

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)	

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*

(鲁东大学资源与环境工程学院, 滨海生态水文过程与环境安全实验室, 烟台 264025)

摘要:为探索秸秆与脱硫石膏配施改良滨海盐渍化土壤效果,以黄河三角洲地区碱化盐土为研究对象,通过田间小区试验,设置对照(CK)、脱硫石膏(DG)、中量秸秆(MS)、脱硫石膏+低量秸秆(DGLS)、脱硫石膏+中量秸秆(DGMS)和脱硫石膏+高量秸秆(DGHS)共6个处理,结合团聚体分级法比较不同处理下滨海盐碱化土壤容重、总孔隙度、pH、可溶性盐含量、微生物量碳、溶解性有机碳、新碳和团聚体有机碳的变化。结果发现,MS和DGHS处理显著降低了土壤容重,增加了土壤总孔隙度、含水率和平均重量直径;各处理下土壤pH和碱化度均显著降低,且无显著性差异;DG处理显著降低了土壤钠吸附比,与MS处理相比,DGLS、DGMS和DGHS处理的土壤钠吸附比有进一步降低的趋势,降幅范围为57%~66%。DGLS、DGMS和DGHS处理的土壤可溶性 Na^+ 分别较MS降低27.92%、32.23%和20.15%,而可溶性 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 含量显著增加;与CK相比,各处理均能显著降低 Cl^- 含量,且各处理间差异不显著。与MS相比,DGMS和DGHS处理微生物量碳和溶解性有机碳则分别显著提高113%、147%和22.81%、28.24%。DGLS、DGMS和DGHS处理新碳形成较MS分别增加67%、114%和175%。DGLS、DGMS和DGHS处理的细大团聚体粒级比例平均值较MS处理提高29.12%;秸秆还田和脱硫石膏施用使盐渍化土壤粗大团聚体和细大团聚体粒级有机碳含量增加最多。DGMS和DGHS处理的粗大团聚体和细大团聚体粒级中新碳形成平均值较MS处理分别提高233%和142%。脱硫石膏施入土壤不会导致土壤重金属污染,不同处理的土壤重金属含量都低于土壤环境质量的二级标准。研究结果可为黄河三角洲滨海盐碱土改良利用以及工农业废弃物综合利用提供科学依据。

关键词:盐碱土改良; 脱硫石膏; 秸秆; 黄河三角洲; 土壤理化性质

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)07-4119-11 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202208047

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, WANG Li, ZHAO Ying*

(Coastal Eco hydrological Process and Environmental Safety Laboratory, School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China)

Abstract: In order to explore the effect of combining straw and desulphurized gypsum on improving coastal saline-alkali soil, taking the alkaline saline soil in the Yellow River Delta as the research object, six treatments including the control (CK), desulphurized gypsum (DG), medium straw amount (MS), desulphurized gypsum + low straw amount (DGLS), desulphurized gypsum + medium straw amount (DGMS), and desulphurized gypsum + high straw amount (DGHS) were set up through a field location experiment. Combined with the aggregate classification method, the changes in bulk density, total porosity, pH, soluble salt content, microbial biomass carbon, dissolved organic carbon, new carbon, and aggregate organic carbon of coastal saline alkali soil under different treatments were compared. The results showed that the MS and DGHS treatments significantly reduced soil bulk density and increased soil total porosity, water content, and average weight diameter. The pH and exchange sodium percentage decreased significantly under all treatments, and there was no significant difference. DG treatment significantly reduced the soil sodium adsorption ratio. Compared with that in the MS treatment, the soil sodium adsorption ratio of DGLS, DGMS, and DGHS showed a further decreasing trend, with a decrease range of 57%-66%. Compared with MS, soil soluble Na^+ decreased by 27.92%, 32.23%, and 20.15% under the DGLS, DGMS, and DGHS treatments, whereas the soil soluble Ca^{2+} and SO_4^{2-} contents increased significantly. Compared with that in CK, all treatments could significantly reduce Cl^- content, and there was no significant difference among all treatments. Compared with that in MS, microbial biomass carbon and dissolved organic carbon were significantly increased by 113% and 147% by DGMS and 22.81% and 28.24% by DGHS, respectively. The new carbon formation of DGLS, DGMS, and DGHS was 67%, 114%, and 175% higher than that of MS, respectively. The average size proportion of fine aggregates treated by DGLS, DGMS, and DGHS was 29.12% higher than that treated by MS. Straw returning and application of desulphurized gypsum increased the organic carbon content of coarse aggregates and fine aggregates in salinized soil. The average value of new carbon formation in coarse aggregates and fine aggregates treated by DGMS and DGHS was 233% and 142% higher than that treated by MS, respectively. Desulphurized gypsum applied to soil did not lead to soil heavy metal pollution, and the soil heavy metal content of different treatments was lower than the secondary standard of the soil environmental quality standard. These results can provide scientific basis for the improvement and utilization of coastal saline-alkali soil and the comprehensive utilization of industrial and agricultural wastes in the Yellow River Delta.

Key words: saline-alkali soil improvement; desulphurized gypsum; straw; Yellow River Delta; physical and chemical properties of soil

我国滨海盐碱土面积大且分布广,普遍存在盐碱化严重、肥力低下和结构不良等障碍因素,作物产量低而不稳^[1]。黄河三角洲面积约50万 hm^2 ,属典型滨海盐碱土,是我国重要的后备土地资源;但土壤整体偏碱,耕层盐分含量高和有机质低,耕种前需要土壤改良处理^[2,3]。在中国东部耕地资源紧缺、人地供需失衡的背景下,开发低成本和有效的盐碱

土修复措施已成为全球关注的重点问题。

改良盐碱土必须去除部分或大部分交换性钠、

收稿日期: 2022-08-05; 修订日期: 2022-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(42207410); 山东省自然科学基金项目(ZR2020QD115); 山东省杰出青年基金项目(ZR2019JQ12); 烟台市校地融合发展项目

作者简介: 赵惠丽(1988~),女,博士,讲师,主要研究方向为盐碱地土壤改良与高效利用, E-mail: hlzhao@ldu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: yzhaosols@gmail.com

降低 pH 值和改善土壤物理结构,有效的方法如水利工程、化学改良剂(如石膏)和生物改良(如秸秆还田)^[4].但许多盐碱土改良措施都对淡水的依赖性强,沿海地区淡水资源匮乏和灌溉设施不完善^[5].目前我国粮食生产中年产秸秆约 7 亿 t,实行就地还田循环利用已成为替代传统有机肥改善土壤理化性质和提高肥力的最重要手段.近年来,国内外研究者在秸秆改良盐碱地方面,开展了大量的田间试验,先后在滨海盐碱土、内蒙古西辽河平原和黄淮海平原盐碱土等土壤上,对棉花秸秆、玉米秸秆和秸秆覆盖等进行了研究,结果表明,秸秆还田能有效降低土壤含盐量,改善土壤团聚体理化结构,提高土壤微生物和酶的活性,显著提高产量^[6~9].化学改良剂提供的 Ca^{2+} 能置换土壤胶体上的 Na^+ ,从而改变土壤可溶性盐离子组成,降低土壤盐碱程度^[10].国内外大量研究表明脱硫石膏改良盐碱地,能显著降低土壤钠吸附比(sodium adsorption ratio, SAR)、土壤碱化度(exchangeable sodium percentage, ESP)、改善土壤结构和提高作物产量^[11~13].部分研究还确定了脱硫石膏的施用量、改良年限和施用后的重金属安全性等^[14].近年来,关于石膏对土壤有机碳积累与矿化的影响,国内外学者也开展了研究工作,结果表明添加石膏能增加土壤有机碳含量、团聚体中碳含量和稳定性并能够降低 CO_2 的排放^[15,16].也有研究发现石膏与秸秆配施较单独施用秸秆可显著降低土壤 CO_2 释放^[17].有研究还发现单一施用秸秆或脱硫石膏均能增加土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)含量^[18,19].

目前,对于单一秸秆或施用脱硫石膏在土壤改良方面的研究已有很多,但秸秆与脱硫石膏配施对土壤理化性质方面的影响相对有限.此外,已有研究多集中于西北干旱区等盐碱地改良治理方面,关于配施对黄河三角洲地区盐碱土的改良效果研究还鲜

见报道.本研究在大田试验条件下,探讨了秸秆与脱硫石膏配施改良对土壤理化性质的影响,旨在为优化黄河三角洲盐碱土固碳策略和合理利用工农业废弃物改良培肥盐碱土提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验于 2019 ~ 2020 年在山东省东营市垦利县黄河口镇现代农业高质量发展产教融合东营基地(37°33'17.9"N, 118°55'51.4"E)进行,是黄河三角洲的核心地区.该地是温带季风气候,主要气候特色为夏季温度高伴随多雨,冬季寒冷且干燥,季风性显著.年均温 12.2℃,光照充分,年平均日照时长 2 682 h.平均降雨量 543 mm,降水年际变化大,其中约 65% 的降水主要集中在 7 ~ 8 月,雨热同期.

1.2 试验材料

试验土壤属于中度盐碱土,这一区域是长期种植水稻(C_3 作物)单作种植系统,土壤基本性状为:砂粒、黏粒和粉粒质量分数分别为 6%、27% 和 67%,容重为 $1.42 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, $\omega(\text{SOC})$ 为 $4.03 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\delta^{13}\text{C}$ 为 -23.21‰ ,含水率为 25.32%, $\omega(\text{全氮})$ 为 $0.24 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{全磷})$ 为 $0.67 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{全钾})$ 为 $18.41 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH 为 7.89,电导率为 $2.61 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, $\omega(\text{交换性钠})$ 为 $2.62 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$.供试秸秆选取玉米秸秆(C_4 作物),采自试验基地周边上年玉米收获后的风干秸秆.秸秆的含碳量为 45.6%,含氮量为 0.68%, $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -13.78‰ .烟气脱硫石膏采自东营胜利发电厂,主要成分为 $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$,富含硫、钙等植物所需的有益矿物质元素, pH 为 7.23, $\omega(\text{CaCO}_3)$ 为 $255 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.除汞外,烟气脱硫石膏样品中的重金属含量低于土壤含量,满足《土壤环境质量标准(试行)》(GB 15618-2018)的二级标准($\text{pH}\geq 7.53$,见表 1).

表 1 供试土壤和脱硫石膏的重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Heavy metals in soil and gypsum/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	Cr	Pb	Cd	Hg	As
脱硫石膏	13.16 ± 0.28	1.48 ± 0.06	0.01 ± 0.001	2.16 ± 0.18	无
供试土壤	24.08 ± 0.32	10.01 ± 0.61	0.15 ± 0.03	0.03 ± 0.003	7.75 ± 0.15
GB 15618-2018 二级标准($\text{pH}>7.5$)	250	170	0.60	3.40	25.00
GB 15618-2018 一级标准(自然背景)	90.00	35.00	无	0.15	15.00

1.3 试验设计

大田试验采取随机区组设计,设置不添加秸秆与脱硫石膏作为对照(CK)、脱硫石膏(DG)、中量秸秆(MS)、脱硫石膏 + 低量秸秆(DGLS)、脱硫石膏 + 中量秸秆(DGMS)和脱硫石膏 + 高量秸秆(DGHS)共 6 个处理;其中,低量秸秆、中量秸秆、

高量秸秆和脱硫石膏的施用量分别为 5、10、15 和 $29 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,其中采集试验地土样并测定基础数据,根据 Xiao 等^[20]描述的方法计算脱硫石膏用量,秸秆的用量参考 Xie 等^[21]的研究,重复 3 次,小区面积 42 m^2 ($6 \text{ m}\times 7 \text{ m}$),小区区组之间用深 60 cm、宽 50 cm 的排水沟分隔,及时排出降雨、灌溉淋洗的盐

分. 试验前将秸秆打碎, 长度小于 5 cm, 按照所设置处理, 秸秆与脱硫石膏撒施在土壤表面后, 采取微耕机将秸秆与脱硫石膏旋入 0~20 cm 土层. 供试作物为棉花(鲁棉 37), 棉花于 2020 年 5 月 10 日播种, 10 月 25 日棉花收获(因首次开垦, 土壤盐碱度高无产量). 种植前 7~10 d 左右, 为了浸出可溶性盐, 用黄河水灌溉一次, 灌溉量为 $2\ 700\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 用黄河水(矿化度为 $0.61\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 总盐为 $610\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 为 8.4)灌溉. 其他田间管理同当地惯例方式保持一致.

1.4 指标测定

棉花收获后, 采用“S”形取样, 从每个小区采集 0~20 cm 土层的土壤样本, 沿自然裂纹轻轻打开, 一部分土壤使其通过 8 mm 的筛, 风干后土壤样品混合均匀用于团聚体分级; 一部分土壤剔除植物残体和其他杂物, 研碎磨细过 2 mm 和 0.25 mm 筛, 来测定土壤其他特性. 土壤容重(bulk density, BD)采取环刀法测定^[22]; 土壤总孔隙度采取容重-密度计法; 土壤含水率采取烘干法; 将风干的土壤去除杂质, 称取土壤样品 100 g 放置在筛顶(套筛孔径依次为 2、0.25 和 0.053 mm), 在桶中缓慢放置套筛, 静置 5 min, 使用团聚体分析仪筛分 8 min, 然后将筛子取出, 静置, 将各套筛上团聚体土壤移至玻璃皿中, 烘干称重^[23]. 土壤团聚体平均重量直径(mean weight diameter, MWD)计算公式如下:

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

式中, R_i 为某级别团聚体平均直径, W_i 为该级别团聚体干重.

土壤 pH 采取雷磁 PHS-3E pH 计测定(土水比为 1:5); 土壤电导率(electrical conductivity, EC)采取雷磁 DDS-307A 电导率仪测定(土水比为 1:5); 土壤阳离子交换量采取乙酸铵浸提法测定^[24]; K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 委托中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 利用离子色谱仪(DIONEX ICS-2100, Thermo Fisher, 美国)测定. SOC 采取重铬酸钾-浓硫酸外加热法^[25]; 土壤溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)采取蒸馏水浸提法; 微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)采取氯仿熏蒸的方法^[26], 采用三氯甲烷熏蒸直接提取, 对照土壤和熏蒸后的土壤用 $0.5\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}\ \text{K}_2\text{SO}_4$ 提取(土液比为 1:5), 滤液中的有机碳含量采用有机碳分析仪(TOC-VCPH, 岛津公司)测定. 土壤 MBC 含量以熏蒸和未熏蒸土样 $0.5\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}\ \text{K}_2\text{SO}_4$ 提取液中含碳量之差除以系数得到, 即 $\text{BC} = \text{EC}/0.45$. 其中, BC

为土壤 MBC 含量; EC 为熏蒸土样与未熏蒸土样提取液含碳量之差; 0.45 为浸提系数. 同时, 计算稻田土壤活性有机碳比例, 公式为土壤活性有机碳比例 = 土壤活性有机碳含量/土壤总有机碳含量 $\times 100\%$. 使用带有同位素比值质谱仪的干式燃烧分析仪测定了原土和团聚体中土壤有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值. 1 g 土壤用 10 mL $1\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}\ \text{HCl}$ 预处理 12 h, 以去除碳酸盐. 根据工作标准的重复测量, $\delta^{13}\text{C}$ 的精度为 $\pm 0.10\%$. 样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 表示如下:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] \times 1\ 000 \quad (2)$$

式中, $R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$, R_{standard} 表示 PDB (peedee belemnite) 标准, $R_{\text{PDB}} = 0.011\ 237\ 2$.

根据培养前后土壤样品及秸秆的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 采用下列公式计算培养结束后土壤中来源于秸秆的有机碳(C_{straw})的含量.

$$\text{New}_c = C_t \times \frac{\delta^{13}\text{C}_t - \delta^{13}\text{C}_s}{\delta^{13}\text{C}_{\text{straw}} - \delta^{13}\text{C}_s} \quad (3)$$

式中, New_c 表示新碳形成(newly SOC formed), 为添加秸秆土壤中来自秸秆碳的量; C_t 为添加秸秆的 SOC 含量; $\delta^{13}\text{C}_t$ 为添加秸秆的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值; $\delta^{13}\text{C}_s$ 为不加秸秆的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值; $\delta^{13}\text{C}_{\text{straw}}$ 为秸秆的 $\delta^{13}\text{C}$ 值.

土壤铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)用 $2\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}\ \text{KCl}$ 溶液浸提, AA3 连续流动分析仪测定^[27]; 土壤速效磷(available phosphorus, AP)用 $0.5\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}\ \text{NaHCO}_3$ 浸提, 钼锑抗比色法测定, 土壤速效钾(available potassium, AK)用乙酸铵浸提火焰光度计法测定^[28,29]. ESP 和 SAR 的计算公式分别为:

$$\text{SAR} = \text{Na}^+ \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{2}(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})} \right)^{-1} \quad (4)$$

$$\text{ESP} = \frac{\text{交换性 Na}^+}{\text{阳离子交换量}} \times 100\% \quad (5)$$

1.5 数据处理与分析

Microsoft Excel 2016 和 Sigmaplot 12.5 用于试验数据的整理以及图表的绘制, 使用 SPSS 21.0 软件对试验数据进行统计分析和主成分分析, 用最小显著差数法(LSD)处理不同指标之间的差异, 验证是否存在显著差异($P < 0.05$), 并采取 Pearson 相关系数进行评价.

2 结果与分析

2.1 秸秆与脱硫石膏配施对土壤容重、含水率和孔隙度的影响

不同改良剂处理滨海盐碱土物理性质见表 2. MS 处理的土壤容重较 CK 显著减少 2.70%, 而土壤含水率、总孔隙度和 MWD 分别较 CK 提高

10.39%、3.45% 和 16.67%。与 CK 相比,DGHS 处理明显降低了土壤容重,提高了土壤含水率和总孔隙率,但与 MS 处理相比无显著性差异。除 DG 处理外,其余各处理均可不同程度增加土壤 MWD。与 MS 处理相比,DGLS、DGMS 和 DGHS 处理的土壤 MWD

分别增加 38.71%、38.71% 和 35.48%,各处理间差异不显著。上述分析表明,脱硫石膏处理对耕层土壤物理性质影响不显著,而秸秆、脱硫石膏与高量秸秆配施处理时,土壤总孔隙度与 MWD 增加较显著,土壤容重显著降低。

表 2 秸秆与脱硫石膏配施下土壤容重、总孔隙度的变化¹⁾

Table 2 Soil bulk density and total porosity under combined application of straw and desulfurization gypsum				
处理	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	含水率/%	土壤总孔隙度/%	MWD
CK	$1.48 \pm 0.02\text{a}$	$24.25 \pm 0.00\text{b}$	$44.07 \pm 0.67\text{b}$	$0.30 \pm 0.01\text{c}$
DG	$1.46 \pm 0.00\text{ab}$	$25.82 \pm 0.01\text{ab}$	$44.60 \pm 0.09\text{ab}$	$0.29 \pm 0.01\text{c}$
MS	$1.44 \pm 0.01\text{b}$	$26.77 \pm 0.01\text{a}$	$45.59 \pm 0.39\text{a}$	$0.35 \pm 0.03\text{b}$
DGLS	$1.45 \pm 0.02\text{ab}$	$25.86 \pm 0.01\text{ab}$	$45.24 \pm 0.87\text{ab}$	$0.42 \pm 0.02\text{a}$
DGMS	$1.45 \pm 0.02\text{ab}$	$26.52 \pm 0.01\text{a}$	$45.05 \pm 0.88\text{ab}$	$0.43 \pm 0.02\text{a}$
DGHS	$1.44 \pm 0.02\text{b}$	$26.95 \pm 0.01\text{a}$	$45.66 \pm 0.70\text{a}$	$0.41 \pm 0.01\text{a}$

1) 数值为平均值 $\pm$ 标准误,不同小写字母表示处理之间的显著差异($P < 0.05$),下同

2.2 秸秆与脱硫石膏配施对土壤盐碱化的影响

2.2.1 秸秆与脱硫石膏配施对土壤可溶性盐的影响

如表 3 所示, Na^+ 是阳离子主体,除 DG 和 MS 处理外,DGLS、DGMS 和 DGHS 处理的 Na^+ 分别较 CK 降低 43.41%、45.50% 和 35.66%,而 DGLS 和 DGHS 处理 Ca^{2+} 分别较 CK 增加 4.48 倍和 3.69 倍,DG、DGLS、DGMS 和 DGHS 处理的 SO_4^{2-} 分别较 CK 增加 2.70、4.10、3.41 和 4.14 倍,与

CK 相比,DG 处理降低了 HCO_3^- 含量,MS 处理增加了 K^+ 含量。各处理均降低了 Cl^- 含量,但各处理间无显著性差异,DG、DGLS 和 DGHS 处理的土壤 EC 较 CK 增加 15.12%~31.79%,其中,DGLS 增幅最显著。盐碱土中对植物生长有害的 Na^+ 和 Cl^- 含量显著降低,而对植物生长有益的 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 等离子含量显著升高,滨海盐碱土得到了有效改良。

表 3 秸秆与脱硫石膏配施下土壤电导率和可溶性盐的变化

Table 3 Soil EC and content of soil soluble salt under combined application of straw and desulfurized gypsum								
处理	离子交换量/ $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$							EC $/\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$
	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}	Cl^-	HCO_3^-	
CK	$12.19 \pm 1.07\text{a}$	$0.10 \pm 0.01\text{b}$	$1.08 \pm 0.25\text{b}$	$1.42 \pm 0.48\text{a}$	$1.88 \pm 0.11\text{c}$	$0.44 \pm 0.02\text{a}$	$0.23 \pm 0.02\text{a}$	$3.24 \pm 0.22\text{b}$
DG	$10.22 \pm 0.78\text{ab}$	$0.15 \pm 0.01\text{ab}$	$2.93 \pm 0.33\text{ab}$	$1.79 \pm 0.05\text{a}$	$5.08 \pm 0.37\text{b}$	$0.27 \pm 0.01\text{b}$	$0.17 \pm 0.07\text{b}$	$3.73 \pm 0.21\text{ab}$
MS	$10.37 \pm 0.88\text{ab}$	$0.16 \pm 0.01\text{a}$	$0.98 \pm 0.15\text{b}$	$1.20 \pm 0.24\text{a}$	$2.29 \pm 0.31\text{c}$	$0.28 \pm 0.10\text{b}$	$0.23 \pm 0.02\text{ab}$	$3.05 \pm 0.30\text{b}$
DGLS	$7.47 \pm 0.26\text{bc}$	$0.13 \pm 0.02\text{ab}$	$4.84 \pm 0.87\text{a}$	$1.84 \pm 0.39\text{a}$	$7.70 \pm 0.79\text{a}$	$0.24 \pm 0.04\text{b}$	$0.20 \pm 0.01\text{ab}$	$4.27 \pm 0.66\text{a}$
DGMS	$7.03 \pm 1.78\text{c}$	$0.13 \pm 0.02\text{ab}$	$2.91 \pm 0.16\text{ab}$	$1.25 \pm 0.27\text{a}$	$6.41 \pm 0.74\text{ab}$	$0.27 \pm 0.04\text{b}$	$0.21 \pm 0.02\text{ab}$	$2.87 \pm 0.69\text{b}$
DGHS	$8.29 \pm 1.78\text{bc}$	$0.14 \pm 0.01\text{ab}$	$3.99 \pm 1.47\text{a}$	$1.87 \pm 0.49\text{a}$	$7.78 \pm 0.63\text{a}$	$0.28 \pm 0.02\text{b}$	$0.20 \pm 0.02\text{ab}$	$3.77 \pm 0.61\text{ab}$

2.2.2 秸秆与脱硫石膏配施对土壤碱化度的影响

如图 1 所示,秸秆与脱硫石膏配施后的土壤 pH 较对照处理有显著下降,降幅在 2.45%~3.87% 之间[图 1(a)],这说明脱硫石膏能降低盐渍土的 pH 值,但处理之间没有显著性差异。ESP 的高度直接反

映了改善的结果。CK 处理的碱化度达到 14% [图 1(b)],为中度碱化土壤^[26]。各处理均能显著降低土壤 ESP,降低幅度在 18.26%~34.87% 之间,土壤盐碱化程度由中度盐碱土变为轻度盐碱土。SAR 的高低可反映土壤钠质化的程度,是评价土壤钠危害的

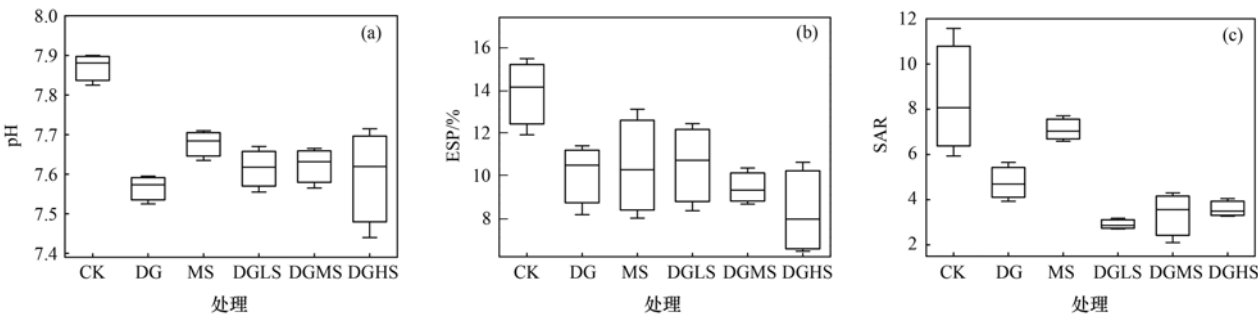


图 1 秸秆与脱硫石膏配施下土壤 pH 值、ESP 和 SAR 的变化

Fig. 1 Soil pH, ESP, and SAR under combined application of straw and desulfurized gypsum

常用指标. 其中, DG 处理大大减小了土壤 SAR, 与 MS 处理相比, DGLS、DGMS 和 DGHS 处理的土壤 SAR 明显减小, 降幅范围为 41.14%~56.74% [图 1(c)]. 在所有处理中, 秸秆与脱硫石膏配施可以大幅降低土壤 SAR.

2.3 秸秆与脱硫石膏配施对土壤养分含量的影响

不同改良措施下土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、AP 和 AK 整体上均有不同程度增加(图 2). DG、MS、

DGLS、DGMS 和 DGHS 处理的 NH_4^+ -N 与 NO_3^- -N 与 CK 相比增幅分别为 25.15%~55.37% 和 10.11%~74.38%, 其中, MS 和 DGHS 处理的 NH_4^+ -N 增幅最显著, DGHS 处理 NO_3^- -N 增幅最显著[图 2(a) 和 2(b)]; 同时, DGHS 处理的 AP 较 CK 显著增加 97.99%, 与 CK 相比, 各处理土壤 AK 含量均有所增加, 但处理之间差异均不显著[图 2(c) 和 2(d)].

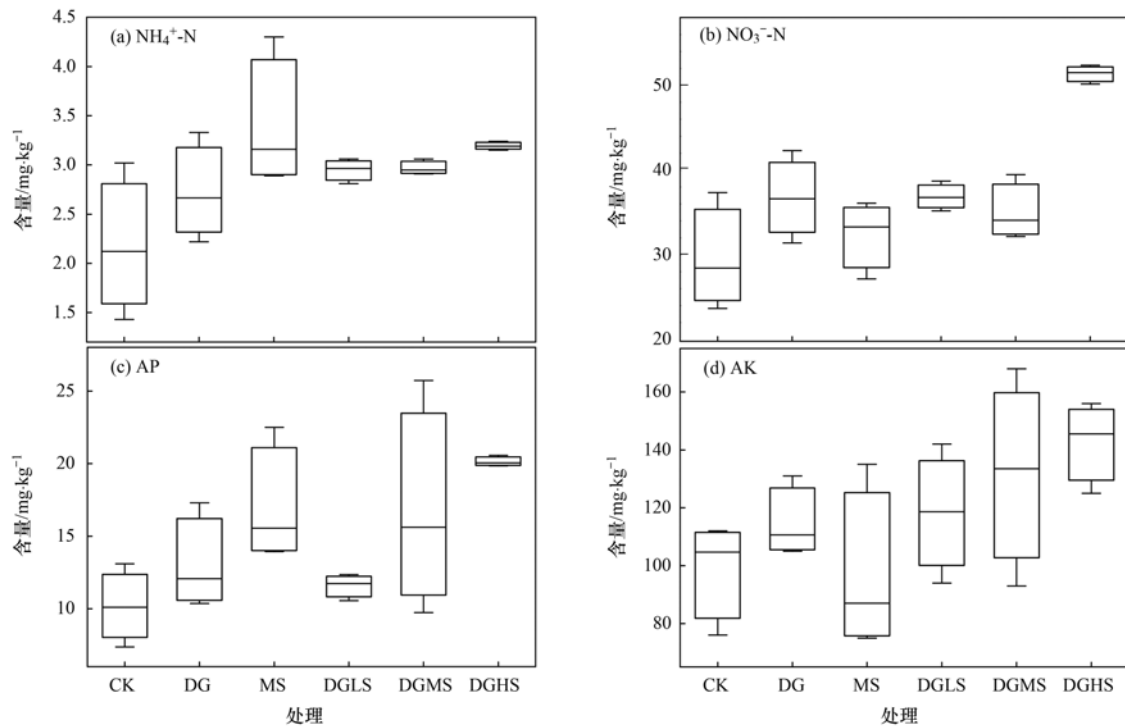


图 2 秸秆与脱硫石膏配施下土壤养分的变化

Fig. 2 Soil nutrients under combined application of straw and desulfurized gypsum

2.4 秸秆与脱硫石膏配施对土壤有机碳组分的影响

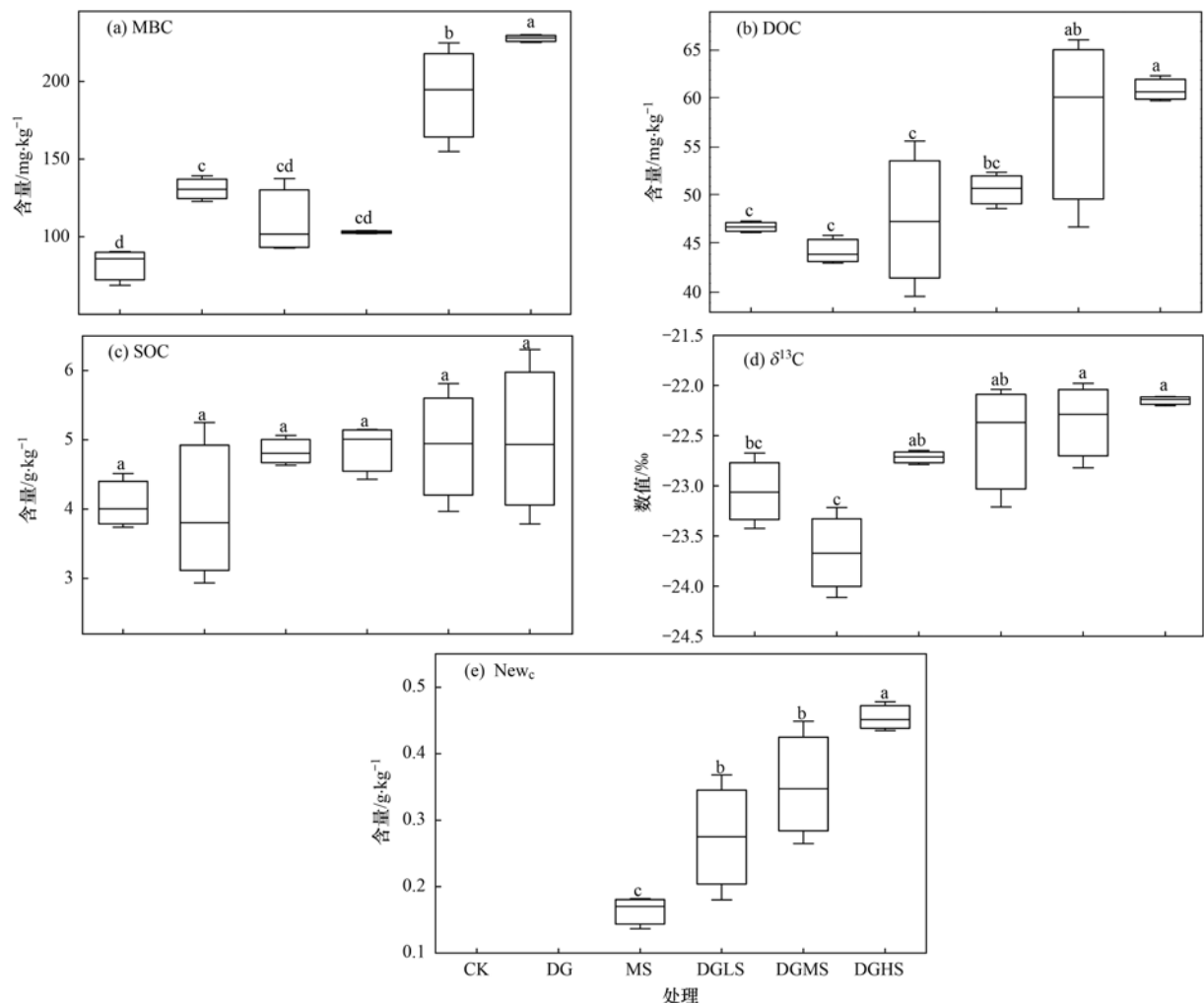
就土壤 MBC 而言, DG 处理的土壤 MBC 含量较 CK 显著增加 89.53%, DGMS 和 DGHS 处理的土壤 MBC 含量显著高于 MS 处理, 分别增加了 2.12 倍和 2.46 倍[图 3(a)]. 与 CK 处理相比, DGMS 和 DGHS 处理的土壤 DOC 含量分别增加 24.60% 和 30.18%, 与 MS 处理相比, DGMS 和 DGHS 处理均显著提高 DOC 含量, 增幅达到 22.76% 和 28.24% [图 3(b)]. $\omega(\text{SOC})$ 的含量范围在 3.95~4.99 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 各处理 SOC 较 CK 均有不同程度的增加, 但无显著性差异[图 3(c)].

如图 3(d) 所示, 添加秸秆提高了土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 各处理土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值大小依次为: DGHS > DGMS > DGLS > MS, 其中, DGHS 和 DGMS 处理的土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别较 CK 显著增加 6.56‰ 和 3.12‰. 与 MS 处理相比, 秸秆与脱硫石膏配施显著提高了土壤新碳形成, 其中, DGMS 和 DGHS 处理显著增加 2.14 倍和 2.75 倍[图 3(e)].

秸秆与脱硫石膏配施可以大幅提高微生物生物量碳、溶解性有机碳和新碳的含量, 并没有对土壤有机碳产生影响.

2.5 秸秆与脱硫石膏配施对土壤团聚体有机碳的影响

加入脱硫石膏和秸秆还田对盐渍化土壤团聚体组成及其有机碳含量产生了显著的影响(图 4). 各团聚体的质量分数与聚体粒径成反比[图 4(a)]. MS、DGLS、DGMS 和 DGHS 处理土壤的粗大团聚体比例较对照分别高 223%、209%、243% 和 259%, 与 MS 处理相比, DGLS、DGMS 和 DGHS 处理土壤的细大团聚体比例分别高 30.82%、30.83% 和 25.75%. 相反, 相对于 CK 来说, 各处理明显降低了微团聚体比例[图 4(a)]. 图 4(b) 为 SOC 在不同粒径土壤中的分配比例, 秸秆与脱硫石膏添加处理促进了 SOC 在大团聚体中的聚集. 与对照相比, DG、MS、DGLS、DGMS 和 DGHS 处理的粗大团聚体各增加了 156%、129%、81%、



不同小写字母表示处理之间的显著差异 ($P < 0.05$)

图3 秸秆与脱硫石膏配施下土壤有机碳组分的变化

Fig. 3 Soil organic carbon fraction under combined application of straw and desulfurized gypsum

150%和202%的有机碳含量,MS、DGMS和DGHS处理的细大团聚体有机碳含量较对照分别增加了46.81%、64.33%和73.54%。

如图4(c)所示,与对照相比,外源添加秸秆与脱硫石膏处理大团聚体土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显上升,在粗大团聚体中,MS、DGLS、DGMS和DGHS处理的 ^{13}C 丰度值分别比对照高1.46%、3.86%、4.29%和3.80%;在细大团聚体中,相应的值分别为2.38%、2.36%、4.85%和5.15%。相对应的,秸秆与脱硫石膏添加更大程度地促进了大团聚体新碳形成,在粗大团聚体中,DGLS、DGMS和DGHS处理的新碳形成分别比MS高109%、221%和244%;在细大团聚体中,DGMS和DGHS处理的新碳形成平均比MS与DG高264%[图4(d)]。总体结果表明:秸秆与脱硫石膏配施能够明显增加土壤中大团聚体的比例而降低土壤微团聚体比例;秸秆与脱硫石膏配施显著增加多个团聚体粒级的SOC及新碳含量。

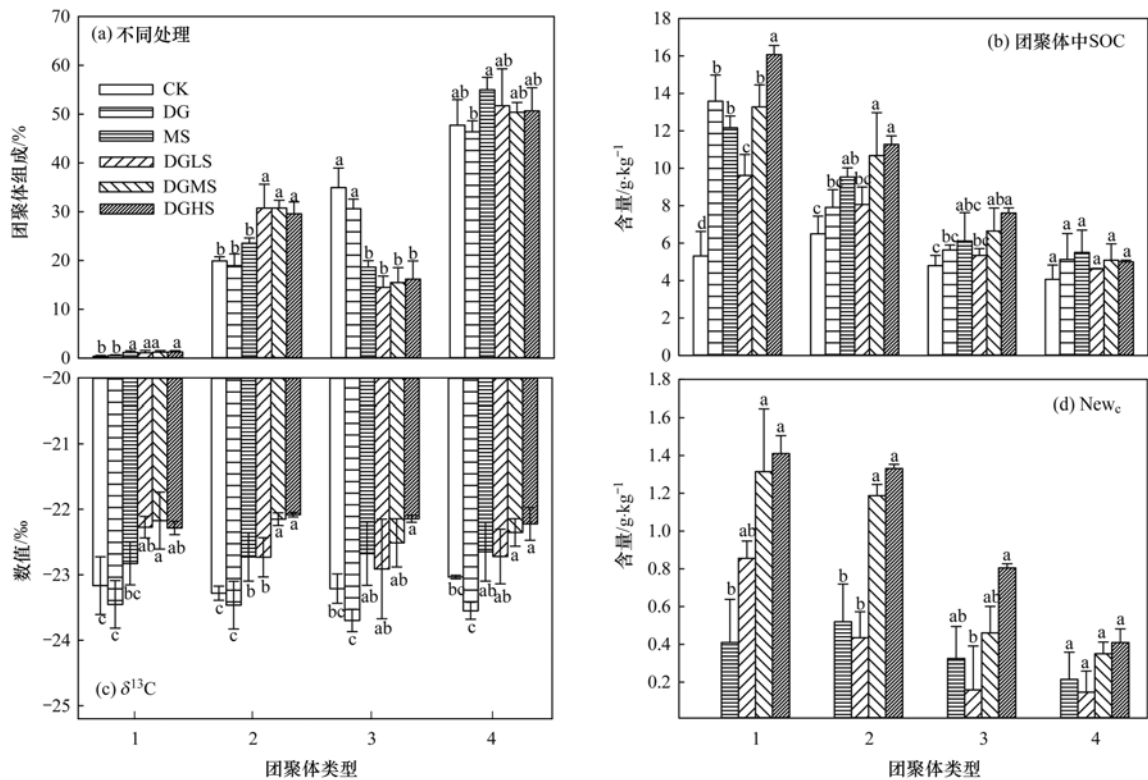
2.6 秸秆与脱硫石膏配施对盐渍化土壤重金属的影响

如表4所示,DG处理、MS处理、DGMS处理和DGHS处理的铬含量与对照处理相比,分别增加了72.32%、71.15%、82.01%和85.73%。与CK相比,DGHS处理的汞含量提高了3.32倍。施用脱硫石膏处理的土壤重金属含量,都小于土壤环境质量标准的二级标准,也进一步证明脱硫石膏改良盐碱地对土壤环境是安全的。

2.7 土壤有机碳与土壤各物理化学性质指数的相互关系

如图5所示,各处理下土壤的物理和化学性质各指标间存在不同程度的相关性。土壤BD与土壤SOC和New_c呈显著负相关($P < 0.05$),土壤孔隙度(soil porosity, SP)与土壤SOC和New_c呈极显著正相关;MWD与DOC、SOC和New_c呈极显著正相关,MWD与水溶性Na⁺呈极显著负相关;水溶性Na⁺与土壤SOC和New_c呈极显著负相关;AK、AP

和速效氮 (available nitrogen, AN) 与土壤 MBC、DOC 和 New_e 呈显著正相关($P < 0.05$).



1. 粗大团聚体, 2. 细大团聚体, 3. 微团聚体, 4. 粘粉粒团聚体; 不同小写字母表示处理之间的显著差异 ($P < 0.05$)

图 4 秸秆与脱硫石膏配施下团聚体组成及团聚体中有机碳含量

Fig. 4 Aggregate size and aggregate-associated organic carbon under combined application of straw and desulfurized gypsum

表 4 秸秆与脱硫石膏配施下土壤重金属元素含量的变化/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 4 Heavy metal elements in soil under combined application of straw and desulfurized gypsum/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

处理	Cr	Pb	Cd	Hg	As
CK	25.05 ± 2.08b	10.33 ± 1.37a	0.17 ± 0.08a	0.03 ± 0.00b	7.82 ± 0.55a
DG	43.15 ± 16.63a	9.14 ± 1.07a	0.17 ± 0.06a	0.07 ± 0.01ab	7.61 ± 0.35a
MS	42.87 ± 21.66a	10.61 ± 1.50a	0.17 ± 0.08a	0.04 ± 0.01ab	7.96 ± 0.66a
DGLS	35.12 ± 12.73ab	9.66 ± 2.06a	0.19 ± 0.08a	0.09 ± 0.01ab	8.32 ± 0.95a
DGMS	45.58 ± 14.74a	9.89 ± 0.42a	0.17 ± 0.13a	0.08 ± 0.02ab	8.31 ± 0.23a
DGHS	46.52 ± 8.58a	9.90 ± 1.08a	0.17 ± 0.07a	0.10 ± 0.09a	7.62 ± 1.03a
GB 15618-1995 二级标准($\text{pH} > 7.5$)	250	350	0.61	1.00	20.03

3 讨论

3.1 秸秆与脱硫石膏配施对滨海盐渍土特性的影响

土壤 pH 和土壤 ESP 是反映土壤碱化特性的重要指标. 单施脱硫石膏、秸秆与脱硫石膏配施均能明显降低土壤 pH、ESP 和 SAR, 施用脱硫石膏的土壤 pH 降低, 原因是 Ca^{2+} 把土壤胶体上的交换性 Na^{+} 置换后形成 Na_2SO_4 中性盐, 从而使土壤 pH 明显减小^[30]. 大量研究表明, 秸秆还田可不同程度地提高土壤有机质含量, 有机质中的大分子羧基对碱性离子起到一定的中和作用, 进而降低了土壤 pH, 这与本研究的结果一致^[31]. 在脱硫石膏中, 交换性 Na^{+} 含量由于 Ca^{2+} 在土壤胶体中置换而减少, 进而减小土壤 ESP, 结合灌溉使之淋洗, 使改良土壤的目

的得以达到^[32]. 此外, 脱硫石膏一方面可以置换土壤胶体吸附的 Na^{+} , 另一方面土壤中的钙含量也得以提高, 综合作用使土壤 SAR 显著降低^[33]. 前人关于有机无机复合措施改良盐碱土方面也做过相关的研究, 比如在土柱调查中, 石膏与堆肥(稻草和风信子)配施相对于对照、单独使用石膏或堆肥更有效地降低了盐碱土的盐分和碱度水平^[34]. 石膏与腐殖酸和有机肥配施已被证明可以改善盐碱化土壤 pH、SAR 和 EC 以及水稻的根系生长和产量^[35]. 有研究表明, 脱硫石膏与腐殖酸配施在降盐和向日葵增产方面均效果最好^[36].

本研究中除了 DGLS 处理外, 使用脱硫石膏改善了土壤结构, 添加脱硫石膏并没有明显提高土壤 EC. 除此之外, 土壤较高的可溶性盐一方面是因为

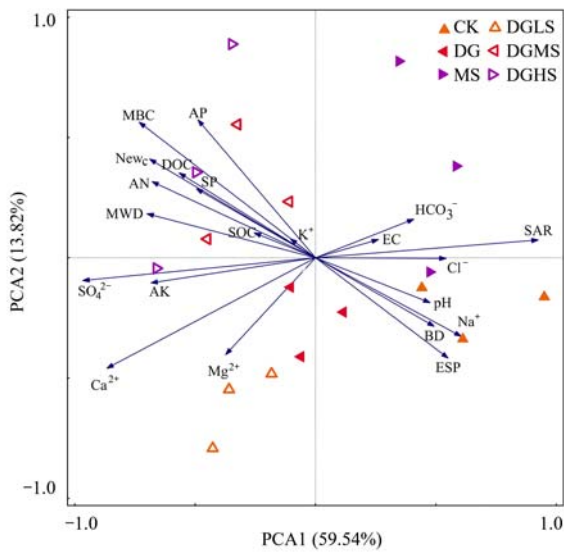


图5 土壤理化性质与土壤有机碳的主成分分析

Fig. 5 Principal component analysis of soil physical and chemical properties and soil organic carbon

施用脱硫石膏中含有的对植物生长有益的水溶性 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} , 但滨海盐渍土中如水溶性的 Na^+ 和 Cl^- 等对植物生长有害的盐离子均显著减少, 因此本研究中脱硫石膏的施用改善了土壤的盐基组分^[30]. 此外, 由于施用脱硫石膏改善了土壤结构, 土壤盐分在入渗过程中更容易被带往深层土壤或随地表水排出, 也是土壤 EC 没有明显提高的因素之一^[14]. 相对于单纯秸秆还田处理, 秸秆与脱硫石膏配施的土壤 Na^+ 含量下降幅度更为显著. 一方面, 土壤表层的水分因为秸秆的覆盖蒸发得以减少, 为土壤锁住更多的水分, 为脱硫石膏与土壤产生化学反应提供了一个较好的环境. 另一方面, 秸秆腐解产生的有机酸中的羧基分子具有化学活性和生物活性, 显著增强了钙离子与钠离子的置换作用. Son 等^[37] 也发表过类似研究, 在室内通过土柱淋洗试验方法评估了石膏结合稻草对沿海滩涂盐碱土化学性质的影响, 发现石膏 + 稻草相对于仅稻草处理土壤的碱度和盐分改良效果好.

3.2 秸秆与脱硫石膏配施对滨海盐渍土物理性质的影响

秸秆还田处理、高量秸秆与脱硫石膏配施的土壤容重明显降低, 土壤总孔隙度和水分含量增加, 表明秸秆还田对改善粉砂质盐土不良的通气性有较显著的效果. 这是因为添加秸秆可以增加地表水的入渗和降水储量, 提高了土壤含水率^[38]. 这与吕雯等^[39] 和马永财等^[40] 研究的结果一致. 因此, 秸秆还田可以在一定程度上改善土质和土壤孔隙状况, 是改良盐碱地的有效途径.

单施秸秆、秸秆与脱硫石膏配施均提高了盐碱

化土壤中细大团聚体的百分比和 MWD, 降低了微团聚体的百分比, 增加顺序依次为: $\text{DGLS} \approx \text{DGMS} \approx \text{DGHS} > \text{MS} > \text{DG}$ 处理. 本研究结果表明秸秆与脱硫石膏配施对土壤团聚体比例及团聚体稳定性改良效果显著高于单施秸秆处理. 团聚体形成与稳定性维系的 3 大类胶结物质是黏粒、无机胶结剂(多价阳离子如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、碳酸盐和氧化物)和有机胶结剂(土壤有机质、作物残体和真菌菌丝); 只有当土壤黏粒或 SOC 含量低时, 阳离子才在土壤团聚过程中起主导作用^[41, 42]. 在盐碱土改良中, 施加有机物料必不可少; 同时, 化学改良剂中 Ca^{2+} 具有将土壤矿物质和有机物质相结合的能力, 从而对 SOC 起到物理保护作用. 在脱硫石膏与秸秆配施措施下, 脱硫石膏可以改善土壤环境, 加速秸秆分解和养分释放; 添加的有机质可以与脱硫石膏中的 Ca^{2+} 发生反应, 这有利于有机碳的固存和土壤结构的改善. 前人也发现过类似结果, 在滨海滩涂复垦土壤上, 与单独添加稻草相比, 稻草还田与石膏施用相结合更有利于增强团聚体稳定性, 原因是石膏中 Ca^{2+} 替换土壤胶体上的可交换 Na^+ , 促进土壤黏粒聚凝^[43].

3.3 秸秆与脱硫石膏配施对土壤有机碳组分、新碳形成和团聚体碳的影响

所有改良剂处理并未显著降低土壤速效养分, 与贺坤等^[44] 研究的结果不一致, 其研究表明利用脱硫石膏改良作物时, 土壤速效磷与速效钾一定范围内的降低不会影响作物生长发育. 毛玉梅等^[45] 的盆栽试验结果也表明无机氮磷钾等养分并不是玉米生长的主要制约因素, 关键在于消除土壤盐渍化危害.

盐碱地 SOC 增加与土壤盐分的降低有关, 一方面可能是因为植物生长的改善和植物残体的大量投入, 另一方面是由于盐分降低引起土壤物理、化学和生物性质的变化, 进而提升 SOC 形成与稳定性^[46]. 本研究各处理并没有提高盐碱化土壤有机碳含量, 是因为土壤有机碳周转和含量变化需要较长时间尺度, 而包括 MBC 和 DOC 在内的土壤不稳定有机碳成分在较短的时间内敏感地反映了农学管理的影响^[47]. 秸秆的添加提高了盐碱化土壤 MBC 和 DOC 含量, 但无显著性差异, 而秸秆与脱硫石膏配施进一步提高了土壤 MBC 和 DOC 含量. 原因可能是盐碱化土壤微生物活性低, 分解转化产生的 DOC 含量少, 采取脱硫石膏改良盐碱土, 由于增加了 Ca 和 S 矿质养分, 能够促进土壤团聚体的形成和稳定性, 降低土壤可交换钠含量及 pH, 改变微生物活性及群落组成, 进而加快了秸秆碳转化, 从而提高了 MBC 和 DOC 含量.

农田 SOC 含量高低取决于外源有机物生成的

新有机碳与土壤原有有机碳矿化损失之间的平衡^[48]. 本研究中添加秸秆处理和秸秆与脱硫石膏配施处理均提高了新碳形成量,但各处理的 SOC 并没有显著性差异,是因为新碳增加的量级在土壤有机碳含量的量级中显得微乎其微. 秸秆与脱硫石膏配施处理的新碳形成量显著高于单纯秸秆处理,这可能是因为添加脱硫石膏改善了土壤理化性质,降低了土壤表面可交换 Na^+ 含量;同时促进了还田秸秆与土壤微生物之间的相互作用,最终以秸秆残留物、土壤微生物的主要代谢产物和生物残骸的形态更多的保存在土壤中,成为构成土壤有机碳库的主要组分,Liang 等^[49]也认为,微生物残留物是土壤高稳定性碳源的重要组成部分. 在盐碱化土壤中,高盐度降低了盐碱土植物来源碳形成的主要原因是,高 Na^+ 含量导致土壤团聚性低,进而影响微生物残体与植物残体稳定性;此外土壤胞外酶活性、微生物量及利用效率和微生物多样性及差异随土壤盐分的增加而降低^[50],进而降低秸秆碳的有效固持^[51].

秸秆与脱硫石膏配施提高了 SOC 在大团聚体中($>2\text{ mm}$ 和 $0.25\sim2\text{ mm}$ 粒径)的含量,这可能得益于秸秆与脱硫石膏配施使土壤盐碱度降低了,促进土壤中团粒结构的形成,进而促使有机碳在土壤中的积累. 本研究中,在 $0.25\sim2\text{ mm}$ 团聚体中土壤有机碳的贡献率较大,而在 $>2\text{ mm}$ 团聚体中的贡献率相对较小,这与肖欣娟等^[52]研究的结果相似,这主要是因为土壤团聚体的有机碳贡献率受各粒径团聚体的占比和团聚体 OC 含量共同决定. 不同粒径团聚体中新形成有机碳的分布和分配规律是进一步研究土壤固碳能力和稳定机制的重要环节. 在本研究中,大团聚体比小团聚体的新碳含量高,这说明秸秆进入土壤后,在物理、化学和生物作用的调控下,土壤有机碳先进入大粒径团聚体中,然后才递进到小粒径团聚体中. Yin 等^[53]利用碳标记法也发现,由秸秆形成的碳首先进入土壤的大团聚体结构内,然后才顺次进入微团聚体内,这与本研究的结果一致. 本研究中,秸秆与脱硫石膏配施较秸秆处理可进一步提高 $>2\text{ mm}$ 和 $0.25\sim2\text{ mm}$ 粒径 $\delta^{13}\text{C}$ 值和新碳含量,这也正解释了全土新碳的提高.

4 结论

(1)添加秸秆对滨海盐碱土物理性状具有较好的效果,其中,单施玉米秸秆和高量秸秆与脱硫石膏配施明显减小了土壤容重,提高了土壤含水率和总孔隙度.

(2)各处理均能显著降低滨海盐碱土的 pH 和 ESP;与单施秸秆相比,秸秆与脱硫石膏配施可不同

程度使土壤 SAR 以及有害盐离子 Na^+ 和 Cl^- 含量减小,而使土壤 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 等离子含量增加,改善了土壤盐基组分.

(3)脱硫石膏与中量和高量秸秆配施均能明显提高土壤 MBC、DOC 含量以及新碳形成. 秸秆与脱硫石膏配施显著提高了细大团聚体比例,降低了微团聚体比例;秸秆与脱硫石膏配施处理促进了 SOC 在大团聚体中的聚集和 New_c 的形成.

(4)主成分分析表明,土壤孔隙度、SOC、 New_c 和活性碳组分与 pH、EC 和 ESP 呈明显负相关,说明有机物料与脱硫石膏配施改良滨海盐渍化土壤与 SOC 及活性碳组分含量增加有关. 土壤重金属含量不会因烟气脱硫石膏而增加,但应格外重视对铬的关注. 秸秆与脱硫石膏配施用于改良滨海盐碱土可以显著改善土壤质量和生态环境,削减了土壤盐碱障碍,还能解决工农业废弃物污染问题. 下一步研究还应结合多年试验数据来明确秸秆与脱硫石膏配施的改良机制.

参考文献:

- [1] 朱建峰,崔振荣,吴春红,等. 我国盐碱地绿化研究进展与展望[J]. 世界林业研究, 2018, 31(4): 70-75.
Zhu J F, Cui Z R, Wu C H, et al. Research advances and prospect of saline and alkali land greening in China[J]. World Forestry Research, 2018, 31(4): 70-75.
- [2] 吕真真,刘广明,杨劲松,等. 黄河三角洲滨海盐渍土区土壤质量综合评价[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(6): 93-97.
Lv Z Z, Liu G M, Yang J S, et al. Synthetic evaluation of soil quality of the coastal saline soil in Yellow River Delta Area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(6): 93-97.
- [3] 欧阳竹,王斌晟,来剑斌,等. 黄河三角洲农业高质量发展新模式[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(2): 145-15.
Ouyang Z, Wang H S, Lai J B, et al. New approach of high-quality agricultural development in the Yellow River Delta[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(2): 145-153.
- [4] 徐成龙,董奕岑,卢家磊,等. 我国滨海盐碱地土壤改良及资源化利用研究进展[J]. 世界林业研究, 2020, 33(6): 68-73.
Xu C L, Dong Y C, Lu J L, et al. Research Progress of Soil Improvement and Soil Resources Utilization of Coastal Saline-alkaline Land in China[J]. World Forestry Research, 2020, 33(6): 68-73.
- [5] 刘郁文. 黄河断流对黄河三角洲地区农业生态环境的影响及对策[J]. 农业环境与发展, 2006, 23(4): 29-30, 34.
- [6] Zhao Y G, Wang S J, Li Y, et al. Effects of straw layer and flue gas desulfurization gypsum treatments on soil salinity and sodicity in relation to sunflower yield[J]. Geoderma, 2019, 352: 13-21.
- [7] 秦都林,王双磊,刘艳慧,等. 滨海盐碱地棉花秸秆还田对土壤理化性质及棉花产量的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(7): 1030-1042.
Qin D L, Wang S L, Liu Y H, et al. Effects of cotton stalk returning on soil physical and chemical properties and cotton yield in coastal saline-alkali soil[J]. Acta Agronomica Sinica, 2017,

- 43(7): 1030-1042.
- [8] 萨如拉, 杨恒山, 范富, 等. 玉米秸秆还田对盐碱地土壤细菌多样性的影响[J]. 玉米科学, 2017, **25**(2): 106-111.
Sarula, Yang H S, Fan F, *et al.* Effect of maize straw returning to field on soil bacterial diversity in saline-alkali land [J]. Journal of Maize Sciences, 2017, **25**(2): 106-111.
- [9] 李兵, 刘广明, 杨劲松, 等. 农艺措施对黄淮海平原盐碱障碍农田土壤酶活性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, **34**(6): 35-38.
Li B, Liu G M, Yang J S, *et al.* Impacts of agronomic measures on soil enzyme activities in salinization blocked farmland in the north China plain[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, **34**(6): 35-38.
- [10] 王正, 孙兆军, El-Sawy S, 等. 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[J]. 环境科学, 2021, **42**(12): 6078-6090.
Wang Z, Sun Z J, El-Sawy S, *et al.* Effects of enteromorpha prolifera biochar and wood vinegar Co-application on takyric solonetz improvement and yield of oil sunflower [J]. Environmental Science, 2021, **42**(12): 6078-6090.
- [11] Wang J M, Yang P L. Potential flue gas desulfurization gypsum utilization in agriculture: a comprehensive review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, **82**: 1969-1978.
- [12] Watts D B, Dick W A. Sustainable uses of FGD gypsum in agricultural systems: introduction[J]. Journal of Environmental Quality, 2014, **43**(1): 246-252.
- [13] Wang S J, Chen Q, Li Y, *et al.* Research on saline-alkali soil amelioration with FGD gypsum[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, **121**: 82-92.
- [14] 毛玉梅, 李小平. 烟气脱硫石膏对滨海滩涂盐碱地的改良效果研究[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(1): 225-231.
Mao Y M, Li X P. Amelioration of flue gas desulfurization gypsum on saline-sodic soil of tidal flats and its effects on plant growth[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(1): 225-231.
- [15] Luo S S, Wang S J, Tian L, *et al.* Aggregate-related changes in soil microbial communities under different ameliorant applications in saline-sodic soils[J]. Geoderma, 2018, **329**: 108-117.
- [16] Han Y S, Tokunaga T K, Salve R, *et al.* Environmental feasibility of soil amendment with flue gas desulfurization gypsum (FGDG) for terrestrial carbon sequestration[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**(15), doi: 10.1007/s12665-016-5966-x.
- [17] Wang J Y, Wang X J, Wang J P. Profile distribution of CO₂ in an arid saline-alkali soil with gypsum and wheat straw amendments: a two-year incubation experiment [J]. Scientific Reports, 2018, **8**(1), doi: 10.1038/s41598-018-30312-0.
- [18] 廖栩, 杨帆, 王志春, 等. 腐解秸秆和脱硫石膏添加对苏打盐渍土淋洗脱盐效率的影响[J]. 土壤与作物, 2020, **9**(1): 74-82.
Liao X, Yang F, Wang Z C, *et al.* Effects of decomposed straw and desulfurized gypsum on salt leaching in saline-sodic soils [J]. Soils and Crops, 2020, **9**(1): 74-82.
- [19] 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.
- [20] 肖国举, 罗成科, 张峰举, 等. 燃煤电厂脱硫石膏改良碱化土壤的施用量[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(6): 762-767.
Xiao G J, Luo C K, Zhang F J, *et al.* Application amount of desulfurized gypsum from coal fired power plants on improving the quality of alkalized soil [J]. Research of Environmental Sciences, 2010, **23**(6): 762-767.
- [21] Xie W J, Chen Q F, Wu L F, *et al.* Coastal saline soil aggregate formation and salt distribution are affected by straw and nitrogen application: a 4-year field study[J]. Soil and Tillage Research, 2020, **198**, doi: 10.1016/j.still.2019.104535.
- [22] 黄毅, 邹洪涛, 虞娜, 等. 新型土壤容重取样器的研制与应用[J]. 水土保持通报, 2010, **30**(2): 190-191, 197.
Huang Y, Zou H T, Yu N, *et al.* Manufacture and implication of new soil bulk sampler [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, **30**(2): 190-191, 197.
- [23] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, **50**(3): 627-633.
- [24] 康婷, 周春火, 魏宗强, 等. 江西省土壤阳离子交换量区域分布特征及其影响因素[J]. 中国农学通报, 2021, **37**(14): 66-71.
Kang T, Zhou C H, Wei Z Q, *et al.* Regional distribution characteristics and influencing factors of soil cation exchange capacity in Jiangxi[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, **37**(14): 66-71.
- [25] 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 等. 基于典范对应分析的滨海滩涂围垦区景观格局与土壤盐渍化关系[J]. 地理研究, 2017, **36**(3): 495-505.
Xie X F, Pu L J, Zhu M, *et al.* Relationship between landscape patterns and soil salinity based on canonical correspondence analysis in coastal reclamation area[J]. Geographical Research, 2017, **36**(3): 495-505.
- [26] 屈忠义, 孙慧慧, 杨博, 等. 不同改良剂对盐碱地土壤微生物与加工番茄产量的影响[J]. 农业机械学报, 2021, **52**(4): 311-318, 350.
Qu Z Y, Sun H H, Yang B, *et al.* Effects of different amendments on soil microorganisms and yield of processing tomato in saline alkali soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, **52**(4): 311-318, 350.
- [27] 杨婷, 钟全林, 李宝银, 等. 短期铵态氮与硝态氮配施对刨花楠幼苗生长及叶片性状的影响[J]. 应用生态学报, 2022, **33**(1): 25-32.
Yang T, Zhong Q L, Li B Y, *et al.* Effects of short-term combined application of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen on the growth and leaf traits of *Machilus pauhoi* seedlings [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, **33**(1): 25-32.
- [28] 景宇鹏, 连海飞, 李跃进, 等. 河套盐碱地不同利用方式土壤盐碱化特征差异分析[J]. 水土保持学报, 2020, **34**(4): 354-363.
Jing Y P, Lian H F, Li Y J, *et al.* Analysis on the difference of soil salinization characteristics in Hetao saline-alkali soil with different Land Use[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, **34**(4): 354-363.
- [29] 刘月, 李孟钊, 徐志杰, 等. 不同改良方法对盐碱土壤水盐运移效果的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, **38**(06): 183-191.
Liu Y, Li M Z, Xu Z J, *et al.* Effects of different improvers on water and salt migration in saline-alkali soil [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, **38**(6): 183-191.
- [30] 贺坤, 李小平, 周纯亮, 等. 烟气脱硫石膏对滨海农耕土壤

- 磷素形态组成的影响[J]. 生态学报, 2017, **37**(9): 2935-2942.
- He K, Li X P, Zhou C L, *et al.* Influence of flue gas desulfurization gypsum on speciation of phosphorus in coastal cultivated soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(9): 2935-2942.
- [31] Wang X J, Jia Z K, Liang L Y, *et al.* Maize straw effects on soil aggregation and other properties in arid land[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, **153**: 131-136.
- [32] 殷小琳, 成晨, 丁国栋, 等. 含钙废弃物对盐碱土改良和胡枝子生长影响[J]. *中国水土保持科学*, 2020, **18**(6): 115-122.
- Yin X L, Cheng C, Ding G D, *et al.* Improvement and effects of calcium-containing wastes on saline-alkali soil and growth of *Lespedeza bicolor* Turcz [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, **18**(6): 115-122.
- [33] 王丹, 黄超, 李小东, 等. 脱硫石膏配施不同量有机物料对盐碱土壤改良效果及作物产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, **37**(1): 34-40.
- Wang D, Huang C, Li X D, *et al.* Effects of different amount of organic materials combined with desulfurized gypsum on soil improvement and crop yield in saline-sodic soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, **37**(1): 34-40.
- [34] Abdel-Fattah M K. Role of gypsum and compost in reclaiming saline-sodic soils[J]. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 2012, **1**(3): 30-38.
- [35] Shaaban M, Abid M, Abou-Shanab R A I. Amelioration of salt affected soils in rice paddy system by application of organic and inorganic amendments[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2013, **59**(5): 227-233.
- [36] 高惠敏, 王相平, 屈忠义, 等. 脱硫石膏与有机物料配施对河套灌区土壤改良及向日葵生长的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, **39**(8): 85-92.
- Gao H M, Wang X P, Qu Z Y, *et al.* Combining desulfurization gypsum and organic materials to improve soil quality and sunflower growth in hetao irrigation district [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, **39**(8): 85-92.
- [37] Son J K, Shin W T, Lee S H, *et al.* Reclamation of a coastal reclaimed tidal land soil by gypsum and rice straw[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2017, **63**(6): 761-770.
- [38] Bucka F B, Kölbl A, Uteau D, *et al.* Organic matter input determines structure development and aggregate formation in artificial soils [J]. *Geoderma*, 2019, **354**, doi: 10.1016/j.geoderma.2019.113881.
- [39] 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菜产量[J]. *农业工程学报*, 2018, **34**(13): 125-133.
- Lv W, Sun Z J, Chen X L, *et al.* Plastic film and straw combined mulching improving water and salt characteristics of Takyr Solonchets and yield of oil sunflower[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, **34**(13): 125-133.
- [40] 马永财, 滕达, 衣淑娟, 等. 秸秆覆盖还田及腐解率对土壤温湿度与玉米产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2021, **52**(10): 90-99.
- Ma Y C, Teng D, Yi S J, *et al.* Effects of straw mulching and decomposition rate on soil temperature and humidity and maize yield[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, **52**(10): 90-99.
- [41] Li Z X, Cai C F, Shi Z H, *et al.* Aggregate stability and its relationship with some chemical properties of red soils in subtropical China[J]. *Pedosphere*, 2005, **15**(1): 129-136.
- [42] Wang S Q, Yao X Y, Zhang Z, *et al.* Soil aggregation and aggregate-related exchangeable base cations under different aged tea (*Camellia sinensis* L.) plantations in the hilly regions of southern Guangxi, China[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, **66**(4): 636-644.
- [43] Kim Y J, Choo B K, Cho J Y. Effect of gypsum and rice straw compost application on improvements of soil quality during desalination of reclaimed coastal tideland soils: Ten years of long-term experiments[J]. *CATENA*, 2017, **156**: 131-138.
- [44] 贺坤, 李小平, 徐晨, 等. 烟气脱硫石膏对滨海盐渍土的改良效果[J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(3): 547-554.
- He K, Li X P, Xu C, *et al.* Remediation efficiency of flue gas desulfurization gypsum on coastal saline alkali soil[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(3): 547-554.
- [45] 毛玉梅, 李小平. 烟气脱硫石膏对滨海滩涂盐碱地的改良效果研究[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(1): 225-231.
- Mao Y M, Li X P. Amelioration of flue gas desulfurization gypsum on saline-sodic soil of tidal flats and its effects on plant growth[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(1): 225-231.
- [46] 米迎宾, 杨劲松, 姚荣江, 等. 不同措施对滨海盐渍土壤呼吸、电导率和有机碳的影响[J]. *土壤学报*, 2016, **53**(3): 612-620.
- Mi Y B, Yang J S, Yao R J, *et al.* Effects of farming practice on soil respiration, EC_e and organic carbon in coastal saline soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, **53**(3): 612-620.
- [47] Yang X, Meng J, Lan Y, *et al.* Effects of maize stover and its biochar on soil CO_2 emissions and labile organic carbon fractions in Northeast China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, **240**: 24-31.
- [48] Xu X R, An T T, Zhang J M, *et al.* Transformation and stabilization of straw residue carbon in soil affected by soil types, maize straw addition and fertilized levels of soil[J]. *Geoderma*, 2019, **337**: 622-629.
- [49] Liang C, Amelung W, Lehmann J, *et al.* Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter[J]. *Global Change Biology*, 2019, **25**(11): 3578-3590.
- [50] Yan D Z, Long X E, Ye L L, *et al.* Effects of salinity on microbial utilization of straw carbon and microbial residues retention in newly reclaimed coastal soil[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2021, **107**, doi: 10.1016/J.EJSOBI.2021.103364.
- [51] Xie W J, Wu L F, Wang J S, *et al.* Effect of salinity on the transformation of wheat straw and microbial communities in a saline soil [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2017, **48**(12): 1455-1461.
- [52] 肖欣娟, 夏建国, 于正义, 等. 茶渣生物质炭对茶园土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. *土壤*, 2021, **53**(3): 594-601.
- Xiao X J, Xia J G, Yu Z Y, *et al.* Effects of biochar of tea residue on soil aggregates and their organic carbon distribution in tea gardens[J]. *Soils*, 2021, **53**(3): 594-601.
- [53] Yin T, Zhao C X, Yan C R, *et al.* Inter-annual changes in the aggregate-size distribution and associated carbon of soil and their effects on the straw-derived carbon incorporation under long-term no-tillage[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, **17**(11): 2546-2557.

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 Waqinhuai 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)