

目次

加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例	杨玺, 孙奕生, 常世彦, 李胜悦, 郑昊天, 王书肖, 张希良 (3627)
基于不同电力需求的中国减排降碳协同增效路径	向梦宇, 王深, 吕连宏, 张楠, 白梓函 (3637)
城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用	张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏, 阳平坚 (3649)
基于可解释性机器学习的城市 O ₃ 驱动因素挖掘	董佳奇, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 张辉辉, 牛月圆, 段小琳 (3660)
基于响应曲面法的臭氧生成敏感性分析	朱禹寰, 陈冰, 张雅茹, 刘晓, 李光耀, 舍静, 陈强 (3669)
基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O ₃ 来源解析	王伊凡, 仝纪龙, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天 (3676)
基于轻量级梯度提升机的南京大气臭氧浓度预测	朱珈莹, 安俊琳, 冯悦政, 贺婕, 张玉欣, 王俊秀 (3685)
2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析	李婷苑, 陈靖扬, 龚宇, 沈劲 (3695)
夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响	杜楠, 陈磊, 廖宏, 朱佳, 李柯 (3705)
气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018~2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别	杨俊, 杨雷峰, 丁华, 谢丹平, 刘妍妍, 余涛, 吕明, 袁自冰 (3715)
2000~2021 年成渝城市群 PM _{2.5} 时空变化及驱动机制多维探测	徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷 (3724)
基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 PM _{2.5} 小时浓度估算	吴迪, 杜宁, 王莉, 吴宇宏, 张少磊, 周彬, 张显云 (3738)
2013~2021 年邢台 PM _{2.5} 重污染过程输送和增长特性	江琪, 盛黎, 靳雨晨, 王继康, 尤媛, 王飞 (3749)
基于高分辨率在线观测数据分析上海市城区秋冬季大气有机气溶胶化学特征及污染来源	朱书慧 (3760)
机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征	于鸣媛, 王谦, 付明亮, 戈畅, 谢峰, 曹芳, 章炎麟 (3771)
沈阳工业区夏季 VOCs 组成特征及其对二次污染形成的贡献	关璐, 苏枫枫, 库盈盈, 胡建林, 于兴娜 (3779)
疫情管控期间深圳市城区 VOCs 的变化特征及减排效果评估	云龙, 林楚雄, 李成柳, 邱志诚, 古添发, 李光程, 张明棣, 郭健锋 (3788)
西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势	王擎雯, 陈庆彩, 王超, 王瑞鹤, 刘国瑞, 李豪, 李艳广 (3797)
淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价	徐振鹏, 钱雅慧, 洪秀萍, 罗钟庚, 高秀龙, 梁汉东 (3809)
雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应	王子铭, 杨丽虎, 宋献方 (3820)
流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法:以铜陵市顺安河流域为例	刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶 (3835)
南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化	郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞 (3846)
闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析	杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 苏文旭, 卢方园, 郝玉胜 (3855)
金沙江丰富类和稀有类浮游真核微生物的分布特征与影响因素	燕炳成, 崔戈, 孙胜浩, 王沛芳, 王超, 吴程, 陈娟 (3864)
嘉陵江不同干扰断面河道沉积物细菌群落多样性	竹兰萍, 张拓, 李佳宁, 王佳颖, 郭伟亮, 徐飞, 张富斌 (3872)
水库水深变化对不同浮游微生物群落及网络互作关键种的影响	王洵, 廖琴, 王沛芳, 袁秋生, 胡斌, 邢小蕾, 徐浩森 (3881)
典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探	吴建强, 张书源, 王敏, 陈敏, 叶文娟, 熊丽君, 黄沈发 (3892)
太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响	俞映倬, 王逸之, 杨根, 杨林章, 段婧婧, 韩雪梅, 薛利红 (3902)
基于机器学习的长江流域农田氮径流流失负荷估算	张有福, 潘哲祺, 陈丁江 (3913)
千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别	俞珂, 严璇, 唐张轩, 张方方, 何圣嘉, 姜培坤 (3923)
沱江和涪江水系干支流氮磷营养盐的空间分布特征	李子阳, 周明华, 徐鹏, 陈露, 刘祥龙, 林洪羽, 江南, 任兵, 张博文 (3933)
外秦淮河底泥污染及疏浚效果	张沐, 任增谊, 张曼, 赵琼, 尹洪斌 (3945)
新污染物多环芳烃衍生物的来源、分布与光化学行为	葛林科, 王子宇, 曹胜凯, 车晓佳, 朱超, 张蓬, 马宏瑞 (3957)
镉砷在针铁矿界面共吸附的相互作用机制	苏子贤, 刘赛红, 管玉峰, 陶亮 (3970)
环糊精键合 Fe-TAML 催化剂的制备及其活化 H ₂ O ₂ 氧化水中有机微污染物	刘清泉, 蔡本哲, 蔡喜运 (3978)
Co(II) 活化过一硫酸盐降解氨基三甲膦酸的性能及反应机制	朱敬林, 汪舒 (3990)
微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征	谢晴帆, 俞楠, 张妮, 谢周云, 单珂欣, 吴亦馨, 唐力, 夏静芬, 杨国靖 (3997)
中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价	王静, 魏恒, 潘波 (4006)
渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价	蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸 (4017)
基于 PMF 模型的农田土壤重金属源暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例	方嘉, 何影, 黄乃涛, 支裕优, 傅伟军 (4027)
乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价	范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 于芸云江·吗米提敏, 阿不都艾尼·阿不里, 谢宣宣, 古丽斯坦·阿不都拉, 刘河疆 (4039)
荒漠绿洲土壤抗生素抗性基因分布特征及驱动机制	黄福义, 周曙仡, 苏建强, 朱永官 (4052)
近 15 年我国土壤抗生素污染特征与生物修复研究进展	赵晓东, 乔青青, 秦宵睿, 李晓晶, 李永涛 (4059)
改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展	吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅 (4077)
沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响:Meta 分析	赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 熊海灵, 朱康文, 陈玉成 (4091)
两种铁改性生物炭对微碱性砷镉污染土壤的修复效果	梁欣冉, 何丹, 郑墨华, 付庆灵, 胡红青, 朱俊 (4100)
秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响	王子钰, 周航, 周坤华, 谭文韬, 蒋毅, 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4109)
秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质	赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 王丽, 赵英 (4119)
基于环境 DNA 的复合污染土壤生物评价和胁迫诊断	黄湘云, 钟文军, 刘训杰, 毕婉娟, 钱林皓, 张效伟 (4130)
地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (4142)
浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险	张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 邓美华 (4151)
生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响	刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐 (4162)
低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响	周颖, 蒋文婷, 刘训悦, 朱高荻, 唐荣贵, 章海波, 蔡延江 (4170)
沼液施用对麦茬口期土壤微生物群落结构特征及功能的影响	乔宇颖, 奚辉, 李娜, 陈喜靖, 沈阿林, 喻曼 (4179)
大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征	刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲 (4191)
马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤有机碳组分和碳转化酶活性的影响	姚智, 焦鹏宇, 吴晓生, 严强, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (4201)
《环境科学》征订启事(3648) 《环境科学》征稿简则(3659) 信息(3714, 4150, 4178)	

生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响

刘鑫裕, 王冬梅*, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 生物炭作为一种既能单独施用, 又能与化肥共同施用的土壤改良剂, 在农业生产实践中被广泛施用. 然而, 关于不同粒径生物炭与磷肥联合施用对土壤和植物的影响研究较少. 采用盆栽试验, 研究在两个磷水平下, 不同粒径生物炭对土壤养分、酶活性以及紫花苜蓿养分吸收的影响[生物炭根据直径分为: C1 (>1 mm) 和 C2 (<0.01 mm) 这两种处理]. 结果表明, 生物炭和磷联合施用显著提高了土壤养分、酶活性和苜蓿养分吸收; 其中, C2 处理显著提高了土壤有效磷含量 ($P < 0.05$) 和磷酸酶活性 ($P < 0.01$), 而 C1 处理对铵态氮、硝态氮、脲酶和过氧化氢酶活性有显著影响 ($P < 0.05$). 并且, 不同粒径生物炭处理间的养分及酶的差异受到土壤磷水平的影响, P0 水平下, C1 和 C2 处理的铵态氮和硝态氮含量并没有显著差异; 而在 P1 水平下, C1 处理的铵态氮和硝态氮含量比 C2 处理高 24.19% 和 18.68% ($P < 0.05$), 但 C1 和 C2 处理的有效磷之间并无显著差异; 磷添加显著提高了苜蓿地上和地下部的 N 和 P 含量 ($P < 0.05$), 但是不同粒径生物炭之间苜蓿养分含量并没有显著影响. 综上所述, 生物炭与磷肥可以作为一种有效的土壤改良方式, 此外, 在使用生物炭进行土壤改良时, 应该考虑粒径对土壤养分和土壤酶的影响.

关键词: 生物炭; 粒径; 磷肥; 土壤养分; 酶活性

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)07-4162-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.202207178

Effect of Biochar with Phosphorus Fertilizer on Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Nutrient Uptake of *Alfalfa*

LIU Xin-yu, WANG Dong-mei*, ZHANG Ze-zhou, ZHANG Peng, FAN Tong-tong

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Biochar is widely used in agricultural production practices as a soil conditioner that can be used both alone and jointly with chemical fertilizer. However, there are few studies on the effects of the combined application of biochar and phosphate fertilizer with different particle sizes on soil and plants. In this experiment, pot experiments were used to study the effects of biochar with different particle sizes on soil nutrients, enzyme activity, and *Alfalfa* nutrient absorption under two phosphorus levels (according to diameter, the biochar was divided into C1: >1 mm and C2: <0.01 mm). This study showed that the combined application of biochar and phosphorus significantly improved soil nutrients, enzyme activity, and *Alfalfa* nutrient absorption. Among them, the C2 treatment significantly increased the soil available phosphorus content and phosphatase activity ($P < 0.05$), whereas the C1 treatment had a significant effect on ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, urease, and catalase activities ($P < 0.05$). Moreover, the differences in nutrients and enzymes among biochar treatments with different particle sizes were affected by soil phosphorus levels. At the P0 level, there was no significant difference in ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents between the C1 and C2 treatments. At the P1 level, the contents of NH_4^+ -N and NO_3^- -N in the C1 treatment were 24.19% and 18.68% higher than those in the C2 treatment ($P < 0.05$), but there was no significant difference between the C1 and C2 treatments. Phosphorus addition significantly increased the N and P contents of *Alfalfa* above ground and in the ground ($P < 0.05$), but there was no significant effect on the nutrient content of *Alfalfa* between different particle sizes of biochar. In conclusion, biochar and phosphate fertilizer can be used as an effective means of soil improvement. In addition, when using biochar for soil improvement, the impact of particle size on soil nutrients and soil enzymes should be considered.

Key words: biochar; particle size; phosphate fertilizer; soil nutrients; enzyme activity

在干旱和半干旱区, 磷(P)是碱性土壤中限制植物生长的重要营养元素之一, 因为P会在土壤中与阳离子快速络合和沉淀^[1]. 有研究表明, 添加P通过影响植物生长和改变微生物生物量或微生物的碳(C)和氮(N)利用率, 从而影响土壤的C和N含量^[2]. 因此, 在某些情况下, 磷肥被过量施用以确保植物生长, 但即使向土壤中施用磷肥后, 也仅有少部分的磷素被利用, 大部分磷素都无法被植物利用^[3].

有研究表明, 生物炭能够增加土壤磷的可用性^[4]. 生物炭是农林废弃物在缺氧或无氧条件下经

热裂解制成的稳定、高度芳香化的固体富碳产物^[5,6]. 此外, 生物炭含有大量营养素, 如N和P等^[7]; 而且生物炭的多孔结构、高比表面积以及对带电粒子的亲和力能够与土壤的物理和生物成分相互作用, 并有可能在整个生态系统当中产生级联效应^[8]. 土壤中添加生物炭可以促进土壤有机碳(SOC)的稳定化^[9], 以及土壤维持N和P的能

收稿日期: 2022-07-17; 修订日期: 2022-10-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504604-04)

作者简介: 刘鑫裕(1998~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持生态修复, E-mail: 115879537306@163.com

* 通信作者, E-mail: dmwang_bjfu@126.com

力^[10,11]. Jing 等^[12]的研究也证明不同种类的生物炭添加均增加了 SOC、碱解氮和有效磷(AP) 的含量. 此外,生物炭减少了土壤硬化并增加了孔隙度,这会对微生物群落和养分循环产生积极影响^[7].

土壤酶是土壤生化反应的重要生物催化剂. 有研究表明,向土壤中添加生物炭通常会增加与 N 和 P 相关的土壤酶活性,并降低与 C 循环相关的土壤酶活性^[13]. 然而,有研究也表明,450℃ 热解的生物炭促进了 C 循环和 N 循环相关酶活性的增加^[12]. 关于生物炭对土壤酶的影响机制有许多研究,根据 Lehmann 等^[14]和 Bailey 等^[15]的说法,生物炭会通过吸收有机和无机颗粒来保护土壤酶,而 Elzobair 等^[16]研究表明生物炭改良剂可以通过保持土壤水分来稳定一些酶的活性,例如,β-木糖苷酶. 可以预见,生物炭改良剂对土壤性质和酶活性的影响可能会有因生物炭本身性质造成较大差异.

目前关于生物炭的研究还主要集中在不同原料、热解温度以及施用量等,相比之下,关于生物炭粒径对土壤和植物生长的影响较少. 虽然有研究表明,小颗粒生物炭与大颗粒生物炭相比,更易在土壤中被微生物分解,从而影响营养循环和其他酶活

性^[17,18]. 但关于不同生物炭粒径单独或与磷肥共同施用在土壤-植物系统中的作用效果的研究却很少,故本文旨在研究不同粒径生物炭和磷肥相互作用下,土壤养分、土壤酶活性和紫花苜蓿养分变化,以期为干旱半干旱地区土壤改良提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验所用土壤采自内蒙古自治区锡林郭勒盟锡林浩特市(43°54'15" ~ 44°13'52"N, 115°24'26" ~ 116°26'30"N,海拔 960 ~ 1 270 m)胜利矿区,清除表层杂物以后,取 0 ~ 20 cm 土层,带回实验室风干,过 2 mm 筛备用. 供试土壤 ω[全氮(TN)]为 1.36 g·kg⁻¹, ω[全磷(TP)]为 1.08 g·kg⁻¹, ω[铵态氮(NH₄⁺-N)]为 0.023 2 g·kg⁻¹, ω[硝态氮(NO₃⁻-N)]为 0.023 7 g·kg⁻¹. 供试生物炭为 500℃ 高温裂解的玉米秸秆生物炭,其理化性质如表 1. 试验所用肥料:氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾.

供试植物为豆科植物紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.),试验种子由北京正道生态科技有限公司提供.

表 1 生物炭理化性质

Table 1 Physicochemical properties of biochar

材料	原料	比表面积 /m ² ·g ⁻¹	pH	ω(灰分) /%	ω/%			
					C	N	P	K
生物质炭	玉米秸秆	7.29	9.46	27.9	55.31	1.35	0.243	1.18

1.2 试验设计

本试验于 2021 年 11 月至 2022 年 2 月在北京林业大学苗圃进行. 试验采用直径为 13 cm,高 15 cm 的花盆,进行盆栽试验,每盆装土 700 g.

本试验设置两个磷添加水平(P0:0 g·kg⁻¹; P1:0.16 g·kg⁻¹)、两个不同粒径生物炭(C1: > 1 mm; C2: < 0.01 mm)添加以及无生物炭添加(C0),共 6 个处理,每个处理 3 次重复. 试验开始前,按比例称量土壤和生物炭,按照土壤质量的 1% 添加生物炭. 其中,C1 和 C2 为 700 g 土壤 + 7 g 生物炭,C0 为添加 700 g 土壤. 将土壤和生物炭混合,然后与磷肥和底肥混合一同装入盆中. 底肥施用根据谢勇等^[19]研究,施氮量为 0.379 g·kg⁻¹,施钾量为 0.18 g·kg⁻¹. 每盆播种紫花苜蓿种子 30 粒,选取大小、形状和色泽一致且饱满的苜蓿种子,先用 95% 的酒精消毒 10 min,清水冲洗干净,播种至育苗盆,每盆播种 30 粒种子,待幼苗长至一个月后进行间苗,留长势一致的幼苗 10 株. 幼苗生长期随机调换不同处理位置,以消除小气候对植物生长带来的影响. 试验期间通过称重法控制土壤含水量(质量分数)在

田间持水量的 80%.

试验结束后对盆栽进行破坏性取样,采取土壤与植物样品,清理植物样品并吸干水分测量植物养分,土壤风干进行理化性状测量. 以土壤为分界线区分植物的地上和地下部.

1.3 指标测定与方法

将植物于 105℃ 下杀青 90s,再将其放入 70℃ 烘箱,烘至恒重,最后将样品磨碎后过筛,用于 N 和 P 含量测定,N 含量采用半微量凯式法测定,P 含量采用钼锑抗比色法测定.

土壤 C、N 和 P 测定方法参照文献[20]:SOC 测定采用重铬酸钾稀释热法,TN 含量采用凯氏定氮法测定(全自动凯氏定氮仪 K1100),TP 采用 NaOH 碱熔-钼锑抗比色法测定;土壤铵态氮和硝态氮采用 KCl 浸提-靛酚蓝法和钒氧化法;AP 采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法.(全自动化学分析仪 Smartchem450 意大利 AMS 公司).

采用试剂盒测定土壤脲酶、过氧化氢酶和磷酸酶,采用紫外分光光度计(TU-1810DS 上海谱析)测定酶活性,试剂盒购买自上海酶联生物科技有限

公司.

1.4 数据处理与分析

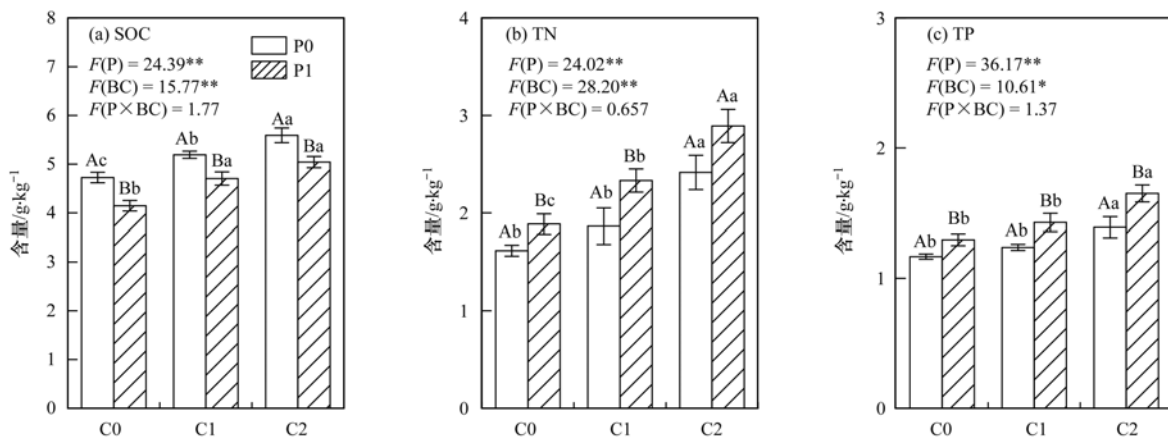
使用 Excel 2019 对数据进行统计整理. 对不同处理间的差异及显著性采用双因素方差分析 (two-way ANOVA) 及多重比较 ($P < 0.05$) (Tukey multiple comparisons; least significant difference). 以上统计分析采用 SPSS 26.0 完成, 使用 Origin 2021 进行绘图.

2 结果与分析

2.1 生物炭粒径和磷肥对土壤养分变化的影响

如图 1 所示, 对于土壤养分含量, 根据方差分析结果, 土壤 TN、TP 和 SOC 含量受到生物炭粒径和磷水平的影响 ($P < 0.05$); 其中, 在 P0 水平下, C1

和 C2 处理的 SOC 含量分别比 C0 高 9.90% 和 18.35%, TN 分别比 C0 高 15.42% 和 49.45%, TP 分别比 C0 高 6.05% 和 19.18%; 在 P1 水平下, C1 和 C2 处理组的 SOC 含量分别比 C0 高 13.47% 和 21.63%, TN 分别比 C0 高 23.55% 和 53.28%, TP 分别比 C0 高 10.17% 和 27.27%. 且在两种磷水平下, 土壤 SOC、TN 和 TP 含量均为 C2 处理最高. 磷添加降低了土壤 SOC 含量, 相较于 P0, C0、C1 和 C2 在 P1 水平下 SOC 含量分别降低了 12.25%、9.39% 和 9.82%; 而土壤 TN 和 TP 含量则是 P1 处理要高于 P0 处理, 其中, C0、C1 和 C2 处理下 TN 分别提高 16.78%、25.00% 和 19.77%, TP 分别提高了 11.05%、15.37% 和 18.60%.



C0、C1 和 C2 分别表示无生物炭、 $>1\text{ mm}$ 和 $<0.1\text{ mm}$ 生物炭处理; P0 表示无磷添加, P1 表示 $0.16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 磷添加; 不同小写字母表示不同粒径生物炭处理间差异显著, 不同大写字母表示不同磷水平下差异显著; * 表示在 $P < 0.05$ 水平显著, ** 表示在 $P < 0.01$ 水平显著, 下同

图 1 不同粒径生物炭和磷肥处理下土壤 SOC、TN 和 TP 含量

Fig. 1 Soil SOC, TN, and soil TP contents under the treatment of phosphate fertilizer and biochar with different particle sizes

对于土壤速效养分, 从图 2 可知, 生物炭的添加均提高了土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的含量, P0 和 P1 水平下 C1 处理中 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 分别较 C0 高 80.43%、92.76% ($P < 0.05$) 和 24.45%、47.58% ($P < 0.05$); C2 处理的 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 分别比 C0

高 51.44%、55.2% ($P < 0.05$) 和 17.63%、24.35% ($P < 0.05$). 但是 P0 水平下, 两种粒径生物炭处理的 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量间并没有显著差异, 但不同粒径生物炭处理的 AP 含量有较大差异, 表现为: $\text{C2} > \text{C1} > \text{C0}$. P 添加降低了土壤 NH_4^+-N 含量, 在 C0、C1 和

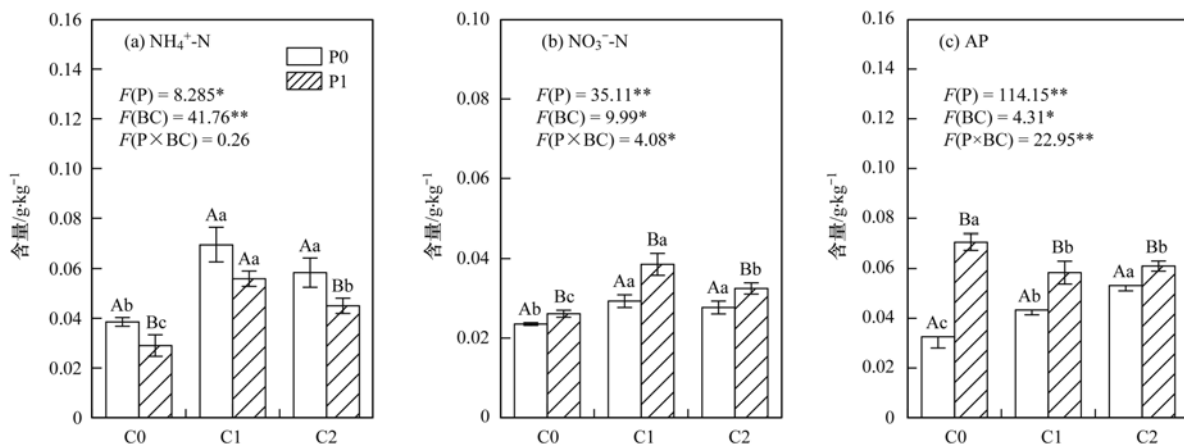


图 2 不同粒径生物炭和磷肥处理下土壤 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和 AP 含量

Fig. 2 Soil NH_4^+-N , NO_3^--N , and AP contents under different particle size biochars and phosphorus fertilizer treatments

C2 处理中分别降低了 24.72%、19.57% 和 22.84%，显著提高了土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ (10.94%、31.55% 和 17.28%) 及 AP 含量 (116.8%、34.68% 和 14.76%)，并且在 P1 水平下，不同粒径生物炭处理的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 之间有较大差异，其中，C1 处理的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量分别比 C2 高 24.19% 和 18.68%。

2.2 生物炭粒径和磷肥对土壤酶活性变化的影响

由图 3 可以看出，在两个磷水平下，C1 和 C2 处理的脲酶(UR)、过氧化氢酶(CAT)和碱性磷酸酶

(ALP)活性均高于 C0 处理，但是生物炭粒径对不同土壤酶活性的影响并不相同。在 P0 和 P1 水平下，C1 处理的 UR 和 CAT 活性要显著高于 C0 和 C2 处理 ($P < 0.05$)；而 ALP 活性则是 C2 处理组最高。

P 添加显著提高了 UR、CAT 和 ALP 的活性，在 P1 水平下，C0、C1 和 C2 处理下的 UR 活性比 P0 高 26.37%、18.25% 和 22.27%；CAT 活性比 P0 高 61.38%、34.82% 和 39.82%；ALP 活性分别比 P0 高 30.52%、59.58% 和 45.39%。

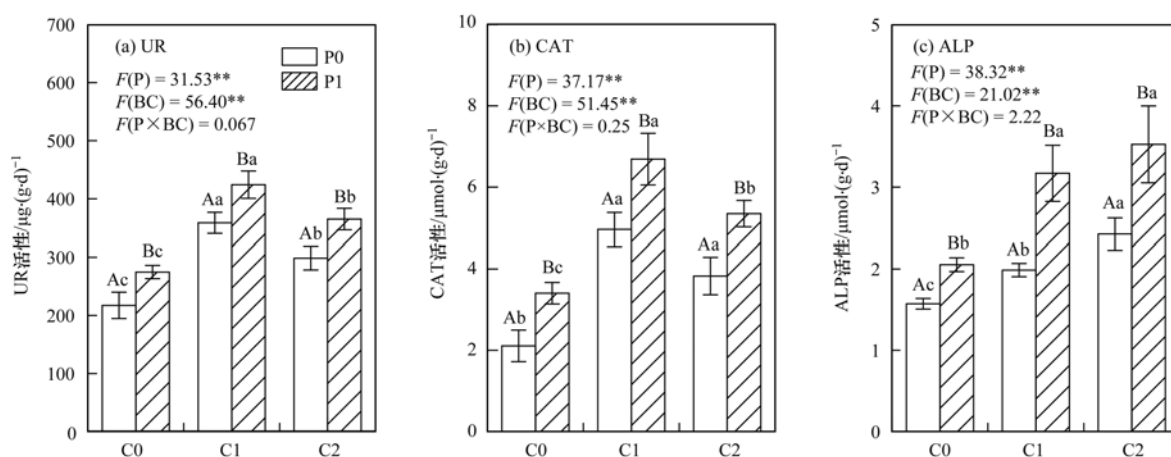


图 3 不同粒径生物炭和磷肥处理下土壤酶活性

Fig. 3 Soil enzyme activity under different particle size biochars and phosphate fertilizer treatments

2.3 生物炭粒径和磷肥对植物养分变化的影响

从图 4 可以看出，除地上部氮素含量随着 P 添加降低外，地下部氮素、磷素和地上部磷素含量均随着 P 添加而显著增加；相比于 P0 水平，P1 水平

下 C0、C1 和 C2 处理地上部氮素含量分别降低了 14.88%、23.00% 和 16.32%，而地下部氮素含量分别增长了 9.71%、10.42% 和 9.92%；C0、C1、C2 处理下，P1 水平的地上部磷素含量和地下部磷素含

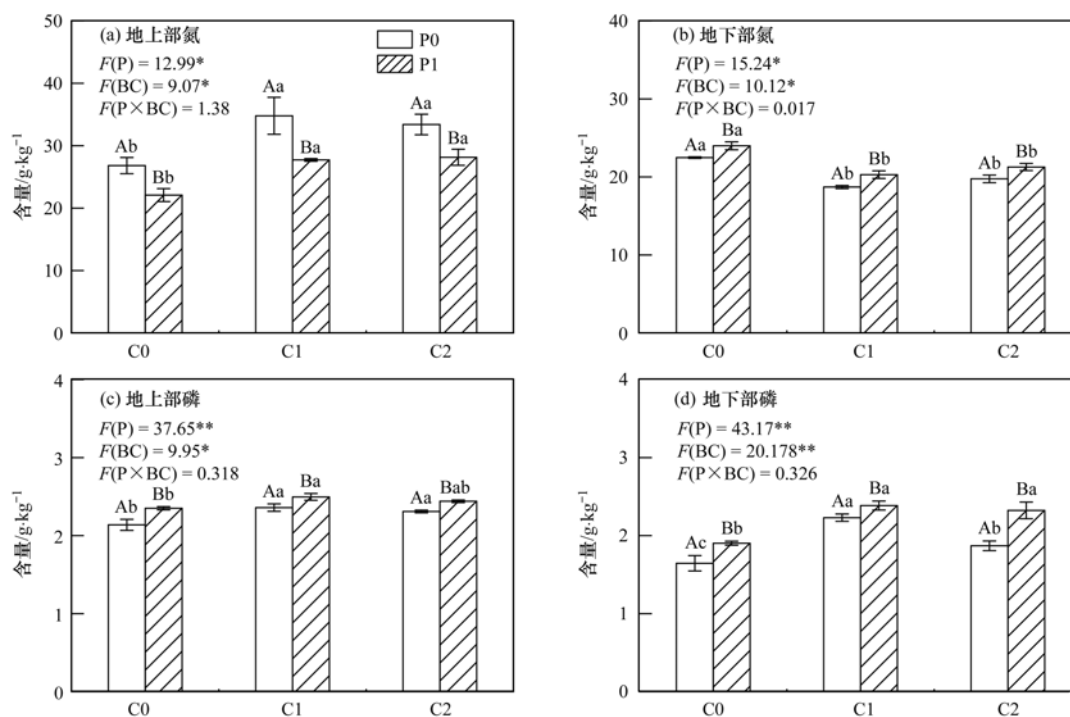


图 4 不同粒径生物炭和磷肥处理下紫花苜蓿养分含量

Fig. 4 Nutrient content of *Alfalfa* under different particle size biochars and phosphorus fertilizer treatments

量分别比 P0 组高 9.11%、6.26%、6.59% 和 22.97%、10.95%、23.06%。

生物炭添加显著提高了地上部氮素、磷素含量和地下部磷素含量 ($P < 0.05$), 显著降低了地下部氮含量 ($P < 0.01$); 但是, 在两个磷水平下, 不同粒径生物炭处理间的地上部氮素、磷素含量和地下部氮素含量之间并没有显著差异; 在 P0 水平下, 不同粒径生物炭之间苜蓿地下部磷之间有显著差异, 表现为 C1 处理的地下部磷比 C2 处理高 14.25%, 但是这种差异随着 P 的添加而消失。

3 讨论

3.1 磷和生物炭添加对土壤养分的影响

大多数土壤向植物提供充足 N 和 P 的能力有限^[21,22]。而有研究表明, 由于生物炭本身含有丰富的碳, 且其灰分中携带大量的氮磷元素会随着生物炭的老化而释放到土壤中^[23], 提高土壤 SOC、TN 和 TP 含量^[5,24,25], 这与本研究的结果一致; 而小颗粒生物炭处理的土壤表现出更高的 SOC、TN 和 TP 含量, 可能是因为小颗粒生物炭与土壤颗粒接触更为紧密, 增加了与土壤基质之间的相互作用, 加速老化过程, 释放出更多的 C、N 和 P^[26], 此外, 小颗粒生物炭表现出更大的表面积, 能够吸附土壤中的氮磷元素, 减少 N 和 P 流失^[27]。此外, 由于不同粒径生物炭对土壤的填充会影响土壤溶液的连通性, 进而影响 P 的释放^[28], 导致小颗粒生物炭处理的土壤 AP 含量高于大颗粒生物炭处理, 这与 Chen 等^[17] 研究的结果一致; 而与 AP 相反, 本研究中大颗粒生物炭处理的土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量要高于小颗粒生物炭, 这可能是由于大颗粒生物炭 H/C 值不同, 有研究表明大颗粒生物炭有较高的 H/C 值^[29], 同时有研究表明, 较高的 H/C 值更有利于将生物炭捕获的 N 释放到土壤当中, 增加土壤无机 N 库^[21]。

P 添加通过促进植物和微生物的生物固氮^[30], 提高土壤 N 含量, 这与 Wang 等^[31] 研究的结果一致, 此外, P 添加通过提高磷的可用性促进植物对 N 的吸收以及对氮矿化的级联效应^[32], 促进土壤中总氮矿化、总硝化和反硝化等氮循环过程, 促使 NH_4^+ -N 加速向 NO_3^- -N 转化, 导致土壤 NH_4^+ -N 减少和 NO_3^- -N 增加, 这与 Chen 等^[33] 和 Zhang 等^[34] 研究的结果一致; 磷肥添加可以增加土壤微生物数量、多样性、丰度和活性^[35], 而与生物炭共同施用, 生物炭的高表面积和高微孔性质可以为微生物的生长和繁殖提供有利的栖息地, 更高的微生物量会吸收更多的 N, 提高土壤 N 含量^[36]; 同时, 微生物能将生物炭分解转化为高分子氮并进一步转化为

NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N^[37], 生物炭与无机肥料的组合会产生更高水平的土壤有效养分。此外, 生物炭通过微孔结构以及增加溶磷微生物的数量, 能提高磷肥在土壤中的保留率, 从而提高土壤 TP 含量^[38], 但生物炭与磷肥之间会发生磷酸盐沉淀/吸附反应, 这种相互作用会降低土壤中磷的有效性^[4]。而磷添加会降低 SOC, 这可能是因为磷添加会显著增加酸杆菌科、芽孢杆菌科、链霉菌科和真菌组的丰度, 这些细菌和真菌丰度的增加会促进顽固性有机碳的分解, 减少土壤稳定 C 库; 此外, P 添加会促进微生物对活性碳库的消耗比例, 从而增强活性碳库的矿化速率, 这进一步降低了土壤有机碳库, 导致 SOC 减少^[39,40], 这与 Poeplau 等^[41] 研究的结果一致。

3.2 磷和生物炭添加对土壤酶活性的影响

生物炭添加会引起微生物丰度的增加或是将生物可用磷引入土壤, 从而促进土壤酶的活性^[42], 这与本研究的结果相似。本研究结果表明, 生物炭添加总体上促进了 UR、CAT 和 ALP 活性; 并且, 由于大颗粒生物炭具有比小颗粒生物炭更丰富的孔隙结构, 能为微生物提供更多的生存空间^[29], 因此大颗粒生物炭处理具有更高的微生物生物量, 导致土壤具有更高的 UR 和 CAT 活性; 与 UR 和 CAT 相反, 小颗粒生物炭处理提高了 ALP 活性, 这可能是因为小颗粒生物炭含有高灰分促成了石灰效应, 提高土壤 pH 值^[17], 使土壤环境更适合 ALP 活性增长^[43]。

P 添加通过增加土壤养分促进根 C 分泌等植物生长发育过程和微生物生命活动提高 CAT 活性^[44,45], 此外, 生物炭添加诱导的有机物的添加, 为微生物的酶促反应提供充足的底物, 从而促进了 CAT 活性增加^[46]。同时, 有研究表明, 氮添加会促进 ALP 活性, 这类添加养分改变不同酶活性来改变另外一种养分的方式称为资源分配原则^[47], 因此, 磷添加促进 UR 活性原理与此相似, 本试验研究表明, P 添加会促进 ALP 活性, Zi 等^[48] 的研究也证明了这点。而 P 添加导致的微生物量的增加会提高对碳氮的需求, 从而驱动 ALP 活性的提高^[31,49]。而随着生物炭的添加, 生物炭能够提高土壤颗粒的聚集能力、土壤养分和保水性, 以上性质的变化能够增强 UR 和 ALP 等水解酶的产生和活性^[50]。

3.3 磷和生物炭添加对植物养分的影响

本研究结果表明, 生物炭提高了苜蓿的磷含量以及地上部氮含量, 这可能是因为生物炭显著提高了土壤有效养分, 增强了养分的供应能力^[51], 此外, 余端等^[52] 的试验也证明, 生物炭能够促进小白菜对 N 和 P 元素的吸收; 然而, 生物炭降低了地下部氮含量, 这可能是因为生物炭能提高植物光合作用能

力^[53],导致植物吸收的氮被运往地上部器官进行叶绿素及相关酶的合成.此外,土壤水分可用性也会影响植物对养分的获取^[54],生物炭能增强土壤持水能力,提高土壤保水性能,且孔隙结构的不同会影响不同粒径生物炭对土壤水分的作用效果^[55];因此,生物炭添加后,土壤有效水分增加,促进植物对养分吸收;但齐瑞鹏等^[56]的研究结果表明,在沙土中添加不同粒径生物炭时,小颗粒生物炭的导水能力要低于大颗粒生物炭,但是生物炭施加量较低时,不同粒径生物炭之间导水率差异并不明显,这可能是不同粒径生物炭处理间植物养分差异不明显的原因.

植物养分吸收可能受到非生物和生物因素的影响,例如叶子特征、植物发育阶段和土壤肥力等因素^[57].有研究表明,P 的输入可以改变植物养分限制、养分利用效率和养分获取策略^[58].这与本研究的结果相似,P 添加提高了苜蓿磷含量和地下部氮含量,这是因为 P 添加提高了土壤微生物丰度及酶活性^[59],且当生物炭添加后,生物炭分解为植物提供了 N 源^[35],同时生物炭导致溶磷微生物的变化,丰富微生物生物磷,并通过增加菌根的活性促进植物对磷的吸收^[38].而植物磷素含量提高,使植物可利用更多磷来合成能量以供植物运输养分至各部分组织器官,而 P 添加促进地上部生物量的增长,当植物生长量大于植物氮的吸收速率时,会产生“生物量稀释作用”^[60],从而导致 P 添加处理的苜蓿地上部氮含量低于无 P 处理.

4 结论

本研究表明,生物炭和磷肥配施能够有效地增加土壤养分含量、提高土壤酶活性并促进紫花苜蓿的养分吸收.而较细粒径的生物炭对 AP 和 ALP 的促进作用要优于较粗粒径生物炭;但生物炭粒径对植物养分的影响却并不显著.磷肥的施用显著提高了土壤养分含量和酶活性,促进了植物养分吸收.此外,土壤生化过程和土壤养分对生物炭的响应会受到土壤磷水平的影响,当外源 P 添加时,C1 处理的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量显著高于 C2 处理.因此,在使用生物炭进行土壤改良时,应该考虑不同粒径生物炭对土壤养分的影响,此外,外源 P 的施入也会影响生物炭的作用效果.

参考文献:

- [1] Chtouki M, Laaziz F, Naciri R, *et al.* Interactive effect of soil moisture content and phosphorus fertilizer form on chickpea growth, photosynthesis, and nutrient uptake [J]. *Scientific Reports*, 2022, **12**(1), doi: 10.1038/s41598-022-10703-0.
- [2] Li J H, Zhang R, Cheng B H, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus additions on decomposition and accumulation of soil organic carbon in alpine meadows on the Tibetan Plateau [J]. *Land Degradation & Development*, 2021, **32**(3): 1467-1477.
- [3] 李会军. 不同磷水平对羊草生长和养分利用的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.
- [4] Xu G, Zhang Y, Sun J N, *et al.* Negative interactive effects between biochar and phosphorus fertilization on phosphorus availability and plant yield in saline sodic soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **568**: 910-915.
- [5] Luo C Y, Yang J J, Chen W, *et al.* Effect of biochar on soil properties on the Loess Plateau: results from field experiments [J]. *Geoderma*, 2020, **369**, doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114323.
- [6] Li J S, Shao X Q, Huang D, *et al.* Short-term biochar effect on soil physicochemical and microbiological properties of a degraded alpine grassland [J]. *Pedosphere*, 2022, **32**(3): 426-437.
- [7] Alkharabsheh H M, Seleiman M F, Battaglia M L, *et al.* Biochar and its broad impacts in soil quality and fertility, nutrient leaching and crop productivity: a review [J]. *Agronomy*, 2021, **11**(5), doi: 10.3390/agronomy11050993.
- [8] Biederman L A, Harpole W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis [J]. *GCB Bioenergy*, 2013, **5**(2): 202-214.
- [9] Gascó G, Paz-ferreiro J, Cely P, *et al.* Influence of pig manure and its biochar on soil CO_2 emissions and soil enzymes [J]. *Ecological Engineering*, 2016, **95**: 19-24.
- [10] Zhang H Z, Chen C R, Gray E M, *et al.* Roles of biochar in improving phosphorus availability in soils: a phosphate adsorbent and a source of available phosphorus [J]. *Geoderma*, 2016, **276**: 1-6.
- [11] Xie Z B, Xu Y P, Liu G, *et al.* Impact of biochar application on nitrogen nutrition of rice, greenhouse-gas emissions and soil organic carbon dynamics in two paddy soils of China [J]. *Plant and Soil*, 2013, **370**(1-2): 527-540.
- [12] Jing Y L, Zhang Y H, Han I, *et al.* Effects of different straw biochars on soil organic carbon, nitrogen, available phosphorus, and enzyme activity in paddy soil [J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1), doi: 10.1038/s41598-020-65796-2.
- [13] Wang X B, Song D L, Liang G Q, *et al.* Maize biochar addition rate influences soil enzyme activity and microbial community composition in a fluvo-aquic soil [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, **96**: 265-272.
- [14] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, *et al.* Biochar effects on soil biota-a review [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(9): 1812-1836.
- [15] Bailey V L, Fansler S J, Smith J L, *et al.* Reconciling apparent variability in effects of biochar amendment on soil enzyme activities by assay optimization [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(2): 296-301.
- [16] Elzobair K A, Stromberger M E, Ippolito J A, *et al.* Contrasting effects of biochar versus manure on soil microbial communities and enzyme activities in an Aridisol [J]. *Chemosphere*, 2016, **142**: 145-152.
- [17] Chen J H, Li S H, Liang C F, *et al.* Response of microbial community structure and function to short-term biochar amendment in an intensively managed bamboo (*Phyllostachys praecox*) plantation soil: effect of particle size and addition rate [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 24-33.
- [18] Manyà J J. Pyrolysis for biochar purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(15): 7939-7954.
- [19] 谢勇, 孙洪仁, 张新全, 等. 坝上地区紫花苜蓿氮、磷、钾肥

- 料效应与推荐施肥量[J]. 中国草地学报, 2012, **34**(2): 52-57.
- Xie Y, Sun H R, Zhang X Q, *et al.* Effects of N, P and K fertilizer on alfalfa and recommended fertilizer rate in bashang area[J]. Chinese Journal of Grassland, 2012, **34**(2): 52-57.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京. 中国农业出版社, 2000.
- [21] Gao S, Deluca T H, Cleveland C C. Biochar additions alter phosphorus and nitrogen availability in agricultural ecosystems: a meta-analysis [J]. Science of the Total Environment, 2019, **654**: 463-472.
- [22] Gul S, Whalen J K. Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, **103**: 1-15.
- [23] Wang X B, Zhou W, Liang G Q, *et al.* Characteristics of maize biochar with different pyrolysis temperatures and its effects on organic carbon, nitrogen and enzymatic activities after addition to fluvo-aquic soil [J]. Science of the Total Environment, 2015, **538**: 137-144.
- [24] 向书江, 余砾, 熊子怡, 等. 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[J]. 环境科学, 2021, **42**(12): 6067-6077.
- Xiang S J, Yu L, Xiong Z Y, *et al.* Effects of combined application of biochar with chemical fertilizers and organic fertilizers on nutrients and phosphorus forms in purple soils [J]. Environmental Science, 2021, **42**(12): 6067-6077.
- [25] 邓华, 高明, 龙翼, 等. 生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5481-5490.
- Deng H, Gao M, Long Y, *et al.* Effects of biochar and straw return on soil aggregate and organic carbon on purple soil dry slope land [J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5481-5490.
- [26] Zhao R D, Wu J P, Jiang C L, *et al.* Effects of biochar particle size and concomitant nitrogen fertilization on soil microbial community structure during the maize seedling stage [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(12): 13095-13104.
- [27] Zhao X, Wang J W, Wang S Q, *et al.* Successive straw biochar application as a strategy to sequester carbon and improve fertility: a pot experiment with two rice/wheat rotations in paddy soil [J]. Plant and Soil, 2014, **378**(1-2): 279-294.
- [28] Sarfraz R, Yang W H, Wang S S, *et al.* Short term effects of biochar with different particle sizes on phosphorous availability and microbial communities [J]. Chemosphere, 2020, **256**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126862.
- [29] He P J, Liu Y H, Shao L M, *et al.* Particle size dependence of the physicochemical properties of biochar [J]. Chemosphere, 2018, **212**: 385-392.
- [30] Ament M R, Tierney J A, Hedin L O, *et al.* Phosphorus and species regulate N₂ fixation by herbaceous legumes in longleaf pine savannas [J]. Oecologia, 2018, **187**(1): 281-290.
- [31] Wang R Z, Bicharanloo B, Hou E Q, *et al.* Phosphorus supply increases nitrogen transformation rates and retention in soil: a global meta-analysis [J]. Earth's Future, 2022, **10**(3), doi: 10.1029/2021EF002479.
- [32] Du E Z, Terrer C, Pellegrini A F A, *et al.* Global patterns of terrestrial nitrogen and phosphorus limitation [J]. Nature Geoscience, 2020, **13**(3): 221-226.
- [33] Chen Y, Sun T T, Qian H Y, *et al.* Nitrogen mineralization as a result of phosphorus supplementation in long-term phosphate deficient soil [J]. Applied Soil Ecology, 2016, **106**: 24-32.
- [34] Zhang Y, Zhang X J, Zhou C, *et al.* Organic and inorganic nitrogen forms as affected by phosphorus additions in a maize-mustard cropping system [J]. CLENA-Soil, Air, Water, 2022, **50**(7), doi: 10.1002/clen.202100240.
- [35] Cheng H Y, Yuan M S, Tang L, *et al.* Integrated microbiology and metabolomics analysis reveal responses of soil microorganisms and metabolic functions to phosphorus fertilizer on semiarid farm [J]. Science of the Total Environment, 2022, **817**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152878.
- [36] Zhang J, Zhang L J, Qiu S J. Biochar amendment benefits ¹⁵N fertilizer retention and rhizosphere N enrichment in a maize-soil system [J]. Geoderma, 2022, **412**, doi: 10.1016/j.geoderma.2022.115713.
- [37] Yuan S N, Tan Z X, Huang Q Y. Migration and transformation mechanism of nitrogen in the biomass-biochar-plant transport process [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, **85**: 1-13.
- [38] Yang L, Wu Y C, Wang Y C, *et al.* Effects of biochar addition on the abundance, speciation, availability, and leaching loss of soil phosphorus [J]. Science of the Total Environment, 2021, **758**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143657.
- [39] Li J H, Cheng B H, Zhang R, *et al.* Nitrogen and phosphorus additions accelerate decomposition of slow carbon pool and lower total soil organic carbon pool in alpine meadows [J]. Land Degradation & Development, 2021, **32**(4): 1761-1772.
- [40] 唐美玲, 魏亮, 祝贞科, 等. 稻田土壤有机碳矿化及其激发效应对磷添加的响应 [J]. 应用生态学报, 2018, **29**(3): 857-864.
- Tang M L, Wei L, Zhu Z K, *et al.* Responses of organic carbon mineralization and priming effect to phosphorus addition in paddy soils [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, **29**(3): 857-864.
- [41] Poeplau C, Bolinder M A, Kirchmann H, *et al.* Phosphorus fertilisation under nitrogen limitation can deplete soil carbon stocks: evidence from Swedish meta-replicated long-term field experiments [J]. Biogeosciences, 2016, **13**(4): 1119-1127.
- [42] 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.
- [43] 袁访, 李开钰, 杨慧, 等. 生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响 [J]. 环境科学, 2022, **43**(9): 4655-4661.
- Yuan F, Li K Y, Yang H, *et al.* Effects of biochar application on yellow soil nutrients and enzyme activities [J]. Environmental Science, 2022, **43**(9): 4655-4661.
- [44] 冯慧芳, 余明, 薛立. 外源性氮磷添加及林分密度对大叶相思林土壤酶活性的影响 [J]. 生态学报, 2020, **40**(14): 4894-4902.
- Feng H F, Yu M, Xue L. Effects of nitrogen and phosphorus additions on soil enzyme activities in Acacia auriculiformis stands under different planting densities [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(14): 4894-4902.
- [45] Huang J S, Chen W J, Qi K B, *et al.* Distinct effects of N and P addition on soil enzyme activities and C distribution in aggregates in a subalpine spruce plantation [J]. Biogeochemistry, 2018, **141**(2): 199-212.
- [46] Jiang Y L, Wang X J, Zhao Y M, *et al.* Effects of biochar application on enzyme activities in tea garden soil [J]. Frontiers

- in Bioengineering and Biotechnology, 2021, **9**, doi: 10.3389/fbioe.2021.728530.
- [47] Fisk M C, Ratliff T J, Goswami S, *et al.* Synergistic soil response to nitrogen plus phosphorus fertilization in hardwood forests[J]. Biogeochemistry, 2014, **118**(1-3): 195-204.
- [48] Zi H B, Hu L, Wang C T. Differentiate responses of soil microbial community and enzyme activities to nitrogen and phosphorus addition rates in an alpine meadow[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, **13**, doi: 10.3389/fpls.2022.829381.
- [49] 邓雪丹. 添加磷和秸秆对磷含量不同的土壤中磷转化的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
- [50] Zhang L Y, Xiang Y Z, Jing Y M, *et al.* Biochar amendment effects on the activities of soil carbon, nitrogen, and phosphorus hydrolytic enzymes: a meta-analysis[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(22): 22990-23001.
- [51] Guo L L, Yu H W, Kharbach M, *et al.* The response of nutrient uptake, photosynthesis and yield of tomato to biochar addition under reduced nitrogen application[J]. Agronomy, 2021, **11**(8), doi: 10.3390/agronomy11081598.
- [52] 余端, 冯牧野, 李燕, 等. 秸秆生物炭对小白菜生长发育及土壤性质的影响[J]. 南方农业, 2019, **13**(34): 45-47.
- [53] Wang S J, Zheng J L, Wang Y J, *et al.* Photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and yield of peanut in response to biochar application[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, **12**, doi: 10.3389/fpls.2021.650432.
- [54] Querejeta J I, Ren W, Prieto I. Vertical decoupling of soil nutrients and water under climate warming reduces plant cumulative nutrient uptake, water-use efficiency and productivity[J]. New Phytologist, 2021, **230**(4): 1378-1393.
- [55] 张雅馥, 王金满, 王敬朋, 等. 生物炭添加对矿区压实土壤水力特性的影响[J]. 农业工程学报, 2021, **37**(22): 58-65.
- Zhang Y F, Wang J M, Wang J P, *et al.* Effects of biochar addition on the hydraulic properties of compacted soils in mining areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, **37**(22): 58-65.
- [56] 齐瑞鹏, 张磊, 颜永毫, 等. 定容重条件下生物炭对半干旱区土壤水分入渗特征的影响[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(8): 2281-2288.
- Qi R P, Zhang L, Yan Y H, *et al.* Effects of biochar addition into soils in semiarid land on water infiltration under the condition of the same bulk density[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, **25**(8): 2281-2288.
- [57] Shi B, Ling X, Cui H, *et al.* Response of nutrient resorption of *Leymus chinensis* to nitrogen and phosphorus addition in a meadow steppe of northeast China[J]. Plant Biology, 2020, **22**(6): 1123-1132.
- [58] Li L, Gao X P, Li X Y, *et al.* Nitrogen (N) and phosphorus (P) resorption of two dominant alpine perennial grass species in response to contrasting N and P availability[J]. Environmental and Experimental Botany, 2016, **127**: 37-44.
- [59] Olatunji O A, Pan K W, Tariq A, *et al.* Planting systems affect soil microbial communities and enzymes activities differentially under drought and phosphorus addition[J]. Plants, 2022, **11**(3), doi: 10.3390/plants11030319.
- [60] 冯婵莹, 郑成洋, 田地. 氮添加对森林植物磷含量的影响及其机制[J]. 植物生态学报, 2019, **43**(3): 185-196.
- Feng C Y, Zheng C Y, Tian D. Impacts of nitrogen addition on plant phosphorus content in forest ecosystems and the underlying mechanisms[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, **43**(3): 185-196.

CONTENTS

Assessing the Environmental and Health Co-benefits of Accelerated Energy Transition and Industrial Restructuring: A Case Study of the BTHS Region	YANG Xi, SUN Yi-sheng, CHANG Shi-yan, <i>et al.</i> (3627)
Synergistic Paths of Reduced Pollution and Carbon Emissions Based on Different Power Demands in China	XIANG Meng-yu, WANG Shen, LÜ Lian-hong, <i>et al.</i> (3637)
Evaluation Method and Application for Urban Carbon Peaking & Neutrality Performance	ZHANG Bao-liu, BAI Zi-han, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3649)
Revealing Driving Factors of Urban O ₃ Based on Explainable Machine Learning	DONG Jia-qi, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (3660)
Sensitivity Analysis of Ozone Formation Using Response Surface Methodology	ZHU Yu-huan, CHEN Bing, ZHANG Ya-ru, <i>et al.</i> (3669)
Analysis of O ₃ Sources in Yulin City in Summer Based on WRF-CMAQ/ISAM Model	WANG Yi-fan, TONG Ji-long, CHEN Yu-xiang, <i>et al.</i> (3676)
Atmospheric Ozone Concentration Prediction in Nanjing Based on LightGBM	ZHU Jia-ying, AN Jun-lin, FENG Yue-zheng, <i>et al.</i> (3685)
Meteorological Formation Mechanisms and Potential Sources of an Ozone Pollution Process in Winter of 2022 in Guangdong Province	LI Ting-yuan, CHEN Jing-yang, GONG Yu, <i>et al.</i> (3695)
Impact of Summer Tropospheric Ozone Radiative Forcing on Meteorology and Air Quality in North China	DU Nan, CHEN Lei, LIAO Hong, <i>et al.</i> (3705)
Identification of Impacts from Meteorology and Local and Transported Photochemical Generation on Ozone Trends in Changsha from 2018 to 2020	YANG Jun, YANG Lei-feng, DING Hua, <i>et al.</i> (3715)
Spatio-temporal Variation and Multi-dimensional Detection of Driving Mechanism of PM _{2.5} Concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021	XU Yong, GUO Zhen-dong, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i> (3724)
Estimation of PM _{2.5} Hourly Concentration in Sichuan Province Based on GTWR-XGBoost Model	WU Di, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (3738)
Transmission and Growth Characteristics of Severe PM _{2.5} Pollution Events from 2013 to 2021 in Xingtai, Hebei	JIANG Qi, SHENG Li, JIN Yu-chen, <i>et al.</i> (3749)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Urban Shanghai During Cold Season Based on High Time-resolution Measurements of Organic Molecular Markers	ZHU Shu-hui (3760)
Emission Factors of Carbonaceous Aerosol and Stable Carbon Isotope for In-use Vehicles	YU Ming-yuan, WANG Qian, FU Ming-liang, <i>et al.</i> (3771)
Composition Characteristics of Volatile Organic Compounds and Associated Contributions to Secondary Pollution in Shenyang Industrial Area in Summer	GUAN Lu, SU Cong-cong, KU Ying-ying, <i>et al.</i> (3779)
Characteristics of VOCs and Assessment of Emission Reduction Effect During the Epidemic Lockdown Period in Shenzhen Urban Area	YUN Long, LIN Chu-xiong, LI Cheng-liu, <i>et al.</i> (3788)
Characteristics of Organic Matter Composition and Oxidation Potential in Road Dust in Winter in Xi'an	WANG Qing-wen, CHEN Qing-cai, WANG Chao, <i>et al.</i> (3797)
Contamination Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Compounds in Surface Dust of Suntuan Mining Area in Huaibei	XU Zhen-peng, QIAN Ya-hui, HONG Xiu-ping, <i>et al.</i> (3809)
Spatial-temporal Variation in Water Quality and Its Response to Precipitation and Land Use in Baiyangdian Lake in the Early Stage of the Construction of Xiong'an New Area	WANG Zi-ming, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (3820)
Simulation of Pollution Apportionment and Optimization of Control Methods in Watershed Scale: A Case Study of the Shun'an Watershed in Tongling City	LIU Guo-wangchen, CHEN Lei, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (3835)
Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Optimization of Monitoring Indicators in Nanchang	ZHENG Zi-yin, CHU Xiao-dong, XU Jin-ying, <i>et al.</i> (3846)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics and Influencing Factors of "Three Waters" in Shandian River Basin	YANG Li-na, JIA De-bin, GAO Rui-zhong, <i>et al.</i> (3855)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Abundant and Rare Planktonic Microeukaryotes in Jinsha River	YAN Bing-cheng, CUI Ge, SUN Sheng-hao, <i>et al.</i> (3864)
Bacterial Community Diversity in Channel Sediments of Different Disturbance Sections of the Jialing River	ZHU Lan-ping, ZHANG Tuo, LI Jia-ning, <i>et al.</i> (3872)
Effects of Reservoir Water Depth on Different Plankton Communities and Keystone Species of Network Interaction	WANG Xun, LIAO Qin, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (3881)
Correlation Between the Diversity Characteristics of Groundwater Bacterial Community and Environmental Factors in Typical Industrial Areas	WU Jian-qiang, ZHANG Shu-yuan, WANG Min, <i>et al.</i> (3892)
Effects of Fertilizer Application Strategy Adjustments on Nitrogen and Phosphorus Loss from Typical Crop Systems in Taihu Lake Region	YU Ying-liang, WANG Yi-zhi, YANG Bei, <i>et al.</i> (3902)
Estimation of Cropland Nitrogen Runoff Loss Loads in the Yangtze River Basin Based on the Machine Learning Approaches	ZHANG Yu-fu, PAN Zhe-qi, CHEN Ding-jiang (3913)
Classification and Identification of Non-point Source Nitrogen Pollution in Surface Flow of the Shangwu River Watershed in the Qiandao Lake Region	YU Ke, YAN Yan, TANG Zhang-xuan, <i>et al.</i> (3923)
Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in the Main Stream and Typical Tributaries of Tuojiang River and Fujiang River	LI Zi-yang, ZHOU Ming-hua, XU Peng, <i>et al.</i> (3933)
Sediment Pollution and Dredging Effect of Waqinhui River	ZHANG Mu, REN Zeng-yi, ZHANG Man, <i>et al.</i> (3945)
Critical Review on Environmental Occurrence and Photochemical Behavior of Substituted Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	GE Lin-ke, WANG Zi-yu, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (3957)
Cadmium and Arsenic Interactions During Co-adsorption onto Goethite	SU Zi-xian, LIU Sai-hong, GUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Catalyst Cyclodextrin-Fe-TAML to Activate H ₂ O ₂ and Oxidize Organic Micropollutants in Water	LIU Qing-quan, CAI Ben-zhe, CAI Xi-yun (3978)
Performance and Reaction Mechanism of Co(II) Mediated Activation of Peroxymonosulfate for Degrading Nitrilotris (Methylene Phosphonic Acid)	ZHU Jing-lin, WANG Shu (3990)
Change in Granulation Potential and Microbial Enrichment Characteristics of Sludge Induced by Microplastics	XIE Qing-fan, YU Nan, ZHANG Ni, <i>et al.</i> (3997)
Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China	WANG Jing, WEI Heng, PAN Bo (4006)
Source Analysis and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Geological High Background Area in Southeastern Chongqing	JIANG Yu-lian, YU Jing, WANG Rui, <i>et al.</i> (4017)
Integrated Analysis on Source-exposure Risk of Heavy Metals in Farmland Soil Based on PMF Model: A Case Study in the E-waste Dismantling Area in Zhejiang Province	FANG Jia, HE Ying, HUANG Nai-tao, <i>et al.</i> (4027)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Farmland Soil and Crops in the Suburbs of Urumqi	FAN Yue, CAO Shuang-yu, Nuerla Ailijiang, <i>et al.</i> (4039)
Distribution and Driving Mechanisms of Antibiotic Resistance Genes in Desert-Oasis Continuum	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yidan, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4052)
Characteristics of Antibiotic Contamination of Soil in China in Past Fifteen Years and the Bioremediation Technology: A Review	ZHAO Xiao-dong, QIAO Qing-qing, QIN Xiao-rui, <i>et al.</i> (4059)
Modified Biochar for Remediation of Soil Contaminated with Arsenic and Cadmium: A Review	LÜ Peng, LI Lian-fang, HUANG Xiao-ya (4077)
Effect of Biogas Slurry Return to Field on Heavy Metal Accumulation in Soil-crop System: A Meta-analysis	ZHAO Qi-zhi, YANG Zhi-min, KONG Fan-jing, <i>et al.</i> (4091)
Remediation Effect of Two Iron-modified Biochars on Slightly Alkaline Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	LIANG Xin-ran, HE Dan, ZHENG Zhao-hua, <i>et al.</i> (4100)
Effects of Straw Removal Measure on Soil Cd Bioavailability and Rice Cd Accumulation	WANG Zi-yu, ZHOU Hang, ZHOU Kun-hua, <i>et al.</i> (4109)
Application of Desulphurized Gypsum with Straw to Improve Physicochemical Properties of Saline-alkali Land in Yellow River Delta	ZHAO Hui-li, YU Jin-yi, LIU Tao, <i>et al.</i> (4119)
Biological Evaluation and Key Stress Factor Diagnosis of Compound Contaminated Soil Based on Environmental DNA	HUANG Xiang-yun, ZHONG Wen-jun, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4130)
Comprehensive Quality Assessment of Soil-Maize Heavy Metals in High Geological Background Area	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (4142)
Ecological Risk and Health Risk of Heavy Metal Pollution in Vegetable Production System of Zhejiang Province	ZHANG Shu-min, LIU Cui-ling, YANG Gui-ling, <i>et al.</i> (4151)
Effect of Biochar with Phosphorus Fertilizer on Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Nutrient Uptake of <i>Alfalfa</i>	LIU Xin-yu, WANG Dong-mei, ZHANG Ze-zhou, <i>et al.</i> (4162)
Effects of Low-density Polyethylene Microplastics on the Growth and Physiology Characteristics of <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk	ZHOU Ying, JIANG Wen-ting, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4170)
Effects of Biogas Slurry Application on Soil Microbial Communities Structure and Function During Wheat-rice Stubble Period	QIAO Yu-ying, XI Hui, LI Na, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Soil Bacterial Community Structure and Ecological Function Characteristics in Different Pollution Levels of Lead-zinc Tailings in Datong	LIU Ze-xun, ZHUANG Jia-yao, LIU Chao, <i>et al.</i> (4191)
Effect of Fire-deposited Charcoal on Soil Organic Carbon Pools and Associated Enzyme Activities in a Recently Harvested <i>Pinus massoniana</i> Plantation Subjected to Broadcast Burning	YAO Zhi, JIAO Peng-yu, WU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (4201)