

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.6
第41卷 第6期

目次

基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源..... 林秋菊,徐娇,李梅,王玮,史国良,冯银厂 (2505)

南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析..... 杨笑影,曹芳,林煜棋,章炎麟 (2519)

西安市PM_{2.5}中水溶性离子的季节变化特征..... 黄舍舍,王羽琴,李升苹,陈庆彩 (2528)

新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响..... 刘会斌,迪丽努尔·塔力甫,王新明,张潇潇,王威,阿布力克木·阿不力孜,买里克扎提·买合木提,刘伟 (2536)

长秋季生物质燃烧对PM_{2.5}中WSOC吸光性的影响..... 孟德友,曹芳,翟晓瑶,张世春,章炎麟 (2547)

2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源..... 王倩 (2555)

南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析..... 曹梦瑶,林煜棋,章炎麟 (2565)

郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析..... 任义君,马双良,王思维,于世杰,李一丹,张瑞芹,尹沙沙 (2577)

上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献..... 韩婷婷,李颖若,邱雨露,何迪,王焱,马志强 (2586)

北京市餐饮业大气污染物排放特征..... 孙成一,白画画,陈雪,翟翼飞,高启天,何万清,聂磊,石爱军,李国傲 (2596)

北京市农业机械排放因子与排放清单..... 王凯,樊守彬,亓浩云 (2602)

北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化..... 李贝贝,黄玉虎,毕晓辉,刘李阳,秦建平 (2609)

基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析..... 张颖蕾,崔希民 (2617)

环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟..... 张毅,马艳飞,宋帅,吕永龙,张盛,吴强 (2625)

岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析..... 周石磊,孙悦,苑世超,彭瑞哲,刘世崇,岳奇丞,张航,王周强,李再兴,罗晓 (2635)

“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析..... 李悦昭,陈海洋,孙文超 (2646)

伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价..... 姜时欣,翟付杰,张超,王蒙蒙,单保庆 (2653)

典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析..... 赵然,韩志伟,申春华,张水,涂汉,郭永丽 (2664)

沉积物参与下氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响..... 陈洁,许海,詹旭,许笛,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,康丽娟 (2671)

丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素..... 李胜男,陈豪宇,彭华,李芸君,朱坚,简燕,纪雄辉 (2679)

胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用..... 王振方,韩子玉,王梦雪,马逸驰,王婷,王丽卿,张玮 (2688)

不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较..... 桑雨璇,杨珈乐,熊怡,尹文博,汪华,王和云 (2698)

过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用..... 张帅,李大鹏,丁玉琴,徐楚天,许鑫澎,孙培荣,赵哲豪,黄勇 (2706)

基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例..... 王亚楠,祝伟,祁新华,范水生 (2714)

不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径..... 张杰,梅宁,刘孟浩,叶雪松,李冬 (2727)

高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5..... 李立,吴丽颖,董正玉,王霖,张倩,洪俊明 (2736)

Fe-cyclam/H₂O₂体系催化降解罗丹明B机制..... 余雨清,陈翔宇,蔡权华,黄歆珏,陈曼 (2746)

微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO₂-NTs为光阳极..... 卢忆,周海珊,彭瑞建,叶杰旭,陈建孟,宋爽,张士汉 (2754)

缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性..... 陈凡雨,徐仲,尤宏,柳锋,李之鹏,陈其伟,韩红卫 (2762)

HRT对改良式A²/O-BAF反硝化除磷脱氮的影响..... 赵凯亮,刘安迪,南彦斌,梁利民,王云霞,陈永志 (2771)

重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化..... 孙琪,赵白航,范飒,周邦磊,李玉琪 (2779)

异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素去除及重金属和盐度的影响..... 王萌萌,曹刚,张迪,冯乃亮,潘涌璋 (2787)

火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替..... 薛嘉俊,张绍青,张立秋,李淑更,姚海楠,耿忠轩,李鸿,刘晓玲 (2796)

游离羟胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响..... 沈琛,张树军,彭永臻 (2805)

死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰..... 苏宇傲,刘宏波,毛秋燕,张慧旻,张衍,刘和 (2812)

中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价..... 陈文轩,李茜,王珍,孙兆军 (2822)

土壤环境质量预警体系构建与应用..... 李笑诺,丁寿康,陈卫平,王夏晖,吕斯丹,刘睿 (2834)

不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系..... 毛霞丽,邱志腾,张爽,沈倩,章明奎 (2842)

长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征..... 宁玉菲,魏亮,魏晓梦,祝贞科,袁红朝,葛亿达,吴金水 (2852)

生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响..... 黄洋,郭晓,胡学玉 (2861)

基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价..... 肖冰,薛培英,韦亮,刘成程,高培培,樊利敏,杜佳燕,刘文菊 (2869)

重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素..... 胡青青,沈强,陈飞,尹炳,邹宏光,庄红娟,张世文 (2878)

新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果..... 陈兆进,李英军,邵洋,林立安,徐鸽,陈彦,田伟,姚伦广,韩辉 (2889)

三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征..... 李丽娟,李昌晓,陈春桦,杨治华,陈雪梅 (2898)

滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布..... 张宇,左剑恶,王丝可,Alisa Salimova,李爱军,李玲玲 (2908)

模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响..... 王愉琬,马安周,种国双,谢飞,周汉昌,刘国华,庄国强 (2918)

水肥气耦合对温室番茄土壤N₂O排放及番茄产量的影响..... 商子惠,蔡焕杰,陈慧,孙亚楠,李亮,朱艳,王晓云 (2924)

矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用..... 尚誉,杨丰隆,宁夏,董轶茹,桑楠 (2936)

海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价..... 汪慧娟,旷泽行,周贤,覃晓青,黄洪辉 (2942)

春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析..... 贺玉晓,李珂,任玉芬,王思琪,方文颖 (2951)

热解温度和时间对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估..... 蔡朝卉,楚沉静,郑浩,罗先香,李锋民 (2963)

长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)..... 蒋自然,金环环,王成金,叶士琳,黄艳豪 (2972)

《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697, 2713, 2811)

不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系

毛霞丽, 邱志腾, 张爽, 沈倩, 章明奎*

(浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058)

摘要: 土壤团聚体的形成和稳定对于有机碳的转化和积累具有重要意义,然而不同母质发育土壤团聚体对有机碳的物理保护作用及其与有机碳矿化之间的关系仍不清楚. 本文以石灰岩、第四纪红土、花岗岩、玄武岩和红砂岩母质发育的典型土壤为对象,研究添加玉米秸秆 7 d 和 184 d 时土壤团聚体和各组分有机碳的变化规律,分析不同母质土壤有机碳矿化的主要影响因素. 结果表明,不添加秸秆时,所有母质土壤以 1.0~0.5、0.5~0.25 和 <0.25 mm 粒级团聚体为主,添加玉米秸秆有效促进了 >2 mm 和 2~1 mm 粒级团聚体的形成. 石灰岩、第四纪红土和玄武岩土壤形成水稳性大团聚体并且保持其稳定的能力高于花岗岩和红砂岩土壤. 添加玉米秸秆培养 184 d,石灰岩、第四纪红土和玄武岩土壤有机碳的累积矿化率显著 ($P < 0.05$) 低于花岗岩和红砂岩土壤. 相关性分析表明,土壤有机碳的累积矿化率与游离态有机碳的比例极显著 ($P < 0.01$) 正相关,而与 >0.25 mm 团聚体有机碳的比例极显著 ($P < 0.01$) 负相关. 利用 ^{13}C 核磁共振 (^{13}C -NMR) 技术对土壤有机碳进行结构表征,结果显示团聚体内轻组有机碳的分解程度低于游离态轻组有机碳,且石灰岩、第四纪红土和玄武岩土壤这两个组分有机碳的分解程度都低于其他母质土壤,直接证实了团聚体对于有机碳的物理保护作用. 成土母质通过控制土壤胶体的数量和性质致使团聚体及有机碳分布对输入外源有机物质的响应存在较大差异,进而影响有机碳的矿化. 石灰岩、第四纪红土和玄武岩土壤中团聚体稳定性高且对有机碳的保护容量大,有利于有机碳的积累和稳定.

关键词: 土壤母质; 团聚体; 游离态有机碳 (fLOC); 矿化; 核磁共振

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2842-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201912222

Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials

MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, SHEN Qian, ZHANG Ming-kui*

(School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Development and the dynamics of stable aggregates in many soils are known to be closely related to the cycling as well as accumulation of soil organic carbon (SOC). This study explored the aggregation processes and distributions of soil organic carbon in soils developed from limestone (L), quaternary red earth (Q), granite (G), basalt (B), and tertiary red sandstone (T) subtropical China related to the addition of maize residues during 7 days and 184 days of incubation. The soils were sieved to <0.25 mm before incubation. We aimed to clarify the mechanisms underlying SOC mineralization across soils from the perspective of soil aggregate protection. Fractionation of the water stable aggregates showed that addition of maize straw promoted the formation of >2 mm and 2-1 mm aggregates, while only 1.0-0.5, 0.5-0.25 and <0.25 mm aggregates were detected in the absence maize straw. The proportion of macroaggregates as well as their stability was always higher in L, Q, and B developed soils than those in G and T developed soils. In amended soils, the accumulation of total SOC was much obvious in L, Q, and B developed soils than those in G and T developed soils, and these increases were mainly contributed by the >0.25 mm macroaggregate-associated SOC. This result indicated that >0.25 mm macroaggregates were important spots for SOC sequestration. Furthermore, the proportions of >0.25 mm macroaggregate-associated SOC were also significantly ($P < 0.05$) higher in L, Q, and B developed soils than those in G and T developed soils, and the free light organic carbon (fLOC) followed an inverse parent material pattern as >0.25 mm macroaggregate-associated SOC. Results also demonstrated that ratios of accumulative mineralized $\text{CO}_2\text{-C}$ to total soil organic carbon in L, Q, and B soils were significantly ($P < 0.05$) lower than those in G and T soils. The correlation analysis further suggested that ratios of cumulative respired $\text{CO}_2\text{-C}$ to total soil organic carbon were significantly and positively correlated ($P < 0.01$) with the proportion of fLOC, but inversely correlated ($P < 0.01$) with the proportion of >0.25 mm macroaggregate-associated SOC. By applying ^{13}C -NMR to characterize the inherent chemical composition of soil organic carbon fractions, we noted that fLOC was more deeply decomposed than intra-aggregate light organic carbon (intra-aggregate LOC), and both the fractions were advanced decomposed in G and T developed soils, verifying enhanced protection of added maize residues inside soil aggregates. The findings of the research suggested that the parent material exerts a significant influence on SOC mineralization by controlling the formation of aggregates and location of SOC in the hierarchical structure of the soil aggregate

收稿日期: 2019-12-26; 修订日期: 2020-01-02

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2019C02035)

作者简介: 毛霞丽(1988~),女,博士研究生,主要研究方向为土壤有机碳稳定特征, E-mail: maoxiali1215@126.com

* 通信作者, E-mail: mkzhang@zju.edu.cn

system. We demonstrated that enhanced physical protection of SOC by forming more stable macroaggregates contributes to carbon accumulation in limestone, quaternary red earth, and basalt developed soils treated with organic amendments.

Key words: soil parent material; aggregates; free light organic carbon (fLOC); mineralization; ^{13}C -NMR spectroscopy

土壤有机碳矿化是陆地生态系统碳输出的重要过程,也是预测土壤有机碳变化动态的关键环节^[1-4]. 团聚体的形成被认为是影响土壤有机碳转化的重要机制^[5,6]. 外源有机物质进入土壤之后可作为胶结剂加快土壤的团聚化进程并有效促进土壤大团聚体的形成,从而改变土壤有机碳的分布状况^[7,8]. 通过反馈作用机制,土壤团聚体对新输入的有机物质进行空间隔离进而产生物理保护作用,而部分未被团聚体包裹的游离态有机质较容易分解矿化^[6,9]. 然而 Poirier 等^[10] 研究秸秆添加量对土壤团聚体粒级分布的影响时发现随着秸秆添加量的增加,土壤大团聚体的比例先上升后基本保持不变. Shahbaz 等^[11] 和 Andruschkewitsch 等^[11] 的研究也表明随着秸秆添加量的增加土壤大团聚体的形成效率降低,相应地团聚体保护有机碳的比例降低而游离态有机碳比例上升,并认为这可能是土壤有机碳矿化率增加的主要原因. 可见土壤中有有机碳的矿化分解与土壤团聚体的保护容量关系密切. 研究团聚体的含量及有机碳的分布特征对于深入揭示不同土壤中有有机质储存、转化与矿化过程的差异尤为重要. 目前关于团聚体对有机碳物理保护的研究多数侧重不同施肥措施、土地利用方式下土壤团聚体组分碳分布的相对数量的变化^[12-14],而较少有研究探讨游离态及团聚体保护有机碳与土壤有机碳矿化两者的关系. 与此同时,结合固体 ^{13}C 核磁共振 (solid-state ^{13}C -NMR spectroscopy) 技术综合评价不同土壤中游离态及团聚体物理保护轻组有机碳的分解特征鲜见报道^[15].

近些年国内外已有研究指出母质作为土壤形成的物质基础,是调控土壤有机碳储量的重要因素^[16-18]. 不同母质发育土壤的物理和化学性质存在很大差异^[19-21]. 例如,石灰岩发育的土壤大多呈中性至微碱性,并且含有相当丰富的交换性钙、镁离子. 第四纪红土和玄武岩发育的土壤具有呈微酸性、质地黏重和富含铁铝氧化物的特点,而花岗岩和红砂岩发育土壤质地相对较砂. 本研究推测这些母质发育土壤其物质性质和组成的差异不仅会直接对有机碳的矿化过程产生影响,还可能通过改变团聚体的粒级分布及有机碳的分布进一步影响土壤对有机物质的保持^[17]. 然而,不同母质发育土壤其大团聚体的形成能力及其对外源有机物料的反应仍不十分清楚. 此外,已有的研究极少从团聚体形成和周转的角度解释不同母质发育土壤其有机碳矿化的差

异^[18,22].

因此本研究通过布置室内模拟培养试验,以浙江省石灰岩、第四纪红土、花岗岩、玄武岩和红砂岩发育的典型土壤为研究对象,分析:①玉米秸秆添加后不同母质发育土壤有机碳的矿化特征;②在不同培养阶段(7 d 和 184 d)土壤团聚体粒级分布及游离态有机碳和团聚体保护有机碳数量的变化情况. 与此同时,基于固体 ^{13}C -NMR 技术对土壤游离态轻组及团聚体物理保护轻组有机碳进行结构表征,深入探讨团聚体的物理保护与土壤有机碳矿化两者的关系,通过进一步了解不同母质发育土壤有机碳转化和积累过程,以期为研究土壤固碳机制提供理论依据.

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试土样为发育于石灰岩、第四纪红土、花岗岩、玄武岩和红砂岩的典型土壤,每种母土壤选择一个采样点,分别为浙江省临安(30°18'N, 118°55'E)、金华(29°06'N, 118°30'E)、丽水(28°15'N, 119°46'E)、绍兴(29°32'N, 120°52'E)和龙游(29°02'N, 119°07'E). 采样点的土地利用方式均为次生林地,植被类型以杉树(*Cunninghamia lanceolata*)为主. 每个采样点设置3个15 m × 15 m的采样方(样方之间的距离大于100 m),每个样方依据“S”型5点法采集心土层土壤样品(20 ~ 40 cm),充分混匀. 将样品中的石砾、落叶残体和根茬移除、风干. 用四分法取一部分风干土样过2 mm和0.154 mm筛,用于测定土壤基本理化性质,并选择有机质含量较低的土壤样品进行培养试验(表1). 用于培养试验的土壤样品(8 kg左右)过0.25 mm筛,破坏土壤中所有的大团聚体.

供试有机物料为玉米叶,采自收获后,经低温烘干,磨细过1 mm筛备用. 全碳含量为385.8 g·kg⁻¹,全氮含量为13.1 g·kg⁻¹.

1.2 培养试验

培养试验共设置3个处理,4个重复,5种母质发育土壤,共180个培养瓶(60个用于矿化培养,120个用于土壤培养). 处理设计如下:①对照(CK),不添加玉米秸秆;②低量玉米秸秆(S 0.5%),添加玉米秸秆为土壤干重的0.5%;③高量玉米秸秆(S 1.0%),添加玉米秸秆为土壤干重的1.0%.

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic properties of studied soils

土壤母质	土壤类型	pH(H ₂ O)	有机碳 /g·kg ⁻¹	游离氧化铁 /g·kg ⁻¹	交换性钙 /cmol·kg ⁻¹	交换性镁 /cmol·kg ⁻¹	土壤质地		
							砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%
石灰岩	油黄泥	7.25	6.75	24.62	9.52	5.80	42.20	18.20	39.60
第四纪红土	黄筋泥	4.21	4.03	51.69	2.32	1.07	26.20	32.00	41.80
花岗岩	砂粘质黄土	4.68	5.56	25.86	1.40	0.17	50.80	20.60	28.60
玄武岩	红黏土	4.41	5.19	63.58	1.53	1.30	21.20	36.00	42.80
红砂岩	红砂土	4.66	2.37	5.65	0.62	0.10	66.80	11.40	11.80

1.2.1 矿化培养试验

土壤有机碳矿化测定采用室内恒温培养、碱液吸收法。称取风干土样 20.00 g, 与玉米秸秆混合均匀后, 置于 1 000 mL 培养瓶中, 调整土壤水分至田间持水量的 30%, 25℃ 的恒温培养箱中, 预培养 5 d。预培养结束之后调整土壤水分至田间持水量的 60%, 将盛有 10 mL NaOH (0.20 mol·L⁻¹) 溶液的塑料烧杯瓶置于培养瓶底, 加盖密封后继续培养, 分别在第 1、3、7、12、18、25、32、42、52、62、72、86、100、114、128、142、156、170 和 184 d 取出玻璃瓶, 同时换入另一批 NaOH 溶液的玻璃瓶继续培养。在取出的塑料烧杯内加入 2 mL BaCl₂ (1 mol·L⁻¹) 溶液及 2 滴酚酞指示剂, 用盐酸 (0.2 mol·L⁻¹) 滴定, 计算培养期内土壤有机碳的矿化量。用称重法校正土壤水分含量, 定期调整土壤水分至初始重量。有机碳的累积矿化量为培养各阶段矿化量之和。

1.2.2 土壤培养试验

称取风干土样 100 g, 以同样的处理设计进行培养。分别在培养的第 7 d 和 184 d 进行破坏性取样。一部分土样沿土壤自然破碎面将其掰成 8 mm 左右小块, 进行团聚体的分组, 另一部分土样过 0.154 mm 筛测定有机碳含量。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 团聚体分级

采用湿筛法^[23]将 100 g 过 8 mm 筛风干土样在烧杯中用去离子水浸泡 10 min, 然后轻轻放入套筛 (2、1、0.5 和 0.25 mm) 的最上级筛子中, 启动湿筛仪 (30 r·min⁻¹、上下振幅 4 cm) 振荡 10 min。湿筛结束后取出套筛, 将各级团聚体分别冲洗至已知重量铝盒中, 50℃ 烘干并称量, 计算各级团聚体所占比重。

测定团聚体有机碳之前先对各粒级团聚体进行密度分组, 以去除轻组有机质。全土及各粒级团聚体有机碳采用重铬酸钾外加热法测定^[24]。

1.3.2 有机碳分组和结构表征

对于 S 1.0% 处理培养 184 d 的土壤样品, 根据湿筛法获得的各级团聚体所占比例, 将 5 个粒级的

团聚体混为一个样品, 进行有机碳分组^[9]。

(1) 游离态轻组有机质 (free light organic carbon, fLOC) 称 10.0 g 土样于 100 mL 离心管, 加入 50 mL 碘化钠溶液 (1.8 g·cm⁻³), 用手轻轻摇动, 静置室温过夜。将悬浮物离心 (3 500 r·min⁻¹, 10 min) 后进行抽滤 (0.45 μm 滤膜)。上述步骤重复 3 次至上清液中无悬浮物为止。滤膜上的物质用蒸馏水反复洗涤数次后, 将滤纸上的物质转移至铝盒中, 50℃ 烘干。离心管内沉淀加 50 mL 蒸馏水进行清洗, 振荡离心后弃去废液, 重复 3 次。

(2) 团聚体保护轻组有机质 (intra-aggregate light organic carbon, intra-aggregate LOC) 继续在离心管中加入 50 mL 六偏磷酸钠溶液 (0.5%), 振荡 18 h, 分散后倒入 0.053 mm 筛子, 将留在筛子上的样品转移至离心管中, 重复游离态轻组有机质的分离步骤获得团聚体内部的轻组有机质, 50℃ 烘干。

利用核磁共振仪 (AVANCE III 400, 布鲁克公司) 对 fLOC 和 intra-aggregate LOC 进行结构表征。采用固态¹³C-交叉极化魔角旋转技术, 转子直径为 3.2 mm, 旋转频率为 15 000 Hz, 接触时间为 3 ms, 循环延迟时间为 4 s。核磁共振功能基团面积积分用 MestReC 软件进行。所测核磁共振谱图主要分为 4 个功能区^[25, 26]: 烷基碳区 [δ (化学位移, 下同) 为 0 ~ 45 ppm]、烷氧碳区 (δ 为 45 ~ 110 ppm)、芳香碳区 (δ 为 110 ~ 160 ppm) 以及羰基碳区 (δ 为 160 ~ 200 ppm)。

1.4 数据处理与分析

利用 SPSS 19.0 对数据进行统计分析。采用单因素方差分析 (One-way ANOVA), 并用 LSD 法进行多重比较, 显著性水平为 0.05。相关分析采用 Pearson 的双侧检验法。

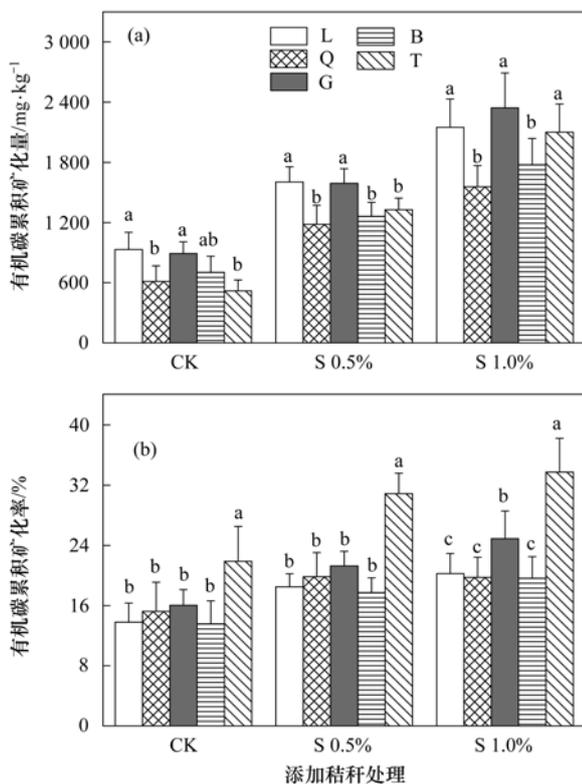
2 结果与分析

2.1 土壤有机碳累积矿化量及累积矿化率

土壤中有有机碳累积矿化量如图 1(a) 所示。经培养 184 d, 不添加秸秆 (CK)、添加 0.5% 秸秆 (S 0.5%) 和添加 1.0% 秸秆 (S 1.0%) 时土壤有机碳

的累积矿化量分别为 518.60 ~ 891.24、1 182.33 ~ 1 604.50 和 1 557.83 ~ 2 343.93 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。石灰岩和花岗岩发育土壤中有有机碳的累积矿化量显著 ($P < 0.05$) 高于第四纪红土和玄武岩发育土壤有机质的累积矿化量。

土壤有机碳的累积矿化率指在 184 d 培养期间有机碳累积矿化量与总有机碳含量(原有有机碳 + 外源玉米秸秆有机碳)的比值。由图 1(b)可知,不同母质土壤间累积矿化率存在显著性差异。在不添加秸秆和添加 0.5% 秸秆时,红砂岩土壤中有有机质的累积矿化率显著 ($P < 0.05$) 高于其他母质土壤,而添加 1.0% 秸秆时红砂岩和花岗岩土壤有机碳的累积矿化率显著 ($P < 0.05$) 高于石灰岩、第四纪红土和玄武岩土壤,且红砂岩和花岗岩之间的差异达显著水平 ($P < 0.05$)。



不同小写字母表示同一秸秆添加量不同母质发育土壤间分析差异显著 ($P < 0.05$); L, 石灰岩; Q, 第四纪红土; G, 花岗岩; B, 玄武岩; T, 红砂岩; CK 表示不添加玉米秸秆; S 0.5% 表示添加玉米秸秆量为 0.5%; S 1.0% 表示添加玉米秸秆量为 1.0%; 图中误差线代表标准偏差, 下同

图 1 不同母质发育土壤中有有机碳的累积矿化量和累积矿化率
Fig. 1 Cumulative mineralized $\text{CO}_2\text{-C}$ and their ratios to total soil organic carbon in soils developed from five parent materials

2.2 土壤团聚体分布特征

培养 7 d 后[图 2(a)、图 2(c)和图 2(e)],在不添加秸秆时石灰岩、第四纪红土和玄武岩土壤以 1 ~ 0.5、0.5 ~ 0.25 和 < 0.25 mm 粒级团聚体形成,而花岗岩和红砂岩土壤以 < 0.25 mm 粒级团聚体所

占比最大, 1 ~ 0.5 mm 和 0.5 ~ 0.25 mm 粒级团聚体显著 ($P < 0.05$) 低于其他 3 种母质土壤。总体而言,添加秸秆降低了所有母质土壤中 < 0.25 mm 微团聚体所占比重,并相应提高了 > 2 mm 和 2 ~ 1 mm 粒级团聚体所占比重(除了红砂岩发育土壤中添加少量秸秆并未促进 > 2 mm 粒级团聚体的形成),且在添加 1.0% 秸秆时第四纪红土和玄武岩土壤中这两个粒级团聚体所占比重显著 ($P < 0.05$) 高于其他 3 种母质发育土壤。

培养 184 d 后[图 2(b)、图 2(d)和图 2(f)],所有土壤中 < 0.25 mm 粒级微团聚体所占比重增加,增加量因母质类型和秸秆添加量的不同存在差异。在添加秸秆的处理中,石灰岩、第四纪红土和玄武岩土壤中该粒级微团聚体所占比重的增量仅为 1.64% ~ 4.17%,而花岗岩和红砂岩土壤中高达 5.17% ~ 10.59%。与此同时,石灰岩、第四纪红土和玄武岩土壤中 > 2 mm 和 2 ~ 1 mm 粒级大团聚体所占比重与培养初期相比变化不明显,而花岗岩和红砂岩母质土壤这两个粒级大团聚体所占比重大幅度降低。

2.3 土壤中游离态有机碳和团聚体有机碳含量及其分配比例

土壤有机碳的组分结果表明(图 3),不同母质土壤各组分有机碳对于添加秸秆的响应有所差异。总体而言,添加秸秆提高了所有母质土壤总有机碳、 > 0.25 mm 粒级大团聚体及游离态有机碳含量,且石灰岩、第四纪红土和玄武岩中总有机碳和 > 0.25 mm 粒级大团聚体有机碳的增量高于花岗岩和红砂岩土壤,而游离态有机碳的增量低于花岗岩与红砂岩土壤。培养 184 d 后所有土壤中总有机碳、 > 0.25 mm 粒级大团聚体和游离态有机碳含量均有了不同程度的降低,降低幅度因土壤母质而异,总有机碳含量降低幅度由高到低依次为:红砂岩土壤 $>$ 花岗岩土壤 $>$ 石灰岩、第四纪红土和玄武岩土壤。此外,土壤有机碳含量的降低主要来源于游离态有机碳含量的减少。

由图 3 还可以看出,石灰岩、第四纪红土和玄武岩土壤中 > 0.25 mm 大团聚体有机碳的比例高于花岗岩和红砂岩土壤,而游离态有机碳的比例低于红砂岩和花岗岩土壤。添加秸秆提高 > 0.25 mm 大团聚体有机碳的比例,降低 < 0.25 mm 微团聚体有机碳的比例。培养 184 d 后,所有母质土壤中 < 0.25 mm 微团聚体有机碳的比例增加而游离态有机碳的比例减少,石灰岩、第四纪红土和玄武岩花岗岩土壤中游离态有机碳的比例降至 3.45% ~ 7.84%,而花岗岩和红砂岩土壤中游离态有机碳仍分别高达

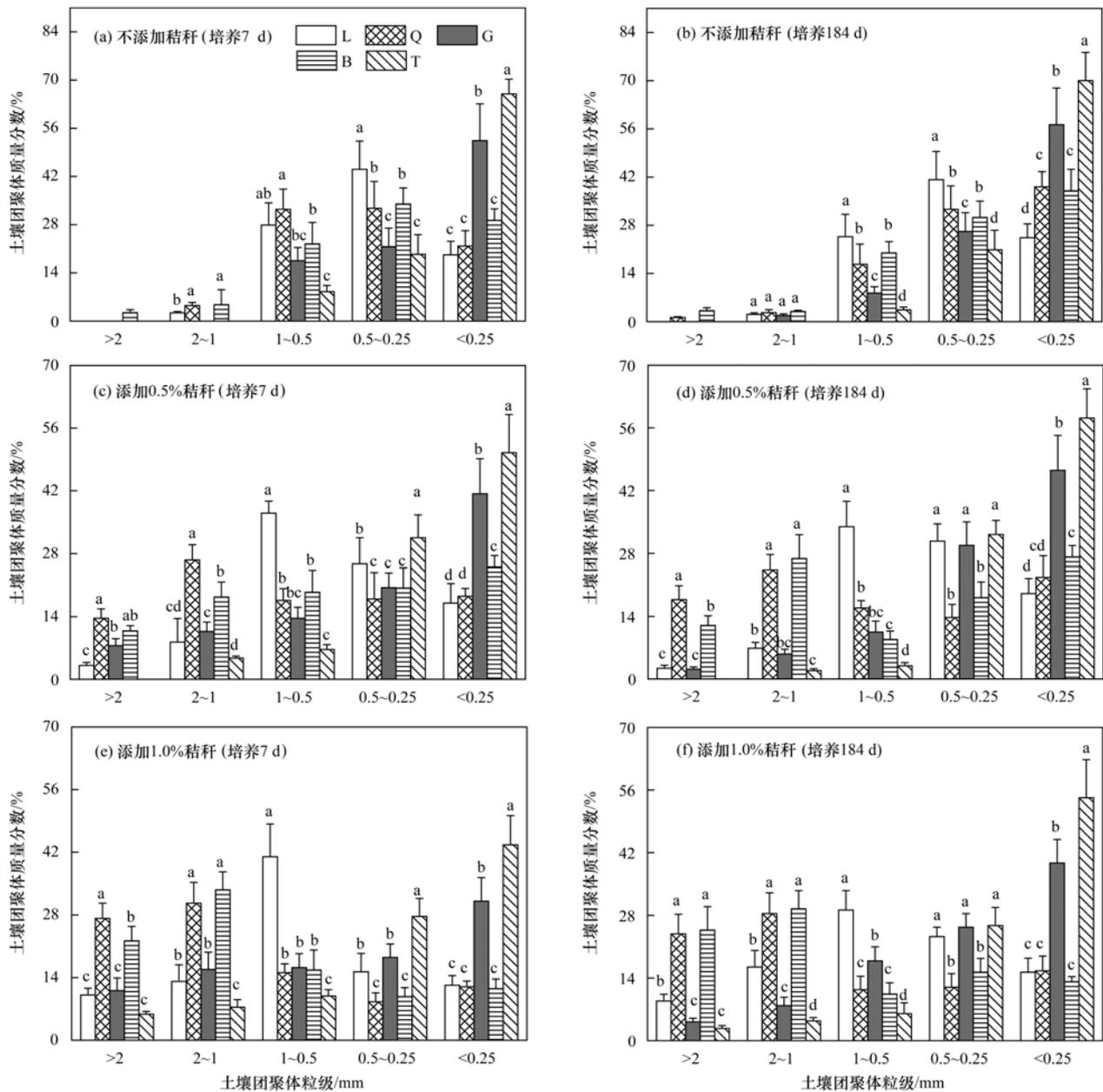


图2 不同母质土壤水稳性团聚体的分布特征

Fig. 2 Distribution of water-stable aggregates in soils developed from five parent materials

11.39%~32.48%和38.90%~55.25%。

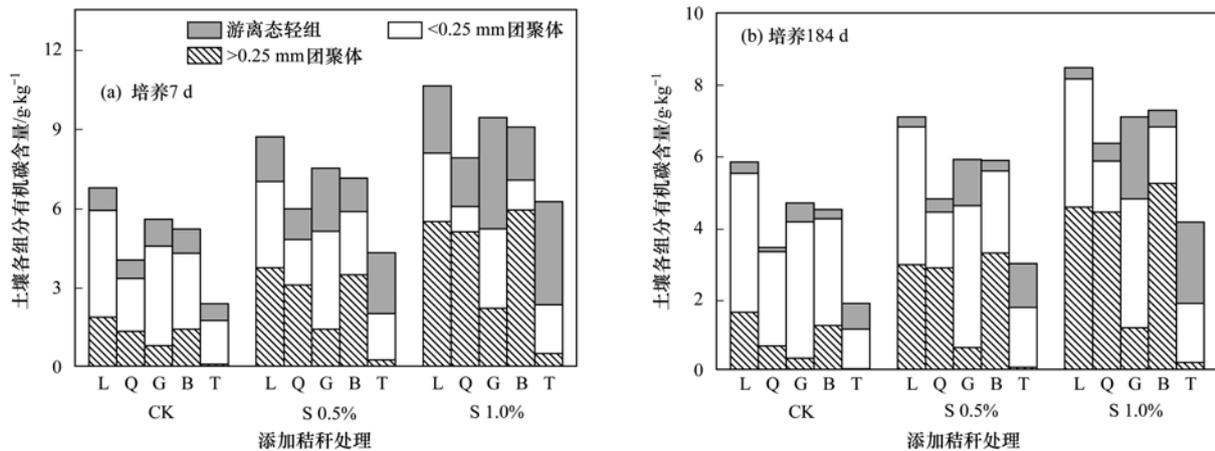
2.4 土壤中游离态轻组和团聚体保护轻组有机碳的结构表征

由图4可知,土壤游离态轻组和团聚体保护轻组有机碳化学结构谱图较相似,但各功能区吸收峰的强度存在差异,且差异主要体现在烷基碳功能区。对核磁共振谱图进行定量分析(表2),土壤游离态轻组和团聚体保护轻组有机碳以烷氧碳所占比例最大(平均为 $54.56\% \pm 8.95\%$),其次为烷基碳(平均为 $16.93\% \pm 4.38\%$)和芳香碳(平均为 $17.49\% \pm 2.57\%$),羰基碳所占比例最少(平均为 $11.02\% \pm 2.11\%$)。土壤团聚体保护轻组有机碳烷氧碳的比例(平均为 $61.95\% \pm 4.47\%$)普遍高于游离态轻组

有机碳(平均为 $47.17\% \pm 4.86\%$)。不同母质土壤两个组分有机碳的化学结构存在较大差异。总体来说,不同母质土壤轻组有机碳其烷氧碳的变化趋势为:第四纪红土、玄武岩土壤>石灰岩土壤>花岗岩和红砂岩土壤,烷基碳、芳化度以及烷基碳/烷氧碳比值的变化趋势与烷氧碳相反。

2.5 土壤各组分有机碳含量和分配比例与有机碳的累积矿化量、累积矿化率之间的关系

相关性分析表明(表3),土壤有机碳184 d的累积矿化量与土壤总有机碳、游离态有机碳含量均呈显著正相关($P < 0.01$)。土壤有机碳的184 d的累积矿化率与土壤游离态有机碳的含量和比例之间的关系为极显著($P < 0.01$)正相关,而与土壤 > 0.25



>0.25 mm 团聚体中有机碳含量为 >2、2~1、1~0.5 和 0.5~0.25 mm 粒级团聚体有机碳含量的总和

图3 培养 7 d 和 184 d 时不同母质土壤各组分有机碳含量

Fig. 3 Organic carbon content of different fractions in soils derived from five parent materials after 7 days and 184 days of incubation

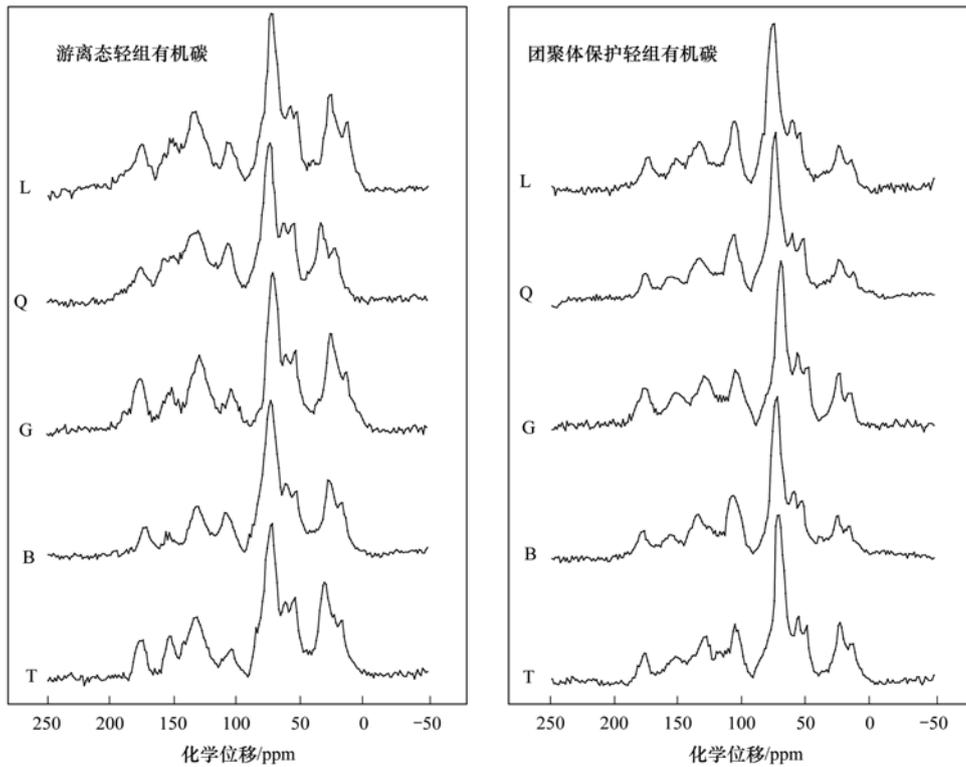


图4 S 1.0%处理培养 184 d 时土壤游离态轻组有机碳和团聚体保护轻组有机碳的¹³C-NMR 图谱

Fig. 4 ¹³C-NMR spectra of soil free light organic carbon and aggregate protected light organic carbon after 184 days of incubation under S 1.0% treatment

mm 团聚体有机碳的比例之间的关系为极显著 ($P < 0.01$) 负相关。

3 讨论

3.1 不同母质土壤团聚体的分布特征

土壤团聚体的形成与胶结剂的种类和数量有关^[21,27,28]。本研究中,石灰岩、第四纪红土和玄武岩土壤在不添加秸秆时有大量的 1~0.5 mm 和 0.5~0.25 mm 以及少量的 2~1 mm 粒级大团聚体形成,而花岗岩和红砂岩土壤主要以 <0.25 mm 粒级团聚

体为主(52.41%~70.00%),而且 0.5~0.25 mm 粒级团聚体所占比例也显著低于其他 3 种母质土壤(图 2)。不同母质土壤之间 >0.25 mm 水稳定性团聚体的变化趋势基本与章明奎等^[21]对野外采集的土壤样品直接进行湿筛分组结果一致。这可能是由于石灰岩、第四纪红土和玄武岩发育土壤质地黏重,且石灰岩发育的棕色石灰土具有丰富的钙镁含量而第四纪红土和玄武岩发育的红壤氧化物含量较高(表 1)。土壤黏粒的内聚力以及铁铝氧化物和钙镁离子的胶结作用有利于 1~0.5 mm 和 0.5~0.25

表 2 S 1.0%处理培养 184 d 时土壤游离态轻组有机碳和团聚体保护轻组有机碳各类型 C 的相对含量/%

Table 2 Relative distribution of different carbon species of soil free light organic carbon and aggregate protected light organic carbon after 184 days of incubation under S 1.0% treatment/%

有机碳组分	土壤母质	烷基碳 (0~45 ppm) ¹⁾	烷氧碳		芳香碳 110~160 ppm	羰基碳 160~200 ppm	烷基碳/烷氧碳	芳化度 ²⁾
			45~90 ppm	90~110 ppm				
游离态轻组有机碳	L	20.94	37.12	9.81	19.10	13.03	0.45	0.22
	Q	18.21	40.15	10.32	18.74	12.58	0.36	0.21
	G	22.32	35.96	8.34	20.21	13.17	0.50	0.23
	B	17.40	42.01	11.21	18.05	11.33	0.33	0.20
	T	23.93	34.10	6.84	21.21	13.92	0.58	0.24
团聚体保护轻组有机碳	L	13.27	44.26	19.40	14.27	8.80	0.20	0.16
	Q	11.32	47.74	18.31	14.41	8.22	0.17	0.16
	G	14.56	42.84	14.81	17.82	9.97	0.25	0.20
	B	12.08	47.50	18.20	13.75	8.47	0.18	0.15
	T	15.25	42.42	14.26	17.37	10.70	0.27	0.19

1) 表示化学位移; 2) 芳化度 = 芳香碳/(烷基碳 + 烷氧碳 + 芳香碳)

表 3 土壤游离态有机碳和团聚体有机碳与有机碳累积矿化量、矿化速率的相关性分析

Table 3 Correlation coefficients between free light organic carbon, aggregate protected organic carbon, and cumulative mineralized CO₂-C as well as their ratios to total soil organic carbon

培养天数 /d	项目	184 d 累积矿化量		184 d 累积矿化率	
		相关系数	显著性	相关系数	显著性
7	有机碳含量(粒级 >0.25 mm)/g·kg ⁻¹	0.378	0.164	-0.444	0.097
	有机碳含量(粒级 >0.25 mm)/%	-0.043	0.878	-0.725**	0.002
	有机碳含量(粒级 <0.25 mm)/g·kg ⁻¹	0.071	0.802	0.075	0.790
	<0.25 mm)/%	-0.206	0.462	0.544*	0.036
	FLOC/g·kg ⁻¹	0.908**	0.000	0.747**	0.001
	FLOC/%	0.534*	0.040	0.964**	0.000
	总有机碳/g·kg ⁻¹	0.811**	0.000	-0.210	0.940
184	有机碳含量(粒级 >0.25 mm)/g·kg ⁻¹	0.381	0.161	-0.407	0.132
	有机碳含量(粒级 >0.25 mm)/%	-0.132	0.640	-0.782**	0.001
	有机碳含量(粒级 <0.25 mm)/g·kg ⁻¹	-0.050	0.861	-0.146	0.604
	有机碳含量(粒级 <0.25 mm)/%	-0.256	0.358	0.484	0.068
	FLOC/g·kg ⁻¹	0.589*	0.021	0.809**	0.000
	FLOC/%	0.246	0.377	0.879**	0.000
	总有机碳/g·kg ⁻¹	0.689**	0.005	-0.202	0.470

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关, ** 表示在 0.01 水平上显著相关, n = 15

mm 粒级团聚体的形成^[28]. 由此可见,对于有机质含量较低的土壤其较小粒级的水稳性大团聚体的形成由无机胶体的数量所决定^[3,19,29].

本研究同时发现,添加玉米秸秆可以有效提高所有母质土壤 >2 mm 和 2~1 mm 粒级团聚体的比例,尤其以第四纪红土和玄武岩土壤增加的比例最大. 对于这 5 种母质土壤来说,有机质是土壤较大粒级大团聚体的主要胶结剂^[27,30]. 然而随着土壤有机物质的矿化分解(培养 184 d),花岗岩和红砂岩母质土壤这两个粒级大团聚体所占比重明显降低(图 2). 这些研究结果表明花岗岩和红砂岩土壤 >2 mm 和 2~1 mm 粒级大团聚体稳定性相对较低. 因此,推测土壤粒径较大的水稳性大团聚体(>1 mm)的形成与有机胶结剂关系密切,但其稳定性的维持则可能依赖于有机无机胶体的共同作用. 胡宁等^[29]认

为在大粒径团聚体的形成过程中,黏粒可能依然是重要的胶结物质. 在添加玉米秸秆时,石灰岩土壤 >2 mm 和 2~1 mm 粒级大团聚体的比例低于第四纪红土、玄武岩土壤也可能与其粉粒含量和氧化铁含量相对较低有关.

3.2 不同母质土壤各组分有机碳的变化特征

总体而言,添加秸秆提高了所有母质土壤总有机碳含量,但石灰岩、第四纪红土和玄武岩中有机碳的增量高于花岗岩和红砂岩(图 3). 李忠佩等^[31]通过向不同母质发育的瘠薄红壤施用有机肥料,也发现第四纪红色黏土发育的红壤中有机碳的积累量比第三纪红砂岩风化物的要高. 依据土壤中有机碳的存在状态,本研究进一步对土壤有机碳进行分组^[9,32]:一种是活性较大的游离态有机碳,这部分有机碳主要包括未分解和半分解动植物残体,较易被

微生物分解利用;另一种是以矿质结合态或是隐蔽在不同粒级团聚体内部被物理化学过程保护的缓效或惰性有机碳。对于后者重点区分 >0.25 mm 和 <0.25 mm 这两个粒级范围的水稳性团聚体对土壤有机碳积累和转化的贡献程度。结果显示(图 3),所有母质土壤总有机碳的增加主要来源于 >0.25 mm 粒级团聚体中有机碳增量的贡献,而培养后期所有母质土壤中总有机碳含量的降低主要来源于游离态有机碳含量的减少。这从侧面证实了 >0.25 mm 团聚体是有机碳积累的重要场所。王玉竹等^[8]运用¹³C 标记技术研究外源有机物料土壤团聚体中的残留特征,发现在花岗岩风化物、第四纪红色黏土、板页岩风化物、近代河流沉积物发育土壤中新输入的玉米秸秆都是主要分布在 $2 \sim 0.25$ mm 大团聚体中。徐虎等^[7]的研究也得到了相似的结论。本研究还发现红砂岩和花岗岩土壤在添加秸秆时其游离态有机碳的比例显著($P < 0.05$)高于石灰岩、第四纪红土和玄武岩土壤,而 >0.25 mm 团聚体有机碳的变化趋势与游离态有机碳相反(图 3)。不同母质土壤间各组分有机碳的分布情况说明石灰岩、第四纪红土和玄武岩土壤中团聚体(尤其是水稳性大团聚体)对有机碳的包裹程度和保护容量远大于花岗岩和红砂岩土壤,这种差异可能会进一步对土壤有机碳的转化和积累产生影响。

借助¹³C-NMR 技术对土壤有机碳进行结构表征(图 4 和表 2),结果显示土壤团聚体内轻组有机碳中烷氧碳的相对含量高于游离态轻组有机碳,而烷基碳、芳香碳及羰基碳的相对含量低于游离态轻组有机碳。此外,第四纪红土、玄武岩和石灰岩土壤中烷基碳/烷氧碳的比值(A/A-O)及芳香化程度略低于花岗岩和红砂岩土壤。大量研究指 A/A-O 和芳香化程度可作为评价土壤有机碳分解/腐殖化程度的敏感指标,其比值越小说明有机质的分解/腐殖化程度越低^[15,25,33]。由此可见,团聚体内轻组有机碳的分解程度相对低于游离态轻组有机碳。考虑到用于培养的原土总有机碳和轻组有机碳含量较低,对于添加 1.0% 玉米秸秆的处理,游离态轻组和团聚体内轻组有机碳的分解特征在一定程度上也可以反映外源玉米秸秆的分解程度。该结果直接证实了第四纪红土、玄武岩和石灰岩土壤团聚体对于有机碳的物理保护作用高于花岗岩和红砂岩土壤。

3.3 不同母质土壤有机碳矿化特征及其影响因素

土壤有机碳累积矿化率能够直观地体现土壤有机碳的相对稳定性^[4]以及土壤的固碳能力^[14]。本研究中 5 种母质土壤有机质累积矿化率的变化趋势为:红砂岩 $>$ 花岗岩 $>$ 石灰岩、第四纪红土和玄武

岩,说明红砂岩和花岗岩土壤有机碳活性较高,而石灰岩、第四纪红土和玄武岩土壤有机碳则更为稳定,且固碳能力较花岗岩和红砂岩土壤强。通过相关性分析发现(表 3),土壤有机碳累积矿化量与游离态有机碳($P < 0.05$)和总有机碳($P < 0.01$)含量正相关。与此同时,土壤有机碳累积矿化率与游离态有机碳的比例呈极显著($P < 0.01$)正相关,而与土壤 >0.25 mm 团聚体有机碳的比例呈极显著($P < 0.01$)负相关。这个研究结果表明土壤有机碳的累积矿化量主要取决于游离态有机碳和总有机碳水平,而累积矿化率与土壤各组分有机碳的分配比例密切相关。李奕等^[5]通过对红壤性水稻土团聚体有机碳矿化进行研究得到了相似的结论,指出有机碳含量是影响团聚体有机碳矿化的最重要因素。与此同时,Whalen 等^[34]等研究也证实森林和农田土壤矿化速率都是主要受土壤轻组有机质分解的影响。

Kemmitt 等^[35]提出的“控制阀”假设认为需要将非生物活性有机质通过一系列非生物过程(从团聚体的释放、从固相中的解析以及化学氧化和水解等)转化为生物活性有机质,才能在微生物的参与下进行矿化分解。近年来有关有机质矿化的研究指出,土壤有机碳的矿化并不完全受土壤微生物的影响^[8],土壤团聚体以及与之相关的物理化学性状可能在土壤有机碳的矿化过程中发挥重要的作用^[36]。与培养 7 d 时相比,红砂岩和花岗岩土壤 >2 mm 和 $2 \sim 1$ mm 团聚体在培养后期大幅度减少,这两个粒级团聚体的破碎将导致原先被团聚体物理保护的有机碳释放,从而导致有机碳矿化作用加强^[30]。由此说明,团聚体对有机碳的物理保护不仅取决于其对有机碳的包裹程度,而且还与团聚体保持其稳定性的能力有关^[37]。在培养后期,石灰岩、第四纪红土和玄武岩花岗岩土壤中游离态有机碳的比例仅为 3.45%~7.84%,而花岗岩和红砂岩土壤中游离态有机碳仍占较大比例,分别高达 11.39%~32.48% 和 38.90%~55.25%。因此如果延长培养时间,花岗岩和红砂岩与其他 3 种母质土壤之间矿化量稳定性的差异可能会更加明显。本研究未能区分石灰岩、第四纪红土和玄武岩这 3 种母质土壤之间有机碳的矿化和积累的差异,这可能是因为玉米秸秆的输入量远低于这 3 种母质土壤其团聚体对有机碳的保护容量。建议今后的研究中提高外源秸秆的输入量并考虑增设秸秆的用量梯度。

4 结论

(1)对于有机质含量较低的土壤, $1 \sim 0.5$ mm 和 $0.5 \sim 0.25$ mm 粒级水稳性大团聚体形成取决于

无机胶体的水平,添加玉米秸秆可以有效提高所有母质土壤 >2 mm 和 2 ~ 1 mm 粒级团聚体的比例,但其稳定性的维持则可能依赖于有机无机胶体的共同作用. 不管是否添加玉米秸秆,石灰岩、第四纪红土和玄武岩土壤形成水稳性大团聚体并且保持其稳定的能力高于花岗岩和红砂岩土壤.

(2) 添加玉米秸秆培养 184 d, 石灰岩、第四纪红土和玄武岩土壤有机碳的矿化稳定性高于花岗岩和红砂岩土壤. 土壤有机碳的累积矿化量主要取决于游离态有机碳含量和总有机碳含量,而累积矿化率与游离态及 >0.25 mm 团聚体有机碳的分配比例关系密切.

(3) 基于¹³C-NMR 技术对土壤游离态轻组和团聚体内轻组有机碳进行表征,结果证实了第四纪红土、玄武岩和石灰岩土壤团聚体对有机碳的物理保护作用强于花岗岩和红砂岩土壤.

(4) 综上所述,土壤团聚体对有机碳的保护容量以及维持其稳定性的能力可能是不同母质发育土壤有机碳矿化和积累存在较大差异的主要影响因素.

参考文献:

- [1] Shahbaz M, Kuzyakov Y, Heitkamp F. Decrease of soil organic matter stabilization with increasing inputs: mechanisms and controls[J]. *Geoderma*, 2017, **304**: 76-82.
- [2] Houghton R A. Historic changes in terrestrial carbon storage [A]. In: Lal R, Lorenz K, Hüttl R, *et al* (Eds.). *Recarbonization of the Biosphere: Ecosystems and the Global Carbon Cycle*[M]. Dordrecht: Springer, 2012. 59-82.
- [3] 李忠佩, 刘明, 江春玉. 红壤典型区土壤中有机的分解、积累与分布特征研究进展[J]. *土壤*, 2015, **47**(2): 220-228.
Li Z P, Liu M, Jiang C Y. Decomposition, accumulation and distribution of soil organic matter in typical red soil region of China[J]. *Soils*, 2015, **47**(2): 220-228.
- [4] 陈仕奇, 吕盛, 高明, 等. 缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 953-960.
Chen S Q, Lv S, Gao M, *et al*. Characteristics of soil organic carbon and mineralization with different stands in Jinyun Mountain[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 953-960.
- [5] 李奕, 刘玲玲, 房煊, 等. 长期施肥对水稻土碳氮矿化与团聚体稳定性的影响[J]. *土壤*, 2019, **51**(3): 451-457.
Li Y, Liu L L, Fang H, *et al*. Effects of long-term fertilization on paddy soil carbon and nitrogen mineralization and aggregates stability[J]. *Soils*, 2019, **51**(3): 451-457.
- [6] Bravo-Garza M R, Voroney P, Bryan R B. Particulate organic matter in water stable aggregates formed after the addition of ¹⁴C-labeled maize residues and wetting and drying cycles in vertisols [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(6): 953-959.
- [7] 徐虎, 张敬业, 蔡岸冬, 等. 外源有机物料碳氮在红壤团聚体中的残留特征[J]. *中国农业科学*, 2015, **48**(23): 4660-4668.
Xu H, Zhang J Y, Cai A D, *et al*. Retention characteristic of carbon and nitrogen from amendments in different size aggregates of red soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, **48**(23): 4660-4668.
- [8] 王玉竹, 周萍, 王娟, 等. 亚热带几种典型稻田与旱作土壤中源输入秸秆的分解与转化差异[J]. *生态学报*, 2017, **37**(19): 6457-6465.
Wang Y Z, Zhou P, Wang J, *et al*. Decomposition and transformation of input straw in several typical paddy and upland soils in subtropical China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(19): 6457-6465.
- [9] Li S Y, Gu X, Zhuang J, *et al*. Distribution and storage of crop residue carbon in aggregates and its contribution to organic carbon of soil with low fertility [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, **155**: 199-206.
- [10] Poirier V, Angers D A, Whalen J K. Formation of millimetric-scale aggregates and associated retention of ¹³C-¹⁵N-labelled residues are greater in subsoil than topsoil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **75**: 45-53.
- [11] Andruschkewitsch R, Geisseler D, Dultz S, *et al*. Rate of soil-aggregate formation under different organic matter amendments—a short-term incubation experiment [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2014, **177**(2): 297-306.
- [12] 王丽, 李军, 李娟, 等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(3): 759-768.
Wang L, Li J, Li J, *et al*. Effects of tillage rotation and fertilization on soil aggregates and organic carbon content in corn field in Weibei Highland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(3): 759-768.
- [13] 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3816-3824.
Luo X H, Wang Z F, Lu C, *et al*. Effects of land use type on the content and stability of organic carbon in soil aggregates [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3816-3824.
- [14] 刘晶, 田耀武, 张巧明. 豫西黄土丘陵区不同土地利用方式土壤团聚体有机碳含量及其矿化特征[J]. *水土保持学报*, 2016, **30**(3): 255-261.
Liu J, Tian Y W, Zhang Q M. Characteristics of soil organic carbon content and mineralization in soil aggregates under different land use patterns on the loess hilly area of Western Henan [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(3): 255-261.
- [15] Courtier-Murias D, Simpson A J, Marzadori C, *et al*. Unraveling the long-term stabilization mechanisms of organic materials in soils by physical fractionation and NMR spectroscopy [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, **171**: 9-18.
- [16] Heckman K, Welty-Bernard A, Rasmussen C, *et al*. Geologic controls of soil carbon cycling and microbial dynamics in temperate conifer forests [J]. *Chemical Geology*, 2009, **267**(1-2): 12-23.
- [17] Barré P, Durand H, Chenu C, *et al*. Geological control of soil organic carbon and nitrogen stocks at the landscape scale [J]. *Geoderma*, 2017, **285**: 50-56.
- [18] 邓万刚, 吴蔚东, 陈明智, 等. 土地利用方式及母质对土壤有机碳的影响[J]. *生态环境*, 2008, **17**(3): 1130-1134.
Deng W G, Wu W D, Chen M Z, *et al*. Effects of land use change and soil parent material on soil organic carbon [J]. *Ecology and Environment*, 2008, **17**(3): 1130-1134.
- [19] 郭奇峰, 谢国雄, 王京文, 等. 浙西 3 类石灰岩发育土壤有机碳和团聚体稳定性的研究[J]. *土壤通报*, 2018, **49**(3): 567-574.
Wu Q F, Xie G X, Wang J W, *et al*. The stability of organic

- carbon and aggregates of three limestone soils in the Western Zhejiang[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, **49**(3): 567-574.
- [20] Araujo M A, Zinn Y L, Lal R. Soil parent material, texture and oxide contents have little effect on soil organic carbon retention in tropical highlands[J]. Geoderma, 2017, **300**: 1-10.
- [21] 章明奎, 何振立. 成土母质对土壤团聚体形成的影响[J]. 热带亚热带土壤科学, 1997, **6**(3): 198-202.
Zhang M K, He Z L. Effect of parent materials on formation of soil aggregates[J]. Tropical and Subtropical Soil Science, 1997, **6**(3): 198-202.
- [22] Angst G, Messinger J, Greiner M, *et al.* Soil organic carbon stocks in topsoil and subsoil controlled by parent material, carbon input in the rhizosphere, and microbial-derived compounds[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, **122**: 19-30.
- [23] John B, Yamashita T, Ludwig B, *et al.* Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use[J]. Geoderma, 2005, **128**(1-2): 63-79.
- [24] Walkley A, Black I. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method[J]. Soil Science, 1934, **37**(1): 29-38.
- [25] 毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 等. 长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1827-1835.
Mao X L, Lu K P, Sun T, *et al.* Effect of long-term fertilizer application on the stability of organic carbon in particle size fractions of a paddy soil in Zhejiang Province, China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(5): 1827-1835.
- [26] Zhao H, Lv Y Z, Wang X K, *et al.* Tillage impacts on the fractions and compositions of soil organic carbon[J]. Geoderma, 2012, **189-190**: 397-403.
- [27] 罗友进, 赵光, 高明, 等. 不同植被覆盖对土壤有机碳矿化及团聚体碳分布的影响[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(6): 117-122.
Luo Y J, Zhao G, Gao M, *et al.* Organic carbon distribution in aggregates and soil organic carbon mineralization in different vegetation covering[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, **24**(6): 117-122.
- [28] Regelink I C, Stoof C R, Rousseva S, *et al.* Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties[J]. Geoderma, 2015, **247-248**: 24-37.
- [29] 胡宁, 马志敏, 蓝家程, 等. 石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3411-3421.
- Hu N, Ma Z M, Lan J C, *et al.* Nitrogen fraction distributions and impacts on soil nitrogen mineralization in different vegetation restorations of karst rocky desertification [J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3411-3421.
- [30] 苗淑杰, 周连仁, 乔云发, 等. 长期施肥对黑土有机碳矿化和团聚体碳分布的影响[J]. 土壤学报, 2009, **46**(6): 1068-1075.
Miao S J, Zhou L R, Qiao Y F, *et al.* Organic carbon mineralization and carbon contribution in aggregates as affected by long term fertilization [J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, **46**(6): 1068-1075.
- [31] 李忠佩, 焦坤, 林心雄, 等. 施肥条件下瘠薄红壤的生物化学性状变化[J]. 土壤, 2003, **35**(4): 304-310.
Li Z P, Jiao K, Lin X X, *et al.* Effect of fertilizer application on biochemical properties of infertile red soils[J]. Soils, 2003, **35**(4): 304-310.
- [32] 梁尧, 韩晓增, 丁雪丽, 等. 不同有机肥输入量对黑土密度分组中碳、氮分配的影响[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(1): 174-178.
Liao Y, Han X Z, Ding X L, *et al.* Distribution of soil organic carbon and nitrogen in density fractions on black soil as affected by different amounts of organic manure application[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, **26**(1): 174-178.
- [33] Wang X Y, Sun B, Mao J D, *et al.* Structural convergence of maize and wheat straw during two-year decomposition under different climate conditions [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(13): 7159-7165.
- [34] Whalen J K, Bottomley P J, Myrold D D. Carbon and nitrogen mineralization from light-and heavy-fraction additions to soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, **32**(10): 1345-1352.
- [35] Kemmitt S J, Lanyon C V, Waite I S, *et al.* Mineralization of native soil organic matter is not regulated by the size, activity or composition of the soil microbial biomass—a new perspective [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, **40**(1): 61-73.
- [36] Strickland M S, Callahan Jr M A, Davies C A, *et al.* Rates of *in situ* carbon mineralization in relation to land-use, microbial community and edaphic characteristics [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, **42**(2): 260-269.
- [37] 郝瑞军, 李忠佩, 车玉萍, 等. 好气与淹水条件下水稻土各粒级团聚体有机碳矿化量[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(9): 1944-1950.
Hao R J, Li Z P, Che Y P, *et al.* Organic carbon mineralization in various size aggregates of paddy soil under aerobic and submerged conditions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, **19**(9): 1944-1950.

CONTENTS

Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i>	(2505)
Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China	YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i>	(2519)
Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xi'an	HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i>	(2528)
Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area	LIU Hui-bin, Dilinuer Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i>	(2536)
Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun	MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i>	(2547)
Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019	WANG Qian	(2555)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn	CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin	(2565)
Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou	REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i>	(2577)
Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i>	(2586)
Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing	SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i>	(2596)
Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation	WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun	(2602)
Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing	LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i>	(2609)
Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061	ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min	(2617)
Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model	ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i>	(2625)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i>	(2635)
Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System	LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao	(2646)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area	JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Gang, <i>et al.</i>	(2653)
Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin	ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i>	(2664)
Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu	CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>	(2671)
Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting	LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i>	(2679)
Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp.	WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i>	(2688)
Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels	SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i>	(2698)
Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment	ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i>	(2706)
Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed	WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i>	(2714)
Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(2727)
Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate	LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i>	(2736)
Mechanisms of Fe-cyclam/H ₂ O ₂ System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B	YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i>	(2746)
Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO ₂ -NTs as a Photoanode	LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i>	(2754)
Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR	CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i>	(2762)
Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A ² /O-BAF	ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i>	(2771)
Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics	SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i>	(2779)
Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity	WANG Meng-qing, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i>	(2787)
Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter	XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i>	(2796)
Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria	SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen	(2805)
Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge	SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i>	(2812)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China	CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i>	(2822)
Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(2834)
Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials	MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i>	(2842)
Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management	NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i>	(2852)
Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops	HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu	(2861)
Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale	XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i>	(2869)
Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors	HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i>	(2878)
Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xixiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i>	(2889)
Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i>	(2898)
Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake	ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i>	(2908)
Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield	WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i>	(2918)
Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N ₂ O Emission and Yield in Greenhouse Tomato	SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i>	(2924)
Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i>	(2936)
Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province	WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i>	(2942)
Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring	HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i>	(2951)
Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk	CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i>	(2963)
Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016)	JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i>	(2972)