

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM_{2.5} 浓度遥感反演 刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一(1513)

秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响 李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉(1520)

基于 GAM 模型的西安市 O₃ 浓度影响因素解析 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎(1535)

北京及周边 6 个城市大气 PM_{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征 朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕(1544)

典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析 李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤(1550)

成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析 王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛(1561)

天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响 姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖(1573)

涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响 吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正(1582)

典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤(1589)

中国地表水硝酸盐分布及其来源分析 张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦(1594)

中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险 杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇(1607)

小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析 范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟(1619)

浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征 马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖(1629)

三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系 米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴(1636)

骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子 张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军(1648)

拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系 王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁(1657)

基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升(1666)

岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析 赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航(1676)

巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应 李如忠, 王莉, 刘超(1684)

镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复 丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇(1692)

氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用 杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君(1700)

北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性 陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡(1709)

新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用 黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵娴, 冯华军(1716)

Ni 掺杂 Sb-SnO₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶 石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠(1725)

磁性 Fe₃O₄-CuO 非均相活化过碳酸钠降解 A07 徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅(1734)

赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星、性能和机制 史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟(1743)

工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响 张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜(1752)

污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性 陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇(1761)

改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性 毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆(1770)

A²/O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性 刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康(1779)

基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制 杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮(1787)

HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响 王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪(1794)

低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征 朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良(1801)

不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征 程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良(1808)

投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响 杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪(1816)

中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险 李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新(1825)

基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染 胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜(1838)

扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险 姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然(1847)

桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估 陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波(1855)

重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素 王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜(1864)

棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用 刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛(1871)

连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量 薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠(1880)

纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响 邓继宝, 张春来, 徐卫红(1888)

矿业废弃地复垦土壤-作物晒吸收特征及其对重金属拮抗效应 尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文(1904)

不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响 杨彩迪, 宗玉统, 卢升高(1914)

化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响 朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳(1921)

紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应 熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明(1930)

浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径 吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰(1941)

极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素 孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国(1950)

红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应 吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽(1960)

稻田土壤 N₂O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制 郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅(1968)

京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估 陈盼, 施晓清(1976)

中国城市工业化发展与 PM_{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制 李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波(1987)

《环境科学》征订启事(1618) 《环境科学》征稿简则(1635) 信息(1724, 1769, 1800)

浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径

吴丹¹, 孙萍¹, 路鹏展¹, 陈友媛^{1,2*}, 郭嘉梦¹, 刘明¹, 王磊³, 张彩杰⁴

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100; 3. 青岛市市政工程设计研究院有限责任公司, 青岛 266061; 4. 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 利用生物炭改善逆境土壤越来越受到人们关注, 浒苔生物炭用于滨海盐碱土修复, 不但可资源化利用浒苔, 还可提高滨海土地储备规模. 本文采用批量土壤培养的方法, 探索 0%~3% 添加量的浒苔生物炭对盐碱土壤改良的效果和途径. 结果表明, 适用于盐碱土壤改良的浒苔生物炭最佳制备温度为 400℃, 最适添加量为 1.5%; 最适添加量下, 浒苔生物炭虽提高土壤盐度(0.12%) 和 pH 值(1.49%), 产生负效应, 但同时降低土壤 Na^+/K^+ 55.73%, 增加矿物质元素 1 倍以上, 提高水分传导性能等正效应; 浒苔生物炭改善土壤理化及生物性质, 提高营养物质含量、增强微生物活性和改善土壤营养可利用性, 产生正效应, 表现为降低土壤容重 11.35%, 提高有机质 42.64%, 提高总碳与总磷中有机碳与有效磷占比 3.84 倍和 4.15 倍, 分别提升土壤蔗糖酶、脲酶及过氧化氢酶活性 2.39、1.18 和 1.50 倍. 因此, 浒苔生物炭对盐碱土的正效应多于负效应, 可用于滨海盐碱土改良. 本研究为浒苔的资源化利用及滨海盐碱区生态环境改善提供新的路径.

关键词: 浒苔生物炭; 盐碱土壤; 土壤营养; 土壤酶; 正效应; 负效应

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1941-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201909044

Effect and Approach of *Enteromorpha prolifera* Biochar to Improve Coastal Saline Soil

WU Dan¹, SUN Ping¹, LU Peng-zhan¹, CHEN You-yuan^{1,2*}, GUO Jia-meng¹, LIU Ming¹, WANG Lei³, ZHANG Cai-jie⁴

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Qingdao Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266061, China; 4. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The use of biochar to improve adversity of soil has received increasing attention. *Enteromorpha prolifera* biochar is used to repair coastal saline-alkali soil, which can not only utilize *Enteromorpha prolifera* but can also increase the scale of the coastal land reserve. In this study, the method of soil culture experiments was used to explore the effect and pathway of 0% - 3% addition of *Enteromorpha prolifera* on the improvement of saline-alkali soil. The results showed that the optimum preparation temperature of *Enteromorpha prolifera* biochar suitable for saline-alkali soil improvement was 400℃, and the optimum addition amount was 1.5%. At the optimum level, although the biochar had a negative effect, such as increasing soil salinity (0.12%) and pH (1.49%), it also produced positive effects, such as reducing soil Na^+/K^+ by 55.73%, increasing mineral content, and improving water conductivity. *Enteromorpha prolifera* biochar improved soil physicochemical and biological properties, increased nutrient content, enhanced microbial activity, improved soil nutrient availability, and produced positive effects. These positive effects were characterized by reducing soil bulk density by 11.35%, increasing organic matter by 42.64%, increasing the proportion of organic carbon in total carbon by 3.84 times, increasing the proportion of available phosphorus in total phosphorus by 4.15 times, and increasing soil invertase activity by 2.39 times, urease activity by 1.18 times, and catalase activity 1.50 times. Therefore, the positive effect of *Enteromorpha prolifera* biochar on saline-alkali soil is more than negative, and it can be used for the improvement of coastal saline-alkali soil. This study provides a new path for the resource utilization of *Enteromorpha prolifera* and the improvement of the ecological environment of coastal saline-alkali soil.

Key words: *Enteromorpha prolifera* biochar; saline-alkali soil; soil nutrients; soil enzymes; positive effect; negative effect

滨海地区经济发展迅速, 土地需求旺盛, 沿海盐碱地是潜在的后备土地资源^[1], 养分缺乏和盐胁迫严重限制了沿海土壤的生产力. 迫切需要减轻盐胁迫, 改善土壤性质, 提升滨海土壤环境的生态服务功能.

生物炭对逆境土壤的改善作用逐渐受到重视^[2,3]. 浒苔是在全球气候变化、水体富营养化等影响下滨海地区经常暴发的海洋大型海藻, 严重危害

海洋生态系统, 亟需资源化利用^[4]. 浒苔生物炭制备具备技术可行性^[5], 据研究大型藻类生物炭的 pH 值为 7.6~13.7^[6], 呈碱性. 且生物炭对土壤 pH 值

收稿日期: 2019-09-04; 修订日期: 2019-11-01

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2019MD033)

作者简介: 吴丹(1983~), 男, 博士后, 主要研究方向为滨海湿地生态修复, E-mail: 15953251500@139.com

* 通信作者, E-mail: youyuan@ouc.edu.cn

的影响存在差异, Fellet 等^[7]的研究发现施用 10% 生物炭时, 矿尾土的 pH 值由 8.1 增加到 10.2, 而 Liu 等^[8]认为施用碱性生物炭并不会增加土壤 pH 值. 那么, 明确浒苔生物炭是否会加重盐碱化程度是将其应用到滨海土壤修复的重要前提.

据报道, 向沿海盐渍土中添加低温生物炭 (300℃) 显著降低了土壤 pH 值和可交换钠质量分数^[9]. 对于微碱性土壤, 高温生物炭 (650℃) 施加量 10% 时导致较高的 pH 值, 但施加量 5% 可降低碱度^[10]. 可见热解温度影响生物炭电导率、pH 值等性质^[11], 施加量影响土壤改良效果及使用成本^[12]. 尽管温度对生物炭性质及施用量对土壤和作物的影响有较多研究^[13,14], 但是用于改良滨海盐碱土壤的浒苔生物炭最佳热解温度及最佳添加量仍不明确.

滨海地区受钠影响的土壤物理性质差, 如结构差, 导水率低, Na^+ 从土壤中阳离子交换位置置换 Ca^{2+} , 破坏黏土颗粒的聚集^[15]. 一般生物炭对土壤结构及营养的改善作用主要体现在其多孔隙结构可降低土壤容重, 大比表面可提供土壤微生物栖息地、提高土壤对氮肥等养分的吸持容量^[16,17], 强离子交换能力能保留养分、减少淋溶和气体损失、改善营养物质的可利用性^[18,19]. 但是浒苔生物炭对盐碱土壤的影响效果和途径仍不清晰.

本研究通过浒苔生物炭热解实验及土壤培养实

验, 明确不同热解温度下浒苔生物炭的理化性质和不同生物炭添加量对土壤盐碱含量、物理化学性质及生物性质的影响, 探索浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径. 主要达到以下 3 个目的: ①适用于改良滨海盐碱土的浒苔生物炭最佳制备温度及最适添加量; ②浒苔生物炭对盐碱土中盐离子含量及 pH 值的影响; ③浒苔生物炭对盐碱土物理、化学及生物性质的影响. 本研究结果为浒苔资源化利用提供有效途径, 以期为滨海盐碱地区盐渍土改良技术研究提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 实验材料

生物炭原材料为浒苔 (*Enteromorpha prolifera*), 绿藻纲, 石莼科. 浒苔粉购买于中国海洋大学生物科技有限公司. 实验前将浒苔粉用蒸馏水清洗数次后放置于 60℃ 烘箱中烘干备用.

供试土壤为山东省东营市滨海盐碱地区 (37°51'563"N, 119°00'290"E) 的表层土 (0~20 cm), 具体理化性质见表 1. 参照全国第二次土壤普查养分分级标准 (按全国统一划分的六级制分级), 有机质属第四级 (10~20 g·kg⁻¹), 全氮和有效磷属第六级 (全氮 < 0.5 g·kg⁻¹、有效磷 < 3 mg·kg⁻¹). 可见滨海盐碱土壤属盐碱含量高, 养分缺乏土壤.

表 1 供试土壤的基本性质¹⁾

Table 1 Basic properties of the tested soils

| 指标 | 参数值 | 指标 | 参数值 | 指标 | 参数值 |
|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|---------------------------------------|----------------|
| pH | 7.98 ± 0.07 | TC/g·kg ⁻¹ | 13.23 ± 0.16 | K ⁺ /mg·kg ⁻¹ | 290.34 ± 0.58 |
| 盐度/‰ | 6.00 ± 0.16 | 有机碳/g·kg ⁻¹ | 2.23 ± 0.11 | Na ⁺ /mg·kg ⁻¹ | 3595.73 ± 5.73 |
| 电导率/mS·cm ⁻¹ | 11.78 ± 0.54 | 有效磷/mg·kg ⁻¹ | 2.76 ± 0.11 | Ca ²⁺ /mg·kg ⁻¹ | 776.27 ± 7.30 |
| 容重/g·cm ⁻³ | 1.43 ± 0.02 | 全氮/g·kg ⁻¹ | 0.45 ± 0.21 | Mg ²⁺ /mg·kg ⁻¹ | 1545.2 ± 2.83 |
| 田间持水量/% | 42.40 ± 0.58 | 有机质/g·kg ⁻¹ | 11.62 ± 0.36 | 阳离子交换量/cmol·kg ⁻¹ | 3.22 ± 0.02 |

1) 数据为平均值 ± 标准偏差

1.2 实验方法

浒苔生物炭的制备采用限氧慢速热解法, 设定温度分别为 400℃ 和 600℃, 得到的生物炭分别标记为 BC400 和 BC600. 具体步骤为: 称取浒苔粉 70 g 于 200 mL 瓷坩埚中, 加盖后置于马弗炉, 升温 (升温速率 10℃·min⁻¹) 至设定温度, 停留 2 h, 自然冷却后依次称重、研磨、过筛 (0.6 mm)、漂洗、烘干 (60℃)、密闭备用.

生物炭作用于盐碱土壤的实验中所用实验容器为直径 7.5 cm、高 8.5 cm、容量为 300 mL 的螺旋盖杯, 每杯装 300 g 土 (以干土计). 设计浒苔生物炭添加量 (质量分数) 分别 0.0% (对照组)、1.0%、1.5%、2.0%、2.5% 和 3.0%, 共 6 个处理组, 每组 3 个平行. 保持每组土壤含水量为田间持水量的 60%,

自然光源, 温度保持在 20~30℃.

1.3 分析测定方法

生物炭表征指标的方法为: 采用 pH 计 (LA-pH10, HACH) 测 pH 值; 采用便携式电导率仪测电导率和盐度; 称重法测灰分的质量分数; 采用比表面积仪 (BET) (Autosorb-iQ3, USA) 测生物炭比表面积; 采用元素分析仪 (CHN, Vario ELIII, Elementar, Germany) 测生物炭的元素组成.

土壤指标测试方法: 在实验进行的第 10、30、60 和 120 d 分别用 10 mL 针筒垂直取样并充分混匀, 自然风干后进行土壤盐度和 pH 值的测量^[20,21]. 实验第 120 d 测定土壤中离子及营养物质含量, 其中采用乙酸铵-氢氧化铵交换-火焰光度法 (LY/T148-1999) 测量可交换钠含量^[22]; 采用离子色谱法

测量 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 含量^[23]; 采用元素分析仪 (Flash-2000 赛默飞世尔) 测量总碳和有机碳含量; 采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法 (HJ 704-2014) 测量有效磷含量^[24]; 采用靛酚比色法测量土壤脲酶活性; 采用高锰酸钾滴定法测量过氧化氢酶活性; 采用 3, 5-二硝基水杨酸 (DNS) 比色法测量蔗糖酶活性^[25]。

1.4 数据处理与分析

数据处理采用画图软件 Origin8.0 和统计软件 SPSS 16.0. 双因素方差分析比较各项测试指标在实验条件下的显著性差异, 显著性水平 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 浒苔生物炭制备温度优选

不同温度下浒苔生物炭基本性质见表 2. 浒苔生物炭在 400°C 时产率为 47.56%, 600°C 产率降低 4.92 个百分点. BC400 与 BC600 的灰分均在 40% 以上,

表 2 浒苔生物炭的基本性质

| 生物炭 | 产率 /% | 灰分 /% | pH | 电导率 / $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ | 比表面积 / $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ | 元素组成/% | | | | 原子比 | |
|-------|-------|--------------|--------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------|------|-------|------|-------|-------|
| | | | | | | C | H | O | N | O/C | H/C |
| BC400 | 47.56 | 44.68 ± 0.35 | 8.84 ± 0.16 | 11.78 ± 0.54 | 157.52 | 55.73 | 3.70 | 39.09 | 2.11 | 0.701 | 0.055 |
| BC600 | 42.64 | 56.70 ± 0.87 | 10.59 ± 0.09 | 12.11 ± 0.14 | 256.60 | 58.20 | 2.05 | 37.90 | 1.86 | 0.651 | 0.035 |

2.2 浒苔生物炭对滨海盐碱土壤盐碱度及离子含量的影响

2.2.1 盐度和 pH 值

浒苔生物炭 (400°C) 对滨海土壤盐度和 pH 值的影响见图 1. 随生物炭添加量升高, 盐度和 pH 值整体上呈轻微升高趋势. 随实验历时的延长, 相同添加量下盐度先升高后趋于稳定, pH 值先升高后降低再趋于稳定, 变化整体不显著. 实验周期内, 盐度比对照组增加 0.12% ~ 3.10%, pH 值增加 1.49% ~

BC600 高 12.02 个百分点. 随热解温度的升高, 浒苔生物炭的 pH 及电导率增大. 比表面积随热解温度升高而增大, BC600 为 BC400 的 1.74 倍. BC600 的 C 的质量分数比 BC400 高 2.47%, H、O 和 N 则均低于 BC400. BC400 的 H/C 和 O/C 均高于 BC600.

考虑生物炭的产率低时有机物质分解严重并增加生产成本^[26], 高 pH 值可能会加重土壤碱度和植物生长所受到的盐碱胁迫^[27]等因素, 结合热解温度越高, 生物炭含碳量、稳定性及固炭率降低等特点^[28], BC400 的产率、pH 值、电导率、元素组成及原子比等指标优于 BC600. 虽然 BC600 比表面积高于 BC400 约 1.63 倍, 但是 Vaughn 等^[29]的研究指出比表面积大于 $100\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 的生物炭即可作为土壤改良剂, 具有为土壤微生物提供良好的栖息环境, 提高对养分元素的吸持容量等作用^[30]. 因此, 本文选择 400°C 作为浒苔生物炭的生产温度, 探究 BC400 对滨海地区盐渍土的改良效果.

5.10%, 1.5% 处理组的盐度及 pH 值增加最小.

浒苔生物炭对土壤盐碱状态的影响程度决定其是否可用于盐渍土改良. 本研究中浒苔生物炭提升土壤盐度, 一方面因为生物炭自身的盐度, 另一方面生物炭表面吸附土壤盐离子达饱和后, 释放 Ca^{2+} 、 K^+ 和 Mg^{2+} 等离子导致盐度增加^[31], 但添加量低于 2% 时, 土壤盐度增加不显著. 对于 pH 值, 添加浒苔生物炭 30 d 后 pH 值降低可能与土壤中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等置换生物炭表面羧基 ($-\text{COOH}$) 上的质子 (H) 有

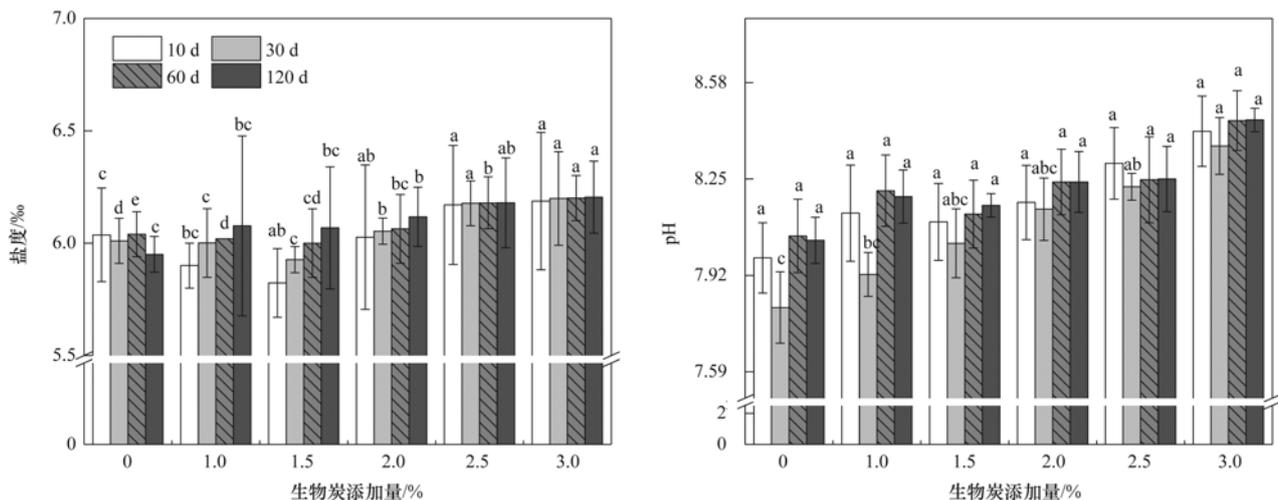


图 1 浒苔生物炭对滨海盐碱土壤盐度和 pH 值的影响

Fig. 1 Effect of *Enteromorpha prolifera* biochar on salinity and pH of coastal saline and alkali soil

关^[32],如果所能置换的质子饱和,生物炭本身的高pH则提高土壤pH值,但本研究中生物炭添加量不高,土壤是一个巨大的缓冲体系,pH值变化不显著($P < 0.05$).因此,浒苔生物炭存在增加土壤盐碱的负效应,但该作用轻微,可通过明确其对土壤物理化学及生物性质的作用,综合评估用于滨海盐碱土壤改良的可行性.

2.2.2 离子含量

浒苔生物炭对滨海盐碱土壤中离子含量的影响见图2.可交换钠含量随生物炭添加量增加而升高,但变化不显著.从1%处理组开始,每增加0.5%的生物炭,可交换钠提高2.82%、3.36%、9.86%和5.63%. Na^+ 含量随生物炭添加量增加而显著提高,相比对照组,各处理组依次提高14.15%、16.47%、29.12%、37.53%和42.83%,1.0%与1.5%的 Na^+ 含量无显著变化,2.0%处理组为1.5%处理组的1.12倍. K^+ 含量随生物炭添加量增加而显著升高,相比对照组,各处理组依次提高1.57、1.96、2.5、3.34倍和3.51倍. Na^+/K^+ 随生物炭添加量增加显著降低,相比对照组,1.5%的添加量可降低 Na^+/K^+ 55.73%.

2.5%的处理组降低 Na^+/K^+ 比例最高32.85%.

Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 含量随生物炭添加量的增加而显著增加.相比对照组, Mg^{2+} 含量分别提高1.18、1.30、1.40、1.54和1.58倍, Ca^{2+} 含量分别提高1.23、1.45、1.60、1.83和2.01倍.每增加0.5%生物炭,提高 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 含量比例最高的是生物炭添加量2.5%的处理组,分别提高13.69%和23.87%.

土壤可溶性钠含量可以反映土壤盐碱板结程度,只有可交换钠才能被植物根系吸收,使植物体受到胁迫,威胁植物生长^[33].本研究中实验周期120d内浒苔生物炭(添加量 $\leq 3\%$)不会显著增加土壤中可交换钠含量,说明植物受到的盐胁迫不会加重.虽然浒苔生物炭提高了 Na^+ 含量,但同时 K^+ 含量增加, Na^+/K^+ 显著降低,说明浒苔生物炭对土壤盐分增加起到一定的抑制效应,同时还会增加 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} ,提高土壤矿物质营养.

2.3 浒苔生物炭对滨海盐碱土壤物理化学性质的影响

2.3.1 容重和有机质

土壤培养120d后容重及有机质的变化见表3.

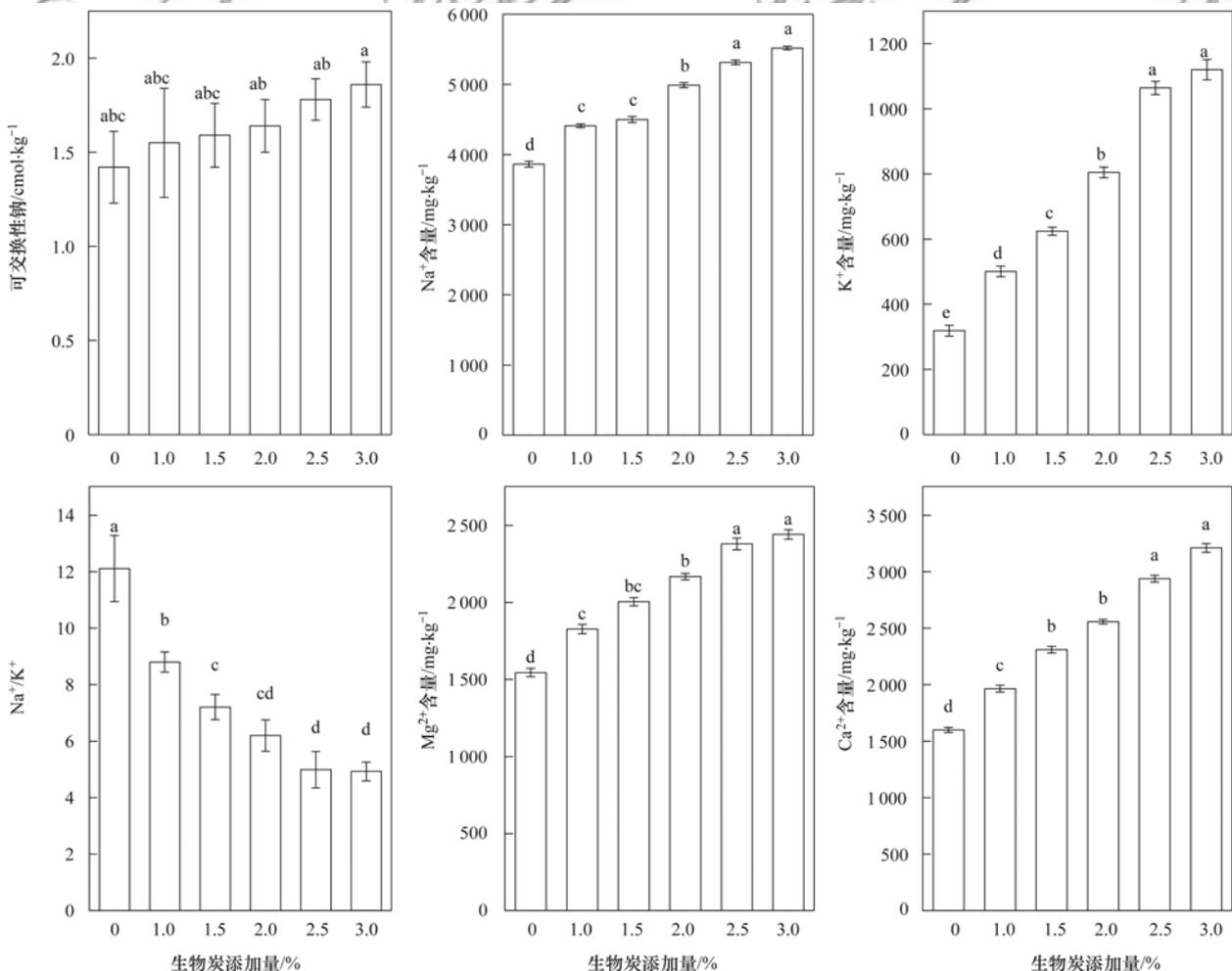


图2 浒苔生物炭对滨海盐碱土壤中离子含量的影响

Fig. 2 Effect of *Enteromorpha prolifera* biochar on ion content in coastal saline and alkali soil

生物炭的添加明显减小土壤容重 (8.51% ~ 21.28%), 且添加量越大越显著. 生物炭的添加明显增加土壤有机质含量, 与对照组相比, 处理组有机质含量增加 33.75% ~ 62.93%, 每增加 0.5% 生物炭, 有机质含量增加 3.89% ~ 6.64%, 1.5% 处理组增加的比重最高.

表 3 浒苔生物炭对滨海盐碱土壤容重和有机质的影响¹⁾

Table 3 Effect of *Enteromorpha prolifera* biochar on soil bulk density and organic matter of coastal saline and alkali soil

| 生物炭添加量 /% | 容重 /g·cm ⁻³ | 有机质含量 /g·kg ⁻¹ |
|-----------|---------------------------|----------------------------|
| 0.0 | 1.41 ± 0.06 ^a | 11.14 ± 0.39 ^d |
| 1.0 | 1.29 ± 0.01 ^b | 14.90 ± 0.45 ^c |
| 1.5 | 1.25 ± 0.01 ^c | 15.89 ± 0.59 ^{bc} |
| 2.0 | 1.22 ± 0.04 ^{cd} | 16.68 ± 0.72 ^{ab} |
| 2.5 | 1.19 ± 0.04 ^d | 17.47 ± 0.78 ^a |
| 3.0 | 1.11 ± 0.03 ^e | 18.15 ± 0.00 ^a |

1) 每个指标的同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

容重是土壤物理结构性质的重要指标^[34], 有研究表明粉砂壤土上施用 2.5% 的生物炭, 显著降低土壤容重 12.5%^[35], 本研究中施用 2.5% 浒苔生物炭降低滨海盐碱土壤容重 15.6%, 使土壤形成疏松结构, 降低土壤板结程度, 更有利于土壤营养的释放和养分的保留^[36,37]. 而且浒苔生物炭作为结构高度芳香化的富碳物质, 具有极强的吸附能力, 能够把土壤中小有机分子吸附聚合成有机质^[38], 显著提升了土壤有机质含量. 总之浒苔生物炭对滨海盐碱土壤的营养状态影响呈正效应, 这将在土壤中碳及磷营养元素含量变化的结果中进一步得到验证.

2.3.2 碳与磷

浒苔生物炭对土壤中碳和磷元素的影响见图 3. 随生物炭添加量的增加, 总碳、总有机碳含量及总碳中有机碳占比均显著升高. 各处理组总碳含量比对照组提升 42.04%、64.08%、88.06%、116.71% 和 140.67%, 总有机碳含量是对照组的 4.39、

6.29、8.08、10.58 和 12.31 倍. 总碳中有机碳占比高于对照组 22.05% ~ 43.38%, 其中, 1.5% 处理组提升幅度最大 (较 1.0% 处理组提升 7.84%). 添加生物炭显著提升总磷及有效磷含量, 且生物炭添加量与总磷中有效磷占比呈显著正相关 ($P < 0.05$). 相比对照组, 各处理组总磷提升 3.33%、7.49%、16.71%、18.44% 和 21.51%. 添加生物炭可提高有效磷含量 3.11 ~ 9.65 倍. 有效磷占比平均提高 5.42 倍, 每增加 0.5% 生物炭, 有效磷占比平均提升 1.23 倍.

土壤碳元素是评价土壤养分及肥力高低的重要指标. 本研究中浒苔生物炭在土壤中 120 d 后, 有机碳稳定性上升, 与本文结果类似, Bhaduri 等^[39]的研究发现添加花生壳生物炭显著提高盐渍土中有机碳含量, 这可能与有机碳矿化量减少有关. 磷是植物生长所必需的大量养分元素. 本研究中浒苔生物炭能够显著提高盐碱土中有效磷含量, 一方面与浒苔生物炭丰富的孔隙体积、大比表面积影响磷的化学行为和有效性有关^[40], 另一方面与生物炭提高土壤中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量 (图 2), 改变有机质含量 (表 3) 有关^[41]. 因此, 浒苔生物炭对滨海盐碱土壤物理化学性质的影响呈正效应, 促进土壤营养积累.

2.4 浒苔生物炭对滨海盐碱土壤生物性质的影响

浒苔生物炭对土壤中蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶活性的影响见图 4. 生物炭的添加导致土壤蔗糖酶及脲酶活性升高, 蔗糖酶活性依次为对照组的 1.39、2.39、3.71、4.27 和 5.68 倍, 脲酶活性依次为对照组的 1.10、1.18、1.23、1.34 和 1.43 倍. 1% 处理组蔗糖酶及脲酶活性升高均不显著, 每增加 0.5% 生物炭, 蔗糖酶及脲酶活性平均分别提高 1.07 和 0.08 倍, 且 1.5% 处理组与 3.0% 组对脲酶活性的提高倍数相当. 土壤过氧化氢酶活性随生物炭的增加呈先升高后降低趋势, 在 1.5% 处理组达

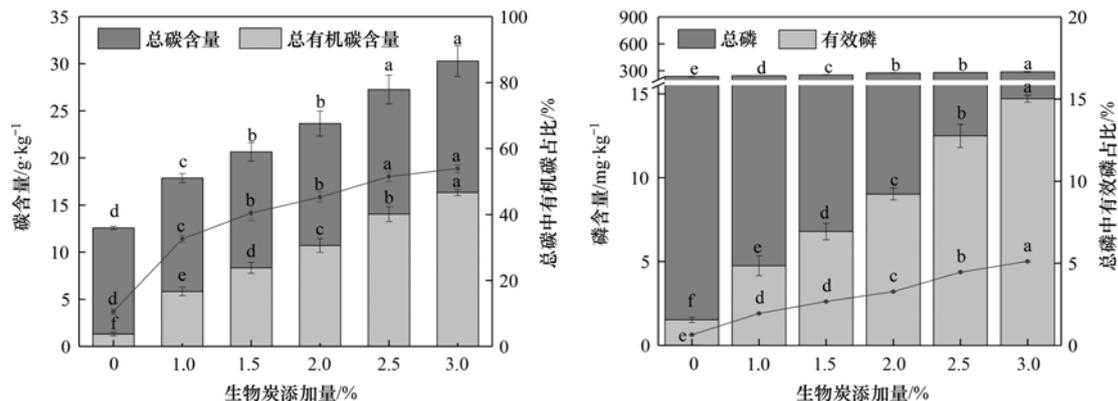


图 3 浒苔生物炭对滨海盐碱土壤中碳与磷元素的影响

Fig. 3 Effect of *Enteromorpha prolifera* biochar on carbon and phosphorus in coastal saline and alkali soil

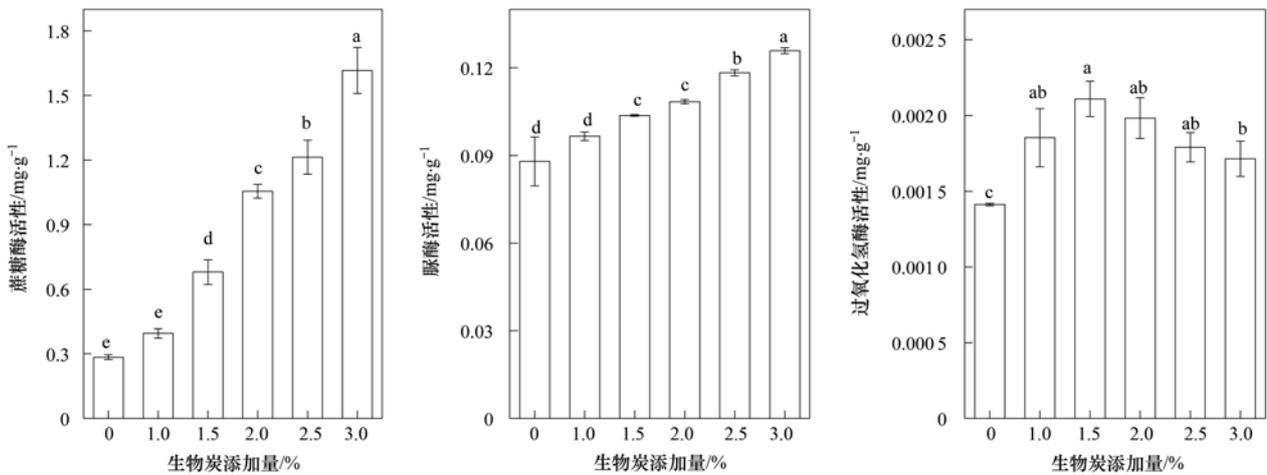


图4 浒苔生物炭对滨海盐碱土壤酶活性的影响

Fig. 4 Effect of *Enteromorpha prolifera* biochar on enzyme activity in coastal saline and alkali soil

最高值,为对照组的1.50倍。

土壤酶主要来源于微生物,特别是蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶,其中蔗糖酶及脲酶对增加土壤中易溶性营养物质起重要作用,与土壤微生物数量及土壤呼吸强度有重要关系,能够反映土壤肥力水平,过氧化氢酶促进土壤中过氧化氢的分解,防止它对生物体的毒害作用。本研究中浒苔生物炭添加量1.5%,实验120 d时蔗糖酶和脲酶活性显著提升,过氧化氢酶活性达最高,说明浒苔生物炭可释放土壤中的微生物所需营养物质^[42],对微生物生长、活性和多样性产生不利影响较小^[43,44],对土壤肥力提高产生正效应。

3 浒苔生物炭改善滨海盐碱土壤的效果及途径

3.1 浒苔生物炭最佳添加量

本研究中浒苔生物炭添加量为1.5%时,对土壤的有机质、有机碳占比和过氧化氢酶活性这3个指标的影响最显著;添加量为2.0%时对总磷的影响最显著;添加量为2.5%时对总碳、总有机碳、有效磷、有效磷占比、 Na^+/K^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 等指标的影响效果最好。生物炭如秸秆生物炭作为土壤改良剂使用时需要考虑制备、能源消耗及人工等成本^[45],魏永霞等^[46]的研究发现提高玉米产量的生物炭最佳施用模式为连续3 a 施加 $35.63 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (1.5%)。而且,Jiang等^[47]的研究发现1~5%的生物炭施用量对土壤微生物的生长和土壤碳存储最为有益。周凤等^[48]的大田实验研究表明生物炭添加量必须控制在合理的范围内(约1.0%),添加量过高则对土壤微生物的代谢活性及丰富度指数等产生不良影响。本研究初步估计每增加0.5%的生物炭可能需要增加1/3的成本^[49],但是浒苔生物炭用于农业方面还处于研究阶段,没有形成市场,无法得知市

场价格,鉴于浒苔原材料易得,作为生物炭回用于土壤改良具有显著的环境效益,是值得期待的。因此,综合考虑浒苔生物炭添加量适宜控制在1.5%,可达到对盐碱土壤性质改善及营养调整的作用。

3.2 浒苔生物炭改善滨海盐碱土壤的正负效应平衡

浒苔生物炭对滨海盐碱土壤的物理化学及生物性质的影响效应分负效应与正效应,各效应的影响途径不同,见图5。本研究中浒苔生物炭本身阳离子交换量较高,电导率较高,加入土壤后产生叠加作用,提高土壤盐碱含量,但提升幅度较小,随着加入时间的延长,对土壤的负效应逐渐得到抵消。主要抵消途径有二:其一,浒苔生物炭改善土壤孔隙度和水力传导率,加速盐的浸出^[50],而且生物炭表面吸附钠盐或细孔对盐的物理截留,降低了盐浓度,同时生物炭覆盖减少蒸发,导致表层土壤中盐分积累减少^[51];其二,土壤溶液的高盐度将吸附的阳离子推向更接近土壤颗粒表面,将土壤团聚体保持在一起,增加了土壤絮凝作用^[52],保持良好的孔隙度,提高受盐害土壤的空气和水分传导性能^[53]。

浒苔生物炭对盐碱土壤的正效应主要表现为降低土壤容重,增加有机质、有机碳、总碳、有效磷、总磷及钾营养含量(图5)。首先,通过改善土壤物理化学性质,浒苔生物炭缓慢释放的有机物质能够结合多价阳离子和黏土颗粒,改善受盐影响土壤的板结状态^[54],增加土壤中水稳定性聚集体,改善土壤结构,减少淋溶和气体损失^[55],改善营养物质的可利用性,增加土壤营养^[56,57];其次,改善盐碱土壤生物性质,增强土壤中微生物活动,影响土壤中的C和N循环,改善土壤营养状况^[58]。

4 结论

浒苔生物炭可用于改良滨海盐碱土壤,最适制

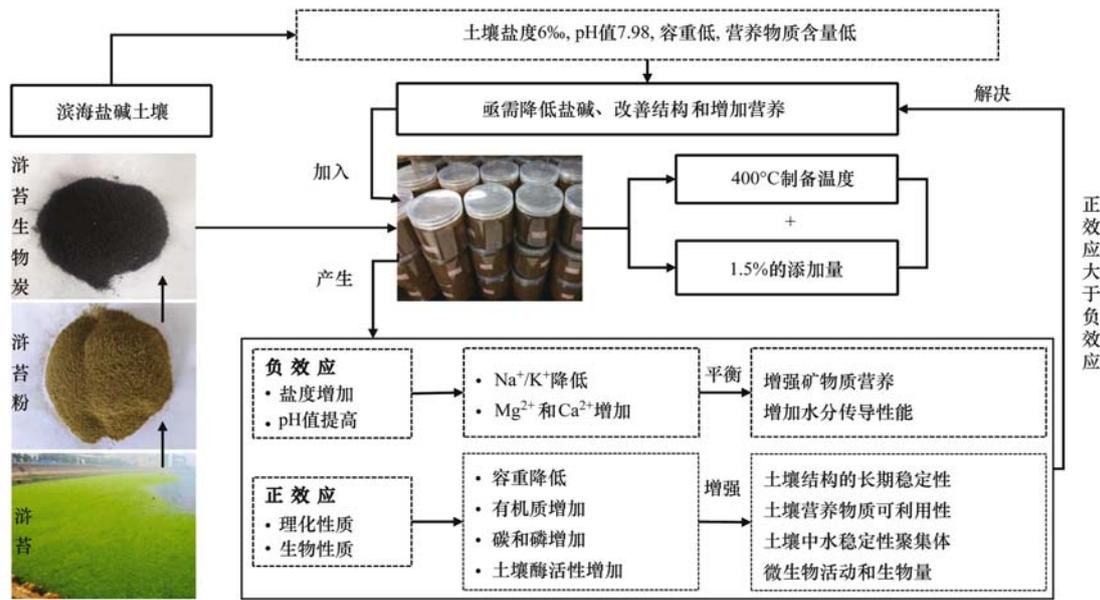


图5 浒苔生物炭对滨海盐碱土壤结构与营养的影响效应

Fig. 5 Effect of *Enteromorpha prolifera* biochar on the structure and nutrition of coastal saline and alkali soil

备温度 400℃, 最佳添加量为 1.5%。浒苔生物炭对盐碱土的改良效应表现为负效应和正效应。负效应为轻微增加土壤盐碱含量, 但是 Na^+/K^+ 降低和 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 的增加促进土壤絮凝作用, 增加土壤水分传导性能, 负效应表达不显著; 正效应为提高土壤营养物质含量, 改善土壤营养物质可利用性, 增加土壤结构的长期稳定性, 增强微生物活动。总之, 浒苔生物炭对滨海地区盐碱土营养状态的影响效应整体上为正效应, 可进行推广应用。

参考文献:

- [1] Luo X X, Liu G C, Xia Y, *et al.* Use of biochar-compost to improve properties and productivity of the degraded coastal soil in the Yellow River Delta, China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, **17**(3): 780-789.
- [2] Awad Y M, Lee S E, Ahmed M B M *et al.* Biochar, a potential hydroponic growth substrate, enhances the nutritional status and growth of leafy vegetables [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **156**: 581-588.
- [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] 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.
- [5] 陈友媛, 惠红霞, 卢爽, 等. 浒苔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.
- [6] Kołtowski 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.
- [7] Fellet G, Marchiol L, Delle V G, *et al.* Application of biochar on mine tailings: Effects and perspectives for land reclamation [J]. *Chemosphere*, 2011, **83**(9): 1262-1267.
- [8] 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 and Biology*, 2012, **14**(5): 745-750.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Ahmad M, Rajapaksha A U, Lim J E, *et al.* Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review [J]. *Chemosphere*, 2014, **99**: 19-33.
- [12] 陈芳, 张康康, 谷思诚, 等. 不同种类生物质炭及施用量对水稻生长及土壤养分的影响 [J]. *华中农业大学学报*, 2019, **38**(5): 57-63.
Chen F, Zhang K K, Gu S C, *et al.* Effects of kinds and application rates of biochar on rice growth and soil nutrients [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2019, **38**(5): 57-63.
- [13] Roberts D A, Paul N A, Dworjanyn S A, *et al.* Biochar from commercially cultivated seaweed for soil amelioration [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 9665.
- [14] Yu K L, Lau B F, Show P L, *et al.* Recent developments on algal biochar production and characterization [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **246**: 2-11.
- [15] Flowers T J, Colmer T D. Salinity tolerance in halophytes [J]. *New Phytologist*, 2008, **179**(4): 945-963.
- [16] 王一宇, 王圣森, 戴九兰. 生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响 [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.
- [17] Warde D A, Nilsson M C, Zackrisson O. Fire-derived charcoal causes loss of forest humus [J]. *Science*, 2008, **320**(5876): 629.
- [18] Hammer E C, Forstreuter M, Rillig M C *et al.* Biochar increases arbuscular mycorrhizal plant growth enhancement and ameliorates salinity stress [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, **96**: 114-121.
- [19] Mia S, Dijkstra F A, Singh B. Long-term aging of biochar: a molecular understanding with agricultural and environmental implications [J]. *Advances in Agronomy*, 2017, **141**: 1-51.
- [20] Rahul D, Meena R S, Pathan S I, *et al.* Carbon and Nitrogen Cycling in Soil [M]. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020.
- [21] 冯棣, 张俊鹏, 孙池涛, 等. 长期咸水灌溉对土壤理化性质和土壤酶活性的影响 [J]. *水土保持学报*, 2014, **28**(3): 171-176.
- Feng L, Zhang J P, Sun C T, *et al.* Effects of long-term irrigation with saline water on soil physical-chemical properties and activities of soil enzyme [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **28**(3): 171-176.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [23] 贺华, 达莉芳, 尤斌. 离子色谱法同时测定土壤中可溶性 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} [J]. *干旱环境监测*, 2011, **25**(3): 181-183.
- He H, Da L F, You B. Determination on Soluble Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} in soil by ion chromatography [J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2011, **25**(3): 181-183.
- [24] HJ 704-2014, 土壤有效磷的测定 碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法 [S].
- [25] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [26] Jin J W, Li Y N, Zhang J Y, *et al.* Influence of pyrolysis temperature on properties and environmental safety of heavy metals in biochars derived from municipal sewage sludge [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, **320**: 417-426.
- [27] Zheng H, Wang Z Y, Deng X, *et al.* Characteristics and nutrient values of biochars produced from giant reed at different temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **130**: 463-471.
- [28] Jie C, 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.
- [29] Vaughn S F, Kenar J A, Tisserat 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.
- [30] 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.
- [31] Thomas S C, Frye S, Gale N, *et al.* Biochar mitigates negative effects of salt additions on two herbaceous plant species [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, **129**: 62-68.
- [32] Chen Z M, Xiao X, Chen B L, *et al.* Quantification of chemical states, dissociation constants and contents of oxygen-containing groups on the surface of biochars produced at different temperatures [J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, **49**(1): 309-317.
- [33] 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.
- [34] Laird D A, Fleming P, Davis D D, *et al.* Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil [J]. *Geoderma*, 2010, **158**(3-4): 443-449.
- [35] Eastman C M. Soil physical characteristics of an aerice ochraqualf amended with biochar [D]. Columbus: Ohio State University, 2011.
- [36] Smider B, Singh B. Agronomic performance of a high ash biochar in two contrasting soils [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **191**: 99-107.
- [37] Lehmann J, Joseph S. *Biochar for Environmental Management* [M]. London: Earthscan, 2009.
- [38] 马莉, 吕宁, 冶军, 等. 生物炭对灰漠土有机碳及其组分的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2012, **20**(8): 976-981.
- Ma L, Lu N, Ye J, *et al.* Effects of biochar on organic carbon content and fractions of gray desert soil [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, **20**(8): 976-981.
- [39] Bhaduri D, Saha A, Desai D, *et al.* Restoration of carbon and microbial activity in salt-induced soil by application of peanut shell biochar during short-term incubation study [J]. *Chemosphere*, 2016, **148**: 86-98.
- [40] 张瑞. 生物炭对滨海盐碱土壤理化特性和小白菜生长的影响研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- Zhang R. Effects of biochar on coastal saline soil physicochemical properties and Pakchoi growth [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [41] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2014, **29**(1): 68-79.
- Wu Y, Xu G, Lü Y C, *et al.* Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties: Current status and knowledge gaps [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, **29**(1): 68-79.
- [42] 周震峰, 王建超, 饶潇潇. 添加生物炭对土壤酶活性的影响 [J]. *江西农业学报*, 2015, **27**(6): 110-112.
- Zhou Z F, Wang J C, Rao X X. Impact of adding biochar on enzyme activity in soil [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2015, **27**(6): 110-112.
- [43] Egamberdieva D, Renella G, Wirth S, *et al.* Secondary salinity effects on soil microbial biomass [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, **46**(5): 445-449.
- [44] Saifullah, Dahlawi S, Naem A, *et al.* Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **625**: 320-335.
- [45] 吴昱, 赵雨森, 刘慧, 等. 秸秆生物炭对黑土区坡耕地生产能力影响分析与评价 [J]. *农业机械学报*, 2017, **48**(7): 247-256.
- Wu Y, Zhao Y S, Liu H, *et al.* Analysis and evaluation of influence of straw biochar on soil productivity of sloping land in black soil region [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, **48**(7): 247-256.
- [46] 魏永霞, 冯超, 石国新, 等. 黑土区坡耕地连年施加生物炭条件下生物炭最佳施用模式 [J]. *农业机械学报*, 2019, **50**(10): 269-277.
- Wei Y X, Feng C, Shi G X, *et al.* Optimal application mode of

- biochar under the application of biochar in sloping farmland in black soil area [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, **50**(10): 269-277.
- [47] Jiang X Y, Deneff K, Stewart C E, *et al.* Controls and dynamics of biochar decomposition and soil microbial abundance, composition, and carbon use efficiency during long-term biochar-amended soil incubations [J]. Biology and Fertility of Soils, 2016, **52**(1): 1-14.
- [48] 周凤, 耿增超, 许晨阳, 等. 生物炭用量对(土娄)土微生物量及碳源代谢活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, **25**(8): 1277-1289.
Zhou F, Geng Z C, Xu C Y, *et al.* Effect of biochar addition on soil microbial biomass and metabolic activities of carbon sources in Lou soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, **25**(8): 1277-1289.
- [49] Clare A J. Economic and environmental potential of biochar: A “win-win” solution for China’s straw? [D]. Edinburgh: The University of Edinburgh, 2015.
- [50] Yue Y, Guo W N, Lin Q M, *et al.* Improving salt leaching in a simulated saline soil column by three biochars derived from rice straw (*Oryza sativa* L.), sunflower straw (*Helianthus annuus*), and cow manure [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, **71**(6): 467-475.
- [51] Akhtar S S, Andersen M N, Naveed M, *et al.* Interactive effect of biochar and plant growth-promoting bacterial endophytes on ameliorating salinity stress in maize [J]. Functional Plant Biology, 2015, **42**(8): 770-781.
- [52] Quirk J P. The significance of the threshold and turbidity concentrations in relation to sodicity and microstructure [J]. Soil Research, 2001, **39**(6): 1185-1217.
- [53] Barbour S L. Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: The soil-water characteristic curve: a historical perspective [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **35**(5): 873-894.
- [54] Yazdanpanah N, Mahmoodabadi M, Cerdà A. The impact of organic amendments on soil hydrology, structure and microbial respiration in semiarid lands [J]. Geoderma, 2016, **266**: 58-65.
- [55] Kanthle A K, Lenka N K, Lenka S, *et al.* Biochar impact on nitrate leaching as influenced by native soil organic carbon in an inceptisol of central India [J]. Soil and Tillage Research, 2016, **157**: 65-72.
- [56] Abbas T, Rizwan M, Ali S, *et al.* Effect of biochar on alleviation of cadmium toxicity in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown on Cd-contaminated saline soil [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(26): 25668-25680.
- [57] Kim H S, Kim K R, Yang J E, *et al.* Effect of biochar on reclaimed tidal land soil properties and maize (*Zea mays* L.) response [J]. Chemosphere, 2016, **142**: 153-159.
- [58] Yuan Z M, Liu H J, Han J, *et al.* Monitoring soil microbial activities in different cropping systems using combined methods [J]. Pedosphere, 2017, **27**(1): 138-146.



CONTENTS

| | |
|--|--|
| PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning | LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513) |
| Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities | LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520) |
| Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models | HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535) |
| Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities | ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544) |
| Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period | LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550) |
| Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu | WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561) |
| Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer | YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1573) |
| Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry | WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582) |
| Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants | DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589) |
| Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China | ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594) |
| Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea | YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607) |
| Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaqing River Estuary in Recent Ten Years | FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619) |
| Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province | MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629) |
| Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir | MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636) |
| Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province | ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648) |
| Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland | WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657) |
| Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir | ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666) |
| Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake | ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676) |
| Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone | LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684) |
| Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar | DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692) |
| Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments | YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700) |
| Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing | CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709) |
| 3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment | HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716) |
| Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode | SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725) |
| Degradation of AO7 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System | XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734) |
| Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism | SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743) |
| Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation | ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752) |
| Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue | CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761) |
| Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II) | BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770) |
| Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System | LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779) |
| Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants | YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787) |
| Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor | WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794) |
| Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment | ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801) |
| Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs | CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808) |
| Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge | YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816) |
| Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities | LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825) |
| Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests | HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838) |
| Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China | YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847) |
| Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi | CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855) |
| Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing | WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864) |
| Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar | LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871) |
| Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer | XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880) |
| Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil | DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888) |
| Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals | YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904) |
| Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland | YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914) |
| Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field | ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921) |
| Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw | XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930) |
| Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil | WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941) |
| Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert | MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950) |
| Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation | LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960) |
| Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities | GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968) |
| Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei | CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976) |
| Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC | LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987) |