势. 沸石施用量为 $20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时大白菜生物量总是最低, 有的甚至低于对

照. 例如, 在 $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ Cd}$ 水平中, $20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 普通沸石处理地上部、根部和总植株生物量比 $\text{Cd}_0 + \text{Z}_0$ 降低了 3.3% ~ 20.5%. 对‘新晋菜三号’大白菜, 在低镉 ($1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ Cd}$) 条件下, 2 种沸石均以低施用量 ($5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 处理对‘新晋菜三号’各部位生物量的增加效果最为明显, $\text{Cd}_1 + \text{OZ}_5$ 使地上部、根部和总植株生物量分别增加了 98.0%、2.1% 和 88.3%, $\text{Cd}_1 + \text{NZ}_5$ 处理则分别增加了 62.6%、18.8% 和 58.1%. $\text{Cd}_1 + \text{OZ}_{10}/\text{OZ}_{20}$ 和 $\text{Cd}_1 + \text{NZ}_{20}$ 处理对‘新晋菜三号’生物量也有一定的增加效果, 除了普通沸石处理根降低了 28.1% ~ 30.2%, 地上部、总植株生物量分别增加了 2.1% ~ 14.3% 和 3.8% ~ 55.2%. $\text{Cd}_1 + \text{NZ}_{10}$ 处理则使‘新晋菜三号’地上部、根部和总植株生物量分别降低了 12.7%、18.8% 和 13.4%. 高镉 ($5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ Cd}$) 条件下, $\text{Cd}_5 + \text{OZ}_{10}/\text{OZ}_{20}$ 处理提高了‘新晋菜三号’地上部、根部和总植株生物量, 增幅分别为 32.4% ~ 70.3%、34.3% ~ 131.4%、38.3% ~ 68.2%, $\text{Cd}_5 + \text{OZ}_5$ 处理则使地上部和总植株生物量分别降低了 4.6% 和 4.0%. 纳米沸石处理以 $\text{Cd}_5 + \text{NZ}_{20}$ 处理对地上部和总植株生物量的增加效果最好, 增幅分别为 76.0% 和 72.9%, $\text{Cd}_5 + \text{NZ}_5$ 处理次之, 增幅分别为 56.5% 和 53.5%, $\text{Cd}_5 + \text{NZ}_{10}$ 处理则为 43.5% 和 45.1%, 但此时其对根部生物量的提高效果最好, 增幅为 70.0%, $\text{Cd}_5 + \text{NZ}_5$ 和 $\text{Cd}_5 + \text{NZ}_{10}$ 处理对根部生物量的增幅分别为 5.7% 和 24.3%. 高镉 ($5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ Cd}$) 条件下纳米沸石处理对‘新晋菜三号’生物量的增加效果明显优于普通沸石.

将纳米沸石与普通沸石进行对比, 低镉 ($1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ Cd}$) 条件下, 普通沸石处理大白菜生物量整体高于纳米沸石处理, 大白菜地上部和总植株干重以 $5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 普通沸石处理最高, $5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 纳米沸石处理次之. 而高镉 ($5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ Cd}$) 条件下, 纳米沸石对大白菜生物量的增加效果略优于普通沸石, 大白菜地上部和总植株干重以 $20 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 纳米沸石处理最高, $10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 普通沸石处理次之.

2.2 大白菜叶和根抗氧化酶活性

分别对山东四号 (图 1) 和新晋菜三号 (图 2) 品种大白菜抗氧化酶活性进行结果分析. 对于山东四号品种 (图 1), 与对照 ($\text{Cd}_0 + \text{Z}_0$) 相比, 添加外源镉明显刺激了地上部 SOD 和低镉条件下 ($1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ Cd}$) 根部 SOD 活性的增加, 降低了 POD 和 CAT 活性 (除了地上部 CAT 活性无显著变化) 和高镉条件

表 1 不同浓度镉污染条件下沸石施用量对大白菜生物量的影响¹⁾

Table 1 Effect of different zeolite doses on the biomass of Chinese cabbage at different Cd levels

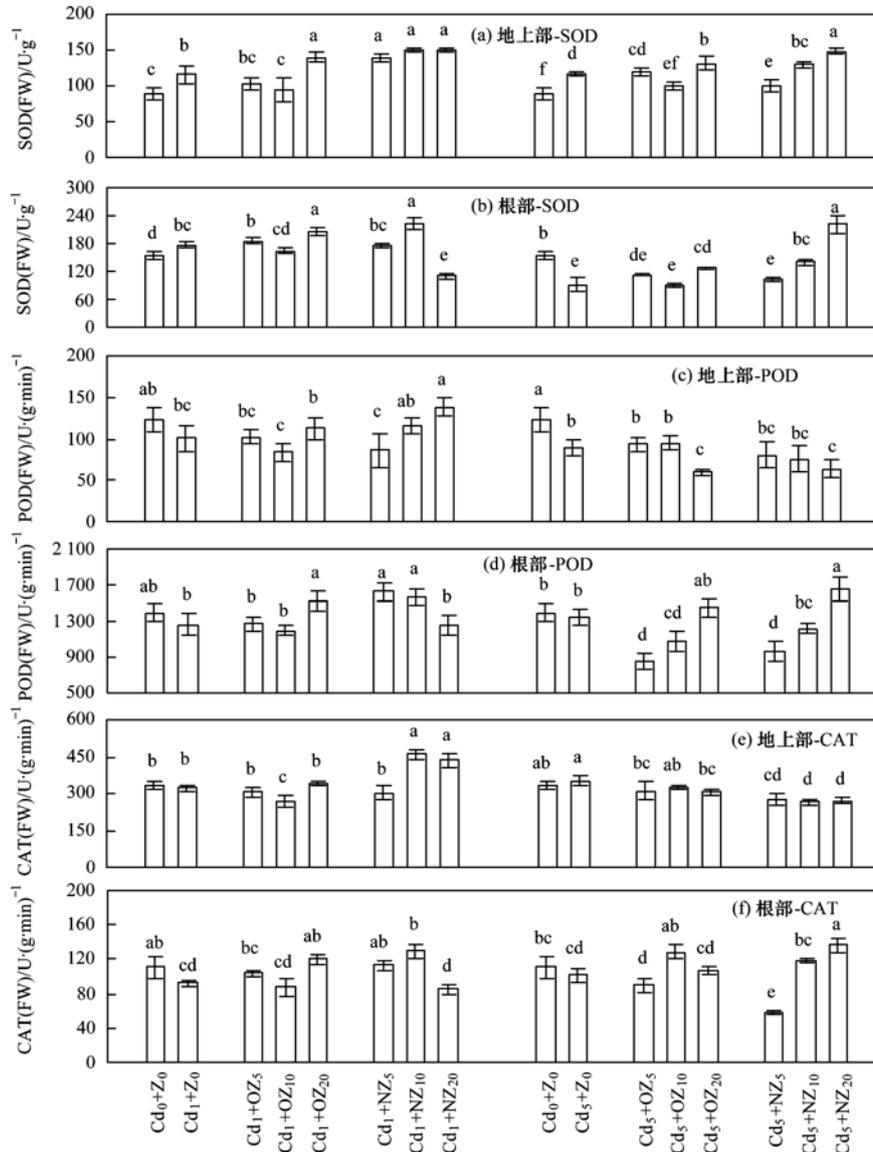
处理	植株干质量/g·pot ⁻¹					
	地上部		根部		总量	
	山东四号	新晋菜三号	山东四号	新晋菜三号	山东四号	新晋菜三号
Cd ₀ + Z ₀	0.91 ± 0.01d	0.64 ± 0.01e	0.09 ± 0.00cd	0.03 ± 0.00d	1.00 ± 0.01d	0.67 ± 0.01e
Cd ₁ + Z ₀	1.10 ± 0.07c	0.86 ± 0.03cd	0.09 ± 0.00cd	0.10 ± 0.01b	1.19 ± 0.01cd	0.95 ± 0.03cd
Cd ₁ + OZ ₅	1.17 ± 0.06bc	1.69 ± 0.175a	0.10 ± 0.00bc	0.10 ± 0.00b	1.27 ± 0.06bc	1.79 ± 0.18a
Cd ₁ + OZ ₁₀	1.15 ± 0.09bc	1.33 ± 0.08b	0.08 ± 0.00de	0.07 ± 0.01c	1.23 ± 0.09bc	1.39 ± 0.07b
Cd ₁ + OZ ₂₀	0.65 ± 0.02e	0.92 ± 0.07c	0.05 ± 0.00f	0.07 ± 0.01c	0.70 ± 0.01e	0.99 ± 0.07c
Cd ₁ + NZ ₅	1.52 ± 0.14a	1.39 ± 0.06b	0.11 ± 0.01b	0.11 ± 0.01a	1.62 ± 0.07a	1.50 ± 0.06b
Cd ₁ + NZ ₁₀	1.29 ± 0.01bc	0.75 ± 0.08de	0.14 ± 0.01a	0.08 ± 0.01c	1.43 ± 0.03b	0.82 ± 0.09d
Cd ₁ + NZ ₂₀	1.30 ± 0.08b	0.98 ± 0.07c	0.07 ± 0.00e	0.10 ± 0.00b	1.37 ± 0.08bc	1.08 ± 0.07c
Cd ₅ + Z ₀	0.91 ± 0.01cd	0.64 ± 0.01d	0.09 ± 0.00a	0.03 ± 0.00e	1.00 ± 0.01cd	0.67 ± 0.01d
Cd ₅ + Z ₅	0.93 ± 0.07cd	1.12 ± 0.07c	0.06 ± 0.01b	0.07 ± 0.00d	0.99 ± 0.06cd	1.19 ± 0.07c
Cd ₅ + OZ ₅	1.30 ± 0.08b	1.07 ± 0.06c	0.07 ± 0.00b	0.07 ± 0.00d	1.36 ± 0.08b	1.14 ± 0.07c
Cd ₅ + OZ ₁₀	1.01 ± 0.01cd	1.91 ± 0.34a	0.07 ± 0.01b	0.09 ± 0.00c	1.08 ± 0.00cd	2.00 ± 0.33a
Cd ₅ + OZ ₂₀	0.86 ± 0.06d	1.48 ± 0.02b	0.07 ± 0.00b	0.16 ± 0.01a	0.93 ± 0.06d	1.64 ± 0.03b
Cd ₅ + NZ ₅	1.67 ± 0.20a	1.75 ± 0.15ab	0.10 ± 0.00a	0.07 ± 0.01d	1.76 ± 0.21a	1.83 ± 0.15ab
Cd ₅ + NZ ₁₀	1.05 ± 0.030c	1.61 ± 0.14b	0.09 ± 0.00a	0.12 ± 0.01b	1.14 ± 0.03c	1.73 ± 0.13b
Cd ₅ + NZ ₂₀	1.03 ± 0.01c	1.97 ± 0.11a	0.04 ± 0.00c	0.09 ± 0.01c	1.07 ± 0.01cd	2.06 ± 0.12a

1) 不同小写字母表示同一个镉污染水平下不同沸石处理及对照间的差异显著性($P < 0.05$), 下同

下($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Cd}$)根部 SOD 活性. 不同镉污染浓度下, 施用沸石对山东四号大白菜抗氧化酶活性的影响有所不同. 低镉($1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Cd}$)条件下, ‘山东四号’地上部和根部 SOD、POD、CAT 3 种酶活性均随着普通沸石施用量的增加呈先下降后上升的变化趋势, 与 $\text{Cd}_1 + \text{Z}_0$ 相比, 仅高施用量($20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的沸石处理增加了大白菜地上部和根部 SOD、POD、CAT 活性, 增幅分别为 16.7% ~ 21.2%、12.6% ~ 19.7% 和 5.3% ~ 29.9%, 其余施用量处理整体上与对照无显著差异($P > 0.05$). 低镉($1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Cd}$)条件下地上部抗氧化酶活性随着纳米沸石施用量的增加而增加, $\text{Cd}_1 + \text{NZ}_{10}$ 和 $\text{Cd}_1 + \text{NZ}_{20}$ 处理使地上部 SOD、POD、CAT 活性分别比对照($\text{Cd}_1 + \text{Z}_0$)增加了 29.7% ~ 29.9%、14.6% ~ 37.7% 和 34.8% ~ 43.1%; 与 $\text{Cd}_1 + \text{Z}_0$ 相比, 根部 SOD、POD、CAT 活性在 $\text{Cd}_1 + \text{NZ}_5$ 和 $\text{Cd}_1 + \text{NZ}_{10}$ 处理下提高 22.8% ~ 40.0%, $\text{Cd}_1 + \text{NZ}_{20}$ 处理抗氧化酶活性与对照无显著差异. 高镉($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Cd}$)条件下, $\text{Cd}_5 + \text{OZ}_{20}$ 处理使山东四号大白菜地上部和根部 SOD 活性分别比对照增加了 12.5% 和 37.5%, $\text{Cd}_5 + \text{NZ}_{10}$ 和 $\text{Cd}_5 + \text{NZ}_{20}$ 处理使地上部和根部 SOD 活性也分别比对照增加了 11.0% ~ 26.8% 和 51.7% ~ 141.1%. 与 $\text{Cd}_5 + \text{Z}_0$ 相比, $\text{Cd}_5 + \text{NZ}_{20}$ 和 $\text{Cd}_5 + \text{OZ}_{20}$ 处理使地上部 POD 活性分别降低了 33.8% 和 28.6%, 中低施用量处理($5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)变化不显著. 根部

部 POD 活性, 比对照($\text{Cd}_5 + \text{Z}_0$)分别增加了 8.2% 和 23.3%, 其它施用量处理则显著低于对照. 施用纳米沸石和普通沸石都显著降低了地上部 CAT 活性, 分别比对照($\text{Cd}_5 + \text{Z}_0$)降低了 8.0% ~ 13.0% 和 21.7% ~ 24.7%. 根部 CAT 活性则反之, 与 $\text{Cd}_5 + \text{Z}_0$ 相比, 中高施用量(10 和 $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的纳米沸石和普通沸石处理增加了根部 CAT 活性, 增幅分别为 5.5% ~ 27.1% 和 16.5% ~ 34.8%, 普通沸石以中施用量($10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)处理提高幅度最大, 纳米沸石则以高施用量($20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)处理提高幅度最大.

新晋菜三号大白菜抗氧化酶活性见图 2. 添加镉显著降低了大白菜 SOD 活性, 除了高镉($\text{Cd}_5 + \text{Z}_0$)根部 POD(降低)和低镉($\text{Cd}_1 + \text{Z}_0$)根部 CAT(显著降低), 外源添加镉均提高了地上部和根部 POD 和 CAT 活性. 低镉($1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Cd}$)条件下, 与 $\text{Cd}_1 + \text{Z}_0$ 相比, $\text{Cd}_1 + \text{OZ}_{10}$ 和 $\text{Cd}_1 + \text{OZ}_{20}$ 处理使地上部和根部 SOD 活性分别提高了 12.9% ~ 15.6% 和 36.0% ~ 57.8% ($P < 0.05$), $\text{Cd}_1 + \text{OZ}_5$ 处理则与对照无显著差异($P > 0.05$); $\text{Cd}_1 + \text{NZ}_5$ 和 $\text{Cd}_1 + \text{NZ}_{10}$ 处理提高了地上部 SOD 活性 16.7% ~ 21.2%, $\text{Cd}_1 + \text{NZ}_{20}$ 处理与对照无显著差异($P > 0.05$); 根部 SOD 则在 $\text{Cd}_1 + \text{NZ}_{10}$ 和 $\text{Cd}_1 + \text{NZ}_{20}$ 处理时提高了 42.2% 和 69.4%, $\text{Cd}_1 + \text{NZ}_5$ 处理则与对照无显著差异($P > 0.05$). 低镉($1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Cd}$)条件下, $\text{Cd}_1 + \text{OZ}_{20}$ 和 $\text{Cd}_1 + \text{NZ}_{20}$ 处理显著提高了地上部 POD 活



不同小写字母表示同一个镉污染水平下不同沸石处理及对照间的差异显著性($P < 0.05$),下同

图1 不同浓度镉条件下沸石用量对山东四号品种大白菜 SOD、POD、CAT 酶活性的影响

Fig. 1 Effect of zeolite doses on SOD, POD, CAT activities of shandongshihao cabbage in soils with different Cd levels

性,分别比对照提高了 20.6% 和 36.4%, $Cd_1 + NZ_{20}$ 和 $Cd_1 + OZ_{10}$ 处理也使根部 POD 活性分别比对照显著提高了 23.2%、19.3% ($P < 0.05$). CAT 活性在低镉条件下则表现为,在 $Cd_1 + NZ_5$ 和 $Cd_1 + NZ_{10}$ 处理下,地上部 CAT 活性分别比对照 ($Cd_1 + Z_0$) 显著提高了 12.7% 和 28.0%, 根 CAT 活性也以 $Cd_1 + NZ_{10}$ 和 $Cd_1 + OZ_{10}$ 处理最高, 分别比对照增加了 16.7% 和 3.3%, 但与对照差异不显著 ($P > 0.05$). 高镉 ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Cd}$) 条件下, 施用纳米沸石和普通沸石总体上使地上部和根部 SOD 和 CAT 活性降低了 0.7% ~ 51.3%, POD 活性则不同, 地上部和根部 POD 活性均随着普通沸石施用量的增加而增加, $Cd_5 + OZ_{20}$ 处理使地上部和根部 POD 活性分别比

对照 ($Cd_5 + Z_0$) 提高了 25.6% 和 20.1%, $Cd_5 + OZ_5$ 和 $Cd_5 + OZ_{10}$ 处理则与对照无显著差异. 纳米沸石施用量对地上部和根部 POD 活性的影响表现相反, 中低施用量处理 ($5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 显著提高了地上部 POD 活性, 比对照提高了 14.5% ~ 23.1% ($P < 0.05$), $Cd_5 + NZ_{20}$ 处理与对照无显著差异 ($P > 0.05$); 根部 POD 活性的则在 $Cd_5 + NZ_{10}$ 和 $Cd_5 + NZ_{20}$ 处理下提高了 30.1% ~ 36.2% ($P < 0.05$), $Cd_5 + NZ_5$ 处理与对照无显著差异 ($P > 0.05$).

2.3 大白菜镉含量

由表 2 可见, 随着土壤镉处理浓度的增加, 大白菜镉含量显著增加 ($P < 0.05$), $Cd_1 + Z_0$ 和 $Cd_5 + Z_0$ 处理中, 2 个品种大白菜镉含量分别增至 $31.079 \sim$

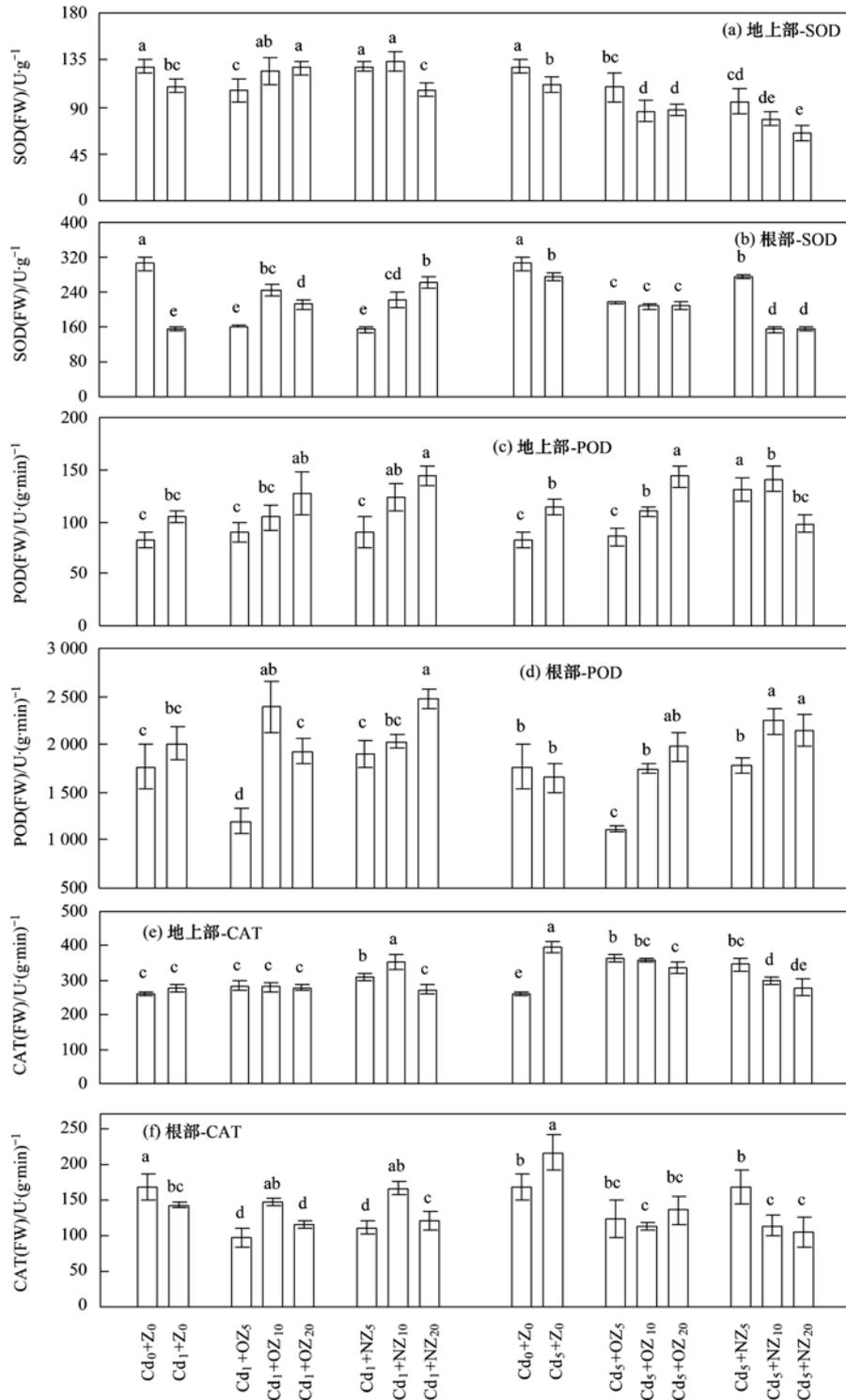


图2 不同浓度镉条件下沸石用量对新晋菜三号品种大白菜 SOD、POD、CAT 酶活性的影响

Fig. 2 Effect of zeolite doses on SOD,POD,CAT activities of xinjincaisanhao cabbage in soils with different Cd levels

40.153 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 77.102 ~ 138.062 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 施用纳米沸石和普通沸石有效降低了 2 个品种大白菜镉含量,大白菜镉含量在沸石施用量、纳米沸石和普通沸石处理间的差异达到显著水平 ($P < 0.05$). 低镉 ($1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ Cd}$) 条件下, 5、10 和 20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的沸石处理使‘山东四号’地上部镉含量比对照 ($\text{Cd}_1 +$

Z_0) 分别降低了 1.0% ~ 35.9%、25.9% ~ 70.4% 和 53.6% ~ 75.0%, 根部镉含量除 $\text{Cd}_1 + \text{OZ}_5$ 处理外均下降了 26.6%、17.1% ~ 60.5%、24.6% ~ 73.3%. ‘新晋菜三号’地上部镉含量则分别降低了 19.5% (除 $\text{Cd}_1 + \text{OZ}_5$ 处理)、53.0% (除 $\text{Cd}_1 + \text{OZ}_{10}$ 处理) 和 41.4% ~ 68.9%; 根部镉含量均下降了

9.6% ~ 47.5%、14.4% ~ 62.5%、49.3% ~ 82.4%。高镉(5 mg·kg⁻¹ Cd)条件下,与对照(Cd₅ + Z₀)相比,5、10和20 g·kg⁻¹的沸石处理使‘山东四号’地上部镉含量分别降低了7.2% ~ 17.0%、39.4% (除 Cd₅ + OZ₁₀处理)和39.4% ~ 53.2%;根部镉含量也下降了18.7% ~ 39.3%、27.8% ~ 50.2%、40.6% ~ 52.4%。‘新晋菜三号’地上部镉含量则分别降低了6.2% ~ 17.0%、0.7% ~ 43.0%和21.0% ~ 63.0%同时根部镉含量也下降了5.4% ~ 39.2%、2.0% ~ 47.8%、25.4% ~

68.7%。在低镉(1 mg·kg⁻¹ Cd)和高镉(5 mg·kg⁻¹ Cd)条件下,2个品种大白菜地上部和根部镉含量均以纳米沸石显著低于普通沸石,相同条件下,纳米沸石处理比普通沸石处理大白菜各部位镉含量低10.5% ~ 65.7%,各处理大白菜地上部和根部镉含量均以纳米沸石高用量(20 g·kg⁻¹)处理最低,如Cd₁ + NZ₂₀处理使‘新晋菜三号’根部镉含量降低至7.086 mg·kg⁻¹。将2个大白菜品种进行对比,各处理大白菜地上部和根部镉含量以山东四号品种低于新晋菜三号。

表2 不同浓度镉污染条件下沸石施用量对大白菜镉含量的影响¹⁾

Table 2 Effect of different zeolite doses on Cd concentration of Chinese cabbage at different Cd levels

处理	镉含量/mg·kg ⁻¹			
	地上部		根	
	山东四号	新晋菜三号	山东四号	新晋菜三号
Cd ₀ + Z ₀	7.06 ± 0.95g	6.83 ± 0.08g	5.69 ± 0.13f	10.92 ± 0.98e
Cd ₁ + Z ₀	36.07 ± 0.03a	34.83 ± 0.20b	31.08 ± 0.03a	40.15 ± 2.19a
Cd ₁ + OZ ₅	35.70 ± 0.14a	48.19 ± 0.78a	31.40 ± 0.14a	36.30 ± 0.66b
Cd ₁ + OZ ₁₀	26.72 ± 0.02b	47.69 ± 0.72a	25.76 ± 1.09b	34.35 ± 0.95b
Cd ₁ + OZ ₂₀	16.74 ± 0.37d	20.40 ± 0.58d	23.44 ± 0.48c	20.37 ± 2.00c
Cd ₁ + NZ ₅	23.11 ± 0.12c	28.02 ± 0.84c	22.80 ± 0.06c	21.07 ± 0.65c
Cd ₁ + NZ ₁₀	10.69 ± 0.85e	16.36 ± 0.76e	12.27 ± 0.43d	15.06 ± 0.18d
Cd ₁ + NZ ₂₀	9.02 ± 0.09f	10.83 ± 0.01f	8.29 ± 0.97e	7.09 ± 0.05f
Cd ₅ + Z ₀	7.06 ± 0.95g	6.83 ± 0.08g	5.69 ± 0.13f	10.92 ± 0.98h
Cd ₅ + Z ₀	77.10 ± 0.00b	101.07 ± 0.10a	120.24 ± 1.53a	138.06 ± 0.99a
Cd ₅ + OZ ₅	71.51 ± 0.25c	94.82 ± 0.14b	97.73 ± 0.39b	130.65 ± 0.95c
Cd ₅ + OZ ₁₀	80.05 ± 0.00a	100.38 ± 0.64a	86.76 ± 0.76c	135.26 ± 0.86b
Cd ₅ + OZ ₂₀	54.10 ± 0.27e	79.88 ± 1.14d	71.43 ± 0.30d	102.98 ± 0.99d
Cd ₅ + NZ ₅	64.00 ± 0.77d	83.89 ± 0.75c	73.03 ± 0.58d	83.89 ± 0.53e
Cd ₅ + NZ ₁₀	46.73 ± 0.64f	57.58 ± 0.35e	59.87 ± 1.34e	72.01 ± 0.02f
Cd ₅ + NZ ₂₀	36.09 ± 0.48g	37.36 ± 1.40f	57.29 ± 0.55f	43.26 ± 1.17g

2.4 大白菜地上部位镉形态和含量

施用纳米沸石和普通沸石影响着大白菜地上部镉形态含量。由表3可见,无论是在低镉(1 mg·kg⁻¹ Cd)还是高镉(5 mg·kg⁻¹ Cd)条件下,施用纳米沸石和普通沸石均有效降低了2个品种大白菜去离子水提取态、氯化钠提取态和醋酸提取态镉含量,且去离子水提取态镉含量随沸石施用量的增加而降低。在低镉(1 mg·kg⁻¹ Cd)条件下,与加镉对照相比,施用5、10和20 g·kg⁻¹的沸石使2个品种大白菜地上部去离子水提取态镉含量分别降低了7.6% ~ 32.4%、11.4% ~ 46.0%和21.0% ~ 66.1%,高镉(5 mg·kg⁻¹ Cd)条件下分别对应降低了3.3% ~ 34.8% (除了OZ₅山东四号)、4.3% ~ 63.0%和23.6% ~ 87.7%。沸石对大白菜去离子水提取态含量的降低效果以纳米沸石优于普通沸石。低镉(1 mg·kg⁻¹ Cd)条件下,施用纳米沸石使2个品种大白菜去离子水提取态镉含量分别较对应施用

量的普通沸石处理降低了13.4% ~ 57.0%和45.7% ~ 83.5%,且施用量越大,纳米沸石对普通沸石的降低幅度越大。在低镉(1 mg·kg⁻¹ Cd)污染条件下,与对照(Z₀)相比,施用沸石使2个品种大白菜氯化钠提取态和醋酸提取态镉含量分别降低了22.5% ~ 83.8% (除了新晋菜三号的OZ₅和OZ₁₀处理)和1.5% ~ 49.2% (除了山东四号NZ₅处理),高镉(5 mg·kg⁻¹ Cd)污染条件下,其含量分别降低了2.6% ~ 73.9% (除了山东四号OZ₅处理)和4.5% ~ 47.7% (除了新晋菜三号的OZ₅处理)。施用纳米沸石和普通沸石明显降低了大白菜地上部镉总提取量。在2个镉浓度污染条件下,与加镉对照(Z₀)相比,施用纳米沸石和普通沸石使山东四号品种大白菜地上部总镉提取量分别降低了12.4% ~ 68.8%和13.2% ~ 55.6% (除Cd₅ + OZ₅处理),使新晋菜三号大白菜分别对应降低了9.4% ~ 71.5%和

表3 不同镉(1 mg·kg⁻¹和5 mg·kg⁻¹ Cd)条件下沸石用量对大白菜地上部镉形态含量的影响/mg·kg⁻¹Table 3 Effect of zeolite doses on Cd chemical forms in shoots of cabbage in soils with different Cd treatments (1 mg·kg⁻¹ and 5 mg·kg⁻¹ Cd)/mg·kg⁻¹

处理	山东四号						
	Cd _E	Cd _W	Cd _{NaCl}	Cd _{HAC}	Cd _{HCl}	Cd _R	Cd _{total}
Cd ₀ + Z ₀	0.000 ± 0.000e	0.107 ± 0.014e	0.036 ± 0.005e	0.088 ± 0.014f	0.072 ± 0.009d	0.088 ± 0.014d	0.391 ± 0.001h
Cd ₁ + Z ₀	0.106 ± 0.022a	0.188 ± 0.043a	1.975 ± 0.119a	1.424 ± 0.008b	0.139 ± 0.026a	0.105 ± 0.011c	3.937 ± 0.154a
Cd ₁ + OZ ₅	0.103 ± 0.014a	0.171 ± 0.012b	1.530 ± 0.069b	0.993 ± 0.007e	0.114 ± 0.030b	0.126 ± 0.019bc	3.036 ± 0.040c
Cd ₁ + OZ ₁₀	0.048 ± 0.001c	0.133 ± 0.015d	1.270 ± 0.063c	1.162 ± 0.055c	0.085 ± 0.016c	0.134 ± 0.054b	2.831 ± 0.016d
Cd ₁ + OZ ₂₀	0.057 ± 0.030c	0.148 ± 0.011c	0.501 ± 0.064d	1.403 ± 0.001b	0.000 ± 0.000e	0.109 ± 0.044c	2.217 ± 0.062e
Cd ₁ + NZ ₅	0.086 ± 0.019b	0.135 ± 0.020d	1.259 ± 0.098c	1.724 ± 0.055a	0.000 ± 0.000e	0.245 ± 0.074a	3.449 ± 0.041b
Cd ₁ + NZ ₁₀	0.051 ± 0.036c	0.115 ± 0.019e	0.320 ± 0.020e	1.036 ± 0.204d	0.000 ± 0.000e	0.089 ± 0.054d	1.612 ± 0.153f
Cd ₁ + NZ ₂₀	0.021 ± 0.00d	0.064 ± 0.001f	0.488 ± 0.009d	0.850 ± 0.045f	0.000 ± 0.000e	0.053 ± 0.016e	1.476 ± 0.072g
Cd ₀ + Z ₀	0.000 ± 0.000e	0.107 ± 0.014f	0.036 ± 0.005g	0.088 ± 0.014g	0.072 ± 0.009d	0.088 ± 0.014c	0.391 ± 0.001h
Cd ₅ + Z ₀	0.253 ± 0.004a	1.335 ± 0.074b	4.334 ± 0.068b	1.557 ± 0.187a	0.083 ± 0.015c	0.373 ± 0.041a	7.935 ± 0.015a
Cd ₅ + OZ ₅	0.250 ± 0.025a	1.603 ± 0.073a	4.794 ± 0.100a	1.092 ± 0.072e	0.107 ± 0.013b	0.178 ± 0.011b	8.023 ± 0.247a
Cd ₅ + OZ ₁₀	0.146 ± 0.000b	1.278 ± 0.003b	4.055 ± 0.139c	1.237 ± 0.101d	0.127 ± 0.026a	0.047 ± 0.015e	6.890 ± 0.006b
Cd ₅ + OZ ₂₀	0.084 ± 0.011c	0.565 ± 0.012d	1.876 ± 0.028	0.936 ± 0.037f	0.024 ± 0.002f	0.036 ± 0.015f	3.520 ± 0.046f
Cd ₅ + NZ ₅	0.133 ± 0.014b	0.870 ± 0.012c	3.119 ± 0.133d	1.487 ± 0.020b	0.036 ± 0.016ef	0.073 ± 0.002d	5.717 ± 0.093c
Cd ₅ + NZ ₁₀	0.081 ± 0.016c	0.579 ± 0.037d	2.432 ± 0.085e	1.262 ± 0.039c	0.046 ± 0.000e	0.047 ± 0.066e	4.447 ± 0.134d
Cd ₅ + NZ ₂₀	0.051 ± 0.001d	0.164 ± 0.016a	1.275 ± 0.143f	0.860 ± 0.048e	0.088 ± 0.017c	0.038 ± 0.018ef	2.476 ± 0.109g
处理	新晋菜三号						
	Cd _E	Cd _W	Cd _{NaCl}	Cd _{HAC}	Cd _{HCl}	Cd _R	Cd _{total}
Cd ₀ + Z ₀	0.135 ± 0.031b	0.157 ± 0.045f	0.072 ± 0.058g	0.035 ± 0.004f	0.000 ± 0.000d	0.050 ± 0.018e	0.450 ± 0.058e
Cd ₁ + Z ₀	0.160 ± 0.019a	0.419 ± 0.003a	2.683 ± 0.119c	1.415 ± 0.076a	0.111 ± 0.051b	0.049 ± 0.000e	4.837 ± 0.224a
Cd ₁ + OZ ₅	0.143 ± 0.030ab	0.387 ± 0.004b	2.810 ± 0.086b	1.364 ± 0.044ab	0.091 ± 0.100bc	0.092 ± 0.013d	4.886 ± 0.036a
Cd ₁ + OZ ₁₀	0.000 ± 0.000c	0.371 ± 0.001bc	2.978 ± 0.006a	1.103 ± 0.075c	0.113 ± 0.036b	0.123 ± 0.011c	4.688 ± 0.105ab
Cd ₁ + OZ ₂₀	0.000 ± 0.000c	0.331 ± 0.016c	1.389 ± 0.120 f	0.887 ± 0.063d	0.146 ± 0.020a	0.212 ± 0.039a	2.964 ± 0.013c
Cd ₁ + NZ ₅	0.000 ± 0.000c	0.283 ± 0.031d	2.051 ± 0.118d	1.238 ± 0.006b	0.082 ± 0.016c	0.165 ± 0.001b	3.819 ± 0.066b
Cd ₁ + NZ ₁₀	0.000 ± 0.000c	0.226 ± 0.050e	1.787 ± 0.102e	0.901 ± 0.096d	0.000 ± 0.000d	0.112 ± 0.010 c	3.026 ± 0.220c
Cd ₁ + NZ ₂₀	0.000 ± 0.000c	0.149 ± 0.036f	1.290 ± 0.076f	0.719 ± 0.032e	0.000 ± 0.000d	0.087 ± 0.017d	2.244 ± 0.062d
Cd ₀ + Z ₀	0.135 ± 0.031c	0.157 ± 0.045g	0.072 ± 0.058h	0.035 ± 0.004f	0.000 ± 0.000d	0.050 ± 0.018f	0.450 ± 0.058g
Cd ₅ + Z ₀	0.080 ± 0.15d	1.656 ± 0.097a	7.672 ± 0.151a	1.484 ± 0.050ab	0.114 ± 0.066c	0.125 ± 0.047e	11.132 ± 0.101a
Cd ₅ + OZ ₅	0.174 ± 0.022b	1.341 ± 0.060b	5.831 ± 0.188c	1.515 ± 0.070a	0.187 ± 0.035q	0.161 ± 0.035d	9.210 ± 0.247c
Cd ₅ + OZ ₁₀	0.203 ± 0.003a	1.159 ± 0.074d	7.470 ± 0.327a	1.371 ± 0.033c	0.128 ± 0.019b	0.226 ± 0.036b	10.557 ± 0.455bc
Cd ₅ + OZ ₂₀	0.000 ± 0.000e	1.266 ± 0.013c	4.430 ± 0.028d	1.062 ± 0.016d	0.000 ± 0.000d	0.169 ± 0.045cd	6.927 ± 0.070d
Cd ₅ + NZ ₅	0.000 ± 0.000e	1.602 ± 0.020a	6.804 ± 0.152b	1.403 ± 0.020b	0.000 ± 0.000d	0.273 ± 0.035a	10.082 ± 0.158b
Cd ₅ + NZ ₁₀	0.000 ± 0.000e	0.612 ± 0.054e	3.721 ± 0.154f	1.032 ± 0.039d	0.000 ± 0.000d	0.252 ± 0.052ab	5.617 ± 0.299e
Cd ₅ + NZ ₂₀	0.000 ± 0.000e	0.208 ± 0.011f	2.001 ± 0.086g	0.776 ± 0.031e	0.000 ± 0.000d	0.186 ± 0.012c	3.170 ± 0.093f

3.1% ~ 38.7% (除 Cd₁ + OZ₅ 处理), 且随着施用量的增加, 降低幅度更大. 值得注意的是, 在高镉(5 mg·kg⁻¹ Cd)条件下, OZ₅ 处理山东四号总镉提取量比对照高出 1.1%, 低镉(1 mg·kg⁻¹ Cd)条件下, OZ₅ 处理新晋菜三号总镉提取量也比对照高出 1.0%. 此外, 在高镉条件下, 新晋菜三号大白菜中, 对总镉提取量随普通沸石施用量的增加没有呈逐渐降低的趋势, 而是以中量(10 g·kg⁻¹)处理最高(10.557 mg·kg⁻¹).

2.5 大白菜地上部位镉形态分配比例

低镉(1 mg·kg⁻¹ Cd)和高镉(5 mg·kg⁻¹ Cd)污染条件下, 地上部镉形态分配比例(FDC)如图3所示. 随着土壤镉浓度的增加, 大白菜各形态去离子

水提取态(Cd_W)、乙醇提取态(Cd_E)、氯化钠提取态(Cd_{NaCl})、醋酸提取态(Cd_{HAC})、盐酸提取态(Cd_{HCl})、残留态(Cd_R)镉含量大幅度上升, 以 Cd_W、Cd_{NaCl}和 Cd_{HAC}含量增加幅度最大. 在对照(Cd₀ + Z₀)条件下, 山东四号和新晋菜三号这2个品种大白菜地上部镉形态均主要为去离子水提取态(Cd_W), 但2个品种镉形态分布情况各不相同. 山东四号镉FDC大小以 Cd_W(27.5%) > Cd_{HAC}(22.5%)、Cd_R(22.5%) > Cd_{HCl}(18.3%) > Cd_{NaCl}(9.2%) > Cd_E(0.0%), 新晋菜三号镉FDC则表现为 Cd_W(35.0%) > Cd_E(30.1%) > Cd_{NaCl}(16.1%) > Cd_R(11.2%) > Cd_{HAC}(7.7%) > Cd_{HCl}(0.0%). 外源添加镉改变了大白菜体内镉的形态含量和分布, 对于山东四号品种,

低镉条件下镉形态分布表现为 Cd_{HAC} (32.7% ~ 64.3%) > Cd_{NaCl} (19.8% ~ 50.4%) > Cd_W (3.9% ~ 7.1%) > Cd_R (2.7% ~ 7.1%) > Cd_E (1.4% ~ 3.4%) > Cd_{HCl} (0.0% ~ 3.7%), 高镉(5 mg·kg⁻¹ Cd)条件下为 Cd_{NaCl} (51.5% ~ 59.8%) > Cd_{HAC} (13.6% ~ 34.7%) > Cd_W (6.6% ~ 20.8%) > Cd_E (1.8% ~ 3.2%) > Cd_R (0.7% ~ 4.7%) > Cd_{HCl} (0.6% ~ 3.6%); 对于新晋菜三号品种, 低镉(1 mg·kg⁻¹ Cd)条件下为 Cd_{NaCl} (46.9% ~ 63.5%) > Cd_{HAC} (23.5% ~ 32.0%) > Cd_W (6.6% ~ 11.2%) > Cd_R (1.0% ~

7.1%) > Cd_{HCl} (0.0% ~ 4.9%) > Cd_E (0.0% ~ 3.3%), 高镉条件下为 Cd_{NaCl} (63.1% ~ 70.8%) > Cd_{HAC} (13.0% ~ 24.5%) > Cd_W (6.5% ~ 18.3%) > Cd_R (1.1% ~ 5.9%) > Cd_E (0.0% ~ 1.9%) > Cd_{HCl} (0.0% ~ 2.0%). 整体而言, 无论在低镉(1 mg·kg⁻¹ Cd)还是在高镉(5 mg·kg⁻¹ Cd)污染条件下, 除了低镉(1 mg·kg⁻¹ Cd)条件下山东四号大白菜醋酸提取态镉 FDC 大多高于氯化钠提取态, 其余情况下 2 个品种大白菜地上部镉均主要以氯化钠提取态存在, 盐酸提取态镉分配比例总是相对较低。

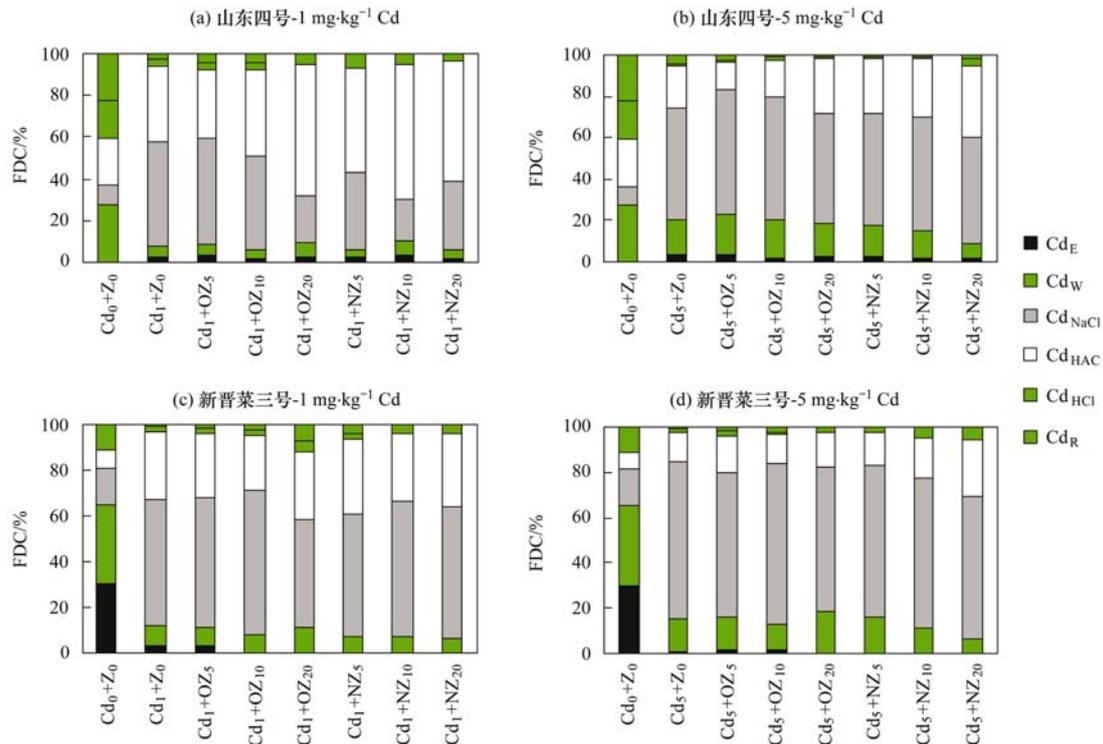


图3 低镉(1 mg·kg⁻¹ Cd)和高镉(5 mg·kg⁻¹ Cd)条件下沸石用量对大白菜地上部镉形态分布的影响

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

3 讨论

镉对植物生长具有双重作用. 大多数研究表明, 镉胁迫条件下, 植物常表现出生长受抑制等镉毒害症状, 且毒害作用随着镉浓度的增加而增加^[17]. 但也有研究指出, 在一定低镉浓度条件下, 镉可刺激和促进植物生长^[18], 或对植物生长没有显著影响^[17, 19]. 本试验中, 在不施用纳米沸石和普通沸石的情况下, 添加外源镉刺激了大白菜的生长, 并提高了大白菜地上部、根部和总植株生物量, 这种刺激作用对‘新晋菜三号’的表现更为明显, ‘山东四号’根部则在土壤 Cd 浓度提高至 5 mg·kg⁻¹ 时, 开始表现出明显的抑制作用, 根生物量显著降低 ($P <$

0.05). 该结果与施宠等^[18]和 Ding 等^[20]的报道一致. 在低镉(1 mg·kg⁻¹ Cd)和高镉(5 mg·kg⁻¹ Cd)污染条件下, 施用纳米沸石和普通沸石均不同程度上增加了大白菜生物量. 但沸石对大白菜生长的影响受沸石施用量、大白菜品种和镉污染含量的影响. 以沸石低施用量(5 g·kg⁻¹)处理对大白菜生长的促进作用最大, 当沸石施用量高至 20 g·kg⁻¹ 时, 大白菜生长开始受到抑制, 生物量甚至显著低于对照. 该结果与 Rebedea 等^[21]的研究一致. 原因可能是低量沸石(5 g·kg⁻¹)有效降低了土壤中镉的有效态含量, 抑制了大白菜对镉的吸收, 从而减轻了镉对大白菜的毒害, 并且沸石施入土壤中, 可提高土壤阳离子交换量等改善土壤理化性状, 提高植物对营养

元素的吸收,从而促进了大白菜生长^[22];但当沸石施用量过高($20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)时,土壤环境中可能存在局部 pH 偏高的情况,从而对植物生长不利,另一方面也可能是由于高施用量的沸石在更有效地吸收固定重金属的同时,也过多地吸附了土壤中的养分,使植物所需养分减少,从而对植物生长产生负面影响。

SOD、POD 和 CAT 等组成的抗氧化系统是植物的重要保护机制^[23~26]。镉胁迫能诱导植物体内产生大量的 O_2^- 、 $\cdot\text{OH}^-$ 、 H_2O_2 、 O_2 等自由基,破坏细胞膜完整性和稳定性,引起植物过氧化损伤,而 SOD、POD、CAT 抗氧化酶活性的提高可清除或减少这些自由基和过氧化物,有利于缓解镉对植物的过氧化伤害^[25,27]。但 SOD、POD 和 CAT 抗氧化系统对植物的保护作用有一定的范围限制^[25]。本试验中,不同浓度镉胁迫下,山东四号和新晋菜三号这 2 个品种大白菜抗氧化酶活性对 Cd 胁迫也表现出不同程度的生理响应,以抵御 Cd 胁迫引起的过氧化伤害。在不施沸石情况下,添加外源镉总体上刺激了‘山东四号’SOD 活性的增加,降低了 POD 和 CAT 活性,‘新晋菜三号’品种抗氧化酶活性变化与之相反。说明镉胁迫条件下,‘山东四号’主要通过提高 SOD 活性来抵御镉胁迫伤害。但当土壤镉污染浓度升至 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,‘山东四号’SOD、POD 和 CAT 活性降低,根部抗氧化能力降低,这与根部生物量降低的结果相符。而‘新晋菜三号’由于对土壤镉的吸收积累量更大,使抗氧化酶对自由基的清除突破了第一道防线,SOD 活性降低,主要通过提高 POD 和 CAT 活性来抵御镉胁迫引起的过氧化损伤。施用纳米沸石和普通沸石不同程度上提高了大白菜抗氧化酶活性。对于‘山东四号’品种,低镉($1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{Cd}$)和高镉($5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{Cd}$)条件下,高施用量($20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)沸石处理均提高了‘山东四号’地上部和根部 SOD、POD 和 CAT 活性(高镉条件下地上部 POD 和 CAT 活性降低除外)。对于‘新晋菜三号’,低镉污染($1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{Cd}$)条件下,纳米沸石及普通沸石中、高施用量($10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)处理总体上提高了地上部和根部 SOD、POD、CAT 抗氧化酶活性,而高镉污染条件下,增施纳米沸石和普通沸石均进一步降低了地上部和根部 SOD 和 CAT 活性,但高施用量($20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)的普通沸石和中、高施用量($10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)的纳米沸石明显提高了地上部和根部 POD 活性。表明施用高量的纳米沸石和普通沸石有利于提高抗氧化系统对活性氧自由基的清除能力,从而缓解镉对植物的过氧化损

伤,而高镉污染条件下,新晋菜三号对镉的吸收积累增加,SOD 和 CAT 活性降低,其抵御能力下降,此时新晋菜三号植株主要通过提高 POD 活性来抗击 Cd 胁迫。

与不施沸石的对照相比,施用纳米沸石和普通沸石均显著降低了大白菜地上部和根部镉含量。该结果与周坤等^[28]的报道类似。在镉污染条件下,大白菜地上部镉含量略小于根部。与普通沸石相比,相同施用量的纳米沸石在显著提高了大白菜生物量的同时,也显著降低了大白菜各部位镉含量。

镉在植物体内的不同形态镉迁移能力有明显的差异,进而影响到植物体内镉的运输转移及镉对植物的毒性^[29]。乙醇和去离子水提取态生物毒性和移动性最高,最容易使植物受到毒害,氯化钠提取态毒性与移动性中等,醋酸与盐酸提取态生物毒性与移动性均最低^[29]。本试验中,对大白菜可食部位(地上部)镉形态进行分析发现,沸石处理降低了去离子水提取态 Cd 含量和分配比例,大白菜可食部位(地上部)镉均主要以氯化钠提取态存在,其次为醋酸提取态,这两种形态均有非活性态,从而有效降低镉在大白菜体内的迁移和毒性^[30]。施用纳米沸石和普通沸石也显著减少了 2 个品种大白菜可食部位(地上部)各形态镉含量和镉提取总量,大大降低了镉对大白菜的毒害也提高了大白菜的食用安全。

4 结论

(1)中高施用量的纳米沸石和高施用量的普通沸石均提高了 2 个品种大白菜地上部和根部 SOD、POD 和 CAT 活性。中低量的纳米沸石和普通沸石处理提高了 2 个品种大白菜各部位生物量,当施用量增至 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,大白菜生长受抑制,生物量降低。

(2)施用纳米沸石和普通沸石后,大白菜可食部位(地上部)各形态镉含量及镉提取总量明显降低,沸石的高施用量($20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)处理对大白菜可食部位(地上部)镉提取总量的降低效果最佳。总镉提取量、氯化钠态镉含量及其分配比例均以新晋菜三号高于山东四号。

(3)纳米沸石和普通沸石降低了大白菜地上部和根部镉含量,且随纳米沸石和普通沸石用量增加,大白菜地上部和根部镉含量呈明显下降趋势。新晋菜三号各部位镉含量明显高于山东四号品种,其对镉的吸收富集能力相对较强。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王立群, 罗磊, 马义兵, 等. 重金属污染土壤原位钝化修复研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(5): 1214-1222.
Wang L Q, Luo L, Ma Y B, *et al.* *In situ* immobilization remediation of heavy metals-contaminated soils: a review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, **20**(5): 1214-1222.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [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] 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.
- [7] Chen Z S, Lee G J, Liu J C. The effects of chemical remediation treatments on the extractability and speciation of cadmium and lead in contaminated soils[J]. Chemosphere, 2000, **41**(1-2): 235-242.
- [8] 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): 813-821.
- [9] 刘秀珍, 赵兴杰, 马志宏. 膨润土和沸石在镉污染土壤治理中的应用[J]. 水土保持学报, 2007, **21**(6): 83-91.
Liu X Z, Zhao X J, Ma Z H. Application of Bentonite and zeolite in dealing soil contaminated by Cd[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, **21**(6): 83-91.
- [10] Rebedea I. An investigation into the use of synthetic zeolites for in situ contaminated land remediation [D]. Merseyside: Liverpool John Moores University, 1997.
- [11] 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.
- [12] 李翔. 纳米沸石在动态动力学拆分中的应用研究[D]. 上海: 复旦大学, 2013.
- [13] 马玮艺, 张彦峰, 姜英男, 等. 不同改良剂对镉污染土壤的化学固定修复的比较研究[J]. 科技博览, 2009, (32): 136-137.
- [14] 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 and its uptake by cabbage in soil[J]. Environmental Science, 2015, **36**(12): 4630-4641.
- [15] 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.
- [16] 张志良, 翟伟菁. 植物生理学实验指导[M]. (第三版). 北京: 高等教育出版社, 2002. 154-155.
- [17] 吴福忠, 杨万勤, 张健, 等. 镉胁迫对桂花生长和养分积累、分配与利用的影响[J]. 植物生态学报, 2010, **34**(10): 1220-1226.
Wu F Z, Yang W Q, Zhang J, *et al.* Effects of cadmium stress on growth and nutrient accumulation, distribution and utilization in *Osmanthus fragrans* var. *thunbergii* [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, **34**(10): 1220-1226.
- [18] 施宠, 王纯利, 黄长福, 等. 镉胁迫对野燕麦幼苗生长及其生理特性的影响[J]. 草地学报, 2015, **23**(3): 526-532.
Shi C, Wang C L, Huang C F, *et al.* Effects of Cd stress on the growth and physiological characteristics of *Avena fatua* seedlings [J]. Acta Agrestia Sinica, 2015, **23**(3): 526-532.
- [19] 刘柿良, 石新生, 潘远智, 等. 镉胁迫对长春花生长, 生物量及养分积累与分配的影响[J]. 草业学报, 2013, **22**(3): 154-161.
Liu S L, Shi X S, Pan Y Z, *et al.* Effects of cadmium stress on growth, accumulation and distribution of biomass and nutrient in *Catharanthus roseus* [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, **22**(3): 154-161.
- [20] 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.
- [21] Rebedea I, Lepp N W. The use of synthetic zeolites to reduce plant metal uptake and phytotoxicity in two polluted soils [J]. Environmental Geochemistry and Health, 1995, **16**: 81-88.
- [22] 张莉, 赵保卫, 李瑞瑞. 沸石改良土壤的研究进展[J]. 环境科学与管理, 2012, **37**(1): 39-43.
Zhang L, Zhao B W, Li R R. Research progress of soil amelioration with zeolite [J]. Environmental Science and Management, 2012, **37**(1): 39-43.
- [23] 高芳, 林英杰, 张佳蕾, 等. 镉胁迫对花生生理特性、产量和品质的影响[J]. 作物学报, 2011, **37**(12): 2269-2276.
Gao F, Lin Y J, Zhang J L, *et al.* Effects of cadmium stresses on physiological characteristics, pod yield, and seed quality in peanut [J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, **37**(12): 2269-2276.
- [24] 惠俊爱, 党志, 叶庆生. 镉胁迫对玉米光合特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(2): 205-210.
Hui J A, Dang Z, Ye Q S. Influence of cadmium stress on photosynthetic characteristics of maize [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, **29**(2): 205-210.
- [25] 汪洪, 赵士诚, 夏文建, 等. 不同浓度镉胁迫对玉米幼苗光合作用、脂质过氧化和抗氧化酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, **14**(1): 36-42.
Wang H, Zhao S C, Xia W J, *et al.* Effect of cadmium stress on photosynthesis, lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in maize (*Zea mays* L.) seedlings[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, **14**(1): 36-42.
- [26] 宋秀华, 王秀峰, 魏珉, 等. 沸石添加对 NaCl 胁迫下黄瓜幼

- 苗生长及离子含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, **11**(2): 259-263.
- Song X H, Wang X F, Wei M, *et al.* Effects of zeolite on growth and ionic contents of cucumber seedlings under NaCl stress[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2005, **11**(2): 259-263.
- [27] 李璇, 岳红, 王升, 等. 影响植物抗氧化酶活性的因素及其研究热点和现状[J]. 中国中药杂志, 2013, **38**(7): 973-978.
- Li X, Yue H, Wang S, *et al.* Research of different effects on activity of plant antioxidant enzymes [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2013, **38**(7): 973-978.
- [28] 周坤, 刘俊, 徐卫红, 等. 外源锌对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(6): 1592-1599.
- Zhou K, Liu J, Xu W H, *et al.* Effect of exogenous zinc on activity of antioxidant enzyme, accumulation and chemical forms of cadmium in different varieties of tomato [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(6): 1592-1599.
- [29] 李红婷, 董然. 2种萱草对铅、镉的吸收累积及其在亚细胞分布和化学形态特征[J]. 华南农业大学学报, 2015, **36**(4): 59-64.
- Li H T, Dong R. Pb & Cd absorption and accumulation characteristics, subcellular distribution and chemical forms in two types of *Hemerocallis* plants [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2015, **36**(4): 59-64.
- [30] 孙岩, 韩颖, 李军, 等. 硅对镉胁迫下水稻生物量及镉的化学形态的影响[J]. 西南农业学报, 2013, **26**(3): 1240-1244.
- Sun Y, Han Y, Li J, *et al.* Effect of Si on rice biomass and chemical species of Cd under Cd stress [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, **26**(3): 1240-1244.

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-ru, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₂ ⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)