

目次

2013~2020年天津市PM _{2.5} -O ₃ 污染变化趋势和影响因素分析	肖致美, 李亚菲, 高璟赞, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)
2015~2020年济南市O ₃ 污染趋势及敏感性变化分析	孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)
南京市南部地区O ₃ 污染特征、生成敏感性及传输影响分析	郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)
天津市“十三五”期间O ₃ 污染特征和驱动因子	李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟赞, 郑乃源, 杨宁 (4241)
基于随机森林的南京市PM _{2.5} 和O ₃ 对减排的响应	尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)
基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化	吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓炯, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)
污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响	钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)
2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析	郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)
滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源	孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)
重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价	谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 王丹尼, 王志恒 (4304)
衡水市桃城区浅层地下水咸化成因	何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)
吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价	白凡, 周金龙, 周殷竹, 韩双宝, 孙英 (4325)
金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性	丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇诚, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)
白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征	程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)
基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制	朱弈, 叶建峰, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)
甾体激素在污水处理厂的赋存特征和行为归趋	刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)
博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价	郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)
太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价	吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)
雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价	郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)
基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析	段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)
锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价	余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)
老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价	王莹, 董爱俊, 杨建峰, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)
畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估	丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新亮, 曾巧云 (4440)
地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究	简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)
微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响	马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)
施加Fe ₃ O ₄ /桑树杆生物炭对土壤团形态和水稻砷含量的影响	阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)
生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制	张丽, 李如霞, 何玉奎, 姚彦坡, 林大松 (4479)
不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响	李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)
椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响	侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)
生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响	冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)
改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应	陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)
改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响	由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)
化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险	赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)
污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失	张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)
化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响	谢军, 王子芳, 王莹, 熊子怡, 高明 (4565)
黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测	刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)
微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (4585)
高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析	姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)
土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响	李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)
中国省域碳达峰路径与政策	苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)
基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制	钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 邹娜, 封强, 傅泽强 (4637)
不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析	刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘锦, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)
中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估	陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)
陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟	古圳威, 刘京, 陈怡, 卢新冉, 王思轶 (4666)
气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响	李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)
降水变化下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸	王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)
水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响	秦纪法, 张佳彭, 桑变, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)
中国省域土壤重金属空间分布特征及分区分区管控对策	石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)
壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议	洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)
微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展	张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圆, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)
生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展	周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)
铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展	魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)
畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术进展	安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)
《环境科学》征订启事(4230)	《环境科学》征稿简则(4303)
信息(4506, 4678, 4741)	

不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响

李平¹, 聂浩¹, 郎漫¹, 朱燕菊¹, 姜海波², 李楠³

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 2. 江苏省耕地质量与农业环境保护站, 南京 210036; 3. 江苏省新沂市耕地质量保护站, 徐州 221400)

摘要: 氮是作物生长的必需营养元素, 生物炭是一种良好的土壤修复材料. 以镉(Cd)污染农田土壤为对象, 采用青菜盆栽试验研究尿素、硫酸铵和硝酸钙这3种氮肥配施生物炭对青菜生长和Cd吸收的影响. 结果表明, 施用氮肥和生物炭促进了青菜生长, 与不施氮肥的对照处理相比, 单施尿素、硫酸铵、硝酸钙和生物炭处理青菜生物量显著增加了5.02%~32.9%, 不同氮肥配施生物炭处理青菜生物量比单施氮肥处理显著增加了8.84%~50.8%. 单施尿素后土壤pH值比对照处理显著降低了0.27个单位, 土壤有效态Cd含量显著增加了30.0%. 单施硫酸铵后土壤pH值比对照处理显著降低了0.33个单位, 青菜Cd含量显著增加了29.2%. 单施硝酸钙对土壤pH值和青菜Cd含量无显著影响, 而单施生物炭后土壤pH值比对照处理显著提高了0.35个单位, 土壤有效态Cd含量和青菜Cd含量分别显著降低了57.4%和53.7%. 氮肥配施生物炭处理土壤pH值比单施氮肥处理显著提高了0.14~0.28个单位, 土壤有效态Cd含量和青菜Cd含量分别显著降低了16.5%~30.1%和15.3%~28.6%. 总体来看, 配施生物炭能够调节不同氮肥对污染土壤中Cd有效性的影响, 在实际重金属污染农田修复过程中, 需合理选择和施用氮肥以获得最大的经济效益和环境效应.

关键词: 镉污染; 青菜; 氮肥; 生物炭; 生物有效性

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4489-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202209248

Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi (*Brassica chinensis* L.) in Cadmium Contaminated Soil

LI Ping¹, NIE Hao¹, LANG Man¹, ZHU Yan-ju¹, JIANG Hai-bo², LI Nan³

(1. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Farmland Quality and Agricultural Environmental Protection Station, Nanjing 210036, China; 3. Xinyi Farmland Quality and Environmental Protection Station, Xuzhou 221400, China)

Abstract: Nitrogen is an essential nutrient element for crop growth, and biochar is a good material for soil remediation. In this study, a pakchoi (*Brassica chinensis* L.) pot experiment was conducted to investigate the effects of the combined application of three nitrogen fertilizers, including urea, ammonium sulfate, calcium nitrate, and biochar on pakchoi growth and cadmium (Cd) uptake from cropland soil contaminated by Cd. The results showed that the application of nitrogen fertilizers and biochar prompted pakchoi growth, and the biomass of pakchoi in the treatments of single applications of urea, ammonium sulfate, calcium nitrate, and biochar were significantly increased by 5.02%-32.9%, as compared with that in the control treatment without nitrogen fertilizer application. The biomass of pakchoi in the treatments of the combined application of nitrogen fertilizers and biochar were significantly increased by 8.84%-50.8%, as compared with that in the treatment of the single application of nitrogen fertilizer. Compared with that under the control treatment without nitrogen fertilizer application, the single application of urea significantly reduced soil pH by 0.27 and significantly increased the content of soil available Cd by 30.0%. The single application of ammonium sulfate significantly reduced soil pH by 0.33 and significantly increased Cd content in pakchoi by 29.2%, as compared with that in the control treatment. The single application of calcium nitrate had no significant effect on soil pH or Cd content in pakchoi, whereas the single application of biochar significantly increased soil pH by 0.35 and significantly decreased the content of soil available Cd and content of Cd in pakchoi by 57.4% and 53.7%, respectively, as compared with that in the control treatment. Soil pH in the treatments of the combined application of nitrogen fertilizers and biochar was significantly increased by 0.14-0.28, the contents of soil available Cd were decreased by 16.5%-30.1%, and the contents of Cd in pakchoi were reduced by 15.3%-28.6%, as compared with that in the treatment of single application of nitrogen fertilizers. In general, the application of biochar could adjust the effects of different nitrogen fertilizers on Cd availability in the contaminated soil. During the remediation process of heavy metal-contaminated cropland, nitrogen fertilizer should be selected and applied reasonably to obtain the maximum economic and environmental benefits.

Key words: cadmium contamination; pakchoi; nitrogen fertilizer; biochar; bioavailability

改革开放以来,因城市化和工业化的快速发展及农业生产中农药、化肥的长期不合理施用,我国农田土壤重金属污染问题日趋严重,对我国生态环境、粮食安全及人民健康造成严重威胁. 众多重金属元素中,镉(Cd)因其生物毒性大、生物活性高、迁移性强且易吸收等特点而受到广泛关注.《全国土壤污染状况调查公报》显示^[1],我国土壤总点位超标率为16.1%,各种无机和有机污染物中以Cd污染程度最为严重,其点位超标率高达7.0%. 污染

土壤中的Cd经农作物吸收后,富集在可食部位中的Cd可以通过食物链在人体中积累,危害人体健康. 因此,开展Cd污染农田土壤的改良修复工作对保障我国粮食安全具有重要意义.

收稿日期: 2022-09-26; 修订日期: 2022-10-25

基金项目: 中央土壤污染防治资金项目(新沂市受污染耕地安全利用推进区(示范基地)核心区建设项目); 国家自然科学基金项目(41301345)

作者简介: 李平(1982~),男,博士,副教授,主要研究方向为土壤环境化学过程与污染控制、土壤氮循环及其生态环境效应, E-mail: pli@nuist.edu.cn

针对重金属污染农田土壤,研究人员研发了多种治理修复技术,其中尤以施用各种重金属钝化材料的原位化学修复技术应用最为广泛^[2,3]. 重金属钝化剂通过物理化学作用使土壤重金属由高活性形态向潜在有效态或无效态转变,进而降低重金属的生物有效性,减少农作物对土壤重金属的吸收^[4,5]. 生物炭是一种由作物秸秆、污泥、家畜粪便和木材等生物质经过热化学过程转化而制成的有机材料,因其高养分含量特性常被用于培肥改良土壤,提高地力. 已有研究发现,施用生物炭显著提高土壤速效养分含量,促进水稻对氮、磷和钾养分的吸收,进而提高水稻产量^[6,7]. 另一方面,生物炭也是一种高度芳香化的有机化合物,其化学结构中富含大量含氧官能团,且生物炭的结构孔隙度和表面积较大,因而能够通过吸附作用固定土壤和沉积物中的活性重金属离子^[8,9]. 近 20 年来,生物炭被广泛用于重金属污染土壤的改良修复. 田间试验结果表明,不同类型的生物炭对中轻度 Cd 污染稻田有很好的修复效果,土壤有效态 Cd 含量与水稻籽粒 Cd 含量随生物炭施用量的增加而显著下降^[10~12]. 近几年,研究人员研发了多种功能性改性方法,以进一步改善生物炭的物理化学性质,提高其对土壤重金属活性的钝化效果. 王鑫宇等^[13]利用 K_2PO_4 、 $KMnO_4$ 和 $NaOH$ 对稻壳生物炭进行改性处理,发现改性生物炭的比表面积和孔容有不同程度的增加,改性生物炭对 Cu 和 Cd 污染土壤的修复效果也有所提升. 王俊楠等^[14]的研究也发现,磁性生物炭可有效降低土壤 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的生物有效性,且生物炭施用量越高,其对土壤重金属活性的钝化效果越好.

施肥是保证农作物正常生长,维持农产品高产优质的必要农艺措施. 施入土壤的肥料可影响土壤理化性质,进而通过吸附、解吸、沉淀和络合等作用影响土壤重金属的存在形态及其有效性^[15]. 氮是植物生长的必需营养元素,参与植物体内影响植物生长的重要生理过程. 铵态氮、硝态氮和酰胺态氮等无机氮肥是当前我国农业生产中应用较为广泛的氮肥类型. 有研究表明,施入土壤的无机氮肥在不同氮形态间的转化过程,以及各形态氮与土壤中不同组分的化学反应过程会影响土壤理化性质,进而影响土壤重金属的生物有效性及作物对土壤重金属的吸收富集^[16,17],且这种影响因氮肥类型、施用量和施用时间的不同而差异明显^[18,19]. 因此,针对中轻度重金属污染土壤的安全利用,可选择边修复边生产的策略,在施用生物炭等钝化剂的同时,施用一定量氮肥以维持农作物正常生长所需的氮素营养供

应,这对于确保粮食产量,达到修复和生产双赢目的具有重要意义.

不同作物对氮肥类型的喜好不同,通常水稻喜好铵态氮肥,小麦等旱作物则喜好硝态氮肥,农业生产中应根据不同作物的氮素需求特性选择合适的氮肥类型. 目前,有关生物炭和氮肥对作物吸收土壤 Cd 的影响研究较多,但相关研究大多是针对单一因素开展,有关不同形态氮肥配施生物炭影响作物吸收土壤 Cd 的研究鲜见报道. 因此,本文选取 Cd 污染农田土壤,以青菜 (*Brassica chinensis* L.) 为研究对象,通过盆栽试验研究尿素、硫酸铵和硝酸钙这 3 种氮肥配施生物炭对青菜生长、土壤 Cd 有效性和青菜吸收 Cd 的影响,以期为重金属污染土壤改良修复过程中氮肥的合理选择与施用,保证蔬菜产量和品质提供科学依据和技术参考.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为采自江苏省新沂市某 Cd 污染水稻田的耕作层土壤(0~20 cm),土壤 pH 值为 5.37,土壤 ω (全 Cd)为 $1.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超出《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)中的 Cd 污染风险筛选值($\text{pH} \leq 5.5$, $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)4.2 倍, ω (有效态 Cd)为 $0.341 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 供试生物炭为杭州聚能生物科技有限公司生产的水稻秸秆生物炭, ω (Cd)为 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 值为 9.75,比表面积为 $164.9 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. 供试青菜品种为新选上海青 (*Brassica chinensis* L.),购自河北省高碑店市科高种业有限公司. 供试氮肥为尿素、硫酸铵和硝酸钙,均为分析纯试剂.

1.2 试验设计

本研究采用温室青菜盆栽试验的方法,试验在南京信息工程大学玻璃温室进行. 共设置 8 个处理,每个处理 3 个重复,具体处理设置及添加材料见表 1. 将 1.5 kg 风干过 2 mm 筛的污染土壤、生物炭(添加量为 $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,以风干土计)及适量满足青菜生长所需的氮、磷和钾肥充分混匀后置于一个直径 16 cm 、高 12 cm 的塑料盆中,为保证施氮处理氮施用量一致,尿素、硫酸铵和硝酸钙(四水)的添加量(以风干土计)分别为 0.32 、 0.71 和 $1.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,磷酸二氢钙(一水)和硫酸钾的添加量(以风干土计)分别为 $0.24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 于 2020 年 6 月 20 日每盆播种 20 粒青菜种子,待植株生长至 4 片真叶间苗,每盆留 3 株苗,2020 年 7 月 21 日青菜成熟收获.

表 1 试验处理设计
Table 1 Experimental treatment design

处理	添加材料	处理	添加材料
CK	磷酸二氢钙 + 硫酸钾	B	生物炭 + 磷酸二氢钙 + 硫酸钾
N	尿素 + 磷酸二氢钙 + 硫酸钾	BN	生物炭 + 尿素 + 磷酸二氢钙 + 硫酸钾
L	硫酸铵 + 磷酸二氢钙 + 硫酸钾	BL	生物炭 + 硫酸铵 + 磷酸二氢钙 + 硫酸钾
X	硝酸钙 + 磷酸二氢钙 + 硫酸钾	BX	生物炭 + 硝酸钙 + 磷酸二氢钙 + 硫酸钾

1.3 样品采集与测定方法

青菜成熟后,收获地上部称鲜重以测定生物量,然后依次用自来水和去离子水清洗,滤纸吸干水分后装入信封,105℃杀青 30 min,70℃烘干至恒重.将烘干后的样品用不锈钢粉碎机磨细后密封保存,用于测定青菜 Cd 含量.青菜收获后采集部分土壤样品,风干后磨碎过 2 mm 筛,用于测定土壤 pH 值和有效态 Cd 含量.

土壤 pH 值采用电位法测定(水土比为2.5:1);土壤 Cd 全量采用 HF-HNO₃-HClO₄ 消煮,青菜 Cd 全量采用 HNO₃-H₂O₂ 消煮^[20],土壤有效态 Cd 采用 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 溶液提取^[21],消煮液和提取液中 Cd 浓度采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,每批试验均做 3 个空白和 20% 的样品重复,植物和土壤样品 Cd 含量测定过程中分别插入了生物标准物质 GBW10015(GSB-6 菠菜)和土壤标准物质 GBW07450(GSS-21)进行质量控制,两种标准物质中 Cd 的回收率分别为 92.7%~105% 和 95.1%~103%.

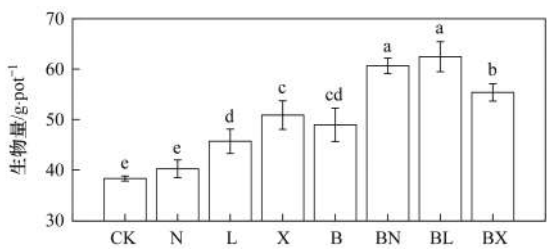
1.4 数据处理与统计分析

全文采用 Origin 9.0 软件进行试验数据的分析与制图,采用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA),各处理间的差异通过 Duncan 法进行显著性检验($P < 0.05$),相关性分析方法采用皮尔逊相关性分析.

2 结果与分析

2.1 青菜生物量

不同处理青菜生物量见图 1,从中可知,氮肥和生物炭的施用均促进了青菜的生长,增加了青菜生物量.与不施氮肥的 CK 处理相比,单施尿素、硫酸铵、硝酸钙和生物炭处理青菜生物量分别增加了 5.02%、19.3%、32.9% 和 27.8%,除单施尿素处理外,其余处理的增幅均达显著水平($P < 0.05$).与单施尿素、硫酸铵和硝酸钙处理相比,尿素、硫酸铵和硝酸钙配施生物炭处理青菜生物量分别增加了 50.8%、36.7% 和 8.84%,增幅均达显著水平($P < 0.05$).不同处理间青菜生物量的大小顺序为:BL > BN > BX > X > B > L > N > CK.



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)

图 1 不同处理青菜生物量

Fig. 1 Biomass of pakchoi during different treatments

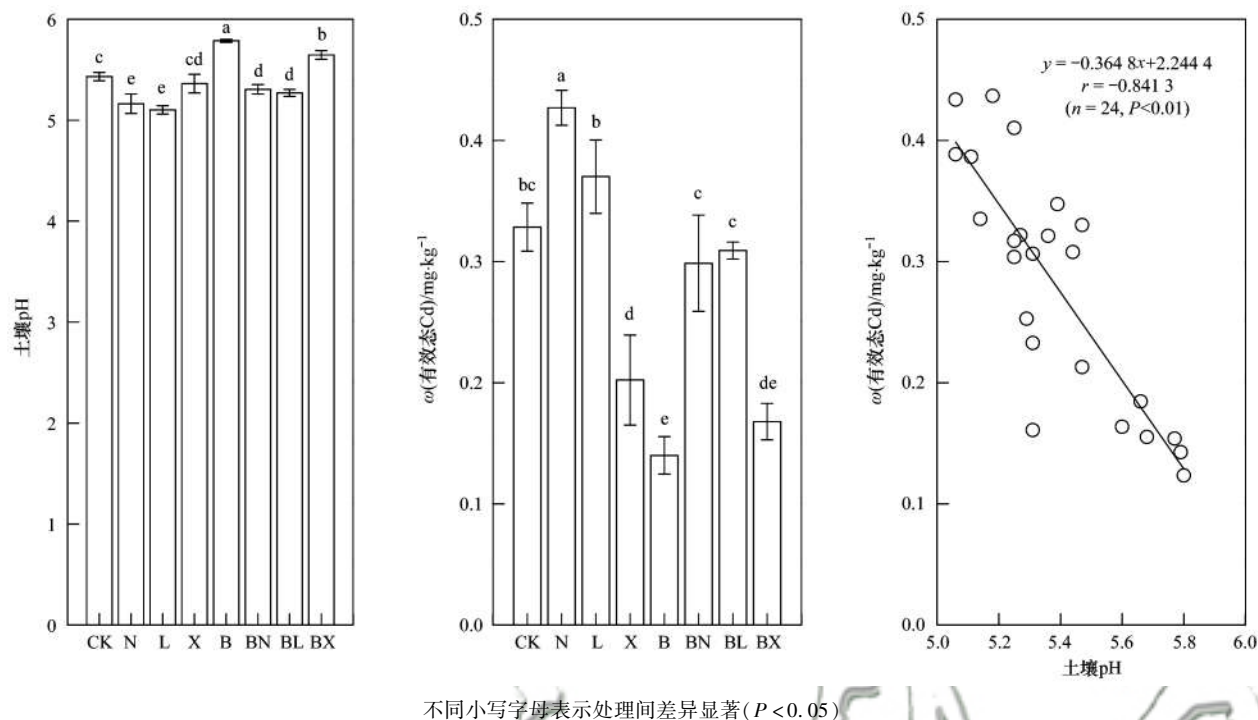
2.2 土壤 pH 值与有效态 Cd 含量

图 2 显示,不同形态氮肥和生物炭的施用对土壤 pH 值的影响有所不同.与不施氮肥的 CK 处理相比,单施硝酸钙对土壤 pH 值无明显影响($P > 0.05$);而单施尿素和硫酸铵后,土壤 pH 值分别显著下降 0.27 和 0.33 个单位($P < 0.05$).与单施氮肥处理不同的是,单施生物炭后土壤 pH 值比 CK 处理显著提高了 0.35 个单位($P < 0.05$).尿素、硫酸铵和硝酸钙配施生物炭处理土壤 pH 值分别比单施尿素、硫酸铵和硝酸钙处理提高了 0.14、0.17 和 0.28 个单位,增幅均达显著水平($P < 0.05$).不同处理间土壤 pH 值的大小顺序为:B > BX > CK > X > BN > BL > N > L.

从图 2 还可以看出,与不施氮肥的 CK 处理相比,施用尿素和硫酸铵后土壤有效态 Cd 含量分别增加了 30.0% 和 12.7%,而施用硝酸钙和生物炭后土壤有效态 Cd 含量分别显著降低了 38.4% 和 57.4% ($P < 0.05$).与单施尿素、硫酸铵和硝酸钙处理相比,尿素、硫酸铵和硝酸钙配施生物炭处理土壤有效态 Cd 含量分别降低了 30.1%、16.5% 和 17.0%,降低幅度均达显著水平($P < 0.05$).不同处理间土壤有效态 Cd 含量的大小顺序为:N > L > CK > BL > BN > X > BX > B. 相关分析结果显示,土壤 pH 值和有效态 Cd 含量呈显著负相关.

2.3 青菜 Cd 含量

不同氮肥和生物炭的施用影响了青菜对土壤 Cd 的吸收(图 3).从中可知,不施氮肥的 CK 处理青菜 $\omega(\text{Cd})$ 达 $1.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)中对叶菜蔬菜中 Cd 限量标准($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的 5.7 倍.单

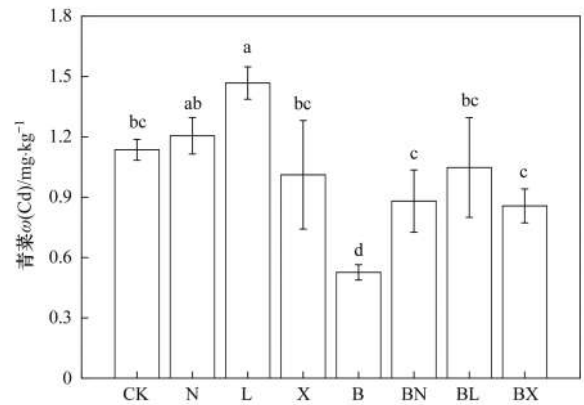


不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图2 不同处理土壤 pH 值、有效态 Cd 含量及两者间相关性

Fig. 2 Soil pH and available Cd content in soil during different treatments and their correlation

施尿素和硫酸铵后,青菜 Cd 含量分别比不施氮肥的 CK 处理增加了 6.11% 和 29.2%,而单施硝酸钙和生物炭后青菜 Cd 含量分别比 CK 处理降低了 11.0% 和 53.7%,生物炭显著抑制了青菜对土壤 Cd 的吸收 ($P < 0.05$). 与单施尿素、硫酸铵和硝酸钙处理相比,尿素、硫酸铵和硝酸钙配施生物炭处理青菜 Cd 含量分别显著降低了 26.9%、28.6% 和 15.3% ($P < 0.05$). 不同处理间青菜 Cd 含量的大小顺序为: $L > N > CK > BL > X > BN > BX > B$. 相关分析结果显示,青菜 Cd 含量与土壤 pH 值呈显著负相关,与土壤有效态 Cd 含量呈显著正相关 (图 4).



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图3 不同处理青菜 Cd 含量

Fig. 3 Content of Cd in pakchoi during different treatments

3 讨论

3.1 不同氮肥配施生物炭对青菜生长的影响

氮是植物生长必需的营养元素,土壤氮主要以有机态存在,而作物只能吸收利用无机氮. 因此,农业生产中需要施用化学氮肥以弥补土壤无机氮供应的不足. 适量施用氮肥可促进作物根系生长发育,增加根密度和长度,提高根系吸水能力,从而促进作物的生长^[22]. 本研究结果表明,3 种氮肥的施用显著促进了青菜生长,提高了青菜生物量,其中尤以硝酸钙的增产效果最好,这可能与青菜作为旱作物更喜好硝态氮肥有关. 施用生物炭的增产效果优于尿素和硫酸铵,这与生物炭对土壤物理化学性质的改善作用有关. 生物炭含丰富的碳、氮、磷和钾等营养元素,施入土壤的生物炭通过矿化作用使其中的有机态养分转变为无机态养分以供青菜吸收利用,从而促进青菜生长^[7,23]. 此外,生物炭可以改善土壤结构,增加土壤总孔隙度,提高土壤透气性,促进作物高产^[24,25]. 本研究结果还显示,氮肥配施生物炭对青菜生长的促进效果要显著优于单施氮肥. 张伟明等^[26]的研究也发现,生物炭配施化肥比单施化肥更能显著提高大豆产量. 一方面,氮肥配施生物炭比单施氮肥为青菜生长补充了更多的养分元素;另一方面,生物炭改善了土壤环境,为土壤微生物和作物提供了良好的生长与繁殖条件^[27,28],且生物炭显著降低了土壤有效态 Cd 含量 (图 2),减轻了 Cd 对青菜

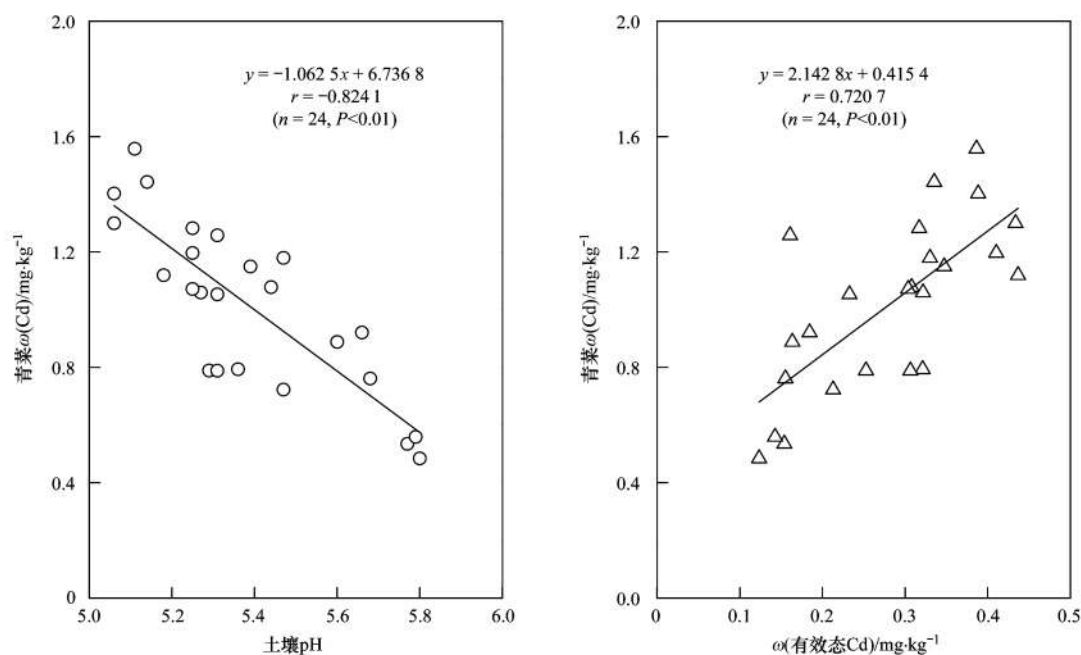


图4 青菜 Cd 含量与土壤 pH 值、有效态 Cd 含量的相关性

Fig. 4 Correlations between Cd content in pakchoi and soil pH, available Cd content in soil

根系的毒害作用. 因此, 在生物炭与氮肥的共同作用下, Cd 污染对青菜生长的毒性效应有了明显改善, 青菜生物量得以显著提高, 而青菜生物量的显著增加可能导致生长稀释效应, 进而有助于降低青菜 Cd 含量.

3.2 不同氮肥配施生物炭对青菜 Cd 吸收的影响

外源无机氮进入土壤后的形态转化过程会对土壤理化性质产生影响, 进而影响重金属在土壤中的化学行为. 本研究结果表明, 施用尿素和硫酸铵显著降低了土壤 pH 值 (图 2). 尿素进入土壤后的水解过程产生铵态氮, 铵态氮经硝化作用转化为硝态氮, 此过程同时会释放 H^+ , 进而降低土壤 pH 值^[29]. 硫酸铵是生理酸性肥料, 植物在吸收铵态氮时, 根系会分泌 H^+ 至土壤中, 从而降低土壤 pH 值^[30]. 本研究中施用硝酸钙对土壤 pH 值没有显著影响, 这可能与肥料施用量较少有关. 孙磊等^[31]的研究也发现, 施用 $0.4 g \cdot kg^{-1}$ (以风干土计) 用量的硝酸钙后, 土壤 pH 没有显著变化. Eriksson^[32]报道指出, 不同形态氮肥对土壤的酸化效应大小顺序为: 硫酸铵 > 硝酸铵 > 硝酸钙. 本研究所使用的生物炭是一种强碱性材料 (pH 值 9.75), 生物炭结构中的大量碱性基团进入土壤后可以显著提高土壤 pH 值^[33]. 此外, 生物炭也可以通过降低土壤交换性铝含量来提高土壤 pH^[34]. 强碱性物料生物炭的施用显著改善了尿素和硫酸铵两种氮肥对土壤的酸化效应, 土壤 pH 值与单施氮肥时相比有显著提升 (图 2). 因此, 对于喜爱铵态氮肥的作物而言, 农业生产过程中有必要配合施用诸如生物炭之类的碱性物料以防止长期过

量施肥而导致土壤酸化的产生.

施用氮肥和生物炭后土壤 pH 值的变化会进一步影响活性重金属离子在土壤中的沉淀/溶解、吸附/解吸和配位/解离等各种化学行为, 进而影响其生物有效性和作物吸收. 已有的研究均报道, 土壤 pH 值越高, 土壤中 Cd 的移动性和有效性越低^[35]. 本研究结果也表明, 土壤 pH 值与土壤有效态 Cd 含量呈极显著负相关 (图 2). 本研究中施用尿素和硫酸铵处理土壤有效态 Cd 含量显著高于不施氮肥的 CK 处理, 可能与尿素和硫酸铵显著降低土壤 pH 值有关. 通常酸性土壤趋于增加作物对 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Hg^{2+} 等重金属阳离子的吸收, 土壤 pH 值的下降使得土壤颗粒表面的正电荷数量增加, 因“同性相斥”原理, 限制了土壤胶体对 Cd^{2+} 的吸附^[36]; 尿素和硫酸铵带入的 NH_4^+ 与 Cd^{2+} 产生交换性吸附, 或是与 Cd^{2+} 形成络合物, 从而减少土壤对 Cd^{2+} 的吸附^[37], 最终提高土壤 Cd 的生物有效性. 而尿素和硫酸铵配施生物炭后, 土壤 pH 值相比单施氮肥条件下有显著提高, 生物炭的介入减缓了尿素和硫酸铵对土壤的酸化效应及由此引发的 Cd 活化效应, 降低了土壤有效态 Cd 含量 (图 2), 进而抑制青菜对土壤 Cd 的吸收, 两者间呈极显著正相关 (图 4). 本研究所有处理中, 单施生物炭处理土壤有效态 Cd 含量和青菜 Cd 含量均为最低, 部分原因与此处理土壤具有最高的 pH 值有关. 通常土壤胶体表面负电荷数随土壤 pH 值的升高而增加, 土壤对活性 Cd^{2+} 的电性吸附也随之增强^[38], Cd^{2+} 与土壤有机、无机胶体结合得更牢固, 更难被解吸进入土壤溶液. 因

此,高 pH 值显著抑制了青菜对活性 Cd^{2+} 的吸收. 相关分析结果也表明,土壤 pH 值与青菜 Cd 含量呈极显著负相关(图 4). 此外,生物炭在制备过程中形成的芳环结构可以为 Cd^{2+} 吸附提供孤对电子和 π 电子,使 Cd^{2+} 易于被生物炭吸附^[39],进而降低其生物有效性.

本研究中,施用硝酸钙后土壤 pH 值没有明显变化,但土壤有效态 Cd 含量显著降低,青菜 Cd 含量也有一定幅度的下降,说明硝酸钙对土壤重金属的解毒作用不是通过影响土壤 pH 值来实现,而可能与土壤中 Cd 存在形态的变化有关. 前人研究发现,施用硝酸钙显著降低了污染土壤中盐提取态和水溶态这两种易被作物吸收利用的 Cd 形态含量,降低了土壤 Cd 的生物有效性;而尿素和硫酸铵显著增加了这两种 Cd 形态含量,增加了土壤 Cd 的生物有效性^[31],这与本研究中硝酸钙处理青菜 Cd 含量低于尿素和硫酸铵处理的结果一致. 生物炭对土壤 Cd 生物有效性的影响除了提高土壤 pH 增加 Cd 吸附这一原因外,也和土壤 Cd 形态转变有关. 前人研究表明,生物炭可以促进土壤中高有效性的交换态 Cd 向活性较弱的铁锰氧化物结合态 Cd、有机结合态 Cd 和残渣态 Cd 转化,且转化效率与生物炭的添加量呈正相关^[40,41]. 一方面,生物炭结构表面富含的羧基、羟基、酚类和氨基等官能团可与土壤中的 Cd^{2+} 发生络合反应或螯合反应,形成更稳定的表面络合物或配合物^[42,43],降低土壤 Cd 有效性. 另一方面,施用生物炭可以增加土壤有机碳含量并将可溶性有机碳转化为稳定态有机组分,进而促进水溶态 Cd 和交换态 Cd 向残渣态 Cd 转变^[44]. 本研究结果还表明,尿素、硫酸铵和硝酸铵与生物炭配施对土壤 Cd 的钝化效果弱于单施生物炭(图 3),一方面是因为尿素和硫酸铵对土壤的酸化效应;另一方面,施入土壤的硝酸钙解离产生的 Ca^{2+} 与土壤中的 Cd^{2+} 的竞争关系降低了土壤对 Cd^{2+} 的吸附^[45],一定程度上增加了土壤 Cd 有效性,正是这两个原因弱化了生物炭对土壤 Cd 有效性的钝化效果. 值得注意的是,不同氮肥配施生物炭除了通过影响土壤 pH 值和 Cd 存在形态而影响青菜 Cd 吸收,还可能影响 Cd 在青菜不同部位间的转运,进而导致不同氮肥处理青菜 Cd 含量的显著差异. 潘维等^[46]的研究发现,铵态氮和酰胺态氮可促进 Cd 由小白菜根系向茎的转运,而硝态氮则能促进 Cd 由小白菜茎向叶的转运. 本文中,施用硝酸钙处理虽然显著降低了土壤有效态 Cd 含量(图 2),但其青菜 Cd 含量与 CK 处理间的差异未达显著水平(图 3),这可能与硝态氮促进 Cd 由青菜茎向叶的转运有关,相关机制

还有待于进一步深入研究.

综上所述,氮肥施用影响了 Cd 在土壤中的化学行为及其生物有效性,配施生物炭能够调节氮肥对土壤中 Cd 有效性的影响. 在改良修复重金属污染土壤过程中,为实现修复和生产双赢的目标,一要根据土壤性质和作物类型选择合适的氮肥类型,对于水稻等喜爱铵态氮肥的作物而言,可考虑适量施用硝态氮肥;二要掌握适量原则,防止氮肥过量施用带来土壤酸化问题,进而影响修复效果. 针对轻中度重金属污染土壤的改良修复,可探索氮肥与生物炭配合施用,充分提高氮肥利用率,使经济效益和环境效益最大化,达到经济高效修复重金属污染土壤的目的.

4 结论

施用氮肥和生物炭促进了青菜生长,氮肥配施生物炭对青菜的增产效应比单施氮肥时更明显. 单施尿素和硫酸铵显著降低了土壤 pH 值,增加了土壤有效态 Cd 含量,促进了青菜对土壤 Cd 的吸收. 尿素和硫酸铵配施生物炭减缓了这 2 种氮肥对土壤的酸化效应及由此引发的 Cd 活化效应,降低了土壤有效态 Cd 含量和青菜对土壤 Cd 的吸收. 硝酸钙比尿素和硫酸铵更有利于维持土壤 pH 值和低 Cd 有效性,配施生物炭进一步加强了硝酸钙对土壤 Cd 活性的钝化效果. 因此,实际种植叶菜类蔬菜时需加强氮肥管理,建议在 Cd 污染土壤上优先选用硝态氮肥,并配合施用适量生物炭或其它有机肥,以达到修复和生产双赢目标. 值得注意的是,本研究只进行了一季盆栽试验,今后应开展多年大田试验以进一步明确氮肥和生物炭影响污染土壤重金属活性和作物吸收重金属的长效性及机制.

参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [EB/OL]. http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm, 2022-09-15.
- [2] 黄占斌,赵鹏,王颖南,等. 土壤重金属固化稳定化材料研发及其应用基础研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 435-445.
Huang Z B, Zhao P, Wang Y N, et al. Progress in basic research & development and its application on solidification and stabilization materials of heavy metals in soil [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(3): 435-445.
- [3] 张静静,朱爽阁,朱利楠,等. 不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(1): 460-468.
Zhang J J, Zhu S G, Zhu L N, et al. Effects of different amendments on fractions and uptake by winter wheat in slightly alkaline soil contaminated by cadmium and nickel [J]. Environmental Science, 2020, 41(1): 460-468.

- [4] 常春英, 曹浩轩, 陶亮, 等. 固化/稳定化修复后土壤重金属稳定性及再活化研究进展[J]. 土壤, 2021, **53**(4): 682-691.
Chang C Y, Cao H X, Tao L, *et al.* Advances on heavy metal stability and reactivation for soil after solidification/stabilization remediation[J]. Soils, 2021, **53**(4): 682-691.
- [5] Smolders E, Wagner S, Prohaska T, *et al.* Sub-millimeter distribution of labile trace element fluxes in the rhizosphere explains differential effects of soil liming on cadmium and zinc uptake in maize[J]. Science of the Total Environment, 2020, **738**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140311.
- [6] 段建军, 郭琴波, 徐彬, 等. 氮肥减量施生物炭对水稻产量和养分利用的影响[J]. 水土保持学报, 2022, **36**(6): 1-11.
Duan J J, Guo Q B, Xu B, *et al.* Effects of biochar application with reduced nitrogen fertilizer on rice yield and nutrient utilization[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, **36**(6): 1-11.
- [7] 汪勇, 吕茹洁, 黎星, 等. 生物炭对双季稻生长与土壤理化性质的影响及其后效[J]. 中国土壤与肥料, 2021, (4): 96-103.
Wang Y, Lü R J, Li X, *et al.* Effects of biochar on double-season rice growth and soil physical and chemical properties and its aftereffects[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021, (4): 96-103.
- [8] 许妍哲, 方战强. 生物炭修复土壤重金属的研究进展[J]. 环境工程, 2015, **33**(2): 156-159, 172.
Xu Y Z, Fang Z Q. Advances on remediation of heavy metal in the soil by biochar[J]. Environmental Engineering, 2015, **33**(2): 156-159, 172.
- [9] Zhang C, Shan B Q, Zhu Y Y, *et al.* Remediation effectiveness of *Phyllostachys pubescens* biochar in reducing the bioavailability and bioaccumulation of metals in sediments[J]. Environmental Pollution, 2018, **242**: 1768-1776.
- [10] Zhang M, Shan S D, Chen Y G, *et al.* Biochar reduces cadmium accumulation in rice grains in a tungsten mining area-field experiment; Effects of biochar type and dosage, rice variety, and pollution level[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2019, **41**(1): 43-52.
- [11] Bashir S, Zhu J, Fu Q L, *et al.* Comparing the adsorption mechanism of Cd by rice straw pristine and KOH-modified biochar[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(12): 11875-11883.
- [12] Zhang Y C, Chen T T, Liao Y K, *et al.* Modest amendment of sewage sludge biochar to reduce the accumulation of cadmium into rice (*Oryza sativa* L.): a field study[J]. Environmental Pollution, 2016, **216**: 819-825.
- [13] 王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 等. 改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4441-4451.
Wang X Y, Meng H B, Shen Y J, *et al.* Characteristics of modified biochars and their immobilization effect on Cu and Cd in polluted farmland soil around smelter [J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4441-4451.
- [14] 王俊楠, 程珊珊, 展文豪, 等. 磁性生物炭的合成及对土壤重金属污染的钝化效果[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2381-2389.
Wang J N, Cheng S S, Zhan W H, *et al.* Synthesis of magnetic biochar and its application in the remediation of heavy-metal-contaminated soils[J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2381-2389.
- [15] 王腾飞, 谭长银, 曹雪莹, 等. 长期施肥对土壤重金属积累和有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(2): 257-263.
Wang T F, Tan C Y, Cao X Y, *et al.* Effects of long-term fertilization on the accumulation and availability of heavy metals in soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(2): 257-263.
- [16] 孙磊, 郝秀珍, 范晓晖, 等. 不同氮肥处理对污染红壤中铜有效性的影响[J]. 土壤学报, 2009, **46**(6): 1033-1039.
Sun L, Hao X Z, Fan X H, *et al.* Effects of different nitrogen fertilizers on soil copper bioavailability in a contaminated red soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, **46**(6): 1033-1039.
- [17] Willaert G, Verloo M. Effects of various nitrogen fertilizers on the chemical and biological activity of major and trace elements in a cadmium contaminated soil[J]. Pedologie, 1992, **43**: 83-91.
- [18] 杜萌, 李丹丹, 杨军, 等. 不同氮肥类型及配施壳聚糖对八宝景天修复镉污染土壤的强化效果[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, **26**(9): 1714-1723.
Du M, Li D D, Yang J, *et al.* Study on different nitrogen forms and combined application of chitosan for enhancing phytoremediation of Cd-contaminated soil by *Hylotelephium spectabile*[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, **26**(9): 1714-1723.
- [19] 张玉盛, 周亮, 肖欢, 等. 氮肥对双季稻根表铁膜形成及双季稻镉积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, **40**(2): 260-268.
Zhang Y S, Zhou L, Xiao H, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer on iron plaque formation on the root surface of double cropping rice and cadmium accumulation in double-season rice [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, **40**(2): 260-268.
- [20] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] Spark D L, Page A L, Helmke P A, *et al.* Methods of soil analysis: part 3 chemical methods, 5.3 [M]. Madison: Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc., 1996.
- [22] 戴含, 王小卉, 邓莹萍, 等. 不同氮浓度对水稻分蘖期根系形态特征的影响[J]. 杂交水稻, 2022, **37**(1): 111-115.
Dai H, Wang X H, Deng Y P, *et al.* Effects of nitrogen concentration on root morphological characteristics in tillering stage of rice[J]. Hybrid Rice, 2022, **37**(1): 111-115.
- [23] Khadem A, Raiesi F, Besharati H, *et al.* The effects of biochar on soil nutrients status, microbial activity and carbon sequestration potential in two calcareous soils [J]. Biochar, 2021, **3**(1): 105-116.
- [24] Singh H, Northup B K, Rice C W, *et al.* Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis[J]. Biochar, 2022, **4**(1), doi: 10.1007/S42773-022-00138-1.
- [25] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, **46**(16): 3324-3333.
Chen W F, Zhang W M, Meng J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, **46**(16): 3324-3333.
- [26] 张伟明, 管学超, 黄玉威, 等. 生物炭与化学肥料互作的大豆生物学效应[J]. 作物学报, 2015, **41**(1): 109-122.
Zhang W M, Guan X C, Huang Y W, *et al.* Biological effects of biochar and fertilizer interaction in soybean plant [J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, **41**(1): 109-122.
- [27] Abel S, Peters A, Trinks S, *et al.* Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of

- sandy soil[J]. *Geoderma*, 2013, **202-203**: 183-191.
- [28] Oladele S, Adeyemo A, Adegaie A, *et al.* Effects of biochar amendment and nitrogen fertilization on soil microbial biomass pools in an Alfisol under rain-fed rice cultivation[J]. *Biochar*, 2019, **1**(2): 163-176.
- [29] Steiner C, Glaser B, Teixeira W G, *et al.* Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, **171**(6): 893-899.
- [30] Wallace A. Relationships among nitrogen, silicon, and heavy metal uptake by plants[J]. *Soil Science*, 1989, **147**(6): 457-460.
- [31] 孙磊, 郝秀珍, 周东美, 等. 不同氮肥对污染土壤玉米生长和重金属 Cu、Cd 吸收的影响[J]. *玉米科学*, 2014, **22**(3): 137-141, 147.
- Sun L, Hao X Z, Zhou D M, *et al.* Effects of different nitrogen fertilizers on growth and heavy metals uptake by corn grown in contaminated soil[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2014, **22**(3): 137-141, 147.
- [32] Eriksson J E. Effects of nitrogen-containing fertilizers on solubility and plant uptake of cadmium[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1990, **49**(3): 355-368.
- [33] Cayuela M L, Sánchez-Monedero M A, Roig A, *et al.* Biochar and denitrification in soils: when, how much and why does biochar reduce N₂O emissions? [J]. *Scientific Reports*, 2013, **3**(1), doi: 10.1038/srep01732.
- [34] Syuhada A B, Shamshuddin J, Fauziah C I, *et al.* Biochar as soil amendment: impact on chemical properties and corn nutrient uptake in a Podzol[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2016, **96**(4): 400-412.
- [35] Palansooriya K N, Shaheen S M, Chen S S, *et al.* Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: a critical review [J]. *Environment International*, 2020, **134**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105046.
- [36] 罗文贱, 张政勤, 陈勇, 等. 连续解吸中离子强度对可变电荷土壤和高岭石体系 pH 的影响[J]. *土壤学报*, 2016, **53**(1): 146-154.
- Luo W J, Zhang Z Q, Chen Y, *et al.* Effect of ionic-strength change on the system pH of variable charge soils and kaolinite during successive desorption[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, **53**(1): 146-154.
- [37] McBride M B. *Environmental chemistry of soils*[M]. New York: Oxford University Press, 1994.
- [38] Li P, Lang M, Wang X X, *et al.* Sorption and desorption of copper and cadmium in a contaminated soil affected by soil amendments[J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2016, **44**(11): 1547-1556.
- [39] Chen Q, Zheng J W, Zheng L C, *et al.* Classical theory and electron-scale view of exceptional Cd (II) adsorption onto mesoporous cellulose biochar *via* experimental analysis coupled with DFT calculations[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **350**: 1000-1009.
- [40] Liu C J, Lin H, Li B, *et al.* Endophyte inoculation redistributed bioavailable Cd and nutrient in soil aggregates and enhanced Cd accumulation in *Phytolacca acinosa* [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **416**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125952.
- [41] Feng S S, Zhang P, Hu Y M, *et al.* Combined application of biochar and nano-zeolite enhanced cadmium immobilization and promote the growth of Pak Choi in cadmium contaminated soil [J]. *NanoImpact*, 2022, **28**, doi: 10.1016/j.impact.2022.100421.
- [42] Mohamed I, Zhang G S, Li Z G, *et al.* Ecological restoration of an acidic Cd contaminated soil using bamboo biochar application [J]. *Ecological Engineering*, 2015, **84**: 67-76.
- [43] Zhou C L, Song X, Wang Y W, *et al.* The sorption and short-term immobilization of lead and cadmium by nano-hydroxyapatite/biochar in aqueous solution and soil[J]. *Chemosphere*, 2022, **286**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131810.
- [44] Lei S C, Shi Y, Xue C, *et al.* Hybrid ash/biochar biocomposites as soil amendments for the alleviation of cadmium accumulation by *Oryza sativa* L. in a contaminated paddy field [J]. *Chemosphere*, 2020, **239**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124805.
- [45] Christensen T H. Cadmium soil sorption at low concentrations: I. Effect of time, cadmium load, pH, and calcium [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1984, **21**(1): 105-114.
- [46] 潘维, 徐茜茹, 卢琪, 等. 不同氮形态对镉胁迫下小白菜生长及镉含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, **23**(4): 973-982.
- Pan W, Xu Q R, Lu Q, *et al.* Effects of nitrogen forms on the growth and Cd concentration of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) under Cd stress[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, **23**(4): 973-982.

CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM _{2.5} -O ₃ Pollution in Tianjin from 2013 to 2020	XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (4211)
Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020	SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, <i>et al.</i> (4220)
Analysis of O ₃ Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing	ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, <i>et al.</i> (4231)
Characteristics and Driving Factors of O ₃ Pollution During 13 th Five-Year Period in Tianjin	LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (4241)
Response of PM _{2.5} and O ₃ to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm	SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, <i>et al.</i> (4250)
Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China	WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment	ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, <i>et al.</i> (4271)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020	GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (4279)
Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River	KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, <i>et al.</i> (4292)
Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing	XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (4304)
Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City	HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, <i>et al.</i> (4314)
Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin	BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (4325)
Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems	DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, <i>et al.</i> (4334)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments	CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)
Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter ...	ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, <i>et al.</i> (4353)
Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants	LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4364)
Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters	HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, <i>et al.</i> (4374)
Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan	WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, <i>et al.</i> (4387)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, <i>et al.</i> (4397)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (4406)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area	YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (4416)
Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China	WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4429)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure	DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, <i>et al.</i> (4440)
Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area	JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, <i>et al.</i> (4448)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth	MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (4458)
Application of Fe ₃ O ₄ /Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content	RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, <i>et al.</i> (4468)
Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil	ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, <i>et al.</i> (4479)
Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.) in Cadmium Contaminated Soil	LI Ping, NIE Hao, LANG Man, <i>et al.</i> (4489)
Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils	HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, <i>et al.</i> (4497)
Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil ...	RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, <i>et al.</i> (4507)
Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil	LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, <i>et al.</i> (4519)
Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil	YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (4530)
Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland	LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, <i>et al.</i> (4541)
Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars	ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (4554)
Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil	XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (4565)
Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River	LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, <i>et al.</i> (4575)
Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (4585)
Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism	YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, <i>et al.</i> (4599)
Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvio-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China	LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, <i>et al.</i> (4611)
Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak	MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, <i>et al.</i> (4623)
Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost	ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, <i>et al.</i> (4637)
Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures	LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, <i>et al.</i> (4647)
Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China	CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, <i>et al.</i> (4655)
Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weiwei Dry Plateau Region of Shaanxi	GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, <i>et al.</i> (4666)
Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China	LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, <i>et al.</i> (4679)
Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration	WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, <i>et al.</i> (4689)
Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland	QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, <i>et al.</i> (4698)
Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level	SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, <i>et al.</i> (4706)
Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants	HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, <i>et al.</i> (4717)
Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment	ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, <i>et al.</i> (4728)
Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions	ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-ying, <i>et al.</i> (4742)
Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review	WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, <i>et al.</i> (4751)
Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology	AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4764)