

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



2019

Vol.40 No.10

第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM _{2.5} 垂直分布及输送·····	肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)
肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析·····	常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析·····	衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)
沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 排放因子及碳组分源谱·····	赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)
城市生活垃圾露天焚烧排放 PM _{2.5} 中重金属污染特征及其暴露健康风险·····	程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)
某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估·····	王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)
南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制·····	邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)
广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性·····	李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)
郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析·····	张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)
基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数·····	梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)
北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱·····	方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)
民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响·····	卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)
利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性·····	王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)
镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能·····	魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)
长江源区大气降水化学特征及离子来源·····	汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)
连续极端降雨对东江流域水质影响分析·····	车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)
基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例·····	黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)
金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征·····	刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)
太湖不同介质电导率时空变化特征·····	王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)
大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析·····	施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)
基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析·····	李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)
草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价·····	张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)
太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律·····	祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)
淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系·····	杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)
岩溶区不同土地利用下地下水碳同位素地球化学特征及生态意义·····	任坤, 潘晓东, 曾洁, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)
岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应·····	杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)
巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析·····	唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)
δ-MnO ₂ /沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮·····	马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)
不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果·····	熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)
不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化·····	刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)
启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水·····	吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)
聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析·····	孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)
典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素·····	冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)
5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素·····	何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)
Cu ²⁺ 和 Pb ²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用·····	卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)
滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价·····	洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)
贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价·····	唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)
渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术·····	李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)
不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选·····	陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)
小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运·····	王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)
微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响·····	廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)
药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制·····	肖亮亮, 丁园 (4668)
磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征·····	张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)
生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征·····	黄福义, 周曙仡聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)
有机肥施用对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响·····	邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)
灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响·····	周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)
柑橘/大蒜盖套作下土壤 CO ₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应·····	游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)
增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响·····	张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)
O ₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟·····	徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)
2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征·····	潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)
《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)	

有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响

邵慧芸¹, 李紫玥¹, 刘丹¹, 李熠凡¹, 鲁璐¹, 王旭东^{1,2*}, 张阿凤^{1,2}, 王彦丽¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100)

摘要:为探明有机肥施用量对壤土有机碳组分和团聚体稳定性的影响, 通过培养试验, 在有机肥不同施用量(0%、1%、2%和4%, 分别表示为T0、T1、T2和T4)和不同培养时间(120、180、240、300和360 d)下研究了土壤有机碳(SOC)组成如轻组有机碳(LFOC)、多糖、纤维素、水溶性有机碳(WSS)、富里酸碳(FAC)、胡敏酸碳(HAC)含量以及团聚体稳定性的动态变化。结果表明, 施用有机肥增加了土壤有机碳及其组分, 且随有机肥用量的增加而增加, 与T0处理相比, 培养至360 d时, T1~T4处理SOC、LFOC、多糖、纤维素、WSS、FAC、HAC含量和HAC/FAC比值分别增加了15.3%~83.2%、6.8~15.9倍、8.5%~46.4%、39.3%~122.6%、35.7%~112.9%、3.3%~46.9%、42.5%~88.3%和28.5%~38.6%; 随着培养时间的延长, SOC和HAC含量呈降低趋势, LFOC先增加后降低, FAC和HAC/FAC比值呈现波动变化, 多糖含量呈增加趋势。施用有机肥, 降低了土壤中>2 mm力稳性团聚体的含量, 增加了土壤中>0.25 mm水稳性团聚体的含量, 培养至360 d时, 与T0处理相比, T4处理使水稳性团聚体平均重量直径(WMWD)增加了58.6%, 使团聚体的破坏率(PAD)降低了22.2%。相关分析表明, 有机碳及其组分间多数具有显著的相关关系, 有机碳组分(除多糖外)与团聚体稳定性间也具有显著相关性。通径分析表明, 土壤HAC含量和>2 mm力稳性团聚体的含量对力稳性团聚体的平均重量直径(DMWD)具有显著的直接作用($P < 0.05$); >2 mm和<0.25 mm水稳性团聚体的含量对WMWD具有极显著直接作用($P < 0.01$); <0.25 mm水稳性团聚体的含量直接影响到团聚体PAD, SOC和WSS通过影响<0.25 mm水稳性团聚体的含量而间接影响到PAD。

关键词:壤土; 有机肥; 土壤有机碳组分; 团聚体; 相关分析; 通径分析

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4691-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201902013

Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability

SHAO Hui-yun¹, LI Zi-yue¹, LIU Dan¹, LI Yi-fan¹, LU Lu¹, WANG Xu-dong^{1,2*}, ZHANG A-feng^{1,2}, WANG Yan-li¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: An incubated study was conducted to explore the effect of different manure application dosages (0%, 1%, 2%, and 4%, referred to as T0, T1, T2, and T4, respectively) on dynamic changes in the organic carbon fraction and aggregate stability of soil under different incubation times (120, 180, 240, 300, and 360 days). Soil organic carbon (SOC) and its fractions, such as light fraction organic carbon (LFOC), and polysaccharides, cellulose, water-soluble substance (WSS), fulvic acid carbon (FAC), humic acid carbon (HAC) content, and aggregate stability were measured. The results showed that SOC and its fractions were increased with increasing manure application rates. The SOC, LFOC, polysaccharides, cellulose, WSS, FAC, HAC contents and the HAC/FAC ratio increased by 15.3% - 83.2%, 6.8 - 15.9 times, 8.5% - 46.4%, 39.3% - 122.6%, 35.7% - 112.9%, 3.3% - 46.9%, 42.5% - 88.3%, and 28.5% - 38.6% under T1-T4 treatments, respectively, compared to the T0 treatment at the end of the incubation period. With a longer period of incubation, the contents of SOC and HAC showed a decreasing trend, the LFOC increased first and decreased. The FAC content and the HAC/FAC ratio showed a fluctuation trend, but the content of polysaccharides showed an increasing trend. The application of manure decreased the content of >2 mm mechanically stable aggregates but increased the content of >0.25 mm water stable aggregates in the soil. The mean weight diameter of water stable aggregate (WMWD) increased by 58.6%, while by the end of the incubation period, the percentage aggregate destruction rate (PAD) decreased by 22.2% under the T4 treatment compared to the T0 treatment. Correlation analysis showed that there was a significant correlation between SOC and its fractions, and between organic carbon fractions (except polysaccharides) and aggregate stability. Path analysis showed that the content of HAC and >2 mm mechanically stable aggregate had a significant direct impact on the mean weight diameter of mechanically stable aggregate (DMWD) ($P < 0.05$). Furthermore, the content of >2 mm and <0.25 mm water stable aggregates had a significant direct impact on the WMWD ($P < 0.01$). The content of <0.25 mm water stable aggregates had a significant direct impact on the PAD ($P < 0.01$), while the content of SOC and WSS had a significant indirect impact on the PAD via a direct effect on the content of <0.25 mm water stable aggregate ($P < 0.05$).

Key words: Loutu; manure; soil organic carbon fractions; aggregate; correlation analysis; path analysis

收稿日期: 2019-02-02; 修订日期: 2019-05-03

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503116); 大学生创新创业训练计划项目(201710712035)

作者简介: 邵慧芸(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤化学, E-mail: shaohuiyun123@126.com

* 通信作者, E-mail: wangxudong01@126.com

目前,土壤退化是全球普遍关注的问题,土壤有机碳含量降低和土壤结构退化是土壤退化的两个主要特征^[1].施肥、耕作及土地利用方式等因素影响着土壤有机碳含量和结构状况^[2],其中,施用有机肥对土壤有机碳和土壤结构有重要影响^[3,4],土壤有机碳对土壤团聚体的形成和稳定性具有重要作用^[4],而团聚体的形成又可以进一步提高土壤的固碳能力^[5,6].

近年来,农业废弃物循环利用受到人们重视,以畜禽粪便为主要原料生产的有机肥被越来越多地施用到土壤中.多数研究表明,施用有机肥在提高土壤有机碳及其组分方面有积极作用^[7,8],而目前关于施用有机肥对土壤团聚体大小和稳定性影响方面存在一定争议.He等^[9]的研究表明,长期施用有机肥降低了耕层土壤<0.25 mm水稳性团聚体的含量,增加了>2 mm团聚体的含量和平均重量直径;而Meng等^[10]的研究表明施用有机肥5年后降低了土壤团聚体的平均重量直径.Plaza-Bonilla等^[11]的研究表明,施用有机肥对表层土壤水稳性和力稳性大团聚体含量都有增加作用;但也有研究表明,施用有机肥降低了力稳性大团聚体的含量和稳定性^[12].这些结论差异的原因可能与环境条件、土壤类型、有机肥的种类及施肥年限等因素有关^[13].除此之外,有机肥施用量也是影响土壤有机碳含量和团聚体形成的重要因素.Yousefi等^[14]的研究表明,随有机肥用量增加,土壤团聚体稳定性、SOC、水溶性有机碳(DOC)和弱酸水解化合物的含量进一步增加.但也有研究表明,有机肥施用量增加并未对土壤团聚体稳定性产生显著影响^[15].由此可见,关于有机肥施用对土壤团聚体形成和稳定性影响的研究虽然很多,但结论并不一致,还要针对性地开展系统研究.

有机胶结作用是土壤团聚体形成的重要途径^[3,13].施用有机肥,不仅可以增加活性有机碳组分,而且会增加纤维素、多糖、腐殖酸等大分子有机组分^[7,16~18].Li等^[7]的研究结果表明,有机肥施用增加了SOC和活性组分(DOC和LFOC);而施用动物粪肥能促进微生物、蚯蚓等的活动可以增加土壤多糖和腐殖物质的含量^[8,17].不同有机碳组分在土壤团聚体形成中作用方式(直接或间接作用)、作用大小虽然有所研究^[19,20],但活性有机碳组分、惰性有机碳组分在团聚体形成方面的作用差异还不十分清楚,还需要进一步深入.为此,本研究选取有机肥为原料,以壤土作为供试土壤,通过培养试验,动态分析了有机肥不同用量对土壤有机碳组分的含量和团聚体稳定性的影响,探讨不同有机碳组

分与团聚体形成和稳定性的关系,以期为农田土壤结构改良提供理论和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2017年7月至2018年7月在西北农林科技大学(34°16'56.24"N, 108°04'27.95"E)日光旱棚内进行.试验采用农田壤土作为供试土壤,风干过筛(2 mm),每盒装土+有机肥(过2 mm筛)500 g,将有机肥(以牛粪为主要原料)按设定量依次加入事先装入塑料盒(口径15 cm,有盖)的土壤中,供试土壤和有机肥的基本理化性质如下(表1).

表1 土壤和有机肥的基本性质

Table 1 General properties of the soil samples and manure			
供试材料	有机碳/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	C/N
土壤样品	9.33	1.07	8.72
有机肥	189.20	15.37	12.31

1.2 试验设计

本试验设4个处理,按有机肥添加比例[有机肥/(土+有机肥)]为0%(无添加)、1%、2%和4%分别记为T0、T1、T2和T4,每个处理3次重复,共60盆随机排列,将有机肥按设定量依次加入事先装入具盖塑料盒(口径15 cm)的土壤中,将土与有机肥充分混匀,加水至田间持水量,使土壤充分湿润,盖上盖子(盖子上打有数量一致的小孔,保证一定的空气和水气交换),然后置于旱棚在自然温度下培养,试验期间采用恒重法将水保持到田间持水量的70%.

1.3 样品采集及分析方法

分别在培养的第120、180、240、300和360 d,取一个批次的培养样品,将采集的原状土样沿自然结构轻轻掰成小块,全部过8 mm筛,自然风干后用于土壤团聚体分析,土壤团聚体粒径分布采用沙维诺夫干筛法和Elliot湿筛法测定^[21],SOC采用重铬酸钾-外加热法测定,土壤WSS、FAC和HAC含量按文献[22]的方法测定,LFOC按文献[18]的方法测定,土壤中纤维素含量按文献[23]的方法进行测定,土壤多糖按文献[24]的方法测定,具体步骤为称取1.00 g过0.25 mm筛风干土于25 mL具塞干燥试管,加入10 mL浓度为2 mol·L⁻¹硫酸沸水浴6 h,水解完毕洗入50 mL容量瓶,定容摇匀后过滤,取1 mL滤液于25 mL试管中,加入5 mL蒽酮试剂沸水浴10 min,取出后迅速放入冷水浴显色10 min,在波长为620 nm处测定吸光度,根据葡萄糖标准曲线计算土壤多糖含量.

1.4 数据计算及处理方法

各粒级力稳性或水稳性团聚体的含量(A)计算公式如下:

$$A = \frac{\text{各粒级力稳性或水稳性团聚体质量(g)}}{\text{土壤样品总质量(g)}} \times 100\%$$

MWD 为平均重量直径^[9], 计算公式如下:

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

式中, x_i 为各粒级团聚体的平均直径, w_i 为各粒级土粒所占的质量分数.

土壤团聚体破坏率(PAD)计算公式如下:

$$\text{PAD} = \frac{(\text{DR}_{0.25} - \text{WR}_{0.25})}{\text{DR}_{0.25}} \times 100\%$$

式中, $\text{DR}_{0.25}$ 为 >0.25 mm 的力稳性团聚体含量, $\text{WR}_{0.25}$ 为 >0.25 mm 的水稳性团聚体含量.

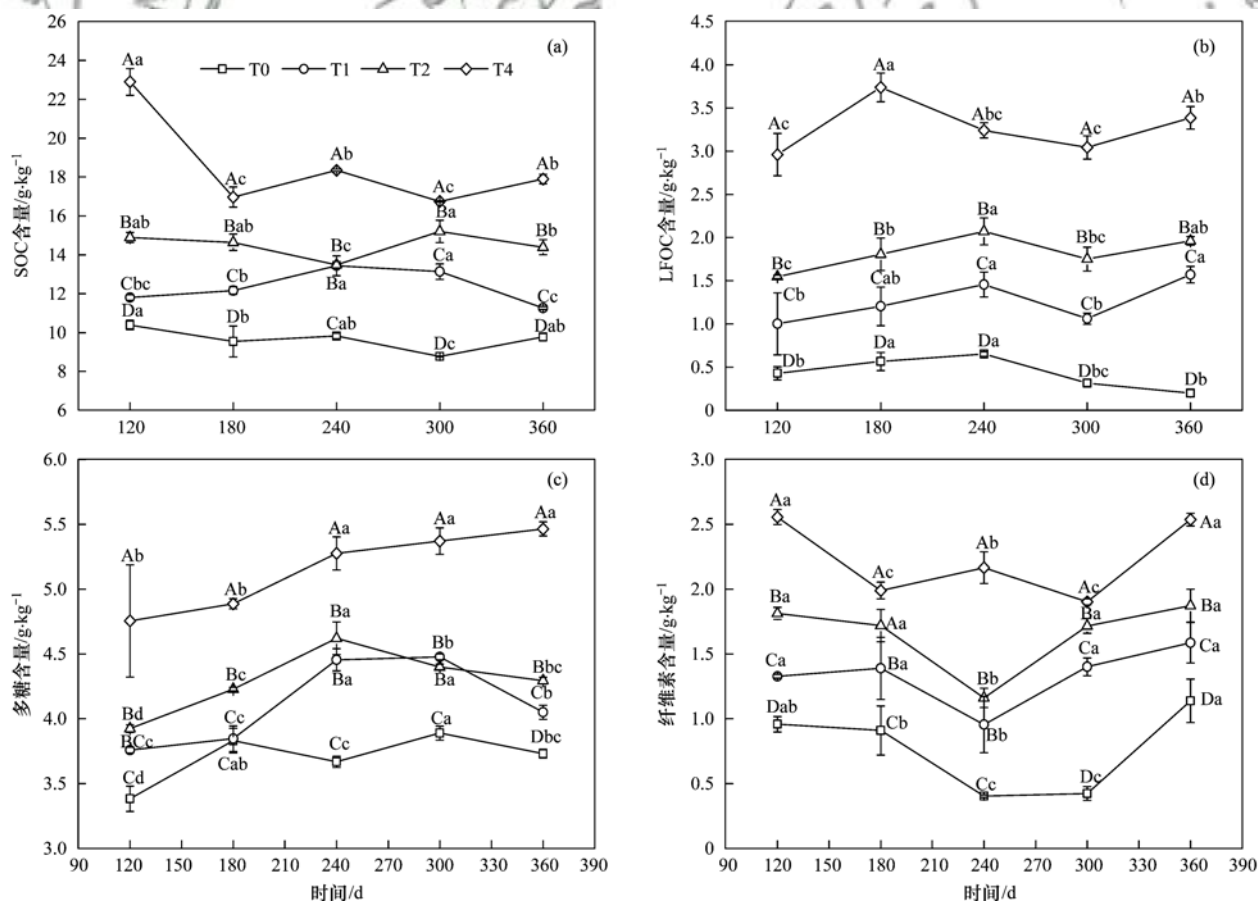
本试验数据均取 3 次重复的平均值, 采用 WPS Office 2016 和 SAS Institute V8 统计软件处理数据, 用 Duncan's 法检验差异显著性($P < 0.05$), 用 SPSS 19.0 做相关分析、逐步回归分析和通径分析. 用 OriginPro 9.0 软件和 WPS Office 2016 做图.

2 结果与分析

2.1 不同用量的有机肥对土壤有机碳及组分的影响

由图 1 可以看出, 施用有机肥不仅增加了 SOC 含量, 也增加了 LFOC、纤维素和多糖的含量, 且随着有机肥用量的增加而增加. 随着培养时间延长, SOC 含量呈降低趋势, LFOC 含量呈先增加后降低的变化趋势, 多糖含量呈增加趋势, 而纤维素含量呈先降低后增加的趋势. 培养至 360 d 时, 与 T0 处理相比, T1 ~ T4 处理, SOC、多糖和纤维素含量分别增加了 15.3% ~ 83.2%、8.5% ~ 46.4% 和 39.3% ~ 122.6%, LFOC 含量增加了 6.8 ~ 15.9 倍. 相对而言, LFOC 含量增加幅度相对较大, 其次是纤维素含量.

由图 2 可知, 施用有机肥增加了土壤 WSS、FAC、HAC 含量和 HAC/FAC 比值, 且随有机肥用量的增加而增加. 随着培养时间的延长, WSS 含量并无显著变化, 而 FAC 含量和 HAC/FAC 比值呈现出一定的波动变化, HAC 含量则呈降低的趋势. 培养至 360 d 时, 与 T0 处理相比, T1 ~ T4 处理土壤 WSS、FAC、HAC 含量和 HAC/FAC 比值分别增加



不同大/小写字母表示处理/培养时间之间差异显著, 下同

图 1 不同用量有机肥对 SOC、LFOC、多糖和纤维素含量的影响

Fig. 1 Effects of different manure application rates on the content of SOC, LFOC, polysaccharide, and cellulose

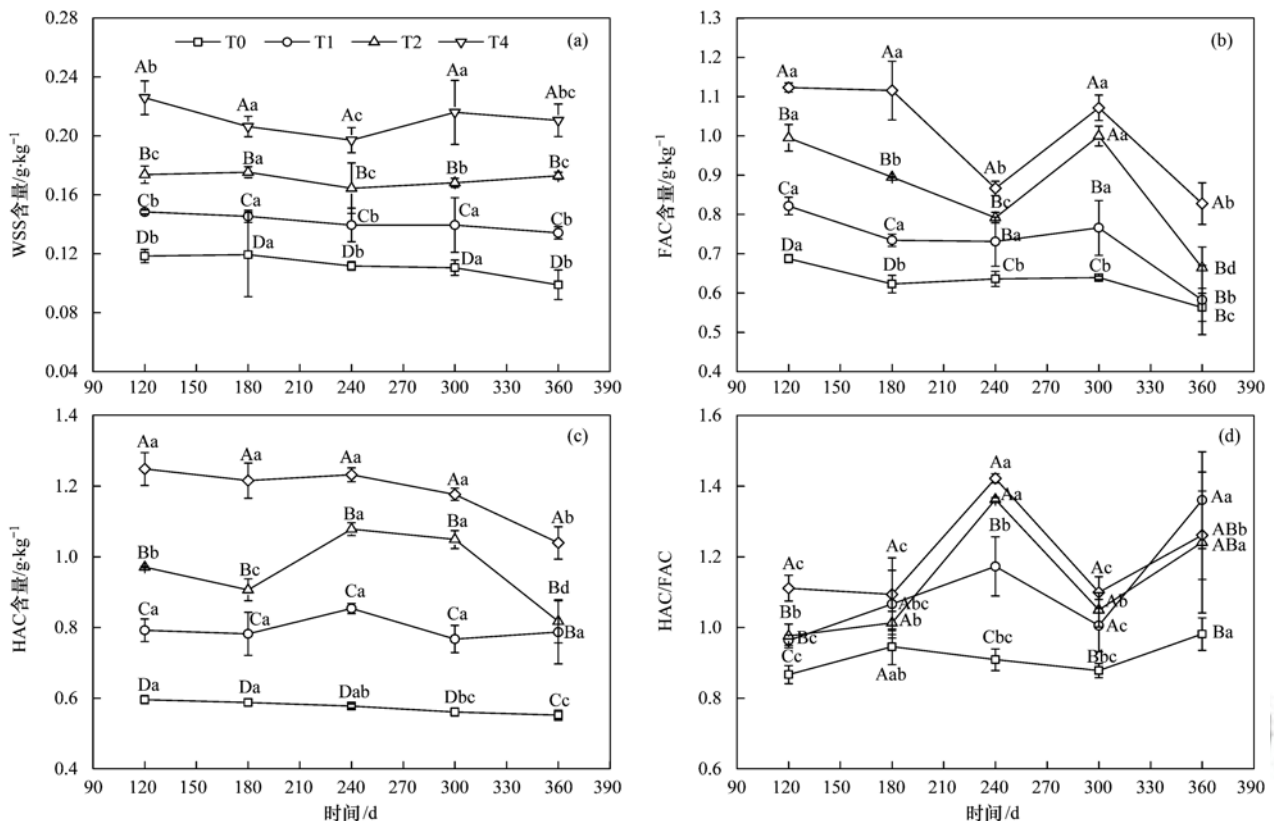


图2 不同用量有机肥对土壤WSS、FAC、HAC含量和HAC/FAC比值的影响

Fig. 2 Effects of different manure application rates on the content of soil WSS, FAC, HAC, and the HAC/FAC ratio

了35.7%~112.9%、3.3%~46.9%、42.5%~88.3%和28.5%~38.6%。

2.2 不同用量的有机肥对土壤团聚体粒径分布和稳定性的影响

土壤力稳性团聚体的变化显示(见图3),在培养300 d以前,随着有机肥用量的增加和培养时间的延长,土壤>2 mm力稳性团聚体的含量总体上呈降低的趋势,而2~1、1~0.5、0.5~0.25和<0.25 mm团聚体的含量呈增加的趋势,整个培养过程中,与T0处理相比,T4处理土壤2~1、1~0.5、0.5~0.25和<0.25 mm团聚体的含量分别平

均增加了13.2%、17.4%、14.1%和27.0%,>2 mm力稳性团聚体的含量平均降低了14.3%;而T1和T2处理与对照相比差异不显著。

土壤水稳性团聚体的变化显示(图4),随有机肥用量增加,土壤>2、2~1、1~0.5和0.5~0.25水稳性团聚体的含量总体上呈增加趋势,而<0.25 mm团聚体的含量呈降低的趋势;随培养时间的延长,土壤>2 mm团聚体的含量呈增加的趋势,而其他粒径团聚体的含量呈降低的趋势,在整个培养过程中,与T0处理相比,T4处理使土壤>2、2~1、1~0.5和0.5~0.25 mm团聚体的含量分别平

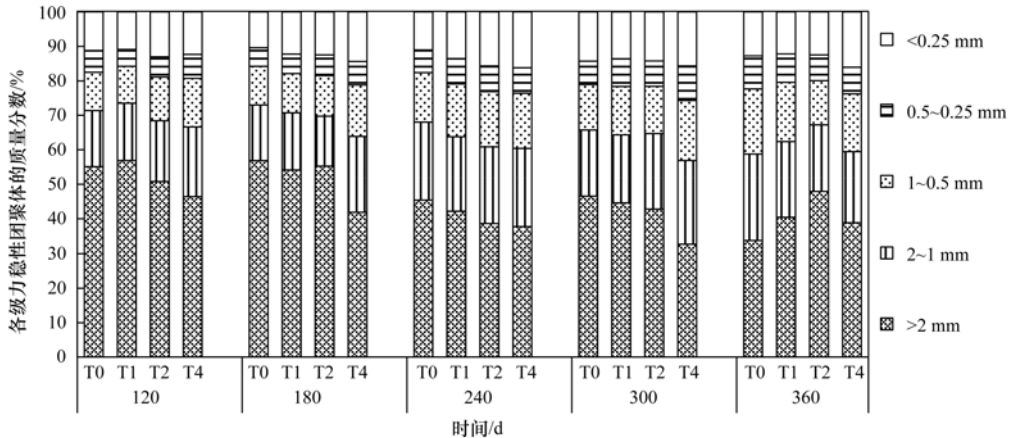


图3 不同用量有机肥对土壤力稳性团聚体粒径分布的影响

Fig. 3 Effects of different manure application rates on the size distribution of mechanically stable aggregates

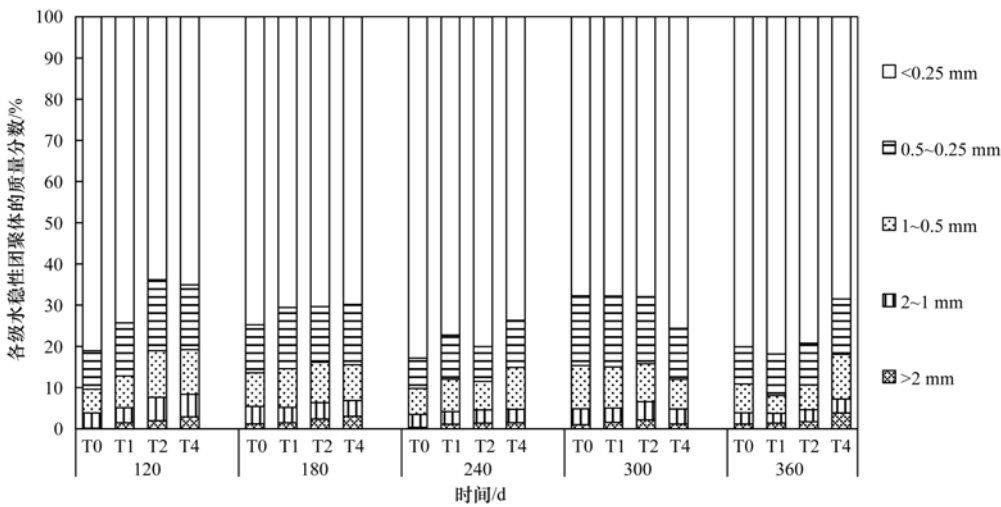


图4 不同用量有机肥对土壤水稳性团聚体粒径分布的影响

Fig. 4 Effects of different manure application rates on the size distribution of water stable aggregates

均增加了 239.1%、13.3%、30.6% 和 28.6%，而使 <0.25 mm 团聚体的含量平均降低 6.7%。

从表2中可以看出，在培养的前240 d，随着有机肥的施用和施用量的增加，土壤 $DR_{0.25}$ 降低（与对照相比），但在240 d以后各处理间总体差异不明显。施用有机肥土壤的DMWD在培养240 d以前变小，培养至360 d时又有所增加。总体看来，在培养过程中DMWD随时间变化总体有降低的趋势。土壤 $WR_{0.25}$ 和WMWD随有机肥用量的增加而增加，

$WR_{0.25}$ 随着培养时间的延长整体呈降低趋势，对于施用低量有机肥的处理（T1和T2），WMWD也呈降低趋势，高施肥处理（T4）的WMWD变化不明显；培养至360 d时，与T0处理相比，T4处理土壤WMWD增加了58.6%， $WR_{0.25}$ 增加了42.6%，差异均达到显著水平。随着有机肥用量的增加和培养时间的延长，土壤团聚体PAD呈降低的趋势，培养至360 d时，与T0处理相比，T4处理土壤团聚体PAD减小22.2%。

表2 不同用量有机肥对土壤团聚体稳定性指标的影响¹⁾

Table 2 Effects of different manure application rates on soil aggregates stability indices

项目	处理	时间/d				
		120	180	240	300	360
$DR_{0.25}/\%$	T0	88.69 ± 0.01 ABa	89.76 ± 0.00 Aa	89.27 ± 0.01 Aa	85.16 ± 0.02 Ab	87.46 ± 0.02 ABa
	T1	89.05 ± 0.01 Aa	87.99 ± 0.01 Bab	86.52 ± 0.01 Bab	85.56 ± 0.02 Ab	88.40 ± 0.03 Aab
	T2	87.09 ± 0.01 ABa	87.65 ± 0.01 Ba	84.31 ± 0.01 Cb	86.82 ± 0.00 Aa	86.96 ± 0.01 ABa
	T4	85.43 ± 0.03 Ba	85.48 ± 0.01 Ca	83.69 ± 0.02 Ca	85.33 ± 0.01 Aa	84.29 ± 0.01 Ba
$WR_{0.25}/\%$	T0	18.79 ± 0.01 Dd	25.51 ± 0.02 Bb	16.98 ± 0.00 Cd	29.84 ± 0.02 Ba	22.07 ± 0.02 Bc
	T1	24.99 ± 0.01 Cc	29.31 ± 0.01 Ab	20.74 ± 0.00 Bd	32.93 ± 0.01 Aa	20.29 ± 0.04 Bd
	T2	36.43 ± 0.00 Ba	29.65 ± 0.00 Ac	20.74 ± 0.00 Bd	30.89 ± 0.01 ABb	20.48 ± 0.01 Bd
	T4	34.79 ± 0.01 Aa	30.45 ± 0.02 Ab	25.97 ± 0.01 Ac	23.80 ± 0.01 Cc	31.47 ± 0.02 Ab
DMWD/mm	T0	3.65 ± 0.53 Aa	3.61 ± 0.22 Aa	3.30 ± 0.62 Ab	2.79 ± 0.30 ABb	2.39 ± 0.36 Cc
	T1	3.61 ± 0.26 Aa	3.52 ± 0.40 Aa	2.58 ± 0.57 Bb	3.10 ± 0.61 ABb	3.00 ± 0.62 ABb
	T2	3.29 ± 0.35 Bb	3.53 ± 0.19 Aa	2.57 ± 0.20 Bd	3.03 ± 0.10 Ac	2.95 ± 0.63 Ab
	T4	2.54 ± 0.46 Cbc	2.84 ± 0.18 Ba	2.54 ± 0.28 Bbc	2.09 ± 0.15 Bc	2.65 ± 0.22 Bab
WMWD/mm	T0	0.24 ± 0.02 Cc	0.32 ± 0.04 Ba	0.23 ± 0.03 Bc	0.31 ± 0.05 Ca	0.29 ± 0.016 Bb
	T1	0.32 ± 0.05 Bbc	0.34 ± 0.05 Bab	0.28 ± 0.05 Bc	0.35 ± 0.01 Ba	0.31 ± 0.07 Bc
	T2	0.41 ± 0.01 Aa	0.39 ± 0.08 Aa	0.30 ± 0.03 Ab	0.37 ± 0.03 Aa	0.31 ± 0.04 Bb
	T4	0.45 ± 0.09 Aa	0.42 ± 0.05 Aa	0.33 ± 0.04 Ab	0.32 ± 0.02 Cb	0.46 ± 0.08 Aa
PAD/%	T0	78.72 ± 0.10 Aab	71.51 ± 2.38 Ac	81.03 ± 0.30 Aa	71.88 ± 2.16 Ac	78.50 ± 1.70 Ab
	T1	70.31 ± 1.00 Bb	66.72 ± 1.06 Bbc	75.42 ± 1.23 Ba	64.45 ± 1.03 Bc	76.06 ± 1.75 Aa
	T2	58.24 ± 0.29 Cc	65.92 ± 0.82 Bb	75.33 ± 0.79 Ba	65.81 ± 1.08 Bb	76.18 ± 0.39 Aa
	T4	59.53 ± 1.76 Cc	63.39 ± 2.82 Babc	68.67 ± 1.06 Ca	61.67 ± 0.82 ABab	61.04 ± 0.73 Bbc

1) 同列(行)不同大(小)写字母表示处理(培养)时间之间差异显著

2.3 有机碳组分间及有机碳组分与团聚体稳定性间的关系

2.3.1 相关分析

表3显示, SOC与土壤纤维素、LFOC、WSS、HAC和FAC含量及HAC/FAC比值呈极显著正相关关系($P < 0.01$); 土壤腐殖酸(HAC和FAC)与活性有机碳(LFOC和WSS)之间呈极显著正相关关系($P < 0.01$); 土壤纤维素含量既与活性有机碳(LFOC和WSS)呈正相关关系($P < 0.01$), 又与腐殖酸之间呈正相关关系($P < 0.01$). HAC/FAC比值与纤维素、LFOC之间呈显著正相关关系($P < 0.01$). 土壤 $DR_{0.25}$ 与SOC、纤维素、LFOC、WSS、HAC和FAC含量及HAC/FAC比值呈极显著负相关关系($P < 0.01$); 土壤 $WR_{0.25}$ 与SOC、纤维素、WSS、HAC和FAC含量呈极显著正相关关系($P < 0.01$), 与LFOC含量呈显著正相关关系($P < 0.05$); 土壤DMWD与土壤LFOC和HAC含量及HAC/FAC比值呈极显著负相关关系($P < 0.01$), 与SOC含量呈显著负相关关系($P < 0.05$); 土壤

WMWD与SOC、纤维素、LFOC、WSS、HAC和FAC含量呈极显著正相关关系($P < 0.01$); 土壤团聚体PAD与SOC、纤维素、LFOC、WSS、HAC和FAC含量呈极显著负相关关系($P < 0.01$).

2.3.2 通径分析

通过逐步回归发现, $DR_{0.25}$ 主要取决于HAC和 $<0.25\text{ mm}$ 团聚体含量, DMWD的大小主要取决于FAC、HAC和各粒径团聚体含量, $WR_{0.25}$ 主要取决于WSS和 $<0.25\text{ mm}$ 的团聚体含量, WMWD大小主要取决于SOC、 $<0.25\text{ mm}$ 和 $>2\text{ mm}$ 团聚体含量. PAD大小主要取决于WSS、SOC、LFOC和 $<0.25\text{ mm}$ 及 $>2\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量. 采用通径分析, 将自变量与因变量之间的相关关系分解为自变量对因变量的直接影响和通过其它自变量对因变的间接影响^[25]. 由表4可知, 在土壤结构的力稳性方面, 土壤 $>2\text{ mm}$ 力稳性团聚体含量和HAC含量对土壤DMWD的直接影响达到显著水平($P < 0.05$).

由表5看出, 在土壤结构的水稳性方面, 土壤 $>2\text{ mm}$ 和 $<0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体对土壤结构体

表3 土壤有机碳组分与团聚体稳定性间的相关关系¹⁾

Table 3 Correlations between soil carbon fractions and aggregate stability

	SOC	多糖	纤维素	LFOC	WSS	FAC	HAC	HAC/FAC	$DR_{0.25}$	$WR_{0.25}$	DMWD	WMWD	PAD
SOC	1												
多糖	-0.223	1											
纤维素	0.879 **	-0.230	1										
LFOC	0.873 **	-0.203	0.825 **	1									
WSS	0.679 **	-0.084	0.626 **	0.723 **	1								
FAC	0.800 **	-0.142	0.647 **	0.714 **	0.783 **	1							
HAC	0.905 **	-0.105	0.797 **	0.916 **	0.727 **	0.836 **	1						
HAC/FAC	0.447 **	0.082	0.511 **	0.597 **	0.159	0.035	0.569 **	1					
$DR_{0.25}$	-0.538 **	0.025	-0.403 **	-0.568 **	-0.402 **	-0.383 **	-0.596 **	-0.460 **	1				
$WR_{0.25}$	0.498 **	-0.124	0.500 **	0.315 *	0.566 **	0.594 **	0.420 **	-0.113	-0.328 *	1			
DMWD	-0.318 *	0.105	-0.177	-0.331 **	-0.065	-0.160	-0.340 **	-0.346 **	0.597 **	0.015	1		
WMWD	0.596 **	-0.049	0.667 **	0.522 **	0.655 **	0.615 **	0.531 **	0.073	-0.362 **	0.867 **	0.029	1	
PAD	-0.664 **	0.163	-0.673 **	-0.534 **	-0.716 **	-0.742 **	-0.601 **	-0.008	0.299 *	-0.878 **	0.036	-0.840 **	1

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, 下同

表4 土壤DMWD与决定变量间的通径系数¹⁾

Table 4 Path coefficient between soil DMWD and decision variables

变量	直接通径系数	间接通径系数						
		$x_1 \rightarrow y$	$x_2 \rightarrow y$	$x_3 \rightarrow y$	$x_4 \rightarrow y$	$x_5 \rightarrow y$	$x_6 \rightarrow y$	$x_7 \rightarrow y$
x_1	0.425 *		0.264	0.137	0.016	0.245	0.0562	-0.266
x_2	-0.323	-0.369		-0.095	-0.012	-0.218	-0.005	0.154
x_3	-0.168	-0.369	-0.183		-0.019	-0.224	-0.058	0.218
x_4	-0.022	-0.331	-0.172	-0.144		-0.196	-0.039	0.143
x_5	-0.384	-0.289	-0.183	-0.098	-0.011		-0.085	0.340
x_6	-0.185	-0.137	-0.009	-0.053	-0.005	-0.175		0.408
x_7	0.481 *	-0.250	-0.103	-0.076	-0.007	-0.271	-0.157	

1) $x_1 \sim x_5$ 分别代表 >2 、 $>2 \sim 1$ 、 $1 \sim 0.5$ 、 $0.5 \sim 0.25$ 和 $<0.25\text{ mm}$ 力稳性团聚体的含量, $x_6 \sim x_7$ 分别代表 FAC 和 HAC 含量, y 代表土壤 DMWD, $R^2 = 0.960$, $F = 55.338$, $P = 0.000 < 0.01$

表 5 土壤 WMWD 与决定变量间的通径系数¹⁾

变量	直接通径系数	间接通径系数		
		$x_1 \rightarrow y$	$x_2 \rightarrow y$	$x_3 \rightarrow y$
x_1	0.520 **		0.414 *	-0.033
x_2	-0.585 **	-0.368		0.028
x_3	-0.045	0.377	0.363	

1) $x_1 \sim x_2$ 分别代表 >2 和 <0.25 mm 水稳性团聚体含量, x_3 代表 SOC, y 代表 WMWD, $R^2 = 0.979$, $F = 306.070$, $P = 0.000 < 0.01$

表 6 土壤团聚体 PAD 与决定变量间的通径系数¹⁾

变量	直接通径系数	间接通径系数				
		$x_1 \rightarrow y$	$x_2 \rightarrow y$	$x_3 \rightarrow y$	$x_4 \rightarrow y$	$x_5 \rightarrow y$
x_1	-0.066		-0.501 *	-0.107	-0.114	0.016
x_2	0.709 **	0.047		0.092	0.118	-0.009
x_3	-0.148	-0.048	-0.440 *		-0.136	0.020
x_4	-0.188	-0.040	-0.446 *	-0.107		0.017
x_5	0.023	-0.045	-0.270	-0.129	-0.143	

1) $x_1 \sim x_2$ 分别代表 >2 和 <0.25 mm 水稳性团聚体含量, $x_3 \sim x_5$ 分别代表 SOC、WSS 和 LFOC 含量, y 代表 PAD, $R^2 = 0.971$, $F = 122.713$, $P = 0.000 < 0.01$

3 讨论

土壤团聚体的大小可以用其平均重量直径 (MWD) 表示, 土壤 >0.25 mm 团聚体的含量以及 MWD 值常常可以作为敏感指标, 反映土壤结构对施肥等管理措施的响应^[26, 27]. 本研究表明, 施用有机肥可以引起土壤 $DR_{0.25}$ 下降, 团聚体 DMWD 呈现先下降 (240 d 以前) 后上升的趋势. 这主要是由于有机肥的施入, 阻止土壤颗粒之间通过黏粒胶结作用形成大团聚体, 从而使 >2 mm 力稳性团聚体数量减少, 导致土壤力稳性团聚体的平均重量直径减小, 表 4 中土壤 >2 mm 力稳性团聚体含量与 DMWD 直接通径系数达到显著水平也进一步说明了这一点. 施用有机肥会提高土壤中腐殖物质的含量, 腐殖质物质尤其是胡敏酸在土壤结构体的形成中具有重要的胶结作用^[3], 因此, 施用有机肥后在胡敏酸等作用下土壤的 <0.25 mm 的力稳性团聚体含量降低, 进一步胶结变成较大的团聚体 (见图 3), 从而引起土壤的 DMWD 在培养 360 d 时有所增加 (见表 2), 胡敏酸与 DMWD 之间的直接通径系数达到显著水平也说明了一点 (见表 4). 施用有机肥使土壤水稳性结构体的平均重量直径 (WMWD) 增大, 增加了土壤团聚体稳定性, 这与 Zou 等^[28] 的研究结果一致. 这主要是由于在有机物质的胶结作用下, 减少了 <0.25 mm 水稳性团聚体的数量, 促进了 >0.25 mm 团聚体的形成 (>2 、 $2 \sim 1$ 、 $1 \sim 0.5$ 和 $0.5 \sim 0.25$ mm 水稳性团聚体的含量总体上呈增加的趋势), 其中 >2 mm 水稳性团聚体的形成和

稳定性具有极显著的直接作用 ($P < 0.01$), 且 >2 mm 的团聚体含量通过影响 <0.25 mm 的团聚体含量而影响到土壤 WMWD ($P < 0.05$).

由表 6 可知, 土壤 <0.25 mm 水稳性团聚体含量对土壤团聚体 PAD 具有极显著的直接作用 ($P < 0.01$), 而 >2 mm 的水稳性团聚体含量、SOC 和 WSS 通过影响 <0.25 mm 水稳性团聚体含量而显著间接影响 PAD ($P < 0.05$).

<0.25 mm 水稳性团聚体的减少是决定水稳性团聚体平均重量直径大小的主要因素, 其直接通径系数或间接通径系数达到了显著水平也进一步说明了这一点.

土壤有机碳是土壤团聚体形成的重要胶结物质之一^[29]. 施用有机肥显著增加了土壤有机碳及其活性组分 WSS、LFOC 和多糖含量, 这与前人的研究结果一致^[7, 16~18]. 而且, 施用有机肥还显著增加了土壤腐殖物质如 FAC 和 HAC 含量, 提高了 HAC/FAC 比值, Sarma 等^[8] 的研究也发现了类似的现象. 相关分析进一步表明 SOC 与 LFOC、WSS、纤维素、FAC 和 HAC 含量呈极显著的正相关关系 ($P < 0.01$), 且 SOC 与纤维素、LFOC 和 HAC 的关系更为密切, 相关系数分别高达 0.879 **、0.873 ** 和 0.905 ** (表 3), 这说明纤维素、LFOC 和 HAC 更能反映土壤有机碳的变化. 施用有机肥后土壤团聚体大小和稳定性的变化与有机碳及其组分的变化密不可分. 本研究发现, 土壤 $DR_{0.25}$ 与 SOC、纤维素、LFOC、WSS、HAC 和 FAC 含量以及 HAC/FAC 比值呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$), DMWD 与 SOC、LFOC、HAC 含量呈显著或极显著的负相关关系, 说明施用有机肥没有促进力稳性大团聚体的形成, 减小了其团聚体的平均重量直径, 这主要是施用有机肥后引起 >2 mm 力稳性团聚体数量减少所致, 通径分析进一步证明这一点. 在农业生产实践中, 施用有机肥后土壤结构疏松, 大的块状结构减少, 也说明了这一点. 土壤 $WR_{0.25}$ 、WMWD 均与 SOC、纤维素、WSS、HAC 和

FAC 含量呈极显著的正相关关系 ($P < 0.01$), WMWD 还与 LFOC 含量呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 说明这些有机组分促进了 >0.25 mm 水稳性团聚体的形成, 从而使 WMWD 增大. SOC、纤维素、WSS 和 FAC 与 $WR_{0.25}$ 和 WMWD 的相关系数高于其他组分 (表 3), 说明这些组分更适合用来指示土壤质量的变化.

通过力稳性团聚体和水稳性团聚体的数量变化可以计算土壤团聚体的破坏率 (PAD), 该指标可以较好地反映土壤团聚体稳定性大小^[30], PAD 越小, 稳定性越高. 施用有机肥后土壤团聚体的 PAD 下降, 说明土壤团聚体的稳定性增加. 随着培养时间的延长, 施用低量有机肥的处理 (T1 和 T2), PAD 有所升高, 而施用高量有机肥的处理 (T4), 则 PAD 变化不明显, 说明通过有机胶结作用形成的水稳性团聚体随着有机物质的矿化分解, 其水稳性会降低, 从而使其破坏率升高, 这种水稳性结构的保持与有机肥用量有关, 施用高量有机肥可以使其稳定性保持的时间更长. 土壤团聚体 PAD 与 SOC、纤维素、LFOC、WSS、HAC 和 FAC 含量呈极显著的负相关关系 ($P < 0.01$), 进一步说明了有机碳及其组分在维持土壤结构体稳定性方面的作用. 通径分析进一步揭示, 施用有机肥后土壤 <0.25 mm 水稳性团聚体含量减少对 PAD 具有极显著的直接影响, SOC 和 WSS 通过减少 <0.25 mm 水稳性团聚体含量而间接影响土壤团聚体 PAD.

4 结论

(1) 施用有机肥, 提高了土壤中 SOC、LFOC、多糖、纤维素、WSS、FAC 和 HAC 的含量, 且随着有机肥用量的增加而增加. 随着培养时间的延长, 不同有机碳组分的变化趋势不同. 培养至 360 d 时, 与对照相比, LFOC 增加相对最多, 纤维素、WSS 和 HAC 次之, 多糖和 FAC 增加相对较少.

(2) 施用有机肥, 减少了土壤中 >0.25 mm 水稳性团聚体的含量, 增加了土壤中 >0.25 mm 水稳性团聚体的含量, 提高了水稳性团聚体的平均重量直径; 降低了土壤团聚体的破坏率 (PAD). 随着培养时间的延长, 施用高量有机肥处理能够保持土壤结构体的水稳性, 而低用量有机肥处理则结构体的水稳性降低.

(3) 施用有机肥引起的土壤 >2 mm 和 <0.25 mm (水稳性) 团聚体含量的变化以及 HAC 含量的变化对土壤团聚体稳定性具有直接影响作用, SOC、WSS 通过影响 <0.25 mm 团聚体含量而间接影响到团聚体破坏率.

参考文献:

- [1] 任卫东. 长期不同施肥和管理措施对壤土有机碳及其组分的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011. 1-51.
Ren W D. Effect of long-term fertilization and soil management regimes on soil organic carbon and its fraction on Loess soil[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2011. 1-51.
- [2] 李婕, 杨学云, 孙本华, 等. 不同土壤管理措施下壤土团聚体的大小分布及其稳定性[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 346-354.
Li J, Yang X Y, Sun B H, *et al.* Effects of soil management practices on stability and distribution of aggregates in Lou soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(2): 346-354.
- [3] 岳会锦. 滴灌农田施用有机肥对土壤有机碳组分与土壤团聚体的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2014. 1-39.
Yue H J. Effect of organic fertilizer amendment on soil organic carbon fractions and aggrigation status in drip irrigated farmland [D]. Shihezi: Shihezi University, 2014. 1-39.
- [4] Graf-Rosenfellner M, Cierjacks A, Kleinschmit B, *et al.* Soil formation and its implications for stabilization of soil organic matter in the riparian zone[J]. CATENA, 2016, 139: 9-18.
- [5] Das B, Chakraborty D, Singh V K, *et al.* Effect of integrated nutrient management practice on soil aggregate properties, its stability and aggregate-associated carbon content in an intensive rice-wheat system[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 136: 9-18.
- [6] 徐国鑫, 王子芳, 高明, 等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(1): 355-362.
Xu G X, Wang Z F, Gao M, *et al.* Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration [J]. Environmental Science, 2018, 39(1): 355-362.
- [7] Li J, Wu X P, Gebremikael M T, *et al.* Response of soil organic carbon fractions, microbial community composition and carbon mineralization to high-input fertilizer practices under an intensive agricultural system[J]. PLoS One, 2018, 13(4): e0195144.
- [8] Sarma B, Farooq M, Gogoi N, *et al.* Soil organic carbon dynamics in wheat-green gram crop rotation amended with vermicompost and biochar in combination with inorganic fertilizers: a comparative study [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 201: 471-480.
- [9] He Y B, Xu C, Gu F, *et al.* Soil aggregate stability improves greatly in response to soil water dynamics under natural rains in long-term organic fertilization [J]. Soil and Tillage Research, 2018, 184: 281-290.
- [10] Meng Q F, Sun Y T, Zhao J, *et al.* Distribution of carbon and nitrogen in water-stable aggregates and soil stability under long-term manure application in solonchic soils of the Songnen plain, northeast China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, 14(6): 1041-1049.
- [11] Plaza-Bonilla D, Álvaro-Fuentes J, Cantero-Martínez C. Soil aggregate stability as affected by fertilization type under semiarid no-tillage conditions [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(1): 284-292.
- [12] Munkholm L J, Schjønning P, Debosz K, *et al.* Aggregate strength and mechanical behaviour of a sandy loam soil under long-term fertilization treatments [J]. European Journal of Soil Science, 2002, 53(1): 129-137.
- [13] Álvaro-Fuentes J, Arrúe J L, Gracia R, *et al.* Tillage and cropping intensification effects on soil aggregation: temporal

- dynamics and controlling factors under semiarid conditions[J]. *Geoderma*, 2008, **145**(3-4): 390-396.
- [14] Yousefi M, Hajabbasi M, Shariatmadari H. Cropping system effects on carbohydrate content and water-stable aggregates in a calcareous soil of Central Iran[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, **101**(1-2): 57-61.
- [15] Leon M C C, Stone A, Dick R P. Organic soil amendments: impacts on snap bean common root rot (*Aphanomyces euteiches*) and soil quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, **31**(3): 199-210.
- [16] Long G Q, Jiang Y J, Sun B. Seasonal and inter-annual variation of leaching of dissolved organic carbon and nitrogen under long-term manure application in an acidic clay soil in subtropical China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, **146**: 270-278.
- [17] Hernández D, Fernández J M, Plaza C, *et al.* Water-soluble organic matter and biological activity of a degraded soil amended with pig slurry[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **378**(1-2): 101-103.
- [18] Kim S Y, Pramanik P, Gutierrez J, *et al.* Comparison of methane emission characteristics in air-dried and composted cattle manure amended paddy soil during rice cultivation [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **197**: 60-67.
- [19] Jiang H, Han X Z, Zou W X, *et al.* Seasonal and long-term changes in soil physical properties and organic carbon fractions as affected by manure application rates in the Mollisol region of Northeast China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, **268**: 133-143.
- [20] Yagüe M R, Domingo-Olivé F, Bosch-Serra A D, *et al.* Dairy cattle manure effects on soil quality: porosity, earthworms, aggregates and soil organic carbon fractions [J]. *Land Degradation & Development*, 2016, **27**(7): 1753-1762.
- [21] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4695-4704.
- Li J L, Jiang C S, Hao Q J. Impact of land use type on stability and organic carbon of soil aggregates in Jinyun mountain [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4695-4704.
- [22] 杨洋. 灌溉方式对设施土壤腐殖质含量及其组分的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017. 1-45.
- Yang Y. Effects of irrigation methods on humus and its components of facilities soil [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017. 1-45.
- [23] 王雨晴, 陈香碧, 董明哲, 等. 红壤丘陵区旱地和水旱轮作地土壤中纤维素降解功能微生物群落特征[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(10): 2071-2079.
- Wang Y Q, Chen X B, Dong M Z, *et al.* Characteristics of cellulose-degrading microbial communities in upland and paddy-upland rotation land soils in red soil hilly region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(10): 2071-2079.
- [24] 张弢. 大棚蔬菜连作对土壤多糖影响的研究[J]. *北方园艺*, 2009, (8): 165-166.
- Zhang T. Effect of continuous cropping of different vegetables on soil polysaccharides [J]. *Northern Horticulture*, 2009, (8): 165-166.
- [25] 彭思利, 申鸿, 袁俊吉, 等. 丛枝菌根真菌对中性紫色土壤团聚体特征的影响[J]. *生态学报*, 2011, **31**(2): 498-505.
- Peng S L, Shen H, Yuan J J, *et al.* Impacts of arbuscular mycorrhizal fungi on soil aggregation dynamics of neutral purple soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(2): 498-505.
- [26] Xie H T, Li J W, Zhang B, *et al.* Long-term manure amendments reduced soil aggregate stability via redistribution of the glomalin-related soil protein in macroaggregates [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 14687.
- [27] Veum K S, Goynes K W, Kremer R, *et al.* Relationships among water stable aggregates and organic matter fractions under conservation management[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, **76**(6): 2143-2153.
- [28] Zou C M, Li Y, Huang W, *et al.* Rotation and manure amendment increase soil macro-aggregates and associated carbon and nitrogen stocks in flue-cured tobacco production [J]. *Geoderma*, 2018, **325**: 49-58.
- [29] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review [J]. *Geoderma*, 2005, **124**(1-2): 3-22.
- [30] 何玉亭, 王昌全, 沈杰, 等. 两种生物质炭对红壤团聚体结构稳定性和微生物群落的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, **49**(12): 2333-2342.
- He Y T, Wang C Q, Shen J, *et al.* Effects of two biochars on red soil aggregate stability and microbial community [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, **49**(12): 2333-2342.

CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang ...	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai ...	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PN/A Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	JI Xiao-qing, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul·Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)