

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.7
第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估 武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)

基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟 谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)

郑州市 PM_{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析 杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)

能见度与 PM_{2.5} 浓度关系及其分布特征 王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)

基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征 白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)

太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源 李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)

办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征 王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦春春 (3008)

南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征 张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)

黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征 张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)

基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析 王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)

李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响 徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)

水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价 王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)

银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价 田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)

人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例 谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)

漓江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析 唐金平, 张强, 胡谦, 张宇, 聂保伟 (3089)

三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因素分析 付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)

降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响 翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)

绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征 童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)

微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析 刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 鹏飞, 王凯军 (3126)

钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性 张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)

基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用 唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)

N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBk5 染料废水 于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)

Cu²⁺ 对以 NO₂⁻ 为电子受体反硝化过程的影响 买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)

CANON 中试反应器启动及性能优化 孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)

好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响 徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)

有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响 刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)

不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响 吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王伟佳, 张树军 (3195)

ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性 张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)

在线 NaClO 反洗对倒置 A²O-MBR 系统微生物群落的影响 王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)

基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价 袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)

北京市清水与再生水协同利用优化模型 张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)

N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除 柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)

北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存 周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)

贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险 杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅男 (3249)

紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征 程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)

四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响 陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)

热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归 李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)

鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响 武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)

宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制 王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)

石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析 张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)

磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度 湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)

会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较 贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)

湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析 蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)

改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响 李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)

重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应 韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)

不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异 彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)

添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N₂O 排放影响 孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)

渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响 刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)

不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征 鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)

西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征 廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)

生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响 李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 俞方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)

《环境科学》征订启事(3194) 《环境科学》征稿简则(3222) 信息(3256, 3284, 3323)

渭北旱塬土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响

刘杰^{1,2}, 马艳婷^{1,2}, 王宪玲^{1,2}, Sompouviset Thongsouk^{1,2}, 李利敏¹, 秦亚旭^{1,2}, 赵志远^{1,2}, 郑伟^{1,2}, 翟丙年^{1,2,3*}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 农业农村部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学苹果试验站, 白水 715600)

摘要: 揭示果园、农耕地两种土地利用方式对土壤团聚体分布、稳定性及有机碳含量的影响, 为渭北旱塬乃至黄土高原区土壤碳库的优化管理提供科学依据. 通过同步采样及湿筛法将果园和农耕地这2种土地利用方式进行土壤粒径分组, 得到大团聚体(>2 mm)、中间团聚体(0.25~2 mm)、微团聚体(0.053~0.25 mm)及粉黏粒(<0.053 mm)组分质量分数, 测定各组分团聚体有机碳含量, 并计算出0~40 cm土层各组分有机碳储量. 结果表明, 在0~20 cm土层, 农业土地利用方式对土壤团聚体含量分布、稳定性具有显著影响. 果园不同粒级团聚体(>2、0.25~2、0.053~0.25和<0.053 mm)含量均值分别为12.9%、51.3%、28.8%和7.0%, 农耕地土壤各粒级团聚体含量分别为8.3%、49.7%、33.6%和8.4%, >0.25 mm团聚体含量显著高于农耕地. 在0~40 cm土层, 农耕地土壤平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)均显著低于果园($P < 0.05$). 不同土地利用方式对土壤各团聚体内有机碳含量影响主要在0~10 cm土层, 与农耕地相比, 果园大团聚体、中间团聚体、微团聚体和粉黏粒内有机碳含量分别提高了56.0% ($P < 0.05$)、57.1% ($P < 0.05$)、40.8% ($P > 0.05$)、13.0% ($P > 0.05$). 各粒级团聚体内有机碳(粉黏粒除外)储量均为果园高于农耕地. 果园增加了>0.25 mm大团聚体及其有机碳含量, 缓解了农耕地对土壤团聚体的破坏, 并提高了有机碳的稳定性. 因此, 与农耕地相比, 果园土壤团聚体稳定性及有机碳含量较高, 提高了团聚体对土壤有机碳的物理保护作用, 有利于土壤有机碳积累, 促进了土壤固碳.

关键词: 渭北旱塬; 土地利用方式; 团聚体; 稳定性; 土壤有机碳

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3361-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201811189

Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland

LIU Jie^{1,2}, MA Yan-ting^{1,2}, WANG Xian-ling^{1,2}, Sompouviset Thongsouk^{1,2}, LI Li-min¹, QIN Ya-xu^{1,2}, ZHAO Zhi-yuan^{1,2}, ZHENG Wei^{1,2}, ZHAI Bing-nian^{1,2,3*}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and Agri-environment of Northwest, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling 712100, China; 3. Apple Experiment Station, Northwest A&F University, Baishui 715600, China)

Abstract: Soil aggregates are important indicators of soil quality and sustainable land utilization, and impact the retention abilities of water and fertilizers and the release of nutrients in soil. This study aimed to understand the effects of two land use types (an orchard and farmland) on the distribution, stability, and organic carbon content of soil aggregates, and provides a theoretical basis for the optimal management of the soil carbon pool in the Weibei Dryland of the Loess Plateau. We examined the soils from an orchard and from farmland by simultaneous sampling and wet sieving; the proportions of large macroaggregates (>2 mm), small macroaggregates (0.25-2 mm), microaggregates (0.053-0.25 mm), and silt and clay (<0.053 mm) were then determined; the content of organic carbon in each aggregate fraction at soil depths of 0-40 cm were also measured, and the total organic carbon content of all aggregates fractions was determined for each soil. The results showed that the type of agricultural land use had a significant effect on the distribution and stability of soil aggregates in the 0-20 cm soil layer, with the relative proportions of the different sized aggregates (>2, 0.25-2, 0.053-0.25, and <0.053 mm) being 12.9%, 51.3%, 28.8%, and 7.0% in the orchards, respectively, and 8.3%, 49.7%, 33.6%, and 8.4% on the farmland, respectively. The proportion of macro-aggregates (>0.25 mm) was significantly higher in the orchard soils than in the farmland soils. Mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) are important indicators of the soil aggregate stability; the MWD and GMD of the farmland soils were significantly lower than the orchard soils in the 0-40 cm depth zone ($P < 0.05$). The effects of different land use types on the organic carbon content of soil aggregates was most marked in the 0-10 cm layer. Compared with farmland, the organic carbon content in the large aggregates, intermediate aggregates, micro-aggregates, and the silt and clay fraction of orchard soils were relatively increased by 56.0% ($P < 0.05$), 57.1% ($P < 0.05$),

收稿日期: 2018-11-24; 修订日期: 2019-01-17

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303104); 陕西省农业科技创新转化项目(NYKJ-2015-17); 杨凌示范区农业科技示范推广能力提升项目(2015-TS-18); 西北农林科技大学试验示范基地科技成果推广项目(TGZX2014-16)

作者简介: 刘杰(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤质量与环境, E-mail: gaibangxiaohunhun@126.com

* 通信作者, E-mail: zhaibingnian@nwfu.edu.cn

40.8% ($P > 0.05$), and 13.0% ($P > 0.05$), respectively. Organic carbon storage in each aggregate class (excluding the < 0.053 mm fraction) in the orchard soils was higher than in the farmland soils. In the orchard soils, the proportion of soil macro-aggregates (> 0.25 mm) and the associated organic carbon content was elevated, damage to aggregates was reduced, and the organic carbon stability was enhanced. In general, the soil aggregate stability and organic carbon content of orchard soils were higher than for the farmland soils. Orchards appear to enhance the physical stability of aggregates with respect to soil organic carbon, contribute to soil organic carbon accumulation, and thus promote soil carbon sequestration.

Key words: Weibei Dryland; land use type; soil aggregates; stability; soil organic carbon

土壤有机碳的截留及稳定是生态系统属性的问题,而不是有机质分子结构问题^[1].然而土壤团聚体是土壤结构的基本单元^[2],可反映一定的生态属性,体现土壤团粒结构优劣的关键指标即土壤团聚体结构组成及大小分布.土壤团聚体的大小分布及稳定性差异造成微生物活动及土壤养分循环的改变,进而影响着土壤的生物地球化学反应^[3].团聚体是有机碳的主要存在场所,有机碳是团聚体的重要胶结物质^[4].有机碳数量提高有利于土壤团聚体的形成及稳定性的增加,而土壤团聚体对有机碳的物理保护作用被认为是土壤碳固定的主要机制^[5].纵观人类历史,土壤有机碳损失了 133 Gt,空气中增加近 500 Gt CO_2 ^[6].团聚体的形成有利于提高土壤碳库,进而有效缓解温室效应^[7].因此,促进土壤团聚体的形成与提升土壤对有机碳固持具有重要意义^[8].不同粒径团聚体对协调土壤养分保持与供应、生物学性质及土壤固碳等具有不同作用^[9].

农田土壤是受人类活动影响较频繁的土壤类型之一,近年来国内外对土壤团聚体稳定性及其有机碳的研究开展得较多,主要集中于农田管理措施(包括保护性耕作、施肥和秸秆覆盖等^[10~13])、植被恢复及不同林龄方面,而关于农田土地利用变化对土壤团聚体稳定性及其有机碳的研究报道还相对较少.在已开展研究中,主要集中在我国南方红壤、黄壤区和西北黄土高原地区^[14~17],且主要是农田、林地与撂荒地之间的比较,关于农田之间不同土地利用方式转变(如农田转变为果园等)方面却鲜见报道.已有研究表明,土地利用方式可影响土壤团聚体稳定性及其有机碳组分.农机具使用及人为活动将导致水稳性大团聚体破坏,进而使土壤团聚体稳定性下降.在我国西北黄土高原、西南岷江流域及西南紫色土壤地区,土壤大团聚体含量均表现为林地大于耕地^[18~20];在东北黑土带,大团聚体有机碳含量草地 $>$ 农田 $>$ 裸地^[21];在亚热带山地红壤区,林地开垦造成土壤团聚体中有机碳损失,转化为农业用地后造成含碳量较高的大团聚体有机碳含量迅速降低^[22].

我国陕西渭北旱塬分布面积广,地处生态脆弱带,且是我国苹果主产区之一,人为土地利用方式

主要为果园和农耕地,人为活动较为强烈,但目前关于该地区农田土地利用方式对土壤团聚体及其有机碳影响方面的研究还很欠缺.本文以渭北旱塬为研究对象,探讨不同农业土地利用方式对渭北旱塬土壤团聚体及其有机碳的影响,以期对渭北旱塬乃至西北黄土高原土壤培肥与固碳减排提供一定的理论支撑.

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

试验地位于渭北旱塬东部的陕西省白水縣,属黄土高原沟壑区,是典型的旱地雨养农业.平均海拔 850 m,暖温带大陆性季风气候,年均气温 11.4°C ,年均降水量为 550 mm.主要农田利用方式为果园和农耕地,土壤类型为黄壤土.农耕地 0~20 cm 土壤有机碳含量为 $8.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,硝铵态氮为 $10.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮为 $0.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷为 $9.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾为 $168.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 为 8.3,土壤容重为 $1.45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

1.2 样品采集与测定

土壤样品于 2018 年 4 月采集于渭北旱塬白水县.其中果园为苹果园(由农耕地转变而来),农耕地为小麦、玉米轮作地.在果园和农耕地采用同步采样方法分别选择 3 个地貌特征相似的样地,每组果园和农耕地相距 < 50 m,详细信息见表 1.每个样地 3 个重复,利用挖剖面取样法在各采样点分层取 0~10、10~20 和 20~40 cm 未扰动原状土壤,用保鲜盒带回实验室用于测定分析.风干过程中沿自然裂隙掰成直径 1 cm 左右的土块.风干后采用 Elliott 团聚体湿筛法^[23]进行分级.大致步骤为,称取 50 g 风干土样,用 13 mL 纯水缓慢浸润 4°C 环境过夜,然后过一套 3 个不同粒径筛子(2、0.25 和 0.053 mm),在纯水环境中进行湿筛上下振荡(振幅 3 cm,频率 $50 \text{ 次}\cdot\text{min}^{-1}$),进而得到 > 2 、0.25~2、0.053~0.25 和 < 0.053 mm 这 4 个粒径组分,即大团聚体、中间团聚体、微团聚体和粉黏粒^[24].得到的不同粒径团聚体烘干并称量,用于各组分质量分数计算及团聚体有机碳含量测定.

土壤有机碳含量测定采用重铬酸钾氧化法;全

表 1 试验区信息

Table 1 Information for the experimental area

土地利用方式	经纬度	土地利用年限/a	种植制度
果园 1	109°34'07"E, 35°13'10"N	31	苹果树
农田 1	109°34'07"E, 35°13'11"N	>40	小麦、玉米轮作
果园 2	109°34'16"E, 35°13'13"N	25	苹果树
农田 2	109°34'16"E, 35°13'14"N	>40	小麦、玉米轮作
果园 3	109°32'31"E, 35°13'00"N	20	苹果树
农田 3	109°32'31"E, 35°13'01"N	>40	小麦、玉米轮作

氮采用凯氏法消解-AA3 型连续流动分析仪测定;速效磷采用碳酸氢钠法测定;土壤容重采用环刀法测定^[25];硝、铵态氮采用流动分析仪(AA3)测定。

1.3 数据处理

土壤团聚体稳定性的评价指标采用平均重量直径(mean weight diameter, MWD)和几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)。其计算公式如下:

$$\text{MWD} = \sum_i^n \bar{X}_i W_i \quad (1)$$

$$\text{GMD} = \exp\left(\sum_i W_i \ln \bar{X}_i\right) \quad (2)$$

式中, n 为粒径分组数; \bar{X}_i 为该组分的平均直径(mm); W_i 为该组分质量分数(%)。

不同团聚体组分的有机碳储量均采用等质量法计算^[26], 计算公式如下:

$$M_{\text{soil}} = \rho_b \cdot H \times 10\,000 \quad (3)$$

$$T_{\text{add}} = \frac{[(M_{\text{soil, equiv}} - M_{\text{soil, surf}}) \times 0.000\,1]}{\rho_{b, \text{subsurface}}} \quad (4)$$

$$M_{\text{element}} = M_{\text{soil}} \cdot C_{\text{conc}} \times 0.001 \quad (5)$$

$$M_{\text{element, equiv}} = M_{\text{element, surf}} + M_{\text{element, Tadd}} \quad (6)$$

式中, M_{soil} 为单位面积的土壤质量($\text{mg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ρ_b 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); H 为土层厚度(m); T_{add} 为需要达到等质量土壤额外增加的亚表层土层厚度(m); $M_{\text{soil, equiv}}$ 为最大的土壤质量($\text{mg} \cdot \text{hm}^{-2}$); $M_{\text{soil, surf}}$ 为质量小于 $M_{\text{soil, equiv}}$ 的其他处理的表层土壤质量之和($\text{mg} \cdot \text{hm}^{-2}$); $\rho_{b, \text{subsurface}}$ 为亚表层土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), 在试验中为 50 ~ 60 cm 土层的土壤容重; M_{element} 为 SOC 储量($\text{mg} \cdot \text{hm}^{-2}$); C_{conc} 为有机碳占全土的含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 即某一粒径团聚体占全土的质量分数乘以该粒径团聚体有机碳含量; $M_{\text{element, equiv}}$ 为单位面积等质量土体的 SOC 储量($\text{mg} \cdot \text{hm}^{-2}$), $M_{\text{element, surf}}$ 为单位面积表层土体的 SOC 储量($\text{mg} \cdot \text{hm}^{-2}$), $M_{\text{element, Tadd}}$ 为单位面积上需要达到等质量额外增加的亚表层土体的 SOC 储量($\text{mg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

本试验中农耕地和果园 2 种土地利用方式相同土层不同粒径间的团聚体质量分数、SOC 含量及储

量均采用 SPSS 21.0 进行方差齐性检验($P > 0.05$), 如通过则采用 LSD 检验; 否则($P < 0.05$), 采用 Tamhane's T2 进行差异显著性检验。农耕地和果园这 2 种土地利用方式下各指标之间差异性分析采用独立样本 t 检验。

2 结果与分析

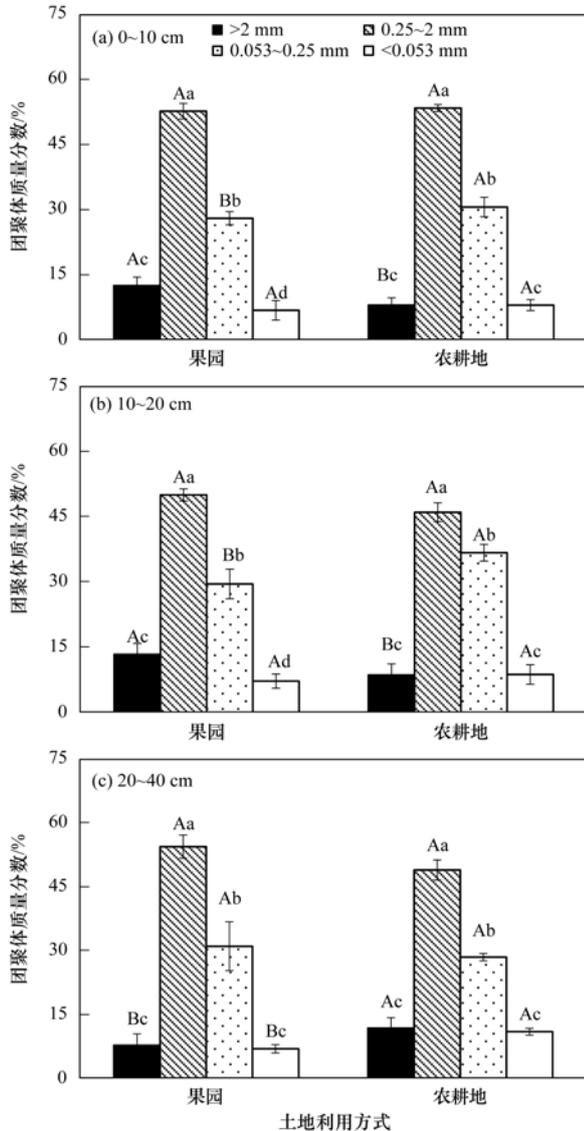
2.1 2 种土地利用方式对土壤团聚体分布的影响

不同土地利用方式下土壤各粒径团聚体组分的含量分布均为中间团聚体(0.25 ~ 2 mm) > 微团聚体(0.053 ~ 0.25 mm) > 大团聚体(> 2 mm) > 粉黏粒(< 0.053 mm)(图 1)。通过湿筛得到的果园、农耕地两种不同土地利用方式下 0 ~ 20 cm 土壤大团聚体(> 2 mm)和微团聚体(0.053 ~ 0.25 mm)分布存在差异[图 1(a)和图 1(b)]。在 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 土层, 与农耕地相比, 果园土壤中大团聚体含量分别增加了 55.9% 和 54.9% ($P < 0.05$), > 0.25 mm 团聚体含量分别增加了 6.1% 和 15.9% ($P < 0.05$), 微团聚体含量分别降低了 8.4% 和 2.0% ($P < 0.05$), 中间团聚体和粉黏粒含量差异性不显著。

通过图 1(c)可以看出, 在 20 ~ 40 cm 土层, 果园、农耕地土壤大团聚体(> 2 mm)和粉黏粒(< 0.053 mm)含量存在显著差异, 中间团聚体(0.25 ~ 2 mm)和微团聚体(0.053 ~ 0.25 mm)含量差异不显著。相比农耕地, 在 20 ~ 40 cm 土层, 果园、农耕地土壤大团聚体(> 2 mm)和粉黏粒(< 0.053 mm)含量分别降低了 3.4% 和 3.7% ($P < 0.05$), 但 > 0.25 mm 土壤团聚体提高了 2.4% ($P > 0.05$)。

由图 1 可知, 对于土壤大团聚体(> 2 mm), 随土层深度增加, 果园中其含量呈下降趋势, 农耕地则变化不显著; 中间团聚体(0.25 ~ 2 mm)随土层深度增加, 则均表现为先降低后升高的趋势; 微团聚体(0.053 ~ 0.25 mm)随土层深度增加, 果园中其含量呈上升趋势, 农耕地则为先升高后降低趋势; 关于粉黏粒(< 0.053 mm)随土层深度增加, 果园和农耕地均表现为有一定的上升趋势; 对于 > 0.25 mm 土壤团聚体随土层深度增加, 果园中含量

呈下降趋势, 农耕地为先降低后上升的趋势。



图中不同大写字母表示同一粒径团聚体不同土地利用方式在 5% 水平有差异; 不同小写字母表示同一土地利用方式不同粒径团聚体在 5% 水平有差异, 下同
图 1 2 种土地利用方式下土壤各粒径团聚体质量分数

Fig. 1 Proportion of each soil aggregate size class under the two land use types

数据表明, 果园和农耕地 2 种土地利用方式对土壤团聚体组成的影响较为显著。如图 2 所示, 在 0~40 cm 的土壤深度内, 不同土地利用方式下土壤各粒径团聚体组分的含量分布趋势一致, 均为中间团聚体 (0.25~2 mm) > 微团聚体 (0.053~0.25 mm) > 大团聚体 (>2 mm) > 粉黏粒 (<0.053 mm), 但对于 >0.25 mm 团聚体而言, 果园、农耕地分别为 63.2% 和 59.3%。>0.25 mm 土壤团聚体被认为是土壤结构中最佳的结构体 (土壤团粒结构体), 在维持土壤结构稳定中起关键作用, 其分布含量越高, 说明土壤结构稳定性越好。与农耕地相比, 果园 >0.25 mm 团聚体提高了 6.5% ($P <$

0.05), 说明果园比农耕地土壤结构更加合理。

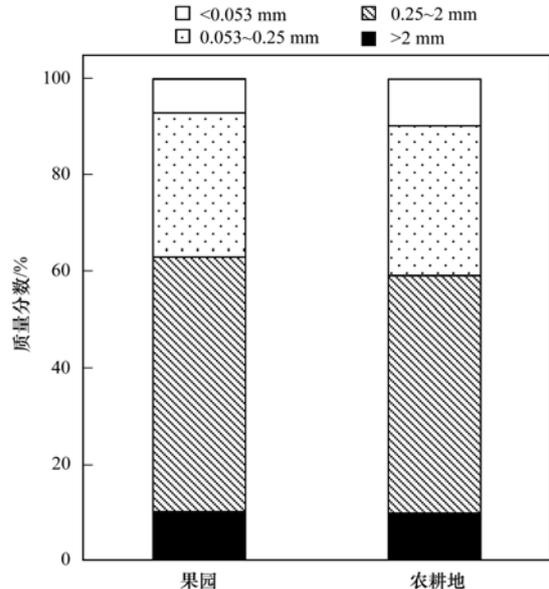


图 2 2 种土地利用方式土壤 0~40 cm 土层各粒径团聚体质量分数平均值

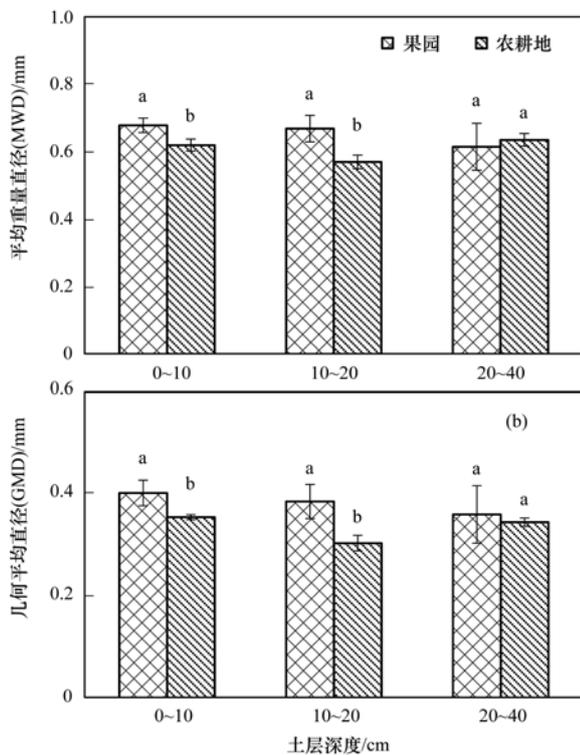
Fig. 2 Mean proportion of soil aggregate size classes at 0-40 cm soil depths under the two land use types

2.2 2 种土地利用方式对土壤团聚体稳定性的影响

果园、农耕地两种不同土地利用方式下 MWD 和 GMD 如图 3 所示。在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层, 果园团聚体 MWD 和 GMD 值均显著高于农耕地。而在 20~40 cm 土层, 差异变小 ($P > 0.05$), 由此说明果园与农耕地两种不同土地利用方式对土壤团聚体稳定性的影响主要在上面两个土层的表层土壤。总的来看, 随土壤深度的增加, 果园土壤稳定性逐渐减弱, 而农耕地则呈先降低后上升的趋势。在 0~40 cm 土壤深度内, MWD 为果园 (0.64 mm) > 农耕地 (0.61 mm) ($P < 0.05$), GMD 为果园 (0.37 mm) > 农耕地 (0.33 mm) ($P < 0.05$)。与农耕地相比, 果园 MWD 和 GMD 均有显著提高 ($P < 0.05$), 表明农耕地长期种植团聚体稳定性处于较低水平, 易被水分散, 而果园则会增强团聚体稳定性, 改善土壤结构, 进而提高抵抗外力破坏的能力。

2.3 2 种土地利用方式对团聚体有机碳的影响

果园和农耕地这 2 种不同土地利用方式下土壤各粒径团聚体有机碳含量, 参见图 4。整体来看, 果园和农耕地不同粒径团聚体内有机碳含量趋势一致, 均为大团聚体 (>2 mm) > 中间团聚体 (0.25~2 mm) > 微团聚体 (0.053~0.25 mm) > 粉黏粒 (<0.053 mm)。0~40 cm 土层, 不同粒径土壤团聚体内有机碳含量均随土壤深度增加呈下降趋势, 果园随土壤深度增加, 有机碳含量变化较大, 农耕地变化相对较缓慢 (图 4)。果园、农耕地两种不同土地利用方式在 0~10 cm 土层土壤大团聚体、微



图中不同小写字母表示同一土层
不同土地利用方式在 5% 水平上有差异

图 3 2 种土地利用方式土壤团聚体平均重量直径 (MWD)
和几何平均直径 (GMD)

Fig. 3 Mean weight diameter and geometric mean diameter
of soil aggregates under the two land use types

团聚体内有机碳含量影响较显著 [图 4(a)]. 在 0~10 cm 土层, 果园和农耕地两种土地利用方式下大团聚体内有机碳含量为果园 ($13.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 农耕地 ($8.9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) ($P < 0.05$), 中间团聚体内有机碳含量为果园 ($13.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 农耕地 ($8.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) ($P < 0.05$), 微团聚体内有机碳含量为果园 ($10.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 农耕地 ($7.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) ($P < 0.05$), 粉黏粒内有机碳含量为果园 ($7.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 农耕地 ($6.3 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) ($P > 0.05$). 与农耕地相比, 果园大团聚体内、中间团聚体内、微团聚体内和粉黏粒内有机碳含量分别提高了 56.0% ($P < 0.05$)、57.1% ($P < 0.05$)、40.8% ($P > 0.05$) 和 13.0% ($P > 0.05$), 说明种植果树会导致 0~10 cm 土层团聚体内有机碳含量的提高, 尤其是大团聚体和中间团聚体.

果园、农耕地两种不同土地利用方式在 10~20 cm 土层土壤不同粒径土壤团聚体内有机碳含量有变化, 但差异不显著 [图 4(b)]. 在 10~20 cm 土层, 果园和农耕地两种土地利用方式下大团聚体内有机碳含量为果园 ($8.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 农耕地 ($8.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 中间团聚体内有机碳含量为果园 ($8.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 农耕地 ($8.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 微团聚体内有机碳

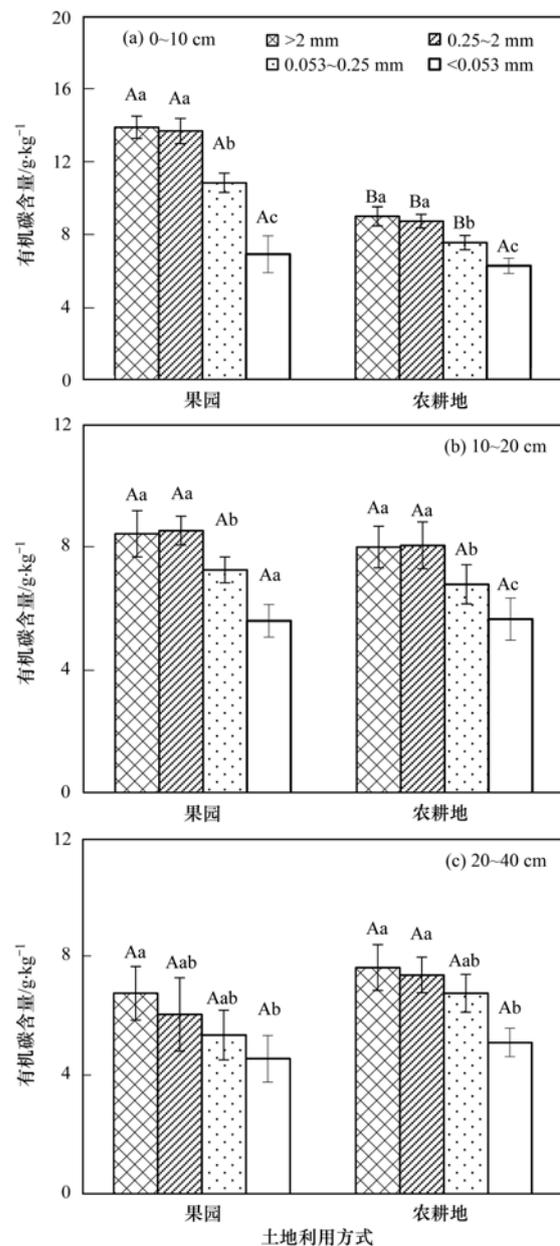


图 4 2 种土地利用方式下土壤各粒径团聚体有机碳含量

Fig. 4 Organic carbon content of each aggregate size
class under the two land use types

含量为果园 ($7.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 农耕地 ($6.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 粉黏粒内有机碳含量为果园 ($5.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) = 农耕地 ($5.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$). 与农耕地相比, 果园大团聚体内、中间团聚体内、微团聚体内有机碳含量分别提高了 5.4% ($P > 0.05$)、5.9% ($P > 0.05$)、6.9% ($P > 0.05$), 说明虽然相对农耕地, 果园大团聚体、中间团聚体及微团聚体内有机碳含量有一定提高, 但是差异并不明显. 10~20 cm 土层, 果园、农耕地不同团聚体内有机碳含量大致相似.

果园、农耕地两种不同土地利用方式在 20~40 cm 土层不同粒径土壤团聚体内有机碳含量有变化, 但差异不显著 [图 4(c)]. 在 20~40 cm 土层, 果园和农耕地两种土地利用方式下大团聚体内有机碳

含量为果园 ($6.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) < 农耕地 ($7.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 中间团聚体内有机碳含量为果园 ($6.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) < 农耕地 ($7.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 微团聚体内有机碳含量为果园 ($5.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) < 农耕地 ($6.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 粉黏粒内有机碳含量为果园 ($4.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) < 农耕地 ($5.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$). 与农耕地相比, 果园大团聚体内、中间团聚体内、微团聚体内和粉黏粒内有机碳含量分别降低了 11.3% ($P > 0.05$)、17.9% ($P > 0.05$)、20.8% ($P > 0.05$) 和 10.8% ($P > 0.05$), 说明虽然相对农耕地, 果园大团聚体、中间团聚体及微团聚体内有机碳含量有一定下降, 但是差异并不明显. 20~40 cm 土层, 果园、农耕地不同团聚体内有机碳含量大致相似.

图 5 体现了果园、农耕地两种土地利用方式下 0~40 cm 土壤深度内不同粒径团聚体内有机碳的储量. 大团聚体内有机碳储量为果园 ($5.68 \text{ mg}\cdot\text{hm}^{-2}$) > 农耕地 ($4.65 \text{ mg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 中间团聚体内有机碳储量为果园 ($26.67 \text{ mg}\cdot\text{hm}^{-2}$) > 农耕地 ($22.58 \text{ mg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 微团聚体内有机碳储量为果园 ($12.71 \text{ mg}\cdot\text{hm}^{-2}$) > 农耕地 ($12.56 \text{ mg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 粉黏粒内有机碳储量为农耕地 ($3.06 \text{ mg}\cdot\text{hm}^{-2}$) > 果园 ($2.20 \text{ mg}\cdot\text{hm}^{-2}$). 可知, 果园 > 0.25 mm 团聚体内有机碳储量均显著高于农耕地, 表明果园比农耕地更能提高团聚体组分内有机碳含量, 有利于土壤有机碳的积累.

从图 5 可知, 同一土地利用方式下各粒径团聚体内有机碳储量存在显著差异. 果园、农耕地各粒径有机碳储量分别为中间团聚体 > 微团聚体 > 大团聚体 > 粉黏粒, 且大团聚体、中间团聚体内有机碳储量果园 > 农耕地. 与农耕地相比, 果园有机碳含量随粒径增大而上升: 其大团聚体、中间团聚体、微团聚体及粉黏粒的增加量分别为 22.0%、18.1%、1.2% 和 28%. 对于 > 0.25 mm 的大团聚

体内有机碳储量而言, 果园 ($32.3 \text{ mg}\cdot\text{hm}^{-2}$) > 农耕地 ($27.2 \text{ mg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 相比农耕地增加 18.8% ($P < 0.05$); < 0.25 mm 的微团聚体而言, 农耕地 ($15.6 \text{ mg}\cdot\text{hm}^{-2}$) > 果园 ($14.9 \text{ mg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 但差异并不显著. 因此, 果园与农耕地相比, 粒径较大的团聚体更容易积累有机碳.

3 讨论

3.1 2 种土地利用方式对土壤团聚体稳定性的影响

团聚体是有机质的存在空间, 有机质是团聚体的重要胶结物质. 团聚体几何平均直径 (GMD) 和平均重量直径 (MWD) 作为体现土壤中团聚体稳定性的关键指标, GMD 和 MWD 值越大, 团聚度越高, 稳定性越强. 果园、农耕地 2 种土地利用方式显著影响土壤有机质含量, 从而对土壤团聚体稳定性起到间接作用. 本研究通过测定 0~40 cm 土层有机质发现, 有机质平均含量为果园 ($15.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 农耕地 ($13.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) ($P < 0.05$). 与农耕地相比, 果园土壤有机质提高了 9.9% ($P < 0.05$), > 0.25 mm 的大团聚体含量增加了 6.5% ($P < 0.05$), GMD 和 MWD 值也均有显著提高 ($P < 0.05$), 果园土壤有机质含量增加, 有效避免了土壤大团聚体的破坏, 进而提高了土壤团聚体的稳定性. 农耕地土壤耕作频率高, 耕作后大团聚体 (> 2 mm) 相对更容易破裂, 耕作优先降低了大团聚体含量. 与农耕地相比, 果园土壤粉黏粒 (< 0.053 mm) 含量相对较低, 分析可能是由于耕作频率高的农耕地转化为耕作频率低、凋落物归还较大的林地果园, 有机质含量及微生物活性提高, 胶结物质上升, 进而将部分小的团聚体 (粉黏粒) 聚合为较大的团聚体——微团聚体 (0.053~0.25 mm) 和中间团聚体 (0.25~2 mm), 从而使土壤团聚体稳定性得到提高, 这与在其它区域研究的规律性基本一致^[15, 27~29].

3.2 2 种土地利用方式对土壤团聚体内有机碳含量及储量的影响

本研究表明, 果园、农耕地不同粒径团聚体内有机碳含量趋势一致, 有机碳含量均为大团聚体 (> 0.25 mm) 高于微团聚体 (< 0.25 mm), 与谢锦升等^[30]的研究结果一致. 因为相对全土总有机碳来说, 大团聚体对有机碳有一定的富集功能^[31, 32], 另外, 有机质作为团聚体形成中重要的胶结物质, 微团聚体通过与周围微团聚体或基本粒子在有机物质的胶结作用下形成大团聚体^[33]. 其次, 大团聚体内部颗粒有机质分解, 导致大团聚体破散, 从而使微团聚体被分离出^[34], 进而导致微团聚体内有机

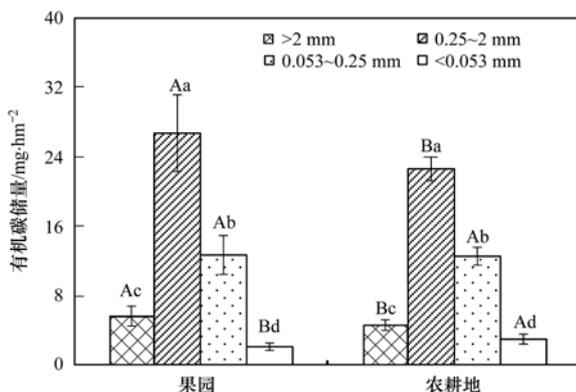


图 5 2 种土地利用方式下土壤各粒径团聚体有机碳储量

Fig. 5 Storage of organic carbon in each soil aggregate size class under the two land use types

碳含量降低. 在 0~40 cm 土层, 不同粒径土壤团聚体内有机碳含量均随土壤深度增加呈减少趋势, 果园随土壤深度增加, 有机碳含量变化较大, 农田变化相对较缓慢, 与李鉴霖等^[15]的研究结果一致. 由于植物残体等凋落物主要在土壤表层积累, 为微生物活动提供能量, 进而促进土壤表层的生物活性, 即植物根、土壤动物区系以及真菌生长, 从而为土壤各粒径团聚体内部胶结形成为微粒有机质创造了良好条件^[35]. 农耕地主要种植小麦, 收获后秸秆会移走, 导致作物中的碳不能归还土壤, 以致于土壤表层有机碳含量低, 随土层深度增加, 并未出现明显的下降趋势.

有研究发现, 与农耕地相比, 果园土壤中粒径较大的团聚体内增加的有机碳较多, 粒径较小团聚体增加量较少甚至会出现损失现象. 这一现象符合 Tisdall 等^[33]和 Six 等^[36]学者关于土壤团聚体形成的经典模型, 他们均认为新鲜输入的有机物质进入土壤后, 首先与土壤中粒径相对较小的微团聚体通过胶结作用聚合为大团聚体, 其内部形成微团聚体, 通过大团聚体内部粗颗粒有机质 (coarse intra-aggregate particulate organic matter, iPOM) 分解或大团聚体破碎形成微团聚体^[34, 37], 然后在耕作扰动等破坏作用下从大团聚体中释放出微团聚体. 果园相对农耕地耕作等土地干扰行为较少, 导致微团聚体在大团聚体内聚集, 自由微团聚体相对农耕地减少. 由于微团聚体内有机碳受物理保护作用, 因此, 相对于大团聚体内新鲜有机质稳定性更高, 进而导致微团聚体内有机碳含量变化较小.

4 结论

(1) 渭北旱塬果园和农耕地土壤团聚体组分均以中间团聚体和微团聚体为主, 不同农业土地利用方式并未直接影响土壤团聚体主要组分的分布. 但对于 >0.25 mm 团聚体、MWD 和 GMD 而言, 果园明显高于农耕地, 在表层土壤尤为明显. 农耕地易导致大团聚体破碎, 进而造成土壤结构退化, 因此果园更有利于维持或提高土壤团聚体的稳定性, 维系土壤良好结构.

(2) 与农耕地相比, 果园将导致各团聚体组内有机碳的增加, 有利于土壤有机碳的恢复与固持, 尤其在 0~10 cm 土层.

(3) 农耕地转变为果园后, >0.25 mm 的大团聚体有机碳储量升高了 $5.11 \text{ mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, <0.25 mm 的微团聚体有机碳储量降低了 $0.71 \text{ mg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 表明在改变土地利用的过程中, 粒径较大的团聚体与有机碳变化较为密切.

参考文献:

- [1] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, *et al.* Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. *Nature*, 2011, **478** (7367): 49-56.
- [2] Franzluebbers A J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, **66** (2): 95-106.
- [3] Peth S, Horn R, Beckmann F, *et al.* Three-dimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using synchrotron-radiation-based microtomography [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, **72**(4): 897-907.
- [4] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. *土壤学报*, 2011, **48**(2): 412-418.
Dou S, Li K, Guan S. A review on organic matter in soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, **48**(2): 412-418.
- [5] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J]. *生态学报*, 2010, **30** (4): 1035-1041.
Liu E K, Zhao B Q, Mei X R, *et al.* Distribution of water-stable aggregates and organic carbon of arable soils affected by different fertilizer application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30** (4): 1035-1041.
- [6] Sanderman J, Hengl T, Fiske G J. Soil carbon debt of 12, 000 years of human land use [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, **114** (36): 9575-9580.
- [7] Rumpel C, Amiraslani F, Koutika L S, *et al.* Put more carbon in soils to meet Paris climate pledges [J]. *Nature*, 2018, **564** (7734): 32-34.
- [8] Blanco-Canqui H, Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2004, **23** (6): 481-504.
- [9] 陈恩凤, 周礼恺, 武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义[J]. *土壤学报*, 1994, **31**(1): 18-25.
Chen E F, Zhou L K, Wu G Y. Performances of soil microaggregates in storing and supplying moisture and nutrients and role of their composition in judging fertility level[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1994, **31**(1): 18-25.
- [10] 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.
- [11] 关松, 窦森, 马丽娜, 等. 长施马粪对暗棕壤团聚体腐殖质数量和质量的影響[J]. *土壤学报*, 2017, **54**(5): 1195-1205.
Guan S, Dou S, Ma L N, *et al.* Effects of long-term application of horse manure on quantity and quality of humic substance in aggregates of dark brown soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, **54**(5): 1195-1205.
- [12] 邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 等. 不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 1045-1052.
- [13] 李文军, 杨基峰, 彭保发, 等. 施肥对洞庭湖平原水稻土团

- 聚体特征及其有机碳分布的影响[J]. 中国农业科学, 2014, **47**(20): 4007-4015.
- Li W J, Yang J F, Peng B F, *et al.* Effects of fertilization on aggregate characteristics and organic carbon distribution in a paddy soil in Dongting Lake Plain of China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, **47**(20): 4007-4015.
- [14] 陈山, 杨峰, 林杉, 等. 土地利用方式对红壤团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(5): 211-216.
- Chen S, Yang F, Lin S, *et al.* Impact of land use patterns on stability of soil aggregates in red soil region of south China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26**(5): 211-216.
- [15] 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.
- [16] 马帅, 赵世伟, 李婷, 等. 子午岭林区植被自然恢复下土壤剖面团聚体特征研究[J]. 水土保持学报, 2011, **25**(2): 157-161.
- Ma S, Zhao S W, Li T, *et al.* Study of the character of soil aggregates under vegetation restoration in Ziwu Mountain [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, **25**(2): 157-161.
- [17] 于寒青, 李勇, 金发会, 等. 黄土高原植被恢复提高大于 0.25mm 粒级水稳性团聚体在土壤增碳中的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, **18**(4): 876-883.
- Yu H Q, Li Y, Jin F H, *et al.* The role of increasing soil water-stable aggregates with diameter > 0.25 mm by vegetation restoration in enhancement of soil organic carbon in the Loess Plateau [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, **18**(4): 876-883.
- [18] 刘梦云, 吴健利, 刘丽雯, 等. 黄土台塬土地利用方式对土壤水稳性团聚体稳定性影响[J]. 自然资源学报, 2016, **31**(9): 1564-1576.
- Liu M Y, Wu J L, Liu L W, *et al.* Stability characteristics of soil water-stable aggregates under different land-use patterns on the loess plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, **31**(9): 1564-1576.
- [19] 胡尧, 李懿, 侯雨乐. 不同土地利用方式对岷江流域土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J]. 水土保持研究, 2018, **25**(4): 22-29.
- Hu Y, Li Y, Hou Y L. Effects of land use types on stability and organic carbon of soil aggregates in Minjiang River Valley [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, **25**(4): 22-29.
- [20] 张曼夏, 季猛, 李伟, 等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其结合有机碳的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2013, **19**(4): 598-604.
- Zhang M X, Ji M, Li W, *et al.* Effect of land use patterns on soil aggregate stability and aggregate-associated organic carbon [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2013, **19**(4): 598-604.
- [21] 苑亚茹, 李娜, 邹文秀, 等. 典型黑土区不同生态系统土壤团聚体有机碳分布特征[J]. 生态学报, 2018, **38**(17): 6025-6032.
- Yuan Y R, Li N, Zou W X, *et al.* Distribution characteristics of organic carbon in aggregates of soils of three ecosystems in typical Mollisols of Northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(17): 6025-6032.
- [22] 毛艳玲, 杨玉盛, 邢世和, 等. 土地利用方式对土壤水稳性团聚体有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2008, **22**(4): 132-137.
- Mao Y L, Yang Y S, Xing S H, *et al.* Effects of land use on soil organic carbon in water-stable aggregates [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, **22**(4): 132-137.
- [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] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, **58**(1): 123-130.
- [25] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科学出版社, 2000. 146-166, 289-295.
- [26] Ellert B H, Bettany J R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995, **75**(4): 529-538.
- [27] 朱仁欢, 郑子成, 李廷轩, 等. 植茶年限对土壤水稳性团聚体腐殖质组分特征的影响[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(6): 1096-1104.
- Zhu R H, Zheng Z C, Li Y X, *et al.* Effect of tea plantation age on humus fractions in soil water-stable aggregates [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(6): 1096-1104.
- [28] Six J, Elliott E T, Paustian K, *et al.* aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, **62**(5): 1367-1377.
- [29] 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.
- [30] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J]. 生态学报, 2008, **28**(2): 702-709.
- Xie J S, Yang Y S, Chen G S, *et al.* Effects of vegetation restoration on water stability and organic carbon distribution in aggregates of degraded red soil in subtropics of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(2): 702-709.
- [31] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, **57**(4): 1071-1076.
- [32] Jastrow J D, Miller R M, Boutton T W. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, **60**(3): 801-807.
- [33] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. *Journal of Soil Science*, 1982, **33**(2): 141-163.
- [34] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(14): 2099-2103.
- [35] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, **56**(3): 777-783.
- [36] Six J, Elliott E T, Paustian K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, **63**(5): 1350-1358.
- [37] Oades J M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management [J]. *Plant and Soil*, 1984, **76**(1-3): 319-337.

CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)