

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期
Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力	李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培 (5563)
汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策	王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平 (5574)
西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单	高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益 (5585)
新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析	陈军辉, 冯小琼, 李媛, 王书肖 (5594)
基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM _{2.5} 浓度估算	吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖迪 (5602)
《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思 (5616)
洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析	孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹 (5624)
北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素	曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭 (5633)
天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析	王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (5644)
沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性	杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜 (5656)
典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析	葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正 (5663)
南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估	张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟 (5673)
基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征: 以郑州市高新区为例	任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄 (5687)
我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响	高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小栓 (5698)
VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析	王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿 (5713)
山东省 O ₃ 时空分布及影响因素分析	张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨 (5723)
2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性	钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政 (5736)
基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建	郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇 (5747)
三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析	张凯, 吴凤平, 成长春 (5757)
长江流域总氮排放量预测	丁肇慰, 郑华 (5768)
1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征	姚梦雅, 胡敏鹏, 陈丁江 (5777)
黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布	韩谔, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明 (5786)
基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源	邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅 (5796)
水源水库真核微生物种群结构季相演替特征	张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容 (5804)
达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异	李文宝, 郭鑫, 张博尧, 杜蕾, 田雅楠 (5814)
尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制	王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞 (5826)
武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估	张坤峰, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军 (5836)
上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系	徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮 (5848)
曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素	李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇 (5857)
水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除	赵伟, 范增增, 杨新萍 (5865)
木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响	孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报 (5876)
黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮	魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英 (5884)
玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响	南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒 (5896)
饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径	周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (5905)
污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势	曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高 (5912)
阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应	高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕 (5921)
典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	李强, 曹莹, 何连生, 王耀锋, 龚成, 何书涵 (5930)
我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价	王耀锋, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健 (5938)
浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险	王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜雯雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军 (5949)
北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探	管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华 (5958)
典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价	强瑞, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫 (5967)
雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应	周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌 (5977)
铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划	朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波 (5988)
干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响	黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧 (5997)
铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除	王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郇建建, 叶新新 (6006)
稻田灌溉河流 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及影响因素	吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文 (6014)
节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房 (6025)
有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N ₂ O 的排放特征及微生物特性	王楷, 史雷, 马龙, 王书婷, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年 (6038)
不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响	孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖 (6047)
氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响	杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧 (6058)
化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响	向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明 (6067)
浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量	王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛 (6078)
《环境科学》第42卷(2021年)总目录	(6091)
《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)	

浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油葵产量

王正^{1,2}, 孙兆军^{1,3*}, Sameh El-Sawy⁴, 王珍³, 何俊³, 韩磊³, 邹本涛⁵

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学新华学院, 银川 750021; 3. 宁夏大学环境工程研究院, 银川 750021; 4. 埃及国家研究中心, 开罗 11435; 5. 烟台大学机电汽车工程学院, 烟台 264005)

摘要: 为探究浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高作物产量,以龟裂碱土为例,通过田间试验研究不同生物炭施加量(0、1%、2%和4%)与不同木醋液稀释倍数(0、2%)复配对土壤pH、碱化度、全盐、容重、速效磷、有机质、盐分离子、油葵生长和产量的影响,不施加生物炭和木醋液视为对照(CK)。结果表明,2%浒苔生物炭+2%木醋液(V2BC2)改良龟裂碱土的综合效果最佳;在最佳处理条件下:①浒苔生物炭与木醋液复配能改善土壤理化性质,具体表现为作物生长期土壤平均pH、碱化度和全盐含量显著降低,较CK分别降低12.14%、40.63%和42.75%,土壤容重显著减小,较CK减小20.78%;②浒苔生物炭与木醋液复配能显著降低土壤Na⁺、Cl⁻和SO₄²⁻含量,较CK分别降低47.17%、45.32%和33.33%,提高土壤K⁺和Ca²⁺含量,其他离子含量的差异不显著;③浒苔生物炭与木醋液复配显著提高土壤养分含量及有效性,增强土壤酶活性,与CK相比,速效磷提高2.88倍,有机质提高58.76%,土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性分别提高0.92、1.02和2.29倍;④油葵产量在V2BC2处理时最高,为3546.7 kg·hm⁻²,较CK增产2325.3 kg·hm⁻²。因此,浒苔生物炭与木醋液复配能进一步提高盐碱土改良效果及作物产量。

关键词: 浒苔生物炭; 木醋液; 碱化土壤改良; 土壤盐分; 土壤酶; 作物产量

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-6078-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202103068

Effects of *Enteromorpha prolifera* Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower

WANG Zheng^{1,2}, SUN Zhao-jun^{1,3*}, Sameh El-Sawy⁴, WANG Zhen³, HE Jun³, HAN Lei³, ZOU Ben-tao⁵

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Xinhua College, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Institute of Environmental Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 4. National Research Centre of Egypt, Cairo 11435, Egypt; 5. School of Electromechanical and Automotive Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: The purpose of this study was to reveal the effects of *Enteromorpha prolifera* biochar combined with wood vinegar on takyric solonetz improvement and crop yield. Different biochar amounts [0%, 1%, 2%, and 4% (ω)] were studied on the basis of 0% and 2% (φ) wood vinegar, wherein no biochar or wood vinegar was applied in the control (CK). Soil pH, alkalinity, exchange sodium percentage (ESP), salinity, bulk density, Olsen-P, organic matter, soil salt concentration, and yield of oil sunflower were analyzed. The results showed that first, the comprehensive effects of 2% wood vinegar and 2% biochar co-application (V2BC2) were greatest; in comparison to that in the CK, the soil pH, ESP, salinity, and bulk density significantly decreased by 12.14%, 40.63%, 42.75%, and 20.78%, respectively. Second, the content of Na⁺, Cl⁻, and SO₄²⁻ significantly decreased by 47.17%, 45.32%, and 33.33%, respectively, compared with those in the CK. In the soil layer of 0-40 cm under the treatment of biochar combined with wood vinegar, however, K⁺ and Ca²⁺ content increased. In addition, there was little variation in the remaining ions compared with those in the CK. Third, *Enteromorpha prolifera* biochar and wood vinegar co-application significantly increased the soil nutrient content and availability and enhanced microbial activity. Compared to that under the CK, Olsen-P and organic matter increased by 2.88 times and 58.76%, respectively, and the activity of urease, alkaline phosphatase, and invertase increased by 0.92 times, 1.02 times, and 2.29 times, respectively. Finally, the highest crop yield was 3546.7 kg·hm⁻² under the V2BC2 treatment, which was 2325.3 kg·hm⁻² more than that under the CK. Therefore, *Enteromorpha prolifera* biochar and wood vinegar co-application can further strengthen the improvement of takyric solonetz and crop yield.

Key words: *Enteromorpha prolifera* biochar; wood vinegar; takyric solonetz improvement; soil salinity; soil enzymes; crop yield

在漠土地区,由于地面经历间歇性积水和失水过程使土壤脱盐碱化而形成碱化土壤^[1~3],以龟裂碱土(因其呈灰白多角形龟裂状而得名,又称白僵土,takyric solonetz)为典型代表。据统计^[4~6],龟裂碱土主要分布于黄河中上游宁夏贺兰山东麓冲积扇边缘地带、甘肃河西走廊、内蒙古河套平原及新疆北疆草原、漠境地带等,其中,宁夏境内龟裂碱土分布面积约为13万hm²^[1],多为低产田或撂荒地。虽然龟裂碱土分布面积广、开发潜力巨大^[2],但该

土壤土质黏重、土性板结僵硬、土壤胶体高度分散、透水性差、肥力低及作物生长困难^[1,7,8],且改良周期长、难度大,严重限制了宁夏地区盐碱土壤的生产力。近年来,生物炭作为新型环境功能材料

收稿日期: 2021-03-09; 修订日期: 2021-05-17

基金项目: 宁夏重点研发计划项目(2018BFG02016, 2019BFG02032, 2018BEB04010); 国家自然科学基金项目(31660133, 31460220); 国家重点研发计划项目(2019YFC1904303)

作者简介: 王正(1988~),男,博士研究生,讲师,主要研究方向为土壤修复与污染治理, E-mail: wangzhshxc@163.com

* 通信作者, E-mail: sunzhaojunyx@126.com

受到广泛关注^[9~12],并在改善逆境土壤取得了良好效果^[13~16].

有研究利用不同用量和不同生产条件(原料和热解温度)的生物炭改良盐碱土壤,并对土壤 pH 和盐度等变化特征及差异进行分析,但结果有所不同^[17,18].有研究表明,将热解温度为 400℃ 的浒苔生物炭施加到滨海盐碱土中,盐度增加 0.12%~3.10%,土壤 pH 提高 1.49%~5.10%^[8].代红翠等^[19]研究碱性砂质土壤在田间持水量为 50%~70% 条件下,施加 5.4% 小麦秸秆生物炭的土壤 pH 较 CK(未施加生物炭)提高 0.2 个单位.夏阳^[20]的研究发现,施加较低用量的生物炭时(1.5%),土壤 pH 和盐度明显降低,而土壤有机质、CEC 和养分含量则明显提高. Song 等^[21]的研究发现,在碱性土壤中施加 10% 的高温生物炭(650℃),土壤 pH 显著增加.也有报道指出^[22],在沿海盐碱土壤中施加低温生物炭(热解温度为 300℃),土壤 pH 显著降低.此外,将较低用量(<5%)的生物炭施入土壤后,可有效减小土壤容重^[23],增加土壤孔隙度和持水能力,提高土壤对养分(氮、磷等)的吸持容量和有效性^[24~26],改善土壤团聚体结构和微生物环境等^[27,28],明显抑制土壤蒸发和返盐现象,但高施入量(>10%)反而加剧土壤蒸发和返盐^[23].综上所述,热解温度和施加量是影响生物炭理化性质、土壤改良效果和成本的最关键因素^[8].

受全球气候变化和水质富营养化等因素影响,海藻浒苔绿潮频发,严重破坏海洋生态,虽然浒苔可加工成菜品或动物饲料,但仍无法达到治理目的,亟需资源化利用^[8,16].已有研究表明,将浒苔制成生物炭并进行资源化利用是完全可行的,相较于其他类型生物炭(如秸秆生物炭),浒苔生物炭的产率和灰分含量更高、比表面积更大^[12],但浒苔生物炭对龟裂碱土的改良效果和最适施加量仍不明确.基于此,明确浒苔生物炭是否会加重土壤盐碱化程度、保障改良效果是将其应用到盐碱土改良的重要前提.另外,在土壤中施加生物炭并不总能产生积极效应,这往往与土壤、植物和生物炭的类型或它们之间的相互作用等有关^[25].鉴于大多数生物炭呈强碱性(如大型藻类生物炭的 pH 约为 7.6~13.7^[29]),施入土壤会提高 pH,这对盐碱地的改良(尤其是碱化土壤)是极为不利的^[8].因此,研究如何合理规避这一缺陷就成为一个重要课题.

木醋液^[30]是生物质热解制炭过程中的酸性副产物(烟气自然冷凝后的液体),主要成分为羧酸类、酚羟基类、醛类和酮类等化合物, pH 为 2.0~4.0,被广泛应用于土壤改良^[31]、提高作物产量^[32]

和水污染处理^[33]等领域,具有极高的市场应用价值.考虑将一定量的木醋液与浒苔生物炭复配使用,可弥补单独施加生物炭对土壤产生的副作用和不利影响,同时实现二者的资源化利用.但目前关于浒苔生物炭与木醋液复配改良龟裂碱土的报道还不多见.

本研究通过田间定位试验,分析不同施加量的浒苔生物炭与木醋液复配对龟裂碱土的 pH、碱化度、含盐量、酶活性和油葵产量的影响,探索浒苔生物炭与木醋液复配对龟裂碱土的改良效果及途径,明确浒苔生物炭和木醋液复配改良龟裂碱土的最适施加量,以期对浒苔和木醋液资源化利用提供技术支撑,对改良宁夏银北地区盐碱土提供一定参考.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于宁夏平罗县某农场内的盐碱荒地(106°53'E, 38°51'N),该地区属典型干旱气候区,干旱少雨,年均降雨量为 173.2 mm(全年降水主要集中在 6~10 月,图 1),昼夜温差大,年平均气温为 9.9~16.2℃,日照时间长、蒸发大,年平均蒸发量为 1755 mm,年平均无霜期为 171 d,年平均地下水埋深 1.5 m.试验区土壤剖面(0~75 cm)呈层状分布,0~23 cm 为黏壤土,23~55 cm 为砂质黏土,55~75 cm 为黏土,土壤质地为黏壤土(0~40 cm 土层土壤黏粒 16.7%,粉粒 38.2%,砂粒 45.1%),试验区农田(0~40 cm 土层)土壤 pH、碱化度和容重较高,养分贫瘠,土壤中阳离子以 Na⁺ 为主,阴离子以 Cl⁻ 为主,基本理化性质如表 1 所示.采用黄河水地面灌溉,其平均矿化度小于 0.5 g·L⁻¹,满足农业灌水要求,对试验无不利影响.

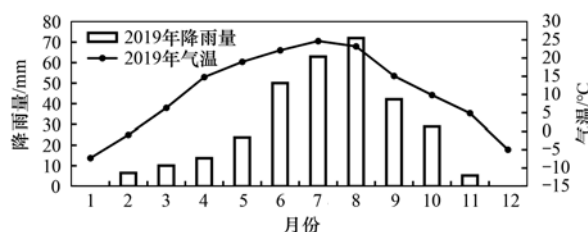


图 1 试验区降雨量和气温

Fig. 1 Rainfall and air temperature in the study site during the experimental period

1.2 试验材料

浒苔生物炭:原材料为浒苔(又名苔条或苔菜, *Enteromorpha prolifera*),绿色粉末,绿藻门石莼科浒苔属,无结块,无杂质,购自宁夏香草生物技术有限公司,水分低于 6%,制备生物炭前将浒苔粉用蒸馏水进行多次冲洗,烘箱烘干并过筛封存备用(烘干

表 1 试验田土壤基本理化性质

Table 1 Basic properties of the tested soils

项目	参数	项目	参数
pH	9.54 ± 0.58	全氮/g·kg ⁻¹	104.88 ± 3.27
全盐/g·kg ⁻¹	4.71 ± 0.95	Na ⁺ /g·kg ⁻¹	2.07 ± 0.29
碱化度/%	27.58 ± 0.55	K ⁺ /g·kg ⁻¹	0.02 ± 0.002
容重/g·cm ⁻³	1.58 ± 0.08	Ca ²⁺ /g·kg ⁻¹	0.15 ± 0.03
有机质/g·kg ⁻¹	9.85 ± 0.51	Mg ²⁺ /g·kg ⁻¹	0.06 ± 0.01
田间持水量/%	36.79 ± 1.76	Cl ⁻ /g·kg ⁻¹	3.57 ± 0.75
电导率/mS·cm ⁻¹	1.92 ± 0.03	SO ₄ ²⁻ /g·kg ⁻¹	0.74 ± 0.06
速效磷/mg·kg ⁻¹	15.45 ± 2.66	CO ₃ ²⁻ /g·kg ⁻¹	0.14 ± 0.02
速效钾/mg·kg ⁻¹	115.61 ± 5.48	HCO ₃ ⁻ /g·kg ⁻¹	0.51 ± 0.10

温度为 65℃,烘干时间为 48 h,过 0.15 mm 筛). 根据 Xiao 等^[34]的研究结果,采用限氧控温炭化法制取浒苔生物炭,设定热解温度为 400℃^[8]. 具体实施为:将

表 2 浒苔生物炭基本性质

Table 2 Basic properties of *Enteromorpha prolifera* biochar

材料	产率/%	灰分/%	CEC /cmol·kg ⁻¹	pH	比表面积 /m ² ·g ⁻¹	总孔容 /cm ³ ·g ⁻¹	元素组成/%	
							C	N
浒苔生物炭	48.28	45.29 ± 0.46	12.65 ± 0.28	8.93 ± 0.17	158.63 ± 6.22	0.006 2 ± 0.000 2	58.93 ± 0.92	2.26 ± 0.19

木醋液:纯苹果木真空干馏萃取制得(炭化温度为 550℃),黄褐色液体,密度为 1.02 g·cm⁻³, pH 为 2.73,有机酸为 41.26%,酮类为 17.28%,苯酚及衍生物为 35.22%, ω (钙)为 2 961.6 mg·kg⁻¹,碱解氮为 57.28 mg·kg⁻¹,速效钾为 8.84 mg·kg⁻¹,以上理化性质基本满足日本农用木醋液的标准^[30],购自陕西亿鑫生物能源开发有限公司. 购买后,将部分木醋液稀释 50 倍(2%,体积分数)并遮光保存待用.

油葵:品种 T562,发芽率 92%,净度 95%,品种纯度 98%,水分低于 15%,购自宿迁大花地园林绿化有限公司.

1.3 试验设计

本试验于 2018 年 10 月~2019 年 11 月进行,在设置木醋液梯度(体积分数)为 0 和 2%^[31](V0 和 V2)的基础上,根据吴丹等^[8]和李帅霖等^[41]的研究结果,设置生物炭施加量(占干土质量分数)分别为 0、1%、2% 和 4%(BC0、BC1、BC2 和 BC4),将不施加生物炭和木醋液视为对照(CK),共 8 个处理,每个处理重复 3 次,共 24 个小区,每个小区种植面积为 10 m²(2 m×5 m),所有小区作随机区组排列,且设置隔离带以阻断小区间的横向渗流,油葵采用人工播种方式种植. 试验设计如表 3 所示.

表 3 试验设计

Table 3 Experimental design

木醋液梯度 (φ)/%	浒苔生物炭施加量(ω)/%			
	0	1	2	4
0	CK	V0BC1	V0BC2	V0BC4
2	V2BC0	V2BC1	V2BC2	V2BC4

已进行水洗烘干过筛处理的浒苔粉置于真空管炉中(O-KTF1200,中国),缓慢升温至设定温度(加热速率约为 10℃·min⁻¹),停留 2 h,自然冷却至室温后取出、研磨过 0.15 mm 筛封存储备用. 升温前充入氮气(体积为炉腔容积的 2 倍),为保证炉腔内氮气体积稳定,在升温过程中进行适量补充(速率约为 500 mL·min⁻¹). 浒苔生物炭的基本性质如表 2 所示. 对比其他报道^[8,12,15,16,35~39],热解温度为 400℃的浒苔生物炭在产率、灰分、pH 和元素组成等基本性质(表 2)方面具有一定优势,此外,结合 Schimmelpfennig 等^[40]的研究结果(生物炭作为土壤改良剂的比表面积至少为 100 m²·g⁻¹),可以初步定性认为浒苔生物炭是一种非常适合于改良盐碱地的材料.

于 2018 年 10 月,将浒苔生物炭均匀撒施于土壤表面,然后进行机械翻耕(深度为 40 cm),使其与耕层土壤充分混合,冬灌(灌溉时间为 2018 年 11 月 5 日,灌水量为 1 500 m³·hm⁻²)后培养. 木醋液于 2019 年 5 月 18 日均匀喷施到土壤中(第 1 次施加用量为 2.5 t·hm⁻²^[42]),此后等量施加 3 次,时间间隔为 30 d(施加时间分别为 6 月 17 日、7 月 17 日和 8 月 16 日). 油葵于 5 月 25 日播种,采用穴播,播种量 8 kg·hm⁻²,行距 30 cm,株距 20 cm,在油葵现蕾期和开花期各灌水 1 次(灌溉时间为 7 月 11 日和 8 月 10 日,灌水量均为 1 200 m³·hm⁻²),灌水后及时破除板结,现蕾期前追施 150 kg·hm⁻² 尿素,落花后追施磷酸二氢钾(150 kg·hm⁻²)和氯化钾(100 kg·hm⁻²),9 月 5 日收获,冬灌(灌水量为 1 500 m³·hm⁻²)后空闲. 播种前,施加基肥(牛粪 30 t·hm⁻²,尿素 225 kg·hm⁻²,过磷酸钙 70 kg·hm⁻²,硫酸钾 70 kg·hm⁻²),各处理田间施肥、灌溉、除草等其他管理措施保持一致.

1.4 样品采集与测定

在改良试验前(2018 年 10 月 16 日)按照“随机”和“多点混合”原则,选取 5 个样方(2 m×2 m),每个样方 3 个采样点,采集 0~40 cm 深度的原土土样(分为 2 层,每层 20 cm,将 2 层土样混合,下同),共采集土壤样品 15 个,剔除杂质,经自然风干、磨碎和过筛(1 mm)后备用.

在播种后第 10 d(幼苗期,6 月 4 日),按照梅花型布点法(5 个采样点),采集油葵根际土壤 500 g(用铲子从油葵根球上分离土壤,将同一处理不同

采样点土样混合,下同),每个处理3次重复,共采集土壤样品24个,自然风干,碾碎后过70目筛,去除杂质,若干次四分后装袋用于土壤pH、碱化度和全盐的测定,播种后第40 d(现蕾期,7月5日)、60 d(开花期,7月26日)和100 d(成熟期,9月4日)的采样过程同上.在播种后第90 d(成熟期,8月24日)采集油菜根际土壤500 g,每个处理3次重复,共采集土壤样品24个,去除植物残根、可见动物残骸和石粒等杂质,过2 mm筛,分为两部分,将一部分小心置于无菌离心管(10 mL)中并用干冰保存带回,进行土壤酶活性的测定;另一部分带回自然风干后装袋用于土壤速效磷、有机质和盐分离子的测定.利用环刀采集0~40 cm深度的土样用于容重的测定,每个处理3次重复,共采集土壤样品24个.

土壤理化性质和酶活性参照文献[43,44]所提供方法测定.土壤pH值采用电位法(土水比1:2.5,PHS-3C型酸度计,中国雷磁);土壤含盐量采用电导法;土壤容重采用烘干法;土壤有机质(soil organic matter, SOM)采用重铬酸钾外加热法;速效磷(Olsen-P)采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法^[8](HJ704-2014);以交换性Na⁺采用乙酸铵-氢氧化铵-火焰光度法(LY/T148-1999);以交换性Na⁺与可交换性阳离子交换量的百分比计算碱化度(exchange sodium percentage, ESP);K⁺和Na⁺含量采用差减法;Ca²⁺和Mg²⁺含量采用EDTA滴定法;Cl⁻采用AgNO₃滴定法;SO₄²⁻采用EDTA回滴法;CO₃²⁻和HCO₃⁻采用双指示剂滴定法;土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法;土壤碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法;土壤蔗糖酶活性采用3,5-二硝基水杨酸(DNS)比色法.

幼苗期统计油菜出苗率,成熟期(收获前)统计存活率,出苗率和存活率按照式(1)和(2)计算.收获时,选取每小区相邻连续2行,每行25株,共50株,分别测算出各处理的油菜株高、盘径及产量.

$$\text{出苗率} = (\text{实际出苗数} / \text{种子数}) \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{存活率} = (\text{实际存活数} / \text{出苗数}) \times 100\% \quad (2)$$

1.5 数据分析和处理

为全面、综合和准确地评价对龟裂碱土的改良效果,避免由个别指标得出片面结论的偶然性,本研究采用土壤总体酶活性指标(total enzyme activity index, E_t)^[27]定量指示土壤总体酶活性,计算公式为:

$$E_t = \sum X_i / \text{average}(X_i) \quad (3)$$

式中, X_i 表示处理土壤第*i*种酶活性的实测值;average(X_i)为同种酶活性的平均值.

采用模糊隶属函数分析法^[1]对所有指标进行综合评价.正向指标(如养分、有机质和酶活性等)、负向指标(如pH、全盐、碱化度和容重等)分别根据式(4)和式(5)计算隶属函数值:

$$R(X_{ij})_{\text{正}} = (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (4)$$

$$R(X_{ij})_{\text{负}} = 1 - \frac{X_{ij} - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}} \quad (5)$$

式中, X_{ij} 表示第*i*个处理第*j*个指标的测定值; $X_{j\min}$ 和 $X_{j\max}$ 分别表示第*j*个指标测定值的最小值和最大值.

根据指标的变异系数求得各个指标的权重^[27],计算公式为:

$$\lambda_j = CV_j / \sum CV_j \quad (6)$$

式中, λ_j 值表示第*j*个指标在所有指标中的重要程度; CV_j 表示第*j*个指标的变异系数.

最后,根据式(7)计算各处理的综合评价值*D*.

$$D = \sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot R(X_{ij}) \quad (7)$$

本研究利用IBM SPSS-Statistics 22.0 (SPSS Inc., 美国)对所有数据进行统计分析,并通过Duncan检验法进行差异显著性检验($P < 0.05$),相关性分析利用MATLAB R2016a (The MathWorks Inc., 美国)编程完成,所有绘图利用Excel 2016和R Studio 3.6.1 (Mathsoft Inc., 美国)完成.

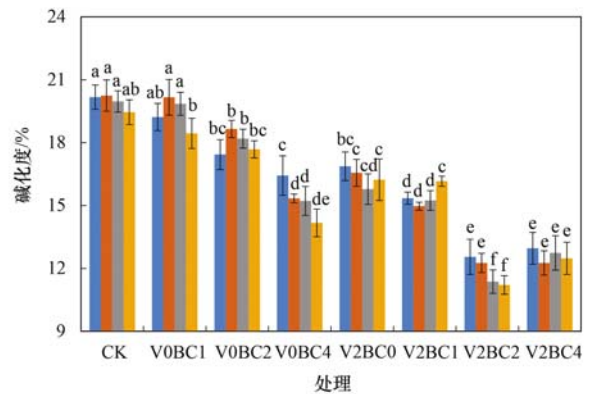
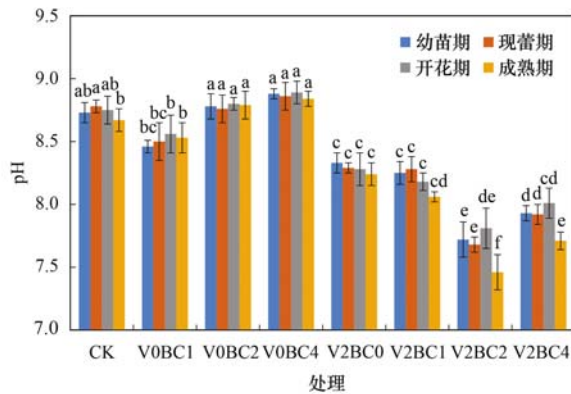
2 结果与分析

2.1 浒苔生物炭与木醋液复配对土壤pH和碱化度的影响

土壤pH是龟裂碱土理化性质和肥力特征的综合体现^[45].从图2来看,不同处理在不同作物生长期对土壤pH的影响存在一定差异.试验区原土0~40 cm土层pH为10.02,各处理的pH均低于原土.V0(V0BC1、V0BC2和V0BC4,下同)处理中,随着生物炭施加量的增加,土壤pH整体上呈现缓慢增加趋势,且在不同生长期内,相同生物炭施加量的土壤pH整体变化不显著($P > 0.05$,下同);V2(V2BC0、V2BC1、V2BC2和V2BC4,下同)处理中,随着生物炭施加量的增加,土壤pH整体上表现出先降低后增加趋势,且在不同生长期内,低施加量(BC0和BC1)的土壤pH变化不显著,而高施加量(BC2和BC4)的土壤pH变化显著($P < 0.05$,下同).本研究中,CK的平均pH(平均值由同一处理在不同生长期的数据求得,下同)为8.73,V0BC1的平均pH为8.51,较CK降低0.22个单位,V0BC2和V0BC4的平均pH分别为8.78和8.86,较CK分

别提高 0.05 和 0.13 个单位,而 V2BC0、V2BC1、V2BC2 和 V2BC4 的平均 pH 分别为 8.28、8.19、7.67 和 7.89, V2BC2 的平均 pH 较 CK 降低 1.06 个单位(降低 12.14%)。前人研究表明,施加适量的木醋液可显著降低碱性土壤 pH^[30, 46]。碱化度是反映龟裂碱土性质的关键指标之一^[1]。试验区原土 0~40cm 土层碱化度为 25.61%,各处理的碱化度均低

于原土。本研究中,CK 的平均碱化度为 19.96%,所有处理的平均碱化度都显著低于 CK; V0 处理中, V0BC4 的平均碱化度最低,为 15.29%,较 CK 降低 23.39%; V2 处理中, V2BC2 的平均碱化度最低,为 11.85%,较 CK 降低 40.63%。可见,碱化度随着生物炭施加量增大而显著降低,且适量的木醋液复配有助于进一步降低土壤碱化度。



不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异 ($P < 0.05$)

图2 浒苔生物炭与木醋液复配对土壤 pH 和碱化度的影响

Fig. 2 Effects of *Enteromorpha prolifera* biochar combined with wood vinegar on pH and ESP of soils

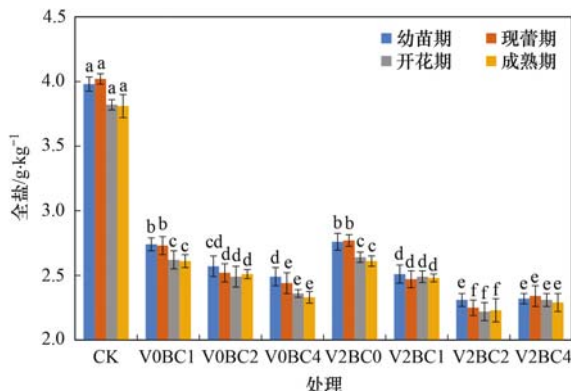
2.2 浒苔生物炭与木醋液复配对土壤全盐的影响

不同处理对土壤全盐有不同的影响(图3)。试验区原土 0~40 cm 土层全盐为 $6.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 各处理的全盐均低于原土。V0 处理中, 所有处理的土壤全盐都显著低于 CK, 且随着生物炭施加量增加, 土壤全盐整体上呈现降低趋势, 且同一生物炭施加量的土壤全盐变化与作物生长期存在一定关系, 表现为幼苗期和现蕾期土壤全盐高于开花期和成熟期, 说明不同生长期的作物对土壤 0~40 cm 土层含盐量的影响存在差异^[20]; V2 处理的土壤全盐较 CK 和 V0 处理均显著降低。其中, V0BC2 和 V0BC4 的平均全盐分别为 $2.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而

V2BC2 和 V2BC4 的平均全盐分别为 $2.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, V2BC2 较 V0BC2 降低 10.71%, V2BC4 较 V0BC4 降低 3.73%, 可见在同一生物炭施加量时, 施加木醋液能显著降低土壤 0~40 cm 含盐量, 且体积分数为 2% 左右时效果最佳^[31, 46]。本研究中, CK 的平均全盐为 $3.93 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, V0 处理中的平均全盐最低为 $2.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (V0BC4), 较 CK 降低 38.68%, 而 V2 处理中的平均全盐最低为 $2.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (V2BC2), 较 CK 降低 42.75%, 降低幅度大于已有报道结果^[1] (其研究中利用砾石暗沟 + 脱硫石膏改良龟裂碱土, 土壤全盐较空白最高降低 33.20%), 说明生物炭与木醋液复配能有效降低土壤表层含盐量, 但不是施加的生物炭越多越好^[35], 且两者之间的协同作用并非 2 个因素效应的简单累加^[47]。

2.3 浒苔生物炭与木醋液复配对土壤盐离子含量的影响

龟裂碱土的碱化度较高, 碱性环境中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 不易溶解到土壤溶液中^[1], 阳离子以 Na^{+} 为主, 阴离子以 Cl^{-} 为最高, 其次为 SO_4^{2-} 。所有处理的 $\omega(\text{Na}^{+})$ 都显著低于 CK (表 4), 且随着生物炭施加量增加而降低, V0 处理中, V0BC4 的 $\omega(\text{Na}^{+})$ 最低, 为 $0.61 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较 CK 降低 42.45%, V2 处理中, V2BC2 的 $\omega(\text{Na}^{+})$ 最低, 为 $0.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较 CK 降低 47.17%, 可见浒苔生物炭与木醋液复配可进一步降低土壤 0~40 cm 土层的 $\omega(\text{Na}^{+})$ 。所有处理的



不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异 ($P < 0.05$)

图3 浒苔生物炭与木醋液复配对土壤全盐的影响

Fig. 3 Effects of *Enteromorpha prolifera* biochar combined with wood vinegar on salinity of soils

$\omega(\text{K}^+)$ 都显著高于 CK,且随着生物炭施加量增加而略微增加,V0 处理中,V0BC4 的 $\omega(\text{K}^+)$ 最高,为 $0.029\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,较 CK 提高 70.59%,V2 处理中,V2BC4 的 $\omega(\text{K}^+)$ 最高,为 $0.027\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,较 CK 提高 58.82%.除 V0BC1、V2BC0 和 V2BC1 外,施加 2%~4%的生物炭处理的 $\omega(\text{Ca}^{2+})$ 都显著高于 CK.所有处理的 $\omega(\text{Mg}^{2+})$ 差异不显著,表明 Mg^{2+} 不易被水淋洗.

表 4 浒苔生物炭与木醋液复配对土壤盐分离子的影响¹⁾

处理	土壤盐分离子的 $\omega/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$							
	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	HCO_3^-
原土	2.19 ± 0.03	0.015 ± 0.003	0.140 ± 0.002	0.062 ± 0.002	4.25 ± 0.13	0.99 ± 0.05	0.150 ± 0.002	0.585 ± 0.011
CK	$1.06\pm0.06\text{a}$	$0.017\pm0.001\text{e}$	$0.144\pm0.003\text{c}$	$0.051\pm0.001\text{a}$	$2.14\pm0.06\text{a}$	$0.90\pm0.19\text{a}$	$0.096\pm0.001\text{a}$	$0.146\pm0.005\text{a}$
V0BC1	$0.73\pm0.07\text{c}$	$0.023\pm0.002\text{b}$	$0.128\pm0.003\text{e}$	$0.048\pm0.001\text{a}$	$1.34\pm0.11\text{c}$	$0.76\pm0.11\text{b}$	$0.084\pm0.002\text{b}$	$0.141\pm0.004\text{a}$
V0BC2	$0.65\pm0.04\text{d}$	$0.027\pm0.001\text{b}$	$0.156\pm0.004\text{b}$	$0.043\pm0.001\text{a}$	$1.16\pm0.06\text{f}$	$0.62\pm0.09\text{cd}$	$0.072\pm0.001\text{b}$	$0.134\pm0.001\text{a}$
V0BC4	$0.61\pm0.06\text{e}$	$0.029\pm0.003\text{a}$	$0.164\pm0.002\text{a}$	$0.055\pm0.002\text{a}$	$1.19\pm0.08\text{e}$	$0.71\pm0.13\text{bc}$	$0.078\pm0.002\text{b}$	$0.128\pm0.004\text{a}$
V2BC0	$0.85\pm0.09\text{b}$	$0.019\pm0.004\text{d}$	$0.136\pm0.002\text{d}$	$0.046\pm0.002\text{a}$	$1.37\pm0.12\text{b}$	$0.79\pm0.08\text{ab}$	$0.072\pm0.002\text{b}$	$0.146\pm0.001\text{a}$
V2BC1	$0.79\pm0.05\text{bc}$	$0.021\pm0.001\text{c}$	$0.132\pm0.003\text{d}$	$0.046\pm0.001\text{a}$	$1.28\pm0.03\text{d}$	$0.72\pm0.06\text{bc}$	$0.066\pm0.001\text{b}$	$0.140\pm0.002\text{a}$
V2BC2	$0.56\pm0.02\text{f}$	$0.025\pm0.002\text{b}$	$0.156\pm0.002\text{b}$	$0.043\pm0.001\text{a}$	$1.17\pm0.04\text{f}$	$0.60\pm0.05\text{d}$	$0.078\pm0.002\text{b}$	$0.134\pm0.005\text{a}$
V2BC4	$0.60\pm0.03\text{e}$	$0.027\pm0.001\text{b}$	$0.156\pm0.002\text{b}$	$0.053\pm0.001\text{a}$	$1.19\pm0.03\text{e}$	$0.68\pm0.08\text{c}$	$0.084\pm0.001\text{b}$	$0.128\pm0.004\text{a}$

1) 不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异($P<0.05$)

土壤溶液中的 Cl^- 性质稳定,难与其他离子反应且不易附着在土壤胶体上,随水分运动.所有处理的 $\omega(\text{Cl}^-)$ 都低于 CK,表明施加生物炭能提高 Cl^- 的洗脱效果.V0 处理中,V0BC2 的 $\omega(\text{Cl}^-)$ 最低,为 $1.16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,较 CK 降低 45.79%,V2 处理中,V2BC2 的 $\omega(\text{Cl}^-)$ 最低,为 $1.17\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,较 CK 降低 45.32%,表明在同一生物炭施加量条件下,施加木醋液对土壤 $\omega(\text{Cl}^-)$ 的影响并不显著.所有处理的 $\omega(\text{SO}_4^{2-})$ 都低于 CK,V0 处理中,V0BC2 的 $\omega(\text{SO}_4^{2-})$ 最低,为 $0.62\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,较 CK 降低 31.11%,V2 处理中,V2BC2 的 $\omega(\text{SO}_4^{2-})$ 最低,为 $0.60\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,较 CK 降低 33.33%.所有处理的 $\omega(\text{CO}_3^{2-})$ 和 $\omega(\text{HCO}_3^-)$ 的差异并不显著.

2.4 浒苔生物炭与木醋液复配对土壤速效磷、有机质和容重的影响

播种后 90 d,浒苔生物炭与木醋液复配显著提升龟裂碱土养分含量^[8, 25],改善土壤结构(表 5).速效磷是评价土壤供磷水平的重要指标^[9].所有处理的 ω (速效磷)都显著高于 CK;V0 处理中,V0BC4 的 ω (速效磷)最高,为 $44.78\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,较 CK 提高 2.98 倍;V2BC0 的 ω (速效磷)为 $15.86\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,较 CK 提高 0.41 倍,可见单独施加木醋液可提高土壤 ω (速效磷)^[46];V2 处理中,V2BC4 的 ω (速效磷)最高,为 $47.19\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,较 CK 提高 3.19 倍,且显著高于 V0BC4,说明浒苔生物炭与木醋液复配对龟裂碱土的 ω (速效磷)影响效果明显,其次为 V2BC2,较 CK 提高 2.88 倍.但必须指出,施加生物炭过多会提高土壤 pH,降低土壤对磷的吸附,导致磷素流失^[27].

土壤有机质是土壤固相部分的重要组成部分,

是植物营养的重要来源^[7, 37].所有处理的 ω (有机质)都显著高于 CK;V0 处理中,V0BC4 的 ω (有机质)最高,为 $15.28\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,较 CK 提高 63.25%;V2BC0 的 ω (有机质)为 $10.81\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,较 CK 提高 15.49%,可见单独施加木醋液也可提高土壤 ω (有机质)^[31];V2 处理中,V2BC4 的 ω (有机质)最高,为 $16.57\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,较 CK 提高 77.03%,且显著高于 V0BC4,说明浒苔生物炭与木醋液复配对龟裂碱土的 ω (有机质)影响效果亦明显,其次为 V2BC2,较 CK 提高 58.76%.

土壤容重是评价土壤结构性质的评价指标^[23].相较而言,当土壤容重越低时,土壤结构更加疏松,透水透气性越好,越不易发生板结,更有利于土壤营养的释放和养分的固持^[20].试验区原土 0~40 cm 土层容重为 $1.59\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,各处理的容重均低于原土.所有处理的容重都显著低于 CK;V0 处理中,V0BC4 的容重最低,为 $1.21\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,较 CK 降低 21.43%;V2BC0 的容重为 $1.48\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,与 CK 并无显著差异,可见单独施加木醋液能降低土壤容重,但影响并不明显,这与前人的研究结果是一致的^[47];V2 处理中,V2BC4 的容重最低,为 $1.19\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,较 CK 降低 22.73%,其次为 V2BC2,较 CK 降低 20.78%.

2.5 浒苔生物炭与木醋液复配对土壤酶活性的影响

本研究中,选取脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶^[48~50](分别是参与生物氮、磷和碳代谢循环的重要酶类)为代表,探究浒苔生物炭与木醋液复配对龟裂碱土酶活性的影响(表 6).种植 90 d 后,所有处理的 3 种酶活性都显著高于 CK,表明浒苔生物炭可提供土壤微生物所需的营养物质,促进微生物生

表 5 浒苔生物炭与木醋液复配对土壤速效磷、有机质和容重的影响¹⁾

Table 5 Effects of *Enteromorpha prolifera* biochar combined with wood vinegar on Olsen-P, SOM, and bulk density of soils

处理	ω (速效磷) /mg·kg ⁻¹	ω (有机质) /g·kg ⁻¹	容重 /g·cm ⁻³
CK	11.26 ± 1.24h	9.36 ± 0.69f	1.54 ± 0.08a
V0BC1	27.38 ± 1.86e	11.22 ± 0.71d	1.39 ± 0.05b
V0BC2	39.66 ± 2.01d	12.35 ± 0.93cd	1.27 ± 0.07c
V0BC4	44.78 ± 1.52b	15.28 ± 0.54b	1.21 ± 0.03d
V2BC0	15.86 ± 0.97g	10.81 ± 0.49e	1.48 ± 0.05ab
V2BC1	30.69 ± 1.08e	13.37 ± 0.84c	1.35 ± 0.04bc
V2BC2	43.71 ± 2.21c	14.86 ± 0.76bc	1.22 ± 0.04d
V2BC4	47.19 ± 1.75a	16.57 ± 0.37a	1.19 ± 0.02d

1) 不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异($P < 0.05$)

表 6 浒苔生物炭与木醋液复配对土壤酶活性的影响¹⁾

Table 6 Effects of *Enteromorpha prolifera* biochar combined with wood vinegar on enzyme activity in soils

处理	土壤酶活性			E_t	排序
	脲酶活性 /μg·(d·g) ⁻¹	碱性磷酸酶活性 /μmol·(d·g) ⁻¹	蔗糖酶活性 /mg·(d·g) ⁻¹		
CK	93.42 ± 5.26f	0.64 ± 0.09f	0.38 ± 0.06e	1.71	8
V0BC1	124.57 ± 3.19d	1.16 ± 0.14d	0.52 ± 0.08d	2.57	6
V0BC2	168.15 ± 2.08ab	1.24 ± 0.28c	0.97 ± 0.12b	3.58	4
V0BC4	161.23 ± 2.26b	1.36 ± 0.19b	1.03 ± 0.25b	3.66	3
V2BC0	102.45 ± 3.97e	0.83 ± 0.11e	0.46 ± 0.09d	2.04	7
V2BC1	130.69 ± 5.38c	1.23 ± 0.67c	0.61 ± 0.14c	2.82	5
V2BC2	179.19 ± 2.66a	1.29 ± 0.39bc	1.25 ± 0.07a	3.96	1
V2BC4	166.75 ± 4.11ab	1.41 ± 0.26a	1.07 ± 0.26b	3.79	2

1) 不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异($P < 0.05$)

V2BC4,而 CK 最小,说明浒苔生物炭与木醋液复配对土壤酶活性的影响较大,但其结果与施加量、作物、土壤类型以及酶的特性等因素有密切关系。

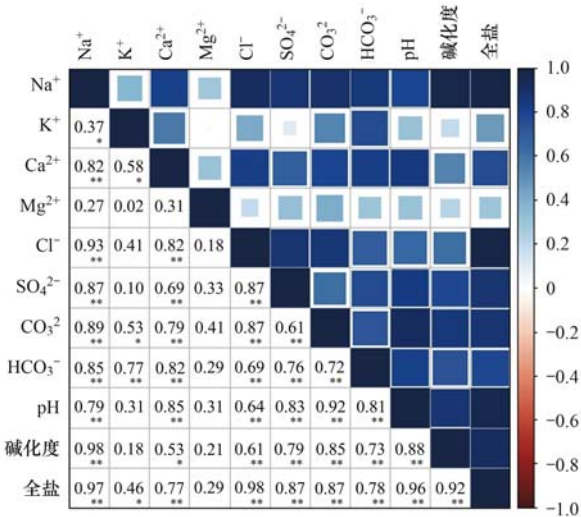
2.6 土壤化学性质相关性分析

本研究中,不同处理土壤盐分离子与理化性质之间的相关性如图 4 所示。 Na^+ 与 Cl^- 存在极显著正相关关系($P < 0.01$,下同),相关系数为 0.93,这与它们之间的协同运移有关^[1],其次为 CO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 。 pH 与 CO_3^{2-} 存在极显著正相关关系,相关系数为 0.92,其次为 HCO_3^- ,这与 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 水解过程有关^[23]。全盐和 K^+ 存在显著正相关关系($P < 0.05$,下同),与其他离子(除 Mg^{2+})均呈极显著正相关关系,与 Cl^- 相关性最大,相关系数为 0.98,其次为 Na^+ 。另外,由定义可知,碱化度是用 Na^+ 的饱和度来表示的^[4]。因此,龟裂碱土中 CO_3^{2-} 、 Cl^- 和 Na^+ 的浓度变化在很大程度上可以反映土壤 pH 、全盐和碱化度变化。

2.7 浒苔生物炭与木醋液复配对油葵生长、产量和经济效益的影响

作物产量是衡量农业生产水平的重要指标^[9]。

长,提高土壤酶活性^[49],但过高的生物炭施加量会抑制土壤酶活性^[50]。V0 处理中,V0BC2 的脲酶活性最高,较 CK 提高 0.80 倍,V0BC4 的碱性磷酸酶活性和蔗糖酶活性最高,较 CK 分别提高 1.13 倍和 1.71 倍。V2 处理中,V2BC2 的脲酶和蔗糖酶活性最高,较 CK 分别提高 0.92 倍和 2.29 倍,V2BC4 的碱性磷酸酶活性最高,较 CK 提高 1.20 倍,而 V2BC2 的碱性磷酸酶活性较 CK 提高 1.02 倍。V2BC0 的 3 种酶活性较 CK 有显著提高,说明单独施加适量木醋液有助于提高土壤酶活性^[51]。土壤总体酶活性指标 E_t [按式(3)计算]能够评价酶活性的整体水平^[27]。V2BC2 的总体酶活性指标最大,其次是



不同颜色表示双变量之间的相关性,正方形的大小表示相关性大小; * 表示显著相关($P < 0.05$), ** 表示极显著相关($P < 0.01$)

图 4 土壤化学性质相关性

Fig. 4 Correlation analysis of chemical properties in soils

从表 7 看,2019 年所有处理的出苗率、成活率、株高和盘径均显著高于 CK,表明施加浒苔生物炭与木醋液改善了土壤环境,促进作物生长。V2BC2 的出苗

率和产量最高,产量较 CK 提高 1.90 倍. 2019 年,所有处理的增产(相对于 CK)均超过 1 500 kg·hm⁻²;由于本研究中的浒苔生物炭是在 2018 年施加的,并没有将其计入 2019 年的成本投入,V0 和 V2 处理之间的差别只限于是否施加木醋液,而 V2BC1~V2BC4 的产量均显著高于 V0BC1~V0BC4

和 V2BC0,表明浒苔生物炭与木醋液复配的改良效果要明显强于施加单一材料. 总体而言,浒苔生物炭与木醋液复配产生的经济效益明显高于成本投入,但生物炭施加量超过 2% 时,作物产量和经济效益出现降低趋势,说明高水平的生物炭施加量并不利于提升作物的经济效益.

表 7 浒苔生物炭与木醋液复配对油葵生长、产量和经济效益的影响¹⁾

Table 7 Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> biochar combined with wood vinegar on growth, yield, and economic benefit of oil sunflower									
处理	出苗率 /%	成活率 /%	株高 /cm	盘径 /cm	产量 /kg·hm ⁻²	增产 /kg·hm ⁻²	投入 /元·hm ⁻²	产值 /元·hm ⁻²	经济效益 /元·hm ⁻²
CK	66.2e	57.3e	43.2d	8.3e	1 221.4f	0	3 950	7 328.4	3 378.4e
V0BC1	75.3d	74.6d	82.6c	13.6d	2 947.6d	1 726.2	3 950	17 685.6	13 735.6c
V0BC2	84.6b	78.5c	84.8c	15.2b	3 158.9cd	1 937.5	3 950	18 953.4	15 003.4b
V0BC4	81.7c	80.2c	89.2b	14.1c	3 062.3d	1 840.9	3 950	18 373.8	14 423.8c
V2BC0	77.6d	79.7c	93.5ab	13.5d	2 750.2e	1 528.8	4 920	16 501.2	11 581.2d
V2BC1	84.7b	86.6b	98.2a	15.7b	3 381.1c	2 159.7	4 920	20 286.6	15 366.6b
V2BC2	87.2a	87.6b	96.6a	16.9a	3 546.7a	2 325.3	4 920	21 280.2	16 360.2a
V2BC4	85.1b	89.4a	94.2ab	15.8b	3 475.8b	2 254.4	4 920	20 854.8	15 934.8b

1) 不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异($P<0.05$);增产=产量-CK 的产量;投入包括:翻耕 450 元·hm⁻²,种子 750 元·hm⁻²,化肥(有机肥+无机肥)1900 元·hm⁻²,购买木醋液 700 元·hm⁻²,撒施木醋液 270 元·hm⁻²,水电费 850 元·hm⁻²,浒苔生物炭于 2018 年施入,未计算到 2019 年投入中,油葵价格按 6.0 元·kg⁻¹计算

2.8 综合评价

不同生物炭与木醋液复配处理对土壤理化性质、 E_l 和油葵产量的影响存在差异,仅根据某一指标很难确定最佳处理,本研究采用模糊隶属度函数法对土壤理化性质、酶活性和油葵产量进行综合评价.通过计算土壤理化性质、 E_l 和油葵产量等 8 个指标的隶属函数值,分别利用式(6)

和式(7)计算各指标的权重及综合评价值,依据综合评价值大小进行排序.结果如表 8 所示,最有利于改良龟裂碱土的前 3 种处理依次为 V2BC2、V2BC4 和 V0BC4,其综合评价值分别为 0.94、0.85 和 0.62.可见,浒苔生物炭与木醋液复配能较大程度改良龟裂碱土理化性质,提高油葵的产量.

表 8 隶属函数综合评价¹⁾

Table 8 Subordinate function value analysis										
处理	pH	碱化度	全盐	速效磷	有机质	容重	E_l	产量	综合评价值	排序
V0BC1	0.29	0.26	0.38	0.38	0.74	0.45	0.26	0.43	0.37	6
V0BC2	0.27	0.24	0.21	0.83	0.83	0.79	0.41	0.77	0.48	5
V0BC4	0	0.58	0.49	0.87	0.79	0.63	0.82	0.54	0.62	3
V2BC0	0.49	0.44	0.44	0.59	0.66	0.13	0.20	0.17	0.36	7
V2BC1	0.56	0.59	0.55	0.49	0.73	0.54	0.56	0.54	0.55	4
V2BC2	1	1	1	0.87	0.89	0.81	1	1	0.94	1
V2BC4	0.71	0.72	0.79	1	1	1	0.87	0.69	0.85	2

1) 所有处理的土壤 pH、碱化度和全盐的实测值以 4 个生长期的平均值计算

3 讨论

龟裂碱土土壤胶结着大量的可交换性 Na⁺,使其具有强碱性反应^[45].在强碱条件下,Na⁺会交换土壤胶体结合位点上的离子,使土壤胶体扩散双电层增厚导致土壤团粒遇水易分散崩解^[1],淤闭土壤孔隙,从而限制水分运动,造成龟裂碱土遇水易板结、孔隙度低和透水性差等.

3.1 影响土壤 pH、全盐、容重、碱化度和盐分离子的因素

龟裂碱土中的可交换 Na⁺易水合形成 NaOH,

使土壤的碱性增强^[52],而且 CO₃²⁻ 和 HCO₃⁻ 水解时会夺取 H₂O 中的 H⁺,产生 OH⁻(CO₃²⁻+H₂O $\rightleftharpoons$ HCO₃⁻+OH⁻,HCO₃⁻+H₂O $\rightleftharpoons$ H₂CO₃+OH⁻),导致土壤 pH 偏高.本研究中,单独施加低水平($\omega=1\%$)的生物炭,对龟裂碱土的 pH 提高不明显,这是由于施加量较低未能对土壤这一巨大缓冲体系造成明显影响^[8],但单独施加高水平($\omega>2\%$)的生物炭则提高土壤 pH,一方面是由于生物炭本身呈强碱性;另一方面,生物炭可能会吸附盐基离子导致土壤中游离态碳酸盐和碳酸氢盐含量提高^[17],继而促使 CO₃²⁻ 和 HCO₃⁻ 水解产生更多的 OH⁻.而生物炭

与木醋液复配施加后,土壤 pH 显著降低,这与木醋液的强酸性有关^[30].

干旱地区降雨量小、蒸发强烈,在毛细管作用下土壤盐分随水分迁移至地表,大量盐分积聚在土壤表层. 本研究中,生物炭和木醋液复配显著降低了土壤全盐,其原因在于:一方面,当土壤水分蒸发时,生物炭的微孔隙结构能较好地迫使水分保持在毛细状态,加大水分蒸发散失难度,进而减少盐分表聚^[15]. 但生物炭施加量过高时($\omega > 5\%$),过量的生物炭颗粒会堵塞原本出现的孔隙,导致土壤水力传导度下降,不利于盐分随水向深层迁移,造成盐分积累^[52]. 另外,生物炭表面存在大量的羧基、羟基、内酯基等含氧官能团,使其具有一定的亲水极性^[15],继而提高土壤对水分的吸持能力. 同时也有研究指出^[41],生物炭也存在一定的疏水作用(由于疏水官能团的存在),但该作用机制是否取决于制备材料及热解温度仍需进一步探索. 另一方面,可能是木醋液与土壤盐分反应形成了络合物^[47],降低土壤盐分,但其反应机制仍有待明确. 此外,在油葵生长中后期,茎叶在一定程度上遮蔽了土壤,限制了土壤蒸发,降低了土壤表层盐分含量. 本研究各处理土壤容重的变化主要是由生物炭的输入引起的,而木醋液对其的影响并不明显,这与 Feng 等^[31]的研究结果是一致的. 其原因在于施入多孔和低堆积密度的生物炭可以降低土壤密度^[2],进而减小土壤容重,且生物炭通过减小土壤容重和改变土壤孔隙结构及数量等机制对土壤水分入渗与蒸发产生影响^[23].

在龟裂碱土中施加适量的生物炭和木醋液后,提高了土壤溶液中 Ca^{2+} 和酸根离子含量,而 Ca^{2+} 对土壤胶粒的吸附能力强于 Na^{+} ^[35](电荷数大且水合离子半径小的阳离子优先吸附),致使 Ca^{2+} 置换出土壤胶体上附着的 Na^{+} ,从而降低 Na^{+} 含量和碱化度. 另一方面,酸根离子会中和土壤中的碱性物质,并溶解土壤中被固化的 Ca^{2+} ,被激活的 Ca^{2+} 将土壤胶体中的 Na^{+} 释放出来,进入土壤溶液与负价官能团形成水溶性络合物,随灌溉水进入深层土壤^[8]. 而且,施加生物炭也增加了土壤 K^{+} 含量,这是由于浒苔生物炭含有一定量的水溶性钾,释放到土壤中提高其含量^[53]. 有研究指出^[54], Ca^{2+} 可以置换出土壤中的 Mg^{2+} 和 K^{+} ,但在本研究中, Na^{+} 的降低幅度远远超过 Mg^{2+} 和 K^{+} ,这表明在浒苔生物炭与木醋液复配改良龟裂碱土的离子交换过程中, Ca^{2+} 会优先交换 Na^{+} ,这与程镜润等^[52]的研究结果是一致的. 此外,木醋液的添加引入了大量的羧基和羟基等含氧官能团,使 H^{+} 取代了生物炭中原来与 $-\text{COO}^{-}$ 结合的阳离子,而后生物炭与碱性物质进行中和反

应空出的位点被 Na^{+} 占据,使游离态 Na^{+} 含量降低,继而增强土壤胶粒凝聚^[29],改善土壤结构. 本研究中, Na^{+} 与 Cl^{-} 表现为协同运移,这与氯化物在土壤垂直方向的运移最为活跃的结论是一致的^[55].

3.2 影响土壤速效磷和有机质的因素

本研究中,生物炭与木醋液复配显著提高土壤速效磷和有机质. 生物炭本身含有大量的有机物质,其通过改变土壤养分状况和微生物生存环境提高土壤微生物活力,产生的大量分泌物使土壤团粒胶结,继而提升土壤养分的固持能力^[19]. 而且,生物炭表面的含氧官能团和基团(如胺基、羧基和酰胺基等)可有效减少养分淋失,增加土壤有机碳、有效磷和速效钾^[25]. 有研究表明,生物炭可通过抑制有机碳矿化的负激发作用使其留在土壤中^[9]. 此外,施加生物炭引入大量的 Ca^{2+} 并交换土壤胶体中的 Na^{+} ,使土壤胶体从钠质亲水胶体向钙质疏水胶体转变(由于含 Ca^{2+} 胶体微粒的外层不吸附水分子),削弱了土壤胶粒间的排斥力(与土壤扩散双电层向粘粒表面压缩有关^[17]),继而促进土壤胶粒絮凝,改善土壤团粒结构,提高养分的供储能力. 与此同时,含有大量有机化合物的木醋液通过胶结土壤颗粒也可降低由于酸溶解而引起的土壤结构破坏程度,继而提高养分含量,而且木醋液含有的大量活性分子有利于土壤团粒间的离子迁移,释放原本被固定的土壤养分^[31].

3.3 影响土壤酶活性的因素

土壤养分和重金属含量与根际土壤微生物群落有着密切关系,而土壤理化因子是驱动微生物群落结构变化的主要因素^[56]. 脲酶能够促进有机质肽键的水解,其活性是表征土壤供氮能力的重要指标^[48];碱性磷酸酶能够促进有机磷化合物的水解,提高磷素的有效性^[50];蔗糖酶能够水解蔗糖为土壤微生物提供能量,并参与土壤有机质的矿化与分解,对土壤碳循环起着重要作用^[51]. 本研究中,浒苔生物炭与木醋液复配显著提高了土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性,说明二者可能会通过自身性质改变土壤理化特性和微生物区系结构来影响土壤微生物群落分布与功能多样性^[56]. 首先,生物炭和木醋液中含有大量酶促基质或类似物,促进土壤酶的分泌;另一方面,酶活性较高时又促进土壤中复杂大分子化合物的分解,为微生物生长和发育提供能源物质,继而增强土壤酶的分泌;以上两个过程相互促进,相互渗透,共同提高土壤酶活性. 但必须指出,施加的生物炭用量和木醋液浓度过高,都会显著降低土壤酶活性,其原因可能在于大量生物炭的输入会吸附酶分子,对酶促反应结合位点形成保护,从

而抑制酶促反应的进行,降低土壤酶活性^[49].而高浓度木醋液可能瞬间改变土壤微域环境,且其含有的大量酸类和酚类等有机物质可能会对土壤微生物形成毒害作用^[51],从而抑制土壤微生物生长与活性.

3.4 影响油葵生长、产量和经济效益的因素

有研究表明^[19],植物通过改变不同器官的生物量分配来达到在变化的环境中最大限度地提高获取各种资源的能力,促进生长.本研究中,苧苔生物炭与木醋液复配显著提高了油葵生长和产量,这与前人在蓝莓上的研究相符^[32].生物炭可为作物提供大量营养元素(与其表面携带的复杂化合物溶出或降解有关^[9]),改善土壤养分及植物营养代谢,促进油葵对微量元素的吸收和籽粒发育^[25].木醋液施入土壤后,通过吸附和代换机制起到保氮、解磷、活钾及提高养分有效性的作用^[31],为油葵增产提供支持.而且,施加适宜浓度的木醋液有助于作物根系生长,促进光合作用及相关代谢过程,从而提高产量,这在许多作物上已得到证实^[57~59].其原因可能是由于木醋液中的有机酸能引起作物细胞酸化,导致细胞壁木质纤维素间氢键断裂使其连接松动,从而促进细胞分裂、伸长,利于根系生长及增产^[32].然而,生物炭和木醋液对作物生长与产量的影响机制是非常复杂的^[31].如有研究表明^[60],施加 2% 生物炭时水稻产量较空白提高 15.78%,这与 Dong 等^[61]的研究结果(施加 2% 生物炭时水稻产量与空白无显著差异)有所不同,可能与土壤、生物炭类型及灌水方式等有密切关系^[9].另有研究表明,当施入稀释倍数低于 50 倍($\varphi < 2\%$)的木醋液时,作物根系会受到重度伤害,过低时(稀释倍数小于 5 倍)导致枯萎甚至死亡^[62],其原因是施加较低稀释倍数的木醋液使土壤溶液 pH 迅速下降,导致作物相对电解质外渗率和丙二醛(MDA,脂质氧化的重要产物之一)含量增加,从而引起作物代谢紊乱,抑制生长^[59].另外,鉴于生物炭施加量每增加 0.5% 其应用成本可能提高 1/3^[8],所以苧苔生物炭与木醋液复配改良龟裂碱土的成本也是影响其推广应用的重要指标.虽然苧苔生物炭市场价格未知,但其制备材料很容易获取,所以价格还是非常可期的^[16],而木醋液的价格相对较低^[30].综合以上因素并结合本研究的经济效益分析,考虑施加 2% 苧苔生物炭 + 2% 木醋液(V2BC2)可达到对龟裂碱土改良的最佳效果.

4 结论

(1)苧苔生物炭与木醋液复配能显著降低龟裂碱土 pH、碱化度和全盐含量,提高土壤速效磷和有

机质含量,增强土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性.

(2)苧苔生物炭与木醋液复配能显著降低龟裂碱土容重及 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量,促进土壤胶粒絮凝,改善土壤团粒结构.

(3)苧苔生物炭与木醋液复配能显著促进油葵生长,提高油葵产量,本研究中,2% 苧苔生物炭与 2% 木醋液复配的综合效果最佳.因此,苧苔生物炭与木醋液复配改良龟裂碱土有较好前景.

参考文献:

- [1] 王旭,孙兆军,韩磊,等.砾石暗沟提高脱硫石膏改良龟裂碱土效果及油葵产量[J].农业工程学报,2017,33(22): 143-151.
Wang X, Sun Z J, Han L, et al. Subsurface gravel blind ditch increasing improved effects of takyric solonetz by desulfurized gypsum and yield of oil sunflower [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33 (22): 143-151.
- [2] 王一字,王圣森,戴九兰.生物炭对盐碱土壤氨挥发影响[J].环境科学,2019,40(8): 3738-3745.
Wang Y Y, Wang S S, Dai J L. Effect of biochar on ammonia volatilization in saline-alkali soil [J]. Environmental Science, 2019, 40 (8): 3738-3745.
- [3] 石玉龙,刘杏认,高佩玲,等.生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N_2O 排放的影响[J].环境科学,2017,38(12): 5333-5343.
Shi Y L, Liu X R, Gao P L, et al. Effects of biochar and organic fertilizer on saline-alkali soil N_2O emission in the North China Plain [J]. Environmental Science, 2017, 38 (12): 5333-5343.
- [4] 吕雯,孙兆军,陈小莉,等.地膜秸秆复合覆盖改善龟裂碱土水盐特性提高油葵产量[J].农业工程学报,2018,34(13): 125-133.
Lü W, Sun Z J, Chen X L, et al. Plastic film and straw combined mulching improving water and salt characteristics of Takyr Solonchaks and yield of oil sunflower [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34 (13): 125-133.
- [5] Zhang T B, Dong Q G, Zhan X Y, et al. Moving salts in an impermeable saline-sodic soil with drip irrigation to permit wolfberry production [J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 636-645.
- [6] Zhang T B, Zhan X Y, Kang Y H, et al. Improvements of soil salt characteristics and nutrient status in an impermeable saline-sodic soil reclaimed with an improved drip irrigation while ridge planting *Lycium barbarum* L. [J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(4): 1126-1139.
- [7] 赵娇,谢慧君,张建.黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析[J].环境科学,2020,41(3): 1449-1455.
Zhao J, Xie H J, Zhang J. Microbial diversity and physicochemical properties of rhizosphere microenvironment in saline-alkali soils of the Yellow River Delta [J]. Environmental Science, 2020, 41 (3): 1449-1455.
- [8] 吴丹,孙萍,路鹏展,等.苧苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径[J].环境科学,2020,41(4): 1941-1949.
Wu D, Sun P, Lu P Z, et al. Effect and approach of *Enteromorpha prolifera* biochar to improve coastal saline soil [J]. Environmental Science, 2020, 41 (4): 1941-1949.

- [9] 勾芒芒, 屈忠义, 王凡, 等. 生物炭施用对农业生产与环境效应影响研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2018, **49**(7): 1-12.
Gou M M, Qu Z Y, Wang F, *et al.* Progress in research on biochar affecting soil-water environment and carbon sequestration-mitigating emissions in agricultural fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, **49**(7): 1-12.
- [10] Jia H, Ben H X, Wu F Z. Effect of biochar prepared from food waste through different thermal treatment processes on crop growth [J]. Processes, 2021, **9**(2), doi: 10.3390/pr9020276.
- [11] Nautiyal P, Subramanian K A, Dastidar M G. Adsorptive removal of dye using biochar derived from residual algae after in-situ transesterification; alternate use of waste of biodiesel industry [J]. Journal of Environmental Management, 2016, **182**: 187-197.
- [12] 陈友媛, 李培强, 李闲驰, 等. 苣荬生物炭对雨水径流中氨氮的吸附特性及吸附机制[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 274-282.
Chen Y Y, Li P Q, Li X C, *et al.* Effect of *Enteromorpha prolifera* biochar on the adsorption characteristics and adsorption mechanisms of Ammonia Nitrogen in rainfall runoff [J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 274-282.
- [13] Yang W C, Wang Z W, Song S, *et al.* Adsorption of copper (II) and lead (II) from seawater using hydrothermal biochar derived from *Enteromorpha* [J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, **149**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110586.
- [14] 陈友媛, 惠红霞, 卢爽, 等. 苣荬生物炭的特征及其对 Cr(VI) 的吸附特点和吸附机制[J]. 环境科学, 2017, **38**(9): 3953-3961.
Chen Y Y, Hui H X, Lu S, *et al.* Characteristics of *Enteromorpha prolifera* biochars and their adsorption performance and mechanisms for Cr(VI)[J]. Environmental Science, 2017, **38**(9): 3953-3961.
- [15] 单瑞峰, 宋俊瑶, 邓若男, 等. 不同类型生物炭理化特性及其对土壤持水性的影响[J]. 水土保持通报, 2017, **37**(5): 63-68.
Shan R F, Song J Y, Deng R N, *et al.* Physical and chemical properties of biochar produced from different materials and effect on soil water holding capacity [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, **37**(5): 63-68.
- [16] 吴海霞, 孙萍, 卢爽, 等. 苣荬生物炭促进土壤 Pb 固定并缓解植物 Pb 毒性[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(8): 3530-3538.
Wu H X, Sun P, Lu S, *et al.* *Enteromorpha prolifera* biochar promoted the immobilization of Pb in soil and reduced the phytotoxicity of Pb to *Vetiveria zizanioides* L. Nash [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(8): 3530-3538.
- [17] Liu X H, Zhang X C. Effect of biochar on pH of alkaline soils in the Loess Plateau; results from incubation experiments [J]. International Journal of Agricultural & Biology, 2012, **14**(5): 745-750.
- [18] Chintala R, Schumacher T E, McDonald L M, *et al.* Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures [J]. Clean-Soil, Air, Water, 2014, **42**(5): 626-634.
- [19] 代红翠, 陈源泉, 王东, 等. 生物炭对碱性砂质土壤小麦出苗及幼苗生长的影响[J]. 中国农业大学学报, 2018, **23**(4): 1-7.
Dai H C, Chen Y Q, Wang D, *et al.* Effect of biochar amendment on wheat emergence and seedling growth in alkaline soil[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, **23**(4): 1-7.
- [20] 夏阳. 生物炭对滨海盐碱植物生长及根际土壤环境的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
Xia Y. Impact of biochar-rhizosphere system on plant growth by affecting soil nutrient availability and microbial community in coastal saline soil [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [21] Song Y J, Zhang X L, Ma B, *et al.* Biochar addition affected the dynamics of ammonia oxidizers and nitrification in microcosms of a coastal alkaline soil [J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, **50**(2): 321-332.
- [22] Wu Y, Xu G, Shao H B. Furfural and its biochar improve the general properties of a saline soil [J]. Solid Earth, 2014, **5**(2): 665-671.
- [23] 许健. 生物炭对土壤水盐运移的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
Xu J. Study on the influence of biochar experimental on the migration of soil water and salt [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [24] 杨文娜, 邓正昕, 李娇, 等. 生物炭与化肥混合对氨挥发和磷固定的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 467-476.
Yang W N, Deng Z X, Li J, *et al.* Effect of biochar and chemical fertilizer mixture on ammonia volatilization and phosphorus fixation [J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 467-476.
- [25] 周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 等. 生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 914-921.
Zhou H H, Yuan X Y, Xiong Y T, *et al.* Effects of biochar input on changes of available nutrient elements in riparian soils with different landuse types [J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 914-921.
- [26] 罗东海, 王子芳, 龙翼, 等. 化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1286-1295.
Luo D H, Wang Z F, Long Y, *et al.* Effect of optimized fertilization and biochar application on phosphorus loss in purple soil sloping farmland [J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1286-1295.
- [27] 冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 等. 生物炭对土壤酶活和细菌群落的影响及其作用机制[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 422-432.
Feng H L, Xu C S, He H H, *et al.* Effect of biochar on soil enzyme activity & the bacterial community and its mechanism [J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 422-432.
- [28] 解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 等. 滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 1404-1412.
Xie X F, Pu L J, Wang Q Q, *et al.* Response of soil enzyme activities and their relationships with physicochemical properties to different aged coastal reclamation areas, Eastern China [J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 1404-1412.
- [29] Kołowski M, Charnas B, Skubiszewska-Zięba J, *et al.* Effect of biochar activation by different methods on toxicity of soil contaminated by industrial activity [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, **136**: 119-125.
- [30] 王才威, 张守玉, 杨东杰, 等. 木醋液制备及形成机理研究进展[J]. 化工进展, 2020, **39**(9): 3723-3738.
Wang C W, Zhang S Y, Yang D J, *et al.* Research advance in preparation and formation mechanism of wood vinegar [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, **39**(9): 3723-3738.

- 3723-3738.
- [31] Feng Y F, Li D T, Sun H J, *et al.* Wood vinegar and biochar co-application mitigates nitrous oxide and methane emissions from rice paddy soil: a two-year experiment [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **267**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115403.
- [32] Zhang Y C, Wang X, Liu B J, *et al.* Comparative study of individual and co-application of biochar and wood vinegar on blueberry fruit yield and nutritional quality [J]. *Chemosphere*, 2020, **246**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125699.
- [33] 张鑫, 张妍, 毕直磊, 等. 中国地表水硝酸盐分布及其来源分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1594-1606.
Zhang X, Zhang Y, Bi Z L, *et al.* Distribution and source analysis of nitrate in surface waters of China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1594-1606.
- [34] Xiao X, Chen B L, Zhu L Z. Transformation, morphology, and dissolution of silicon and carbon in rice straw-derived biochars under different pyrolytic temperatures [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(6): 3411-3419.
- [35] 陈友媛, 王翔宇, 吴海霞, 等. 浒苔生物炭对滨海盐碱土 Na^+ 的吸附迁移机制研究 [J]. *中国海洋大学学报*, 2019, **49**(S1): 85-92.
Chen Y Y, Wang X Y, Wu H X, *et al.* Adsorption and migration mechanism of *Enteromorpha prolifera* biochar on Na^+ in coastal saline-alkaline soil [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, **49**(S1): 85-92.
- [36] 张兴源, 单瑞峰, 孙小银, 等. 条浒苔与玉米秸秆热解特性及所制生物炭性质对比 [J]. *生态与农村环境学报*, 2016, **32**(5): 847-851.
Zhang X Y, Shan R F, Sun X Y, *et al.* Pyrolytic features of *Enteromorpha compressa* and *Zea mays* and comparison between their biochar products in property [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, **32**(5): 847-851.
- [37] 王凡, 屈忠义. 生物炭对盐渍化农田土壤的改良效果研究进展 [J]. *北方农业学报*, 2018, **46**(5): 68-75.
Wang F, Qu Z Y. Progress research on the improvement effect of biochar on salinized farmland soil [J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2018, **46**(5): 68-75.
- [38] Chi J, Liu H Y. Effects of biochars derived from different pyrolysis temperatures on growth of *Vallisneria spiralis* and dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments [J]. *Ecological Engineering*, 2016, **93**: 199-206.
- [39] Vaughn S F, Kenar J A, Tissierat B, *et al.* Chemical and physical properties of *Paulownia elongata* biochar modified with oxidants for horticultural applications [J]. *Industrial Crops and Products*, 2017, **97**: 260-267.
- [40] Schimmelpfennig S, Glaser B. One step forward toward characterization: some important material properties to distinguish biochars [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, **41**(4): 1001-1013.
- [41] 李帅霖, 王霞, 王朔, 等. 生物炭施用方式及用量对土壤水分入渗与蒸发的影响 [J]. *农业工程学报*, 2016, **32**(14): 135-144.
Li S L, Wang X, Wang S, *et al.* Effects of application patterns and amount of biochar on water infiltration and evaporation [J]. *Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(14): 135-144.
- [42] Sun H J, Feng Y F, Xue L H, *et al.* Responses of ammonia volatilization from rice paddy soil to application of wood vinegar alone or combined with biochar [J]. *Chemosphere*, 2020, **242**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125247.
- [43] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [44] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1983.
- [45] 屈忠义, 胡敏, 王丽萍, 等. 不同改良措施对盐渍化土壤水热碳与葵花产量的影响 [J]. *农业机械学报*, 2020, **51**(3): 268-275.
Qu Z Y, Hu M, Wang L P, *et al.* Effects of different improvement measures on hydrothermal carbon and sunflower yield in salinized soil [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, **51**(3): 268-275.
- [46] 唐晓倩. 木醋液和牛粪配施对盐碱土化学性质和微生物群落结构的影响 [D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
Tang X Q. Effect of pyrolytic acid co-applied with cow manure on chemical properties and microbial community structure in saline-alkali soil [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [47] 王凡. 生物炭与木醋液复配改良盐渍化农田作物生长及水土环境影响试验研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
Wang F. Study on the influence of water and soil environment and crop growth of the salinized farmland treated by the biochar with wood vinegar [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.
- [48] 张体彬, 康跃虎, 万书勤, 等. 滴灌枸杞对龟裂碱土几种酶活性的改良效应 [J]. *土壤学报*, 2015, **52**(6): 1392-1400.
Zhang T B, Kang Y H, Wan S Q, *et al.* Ameliorative effect of cropping *Lycium barbarum* L. with drip irrigation on soil enzymes activities in takyric solonch [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, **52**(6): 1392-1400.
- [49] 乔文静, 戴银月, 张伟, 等. 黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5687-5698.
Qiao W J, Dai Y Y, Zhang W, *et al.* Relationship between the vegetation community and soil nutrient and enzyme activity during the restoration of abandoned land in the Loess Hilly Region [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5687-5698.
- [50] 莫雪, 陈斐杰, 游冲, 等. 黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 895-904.
Mo X, Chen F J, Yu C, *et al.* Characteristics and factors of soil enzyme activity for different plant communities in Yellow River Delta [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 895-904.
- [51] 程虎, 王紫泉, 周琨, 等. 木醋液对碱性土壤微生物数量及酶活性的影响 [J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(2): 696-701.
Cheng H, Wang Z Q, Zhou K, *et al.* Effects of pyrolytic acid on quantity of microorganism and enzyme activity in alkaline soil [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(2): 696-701.
- [52] 程镜润, 陈小华, 刘振鸿, 等. 脱硫石膏改良滨海盐碱土的脱盐过程与效果实验研究 [J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(6): 1505-1513.
Cheng J R, Chen X H, Liu Z H, *et al.* The experimental study on the process and effect to the FGD-gypsum as an improvement in coastal saline-alkali soil [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(6): 1505-1513.
- [53] 郑复乐, 姚荣江, 杨劲松, 等. 改良材料对微咸水滴灌农田土壤盐分分布与离子组成的影响 [J]. *灌溉排水学报*, 2020, **39**(8): 60-71.
Zheng F L, Yao R J, Yang J S, *et al.* The effects of soil amendment with different materials on soil salt distribution and its ion composition under brackish-water drip irrigation [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, **39**(8): 60-71.
- [54] 张进红, 吴波, 王国良, 等. 生物炭对盐渍土理化性质和紫

- 花苜蓿生长的影响[J]. 农业机械学报, 2020, **51**(8): 285-294.
- Zhang J H, Wu B, Wang G L, *et al.* Effects and evaluation of biochar on physical-chemical properties of coastal saline soil and alfalfa growth [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, **51**(8): 285-294.
- [55] 张体彬, 康跃虎, 胡伟, 等. 宁夏银北地区龟裂碱土盐分特征研究[J]. 土壤, 2012, **44**(6): 1001-1008.
- Zhang T B, Kang Y H, Hu W, *et al.* Study on salinity characteristics of takyric solonetz in Ningxia Yinbei Region [J]. Soils, 2012, **44**(6): 1001-1008.
- [56] 崔丙健, 崔二苹, 胡超, 等. 生物质炭施用对再生水灌溉空心菜根际微生物群落结构及多样性的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5636-5647.
- Cui B J, Cui E P, Hu C, *et al.* Effects of selected biochars application on the microbial community structures and diversities in the rhizosphere of water spinach (*Ipomoea aquatica* Forssk.) irrigated with reclaimed water [J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5636-5647.
- [57] Simma B, Polthanee A, Goggi A S, *et al.* Wood vinegar seed priming improves yield and suppresses weeds in dryland direct-seeding rice under rainfed production [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2017, **37**(6), doi: 10.1007/s13593-017-0466-2.
- [58] Luo X X, Wang Z Y, Meki K, *et al.* Effect of co-application of wood vinegar and biochar on seed germination and seedling growth [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, **19**(12): 3934-3944.
- [59] Mungkumchao T, Kesmla T, Pimratch S, *et al.* Wood vinegar and fermented bioextracts: natural products to enhance growth and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) [J]. Scientia Horticulturae, 2013, **154**: 66-72.
- [60] Chen X, Yang S H, Ding J, *et al.* Effects of biochar addition on rice growth and yield under water-saving irrigation [J]. Water, 2021, **13**(2), doi: 10.3390/w13020209.
- [61] Dong D, Yang M, Wang C, *et al.* Responses of methane emissions and rice yield to applications of biochar and straw in a paddy field [J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, **13**(8): 1450-1460.
- [62] 常青, 王永亮, 杨治平, 等. 木醋液对土壤 pH、EC 与茄子叶片光合特性及根系发育的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, **36**(3): 322-328.
- Chang Q, Wang Y L, Yang Z P, *et al.* Effects of wood vinegar on soil pH, EC, and the photosynthetic characteristics of eggplant leaves and root development [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, **36**(3): 322-328.



CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China: Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sierozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)