

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.8

第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM _{2.5} 污染特征与浓度控制效果	张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)
北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析	徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)
合肥市PM _{2.5} 和PM ₁₀ 中元素组成特征及重污染成因分析	刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)
濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琰, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)
关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析	康宝荣, 刘立忠, 刘煥武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)
长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源	吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)
中国城市扩张及空间特征变化对PM _{2.5} 污染的影响	王桂林, 张炜 (3447)
不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM _{2.5} 排放的影响	邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)
浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数	徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)
生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征	马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)
青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征	官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)
广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价	宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)
截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征	胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)
黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析	邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)
风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响	余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)
向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应	王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)
外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响	李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)
新疆喀什三角洲地下水SO ₄ ²⁻ 化学特征及来源	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)
黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析	李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)
北京市河流秋季浮游动物群落特征分析	王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)
三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系	刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)
渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测	万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)
汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系	汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)
饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析	胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)
基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果	彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)
植被对绿色屋顶径流量和水质影响	章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)
光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制	范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)
多种材料对水中氨氮的吸附特性	焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)
不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响	常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)
3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程	刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)
铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制	韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)
缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮	杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)
连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响	薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)
FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制	马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)
ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件	董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)
全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析	张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)
不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比	刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)
异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析	杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)
Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现	高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)
高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N ₂ O产生特征	代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)
生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响	王一字, 王圣森, 戴九兰 (3738)
两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响	周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)
承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征	孙厚云, 卫晓峰, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)
厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析	张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)
宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析	张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)
铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果	林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)
铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用	周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)
生物炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响	刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)
有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响	汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)
土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响	罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)
宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响	高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)
不同浸提剂条件下生物炭吸附性有机物的浸出规律	何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)
基于成组生物毒性测试的PM _{2.5} 毒性	江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)
《环境科学》征订启事 (3587)	
《环境科学》征稿简则 (3595)	
信息 (3611, 3705, 3745)	

土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响

罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明*

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 探究不同土地利用方式下土壤团聚体的粒径分布、稳定性及有机碳在各粒径团聚体中的分布规律, 以期为重庆地区土壤结构的改善及土壤有机碳库的维持及提高提供依据。以重庆市北碚区6种土地利用方式(针阔叶混交林、竹林、果园、旱地、水田和荒草地)为研究对象, 采用湿筛法对土壤进行粒径分组, 对比分析了6种土地利用方式处理下土壤团聚体和团聚体有机碳在0~20、20~40、40~60和60~100 cm土壤剖面中的分布规律。结果表明, 不同土地利用方式下, 土壤的结构和肥力水平存在显著的差异。在0~100 cm土层土壤的各粒径团聚体中, 6种土地利用方式的团聚体粒径均以>0.25 mm为主; 其中, 竹林>0.25 mm团聚体含量最高, 其次是荒草地, 旱地与果园含量最低。不同土地利用方式下0.25~2 mm的粒径团聚体主要分布在0~20 cm土层(28.78%~50.08%), 而0.053~0.25 mm和<0.053 mm的粒径团聚体主要集中在40~60 cm土层。在整个土壤深度内, 竹林和荒草地的土壤团聚体MWD和GMD均高于其他土地利用方式, 即二者的土壤团聚体稳定性较强。土壤团聚体稳定性与土壤团聚体有机碳呈极显著正相关($r=0.569$, $P<0.01$), 在0~100 cm土层中, 土壤0.25~2 mm和<0.053 mm粒径的有机碳含量较高, 其中0.25~2 mm的最高, 平均含量为56.54 g·kg⁻¹。除旱地土壤各粒径团聚体有机碳含量在20~40 cm土层内最高, 其他土地利用方式下土壤各粒径团聚体内有机碳含量均随土壤深度的增加而降低, 表现出显著的表层富集现象。总体上, 6种土地利用方式下, 竹林和荒草地在各土层中的土壤团聚体稳定性较好, 且在各土层中, 竹林土壤各粒径团聚体有机碳含量最高。

关键词: 土地利用方式; 土壤团聚体; 粒径分布; 稳定性; 土壤有机碳

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3816-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201812140

Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates

LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, HUANG Rong, WANG Fu-hua, GAO Ming*

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The distribution and stability of soil aggregates under different land use types, and the distribution of organic carbon in various aggregates, were explored in order to provide a basis for the improvement of soil structure and the maintenance and improvement of soil organic carbon in Chongqing. Focusing on six representative subtropical land use types in the Beibei District of Chongqing (coniferous and broadleaf mixed forest, bamboo forest, orchard, dryland, paddy field, and waste grassland), soils were sorted using the wet sieving method and the six soil types were compared and analyzed. The distribution of aggregates and their organic carbon content were determined at soil profile depths of 0-20, 20-40, 40-60, and 60-100 cm for each land use type. The results showed that there were significant differences in soil structure and fertility levels under the different land use types. Among the particle size aggregates of the 0-100 cm soil layer, the aggregate particle size of the six land use types was mainly >0.25 mm; the content of >0.25 mm aggregate fraction of bamboo forest soil is the highest, followed by the grassland soil, and the dryland and orchard soils is the lowest. Granular aggregates in the size class 0.25-2 mm were mainly distributed in the 0-20 cm soil layers (28.78%-50.08%), while the aggregate size fractions 0.053-0.25 mm and <0.053 mm were mainly concentrated in the 40-60 cm soil layers. Across the entire profile depth, the aggregate MWD and GMD of the bamboo forest and barren grassland soils were higher than the other land use types, i. e., the soil aggregates in these soils were more stable. The stability of soil aggregates was significantly positively correlated with soil aggregate organic carbon content ($r=0.569$, $P<0.01$). In the 0-100 cm soil layer, the organic carbon content of soil aggregates was higher for the 0.25-2 mm and <0.053 mm fractions, with an average content of 56.54 g·kg⁻¹ in the 0.25-2 mm fraction. Except for the organic carbon content of the soil aggregates with different particle size of dryland was the highest in the 20-40 cm soil layer, while under the other land use types, the organic carbon content in soil aggregates decreased with depth, showing significant surface enrichment. Overall, under the six different land use types, the soil aggregates in bamboo forest soils and waste grassland soils showed good stability, and at each soil depth, the organic carbon content of aggregates was highest in the bamboo forest soil.

Key words: land use types; soil aggregates; particle size distribution; stability; organic carbon of soil aggregates

土壤团聚体是土壤颗粒通过凝聚胶结作用等自然过程而形成的土壤结构^[1]。一般用湿筛法将土壤团聚体分为大团聚体(>0.25 mm)和微团聚体(<0.25 mm)。大团聚体含有较多不稳定有机质, 速效养分多, 供肥能力较高, 而微团聚体结合的碳

生物化学稳定性高, 是土壤有机碳长期储存的主要

收稿日期: 2018-12-17; 修订日期: 2019-03-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800101)

作者简介: 罗晓虹(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土地资源与土壤环境, E-mail: 1125582569@qq.com

* 通信作者, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

组成部分. 土壤团聚体的稳定性和团聚体数量对土壤物理性质、土壤养分储量具有极大地影响, 其不但能使土壤结构保持稳定, 减少水土流失, 而且还能保护土壤有机质, 提升土壤的肥力和质量^[2]. 另外, 团聚体良好的固碳作用可以有效缓解温室效应, 因此, 研究土壤团聚体的组成和分布以及有机碳含量对提升土壤肥力、促进有机碳固持具有重要意义.

近年来, 众多学者加强了对土壤团聚体稳定性及其有机碳的研究报道, 但主要集中于耕作、种植、灌溉、施肥和秸秆还田等农田管理措施方面^[3-5]. 不同土地利用方式由于不同的农田管理方式会影响土壤团聚体的含量和团聚体结合土壤有机碳的能力. 有研究表明, 林地不同粒径团聚体有机碳含量都显著高于农业用地^[6]. 陈山等^[7]的研究表明, 不同土地利用方式对团聚体稳定性和土壤基本肥力有极大地影响, 水田和林地土壤团聚体稳定性较高, 土壤有机质的保持较好, 而旱地和果园利用方式则大幅降低了土壤团聚体的稳定性, 易造成农田土壤的侵蚀和肥力下降. 毛艳玲等^[8]在福建亚热带山地的研究表明, 人工林、次生林、园地和耕地与天然林相比, 土壤团聚体颗粒有机碳贮量平均下降了 74.35%. 可见, 土地利用方式是影响土壤团聚体稳定性及其有机碳分布的主要外界因素之一. 目前关于土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的研究较多, 但前人研究多见于东北温带地区^[9]、喀斯特地区^[10]和陕西黄土地区^[11], 对重庆地区土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的研究较少, 已有的研究主要在耕地的不同利用方式方面^[12]. 因此, 本文选取了重庆地区的针阔叶混交林、竹林、果园、旱地、水田和荒草地这 6 种典型土地利用方式为研究对象, 分析不同土地利用方式对土壤团聚体在 0~100 cm 土壤剖面上的分布、稳定性及团聚体有机碳含量的影响, 以期对重庆地区土壤结构的改善及土壤有机碳库的维持及提高提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区 (106°18'14"E ~ 106°56'53"E, 29°39'00"N ~ 30°03'53"N), 该区域属亚热带季风湿润性气候区, 雨量充沛, 四季分明, 年均温 18.2℃, 无霜期 336 d, 年降雨量 1 100 mm 左右. 北碚区属西南坳褶带, 华蓥山阻挡式复背斜帚状弧形构造区重庆弧一部分, 地质岩层以侏罗纪和三叠纪为主. 区内由低山槽、山麓裸丘、浅丘和

沿江河谷构成, 以丘陵地貌为主. 土壤类型丰富, 其中水稻土和紫色土分布最广, 占到全区耕地总面积的 81.7%. 北碚区内自然条件复杂, 植被层次丰富, 种类繁多, 土地利用类型多样, 其中林地(针阔叶混交林、常绿阔叶林、灌木林、毛竹林)和耕地(旱坡地、水田)是该区域最主要的土地利用方式.

1.2 土样采集与样品分析

2016 年 9 月上旬, 在重庆市北碚区选择针阔叶混交林、竹林、果园、旱地、水田和荒草地这 6 种土地利用方式土壤作为研究对象. 每种土地利用方式设置 3 个采样点, 每个采样点 3 个重复, 挖掘土壤剖面 100 cm, 分 4 层进行土壤样品采集: 0~20、20~40、40~60 和 60~100 cm, 用四分法取出足够的样品, 除去土壤中的石块和植物根系, 风干后过孔径 2 mm 筛和 0.25 mm 筛, 保存备用. 采样点信息与供试土壤的基本性质参见文献^[13].

土壤团聚体的分离采用 Elliott^[14]的湿筛法, 分为 >2 mm、0.25~2 mm、0.053 mm~0.25 mm 和 <0.053 mm 这 4 个粒级团聚体.

土壤团聚体有机碳测定方法: 将上述烘干土样磨细过 0.25 mm 筛, 采用土壤有机碳测定方法测定其团聚体有机碳含量.

土壤团聚体稳定性指标采用平均重量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD) 来描述. 计算公式如下:

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

$$\text{GMD} = \exp \left(\sum_{i=1}^n W_i \cdot \ln \bar{X}_i \right) \quad (2)$$

式中, $\bar{X}_i$ 为第 i 级团聚体平均直径 (本研究各级团聚体平均直径取值分别为大团聚体 (6 mm)、较大团聚体 (1.125 mm)、微团聚体 (0.1515 mm) 和黏粉粒组分 (0.0265 mm), W_i 为第 i 级团聚体的质量.

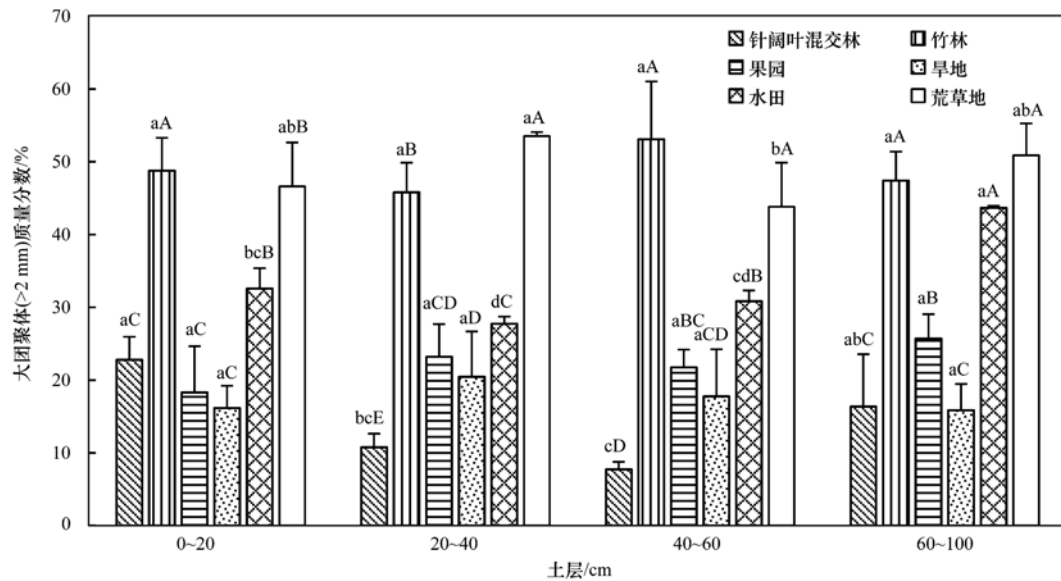
1.3 数据处理与分析

数据处理采用 SPSS 21.0 进行统计分析, 用单因素方差分析 (ANOVA) 和 Duncan 新复极差法对各变量进行显著性检验, 采用 Microsoft Excel 2013 软件绘制图表.

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤团聚体粒径分布特征

从图 1 可以看出, 在 0~100 cm 土层下, 竹林 (48.76%) 和荒草地 (48.71%) 的土壤大团聚体 (>2 mm) 平均含量较高, 针阔叶混交林 (14.41%) 最低. 在 0~20 cm 土层中, 竹林 >2 mm 含量最高, 明显高于其他土地利用方式 ($P < 0.05$), 而旱地



图中不同小写字母表示同一土地利用方式下不同土壤深度在 0.05 水平上的差异显著性, 不同大写字母表示同一土壤深度下不同土地利用方式在 0.05 水平上的差异显著性, 下同

图 1 不同土地利用方式下土壤大团聚体 (> 2 mm) 质量分数

Fig. 1 Proportion of large soil macroaggregates under different land use types

> 2 mm 含量最低. 在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层中, 除果园与旱地、水田 > 2 mm 含量差异不明显外, 其他土地利用方式之间差异显著 ($P < 0.05$). 在 20 ~ 40 和 60 ~ 100 cm 土层中, 荒草地 > 2 mm 含量均为最高.

从图 2 可以看出, 除 40 ~ 60 cm 土层外, 针阔叶混交林较大团聚体 (0.25 ~ 2 mm) 含量都高于其他土地利用方式. 0 ~ 20 cm 土层, 竹林和荒草地的 0.25 ~ 2 mm 含量明显低于其他处理, 其中针阔叶混交林的 0.25 ~ 2 mm 含量最大. 20 ~ 40 cm 土层, 针阔叶混交林的 0.25 ~ 2 mm 含量较最低的荒草地显著增加了 26.11%. 在 40 ~ 60 cm 土层, 旱地的 0.25 ~ 2 mm 含量最高 (45.35%), 但与针阔叶混交林 (44.61%) 间的差异不显著. 随着土壤剖面深度的加深, 针阔叶混交林和旱地 0.25 ~ 2 mm 含量在不同土壤深度内差异不显著.

从图 3 可以看出, 在整个土壤剖面中, 6 种土地利用方式微团聚体 (0.053 ~ 0.25 mm) 平均含量表现为: 果园 > 针阔叶混交林 > 旱地 > 水田 > 竹林 > 荒草地. 随着土壤深度的增加, 竹林和荒草地 0.053 ~ 0.25 mm 含量也逐渐增加, 而果园和旱地 在不同土壤深度内差异不明显. 在 0 ~ 20 cm 和 40 ~ 60 cm 土层中, 除果园 (0 ~ 20 cm) 和针阔叶混交林 (40 ~ 60 cm) 的 0.053 ~ 0.25 mm 含量明显高于其他土地利用方式外, 其他 5 种土地利用方式间均无显著差异. 除 60 ~ 100 cm 土层外, 荒草地 0.053 ~ 0.25 mm 含量均为最低, 与其他土地利用方式间无显著差异. 在 60 ~ 100 cm 土层内, 旱地 0.053 ~ 0.25 mm 含量最高 (24.54%), 水田最低 (14.03%), 两者差异显著 ($P < 0.05$).

由图 4 可知, 竹林、水田和荒草地的粉 + 黏团聚体 (< 0.053 mm) 含量在不同土壤深度内差异不

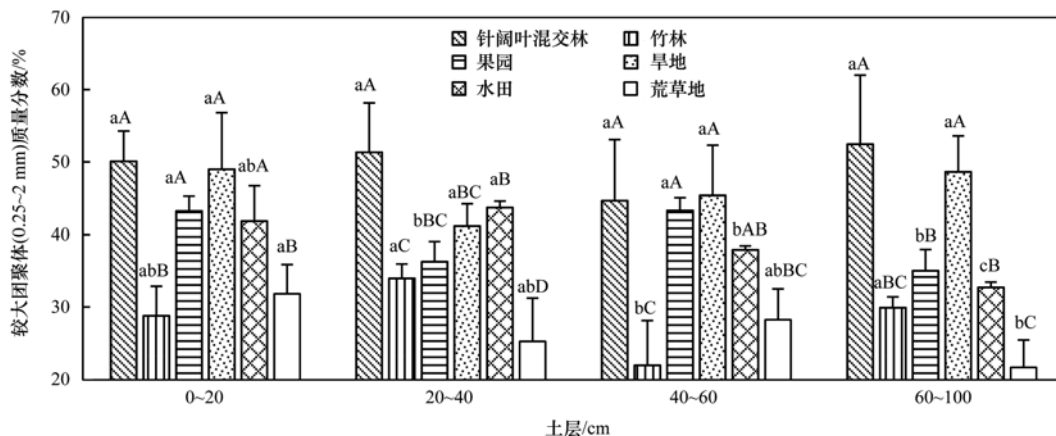


图 2 不同土地利用方式下土壤较大团聚体 (0.25 ~ 2 mm) 质量分数

Fig. 2 Proportion of small soil macroaggregates under different land use types

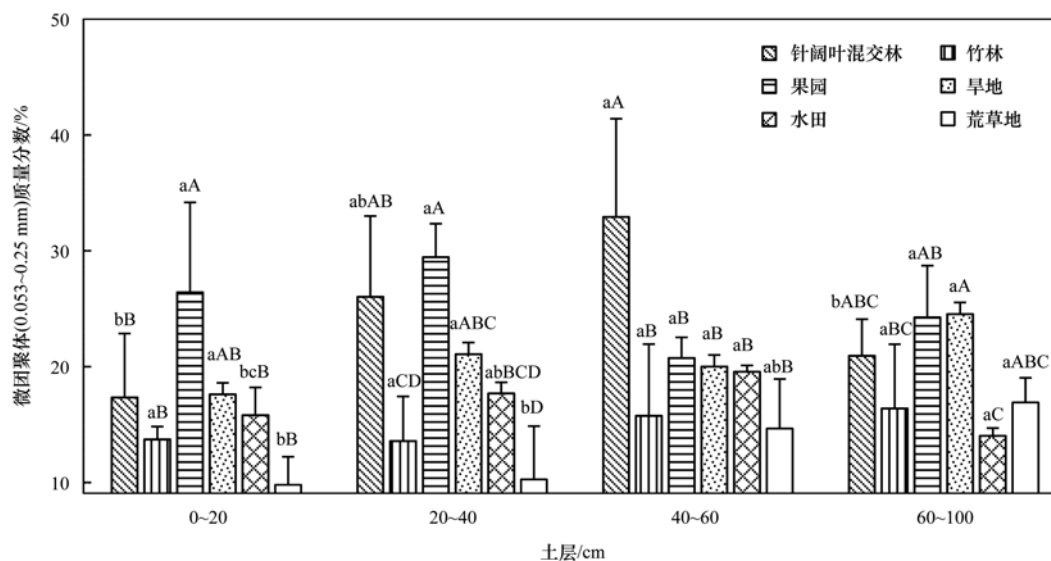


图3 不同土地利用方式下土壤微团聚体 (0.053 ~ 0.25 mm) 质量分数

Fig. 3 Proportion of soil microaggregates under different land use types

显著. 在 0 ~ 20、20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层中, 旱地 <0.053 mm 含量均为最高. 其中在 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层中, 旱地 <0.053 mm 含量均显著高于其他土地利用方式 ($P < 0.05$), 含量分别为 17.26% 和 17.37%; 在 40 ~ 60 cm 土层内, 仅旱地与竹林的 <0.053 mm 含量差异显著 ($P < 0.05$). 在 20 ~ 40 cm 土层内, 仅竹林 (6.67%) 显著低于其他土地利用方式 ($P < 0.05$). 在 60 ~ 100 cm 土层内, 果园 <0.053 mm 含量 (15.03%) 显著高于其他土地利用方式 ($P < 0.05$).

2.2 不同土地利用方式下土壤团聚体稳定性

从表 1 可以看出, 仅果园的土壤水稳性团聚体平均质量直径 (MWD) 随着土层的增加而增加, 竹林、果园、旱地的 MWD 在各个土层之间差异不显著. 在 0 ~ 100 cm 土层内, 竹林 (2.01 ~ 2.13 mm)

和荒草地 (1.88 ~ 2.17 mm) 的土壤团聚体 MWD 均显著高于其他土地利用方式 ($P < 0.05$), 其中荒草地在 20 ~ 40 cm 土层达到最大值, 竹林在 40 ~ 60 cm 达到最大值.

对土壤团聚体几何平均直径 (GMD) 而言, 在 0 ~ 100 cm 土层内, 竹林和荒草地的平均 GMD 较高, 分别为 1.09 mm 和 1.01 mm, 果园与旱地较低, 分别为 0.53 mm 和 0.47 mm, 6 种土地利用方式的土壤团聚体 GMD 在不同土壤深度内的差异都不显著. 除 60 ~ 100 cm 土层外, 竹林和荒草地土壤团聚体 GMD 均显著高于其他土地利用方式 ($P < 0.05$). 在整个土层中, 水田和旱地表现出土壤团聚体 GMD 随着土层加深而逐渐增大, 竹林、荒草地、果园和针阔叶混交林表现出 GMD 随土层加深而减小的趋势.

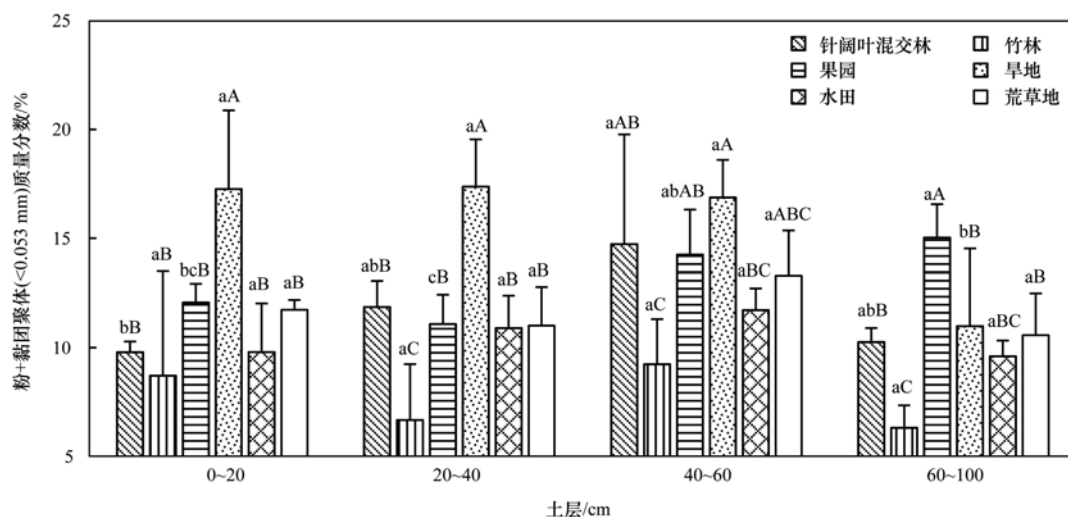


图4 不同土地利用方式下土壤粉 + 黏团聚体 (<0.053 mm) 质量分数

Fig. 4 Proportion of soil silt + clay under different land use types

表 1 不同土地利用方式土壤团聚体平均质量直径 (MWD) 与几何平均直径 (GMD)

Table 1 Mean weight diameter and geometric mean diameter of soil aggregates under different land use types

项目	处理	土层/cm			
		0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 100
MWD/mm	竹林	2.05 ± 0.16aA	2.01 ± 0.13aA	2.13 ± 0.20aA	2.02 ± 0.14aA
	荒草地	2.01 ± 0.17abA	2.17 ± 0.07aA	1.88 ± 0.18bA	2.05 ± 0.11abA
	水田	1.64 ± 0.09bB	1.49 ± 0.04cB	1.54 ± 0.05bcB	1.92 ± 0.01aA
	果园	1.17 ± 0.22aC	1.27 ± 0.12aBC	1.28 ± 0.09aBC	1.33 ± 0.12aB
	旱地	1.15 ± 0.18aC	1.21 ± 0.24aCD	1.17 ± 0.18aC	1.14 ± 0.14aB
	针阔叶混交林	1.39 ± 0.12aBC	1.00 ± 0.12bcD	0.83 ± 0.12cD	1.20 ± 0.15abB
GMD/mm	竹林	1.15 ± 0.11aA	1.09 ± 0.12aA	1.10 ± 0.11aA	1.03 ± 0.11aA
	荒草地	1.06 ± 0.32aA	1.02 ± 0.21aA	1.02 ± 0.21aA	0.96 ± 0.22aA
	水田	0.68 ± 0.03aB	0.71 ± 0.07aB	0.71 ± 0.07aB	0.74 ± 0.15aAB
	果园	0.54 ± 0.03aB	0.54 ± 0.03aBC	0.54 ± 0.03aBC	0.52 ± 0.11aBC
	旱地	0.46 ± 0.09aB	0.47 ± 0.10aC	0.47 ± 0.09aC	0.47 ± 0.07aC
	针阔叶混交林	0.63 ± 0.16aB	0.59 ± 0.11aBC	0.59 ± 0.11aBC	0.57 ± 0.07aBC

1) 表中不同小写字母表示同一土地利用方式下不同土壤深度在 0.05 水平上的差异显著性, 不同大写字母表示同一土壤深度下不同土地利用方式在 0.05 水平上的差异显著性, 下同

2.3 不同土地利用方式下土壤团聚体有机碳含量

从表 2 可以看出, 在 >2 mm 粒径团聚体中, 除旱地外, 其他 5 种土地利用方式土壤 >2 mm 有机碳含量都随土壤深度的增加而降低, 且 0 ~ 20 cm 土层 >2 mm 有机碳含量体有机碳含量均显著高于其他土层 ($P < 0.05$). 竹林和水田土壤 >2 mm 有机碳含量在 0 ~ 20 cm 与 20 ~ 40 cm 土层中均显著高于其他土地利用方式 ($P < 0.05$). 在 0.25 ~ 2 mm

粒径团聚体中, 有机碳的平均含量表现为: 竹林 ($19.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 水田 ($18.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 旱地 ($13.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 果园 ($13.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 荒草地 ($11.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 针阔叶混交林 ($8.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). 在 0 ~ 20 cm 土层中, 竹林土壤 0.25 ~ 2 mm 有机碳含量显著高于其他土地利用方式 ($P < 0.05$), 旱地则显著低于其他土地利用方式 ($P < 0.05$). 在 20 ~ 40、40 ~ 60 和 60 ~ 100 cm 土层内, 针阔叶混交林

表 2 不同土地利用方式下各土壤团聚体粒径的有机碳含量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 2 Content of soil organic carbon in various particle size fractions of aggregates under different land use types/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

团聚体粒径/mm	处理	土层/cm			
		0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 100
>2	竹林	25.79 ± 0.83aA	15.95 ± 1.96bA	12.03 ± 0.49cA	7.70 ± 0.56dB
	荒草地	14.29 ± 0.56aB	11.97 ± 0.25bBC	9.64 ± 0.59cB	8.08 ± 0.30dB
	水田	23.83 ± 0.77aA	17.61 ± 1.47bA	12.53 ± 1.18cA	12.13 ± 0.64cA
	果园	14.87 ± 2.68aB	9.73 ± 0.71bCD	9.54 ± 1.23bB	8.60 ± 0.19bB
	旱地	10.12 ± 0.67bC	12.77 ± 0.60aB	10.77 ± 0.95abAB	7.80 ± 1.78cB
	针阔叶混交林	16.21 ± 4.09aB	8.12 ± 2.90bD	4.64 ± 1.83bC	3.24 ± 0.77bC
0.25 ~ 2	竹林	32.23 ± 2.21aA	22.93 ± 3.19bA	12.90 ± 0.51cAB	9.86 ± 0.98cC
	荒草地	15.33 ± 0.75aC	13.09 ± 0.52bD	10.36 ± 0.20cC	8.51 ± 0.41dD
	水田	27.30 ± 0.45aB	19.59 ± 0.68bB	14.29 ± 1.27cA	13.12 ± 0.77cA
	果园	15.76 ± 0.81aC	13.84 ± 0.28bCD	12.30 ± 0.07cB	12.00 ± 0.46dB
	旱地	12.55 ± 0.70bcD	16.75 ± 1.86aBC	13.39 ± 1.19bAB	10.84 ± 0.37cBC
	针阔叶混交林	16.43 ± 1.42aC	8.88 ± 1.62bE	4.91 ± 0.96cD	3.12 ± 0.28cE
0.053 ~ 0.25	竹林	24.17 ± 2.40aA	16.63 ± 1.76bA	10.53 ± 0.53cA	8.32 ± 0.51cAB
	荒草地	13.64 ± 0.15aB	11.21 ± 0.57bB	9.38 ± 0.83cB	7.23 ± 1.25dBC
	水田	13.37 ± 0.27aB	10.40 ± 0.57bBC	9.31 ± 0.04cBC	9.44 ± 0.18cA
	果园	10.04 ± 0.33aC	8.80 ± 0.47bCD	7.19 ± 0.52cCD	7.01 ± 0.96cBC
	旱地	8.71 ± 3.23abC	10.09 ± 2.13aBCD	8.15 ± 1.74abBCD	5.81 ± 1.09bC
	针阔叶混交林	14.23 ± 1.26aB	7.87 ± 0.93bD	6.68 ± 1.63bD	3.16 ± 0.04cC
<0.053	竹林	27.18 ± 2.84aA	23.08 ± 5.34aA	11.54 ± 0.81bC	10.63 ± 1.89bB
	荒草地	12.14 ± 1.19bB	10.54 ± 0.58bC	15.73 ± 1.87aA	6.31 ± 1.03cC
	水田	25.82 ± 2.53aA	19.68 ± 3.78bAB	14.40 ± 3.28bcABC	12.42 ± 0.38cA
	果园	15.01 ± 2.42aB	14.54 ± 1.76aBC	11.83 ± 2.06abBC	10.33 ± 0.43bB
	旱地	14.05 ± 3.02abB	16.26 ± 1.67aABC	15.37 ± 1.23aAB	11.71 ± 0.65bAB
	针阔叶混交林	11.49 ± 5.08aB	10.02 ± 6.56abC	4.11 ± 2.12abD	2.76 ± 0.29bD

0.25 ~ 2 mm 有机碳含量均显著低于其他土地利用方式 ($P < 0.05$)。在 0.053 ~ 0.25 mm 粒径团聚体中, 除 60 ~ 100 cm 土层外, 竹林土壤 0.053 ~ 0.25 mm 有机碳含量均显著高于其他土地利用方式 ($P < 0.05$)。而在 60 ~ 100 cm 土壤深度内, 水田、竹林、果园、旱地和荒草地 0.053 ~ 0.25 mm 有机碳含量是针阔叶混交林的 2.63、2.22、1.84、2.99 和 2.29 倍。在 < 0.053 mm 粒径团聚体中, 竹林和水田的有机碳含量在 0 ~ 20 cm 土层中显著高于其他 4 种土地利用方式 ($P < 0.05$)。

总体而言, 竹林和水田各粒径团聚体有机碳含量高于其他 4 种土地利用方式, 而针阔叶混交林各粒径团聚体有机碳含量最小。

3 讨论

3.1 土地利用方式对土壤团聚体粒径分布及其稳定性的影响

土壤团聚体结构是土壤肥力的基础, 它可以体现出土壤供应养分的能力及通透性、持水性等性质^[2]。 > 0.25 mm 水稳性团聚体的数量通常可以用来判别土壤结构的好坏, 它的含量和质量越高, 表明土壤抗蚀能力越好、土壤结构稳定性越强^[15]。而团聚体稳定性的变化可以从侧面反映土壤的理化特性和质量变化^[16], 有研究表明, 土地利用方式, 土壤有机质含量、农田管理措施、植被情况等要素能显著影响土壤团聚体稳定性^[17]。土壤团聚体的稳定性常用平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD) 等指标来评价, 其值越大, 就表明土壤的团聚度和稳定性越强^[18]。本试验中, 在 0 ~ 100 cm 土层的各粒径团聚体中, 水田、果园、旱地和针阔叶混交林均以较大团聚体 (0.25 ~ 2 mm) 为主, 竹林和荒草地则以大团聚体 (> 2 mm) 为主, 可见, 6 种土地利用方式的团聚体粒径均以 > 0.25 mm 为主。通过相关性分析 (表 3) 发现, > 0.25 mm 水稳性团聚体含量与土壤团聚体稳定性指标 (MWD 和 GMD) 呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。在 0 ~ 100 cm 土层中, 竹林与荒草地 > 0.25 mm 团聚体含量最高, 且 MWD 在各个土层内都显著高于其他土地利用方式; 在 0 ~ 20、20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层内, 竹林和荒草地土壤团聚体 GMD 也最高, 这与姜敏等^[19]和刘梦云等^[20]的研究结果类似。

Tisdall 等^[21]的研究表明, 人为扰动容易使土壤大团聚体优先遭到破坏, 继而形成微团聚体。竹林覆盖面较大, 受人类活动干扰少, 竹林地表大量的凋落物、微生物和根系分解为多糖等胶结物质, 促进了真菌菌丝体等有机胶结物的生长, 有利于菌

丝对竹林土壤的缠绕作用, 从而促进土壤 > 0.25 mm 团聚体的形成, 增强团聚体的稳定性^[22, 23]。其次, 由于竹林地表覆盖物较多, 土壤抗侵蚀能力较强, 雨水对土壤的淋溶作用减弱, 也有利于提高 > 0.25 mm 团聚体的稳定性^[24, 25]。对荒草地而言, 耕地撂荒后, 土壤受到的扰动减少, 地表的植物、凋落物和植物根系增多, 增加了土壤的有机物来源, 促进了土壤微生物活动, 有利于土壤颗粒间的胶结作用^[26], 最终增加了 > 0.25 mm 团聚体含量和提高了土壤团聚体稳定性。而对于旱地来说, 翻耕会导致土壤大团聚体的破碎化, 减少大团聚体的含量。此外, 果园和旱地的耕作强度和使用频率较高, 土壤易受到剧烈的人为扰动, > 0.25 mm 水稳性团聚体容易遭到破坏而减少, 从而减低了果园和旱地的土壤团聚体稳定性, 这与刘恩科等^[27]的研究结果一致。因此 6 种利用方式中, 果园和旱地的 > 0.25 mm 团聚体含量较低, 土壤团聚体稳定性较差。

表 3 不同土地利用方式下 > 0.25 mm 土壤团聚体含量与团聚体稳定性之间的相关系数¹⁾

Table 3 Correlation coefficients between > 0.25 mm aggregates content and aggregates stability under different land use types			
	> 0.25 mm 土壤团聚体含量	MWD	GMD
> 0.25 mm 土壤团聚体含量	1	0.899 **	0.809 **
MWD		1	0.916 **
GMD			1

1) ** 表示在 0.01 水平上显著相关 ($n = 24$), 下同

3.2 土地利用方式对土壤团聚体有机碳含量的影响

在 0 ~ 100 cm 土层中, 随着团聚体粒径的增大, 6 种土地利用方式下的土壤团聚体有机碳含量表现出先增高后降低再升高的趋势。总的来说, > 0.25 mm 水稳性团聚体有机碳含量高于 < 0.25 mm 团聚体有机碳含量, 其中 0.25 ~ 2 mm 土壤团聚体和 < 0.053 mm 团聚体内有机碳含量较高, 这与谢锦升等^[28]的研究结果相似。这是因为处于分解状态的根系和菌丝不但能提高大团聚体的稳定性, 也可以使土壤固定更多的有机碳^[21]。此外, 大团聚体内部颗粒有机质的分解, 使大团聚体解体而形成微团聚体^[29], 而微团聚体包裹的有机碳受到更强的物理保护^[30], 因此 < 0.053 mm 团聚体的有机碳含量也较高。除旱地外, 其它土地利用方式下各粒径团聚体有机碳含量表现出显著的表层富集现象。其原因可能是植物凋落物主要积累在土壤表层 (0 ~ 20 cm), 枯枝落叶、根系分泌物和土壤生物残体等有机物的输入为土壤微生物和动物供给了养分, 同时植物的根系通过穿透和根际效应改善了土

壤孔隙度,调节了土壤水分,提高了土壤表层的生物活性度,从而有利于土壤团聚体中有机质的积累^[31, 32]. 而旱地由于常年翻耕,土壤分层结构受到扰动,导致20~40 cm土层中有机碳含量高于0~20 cm土层.

有机质作为团聚体的胶结物质,二者关系相辅相成,本研究中,在0~20 cm土层,土壤团聚体稳定性指标(MWD和GMD)与土壤团聚体有机碳均存在极显著正相关关系($P < 0.01$,表4). 竹林和水田各粒径团聚体有机碳含量均显著高于果园和旱地,与罗友进等^[33]和黄先飞等^[34]的研究结果一致. 这是因为竹林受到的人为扰动较少,土壤团聚体的稳定性较高,且竹林表层大量的凋落物和根系分泌物通过分解转化可以补充土壤有机碳含量. 而水田常年处于淹水或过湿状态,微生物不活跃,不利于有机质的分解,同时水田表层土壤有机肥的投入量较高,有利于有机碳的积累和固定^[35]. 对于果园和旱地而言,一方面,>0.25 mm水稳性团聚体容易遭到破坏而减少,导致土壤团聚体稳定性降低,也致使大团聚体破碎导致活性有机质释放并提高微生物活性,微生物活性提高又进一步损耗了土壤有机质,从而导致有机质含量下降;另一方面,果农在进行果树管理时将被修剪的枝叶和果树所结的果实带走,减少了果园中的能源物质. 旱地因作物和秸秆的收获,导致作物中的有机质不能归还土壤,人为翻耕还会导致土壤水分的流失,加速土壤有机碳的矿化,使旱地土壤有机碳含量降低.

表4 0~20 cm土层土壤团聚体稳定性与团聚体有机碳含量之间的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between soil aggregates stability and organic carbon content of aggregates in 0-20 cm soil layers

	MWD	GMD	有机碳含量
MWD	1	0.971 **	0.569 **
GMD		1	0.533 **
有机碳含量			1

4 结论

不同土地利用方式下,土壤的结构和肥力水平存在着显著的差异. 6种土地利用方式下,竹林和荒草地在各土层中的土壤团聚体稳定性较好,且在各土层中,竹林土壤各粒径团聚体有机碳含量最高. 在0~100 cm土层土壤的各粒径团聚体中,针阔叶混交林、果园、旱地和水田均以0.25~2 mm为优势粒径,竹林和荒草地则以>2 mm为优势粒径. 竹林与荒草地的>0.25 mm水稳性团聚体含量较高,且在整个土壤深度内,竹林和荒草地的MWD和GMD值较高,其土壤团聚体稳定性高于其

他土地利用方式. 在0~20 cm土层,土壤团聚体稳定性与土壤团聚体有机碳间呈极显著正相关关系($P < 0.01$). 在0~100 cm土层中,不同土地利用方式下0.25~2 mm团聚体和<0.053 mm团聚体内有机碳含量均较高. 除旱地外,其他土地利用方式下的土壤各粒径团聚体内有机碳含量表现出显著的表层富集现象.

参考文献:

- [1] Shinjo H, Fujita H, Gintzburger G, *et al.* Soil aggregate stability under different landscapes and vegetation types in a semiarid area in northeastern Syria [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2000, **46**(1): 229-240.
- [2] 卢金伟,李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. *水土保持研究*, 2002, **9**(1): 81-85.
Lu J W, Li Z B. Advance in soil aggregate study [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002, **9**(1): 81-85.
- [3] 石宗琳,王加旭,梁化学,等. 渭北不同园龄苹果园土壤团聚体状况及演变趋势研究[J]. *土壤学报*, 2017, **54**(2): 387-399.
Shi Z L, Wang J X, Liang H X, *et al.* Status and evolution of soil aggregates in apple orchards different in age in Weibei [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, **54**(2): 387-399.
- [4] 庄正,张芸,张颖,等. 不同发育阶段杉木人工林土壤团聚体分布特征及其稳定性研究[J]. *水土保持学报*, 2017, **31**(6): 183-188.
Zhuang Z, Zhang Y, Zhang Y, *et al.* Study on distribution characteristics and stability of soil aggregate in Chinese fir plantation at different developmental stages [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, **31**(6): 183-188.
- [5] 李玮,郑子成,李廷轩,等. 不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. *生态学报*, 2014, **34**(21): 6326-6336.
Li W, Zheng Z C, Li T X, *et al.* Distribution characteristics of soil aggregates and its organic carbon in different tea plantation age [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(21): 6326-6336.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 毛艳玲,杨玉盛,崔纪超. 土壤团聚体颗粒有机碳对土地利用变化的响应[J]. *水土保持学报*, 2011, **25**(4): 188-191, 196.
Mao Y L, Yang Y S, Cui J C. Response of land use on soil particulate organic carbon in aggregates [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, **25**(4): 188-191, 196.
- [9] 郑红. 东北温带土地利用变化对土壤团聚体稳定性及有机碳组分的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
Zheng H. Effect of land uses on soil aggregate stability and organic carbon fractions in northeast temperate area [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.
- [10] 李娟,廖洪凯,龙健,等. 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响[J]. *生态学报*, 2013,

- 33(7): 2147-2156.
- Li J, Liao H K, Long J, *et al.* Effect of land use on the characteristics of organic carbon and labile organic carbon in soil aggregates in Karst mountain areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(7): 2147-2156.
- [11] 李娟, 韩霖昌, 陈超, 等. 黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, **31**(1): 248-253, 259.
- Li J, Han J C, Chen C, *et al.* Effects of land use types on soil aggregate characteristics in hilly-gully region of Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, **31**(1): 248-253, 259.
- [12] 王芳丽, 高明, 代文才, 等. 不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征[J]. *水土保持学报*, 2016, **30**(4): 227-232.
- Wang F L, Gao M, Dai W C, *et al.* Distribution characteristics of soil organic carbon under different land use types[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(4): 227-232.
- [13] 陆畅. 土地利用方式对土壤植硅体碳和团聚体有机碳的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- Lu C. Effects of land uses on soil phytOC and organic carbon of soil aggregates[D]. Chongqing: Southwest University, 2018.
- [14] 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.
- [15] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. *土壤通报*, 2005, **36**(3): 415-421.
- Wang Q K, Wang S L. Forming and stable mechanism of soil aggregate and influencing factors [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, **36**(3): 415-421.
- [16] Márquez C O, García V J, Cambardella C A, *et al.* Aggregate-size stability distribution and soil stability [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, **68**(3): 725.
- [17] Blanco-Canqui H, Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2004, **23**(6): 481-504.
- [18] Amézketa E. Soil aggregate stability: A review[J]. *Journal of Sustainable Agriculture*, 1999, **14**(2-3): 83-151.
- [19] 姜敏, 刘毅, 刘闯, 等. 丹江口库区不同土地利用方式土壤团聚体稳定性及分形特征[J]. *水土保持学报*, 2016, **30**(6): 265-270.
- Jiang M, Liu Y, Liu C, *et al.* Study on the stability and fractal characteristics of soil aggregates under different land use patterns in the Danjiangkou reservoir [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(6): 265-270.
- [20] 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.
- [21] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 1982, **33**(2): 141-163.
- [22] 宋影, 辜夕容, 严海元, 等. 中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 1151-1158.
- Song Y, Gu X R, Yan H Y, *et al.* Dynamics of microbes and enzyme activities during litter decomposition of pinus massoniana forest in mid-subtropical area[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 1151-1158.
- [23] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 等. 三峡库区马尾松林土壤凋落物层酶活性对凋落物分解的影响[J]. *生态学报*, 2014, **34**(9): 2228-2237.
- Ge X G, Xiao W F, Zeng L X, *et al.* Effect of soil-litter layer enzyme activities on litter decomposition in *Pinus massoniana* plantation in Three Gorges Reservoir area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(9): 2228-2237.
- [24] 肖复明, 范少辉, 汪思龙, 等. 毛竹林地土壤团聚体稳定性及其对碳贮量影响研究[J]. *水土保持学报*, 2008, **22**(2): 131-134, 181.
- Xiao F M, Fan S H, Wang S L, *et al.* Moso bamboo plantation soil aggregate stability and its impact on carbon storage [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, **22**(2): 131-134, 181.
- [25] 王富华, 吕盛, 黄容, 等. 缙云山4种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1504-1511.
- Wang F H, Lü S, Huang R, *et al.* Distribution of organic carbon in soil aggregates from four kinds of forest vegetation on Jinyun Mountain [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1504-1511.
- [26] 郑子成, 王永东, 李廷轩, 等. 退耕对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. *自然资源学报*, 2011, **26**(1): 119-127.
- Zheng Z C, Wang Y D, Li T X, *et al.* Effect of abandoned cropland on stability and distributions of organic carbon in soil aggregates [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, **26**(1): 119-127.
- [27] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 刘满强, 胡锋, 陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展[J]. *生态学报*, 2007, **27**(6): 2642-2650.
- Liu M Q, Hu F, Chen X Y. A review on mechanisms of soil organic carbon stabilization [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(6): 2642-2650.
- [31] 廖洪凯, 李娟, 龙健, 等. 基于组内-组间主成分分析的土地利用与团聚体有机碳关系的研究[J]. *自然资源学报*, 2015, **30**(1): 141-151.
- Liao H K, Li J, Long J, *et al.* The study of relationship between land use and aggregate associated SOC based on between-within classes PCA in the Karst Region [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(1): 141-151.
- [32] 胡雷, 王长庭, 阿的鲁骥, 等. 高寒草甸植物根系生物量及有机碳含量与土壤机械组成的关系[J]. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 2015, **41**(1): 6-11.
- Hu L, Wang C T, Ade L J, *et al.* Relationship between root

- biomass, soil organic carbon and soil mechanical composition in alpine meadow [J]. *Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2015, **41**(1): 6-11.
- [33] 罗友进, 魏朝富, 李渝, 等. 土地利用对石漠化地区土壤团聚体有机碳分布及保护的影响[J]. *生态学报*, 2011, **31**(1): 257-266.
- Luo Y J, Wei C F, Li Y, *et al.* Effects of land use on distribution and protection of organic carbon in soil aggregates in karst rocky desertification area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(1): 257-266.
- [34] 黄先飞, 周运超, 张珍明. 土地利用方式下土壤有机碳特征及影响因素——以黔北喀斯特小流域为例[J]. *自然资源学报*, 2018, **33**(6): 1056-1067.
- Huang X F, Zhou Y C, Zhang Z M. Characteristics and affecting factors of soil organic carbon under land uses: A case study in Houzhai River Basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, **33**(6): 1056-1067.
- [35] 胡玉福, 彭佳佳, 蒋双龙, 等. 川中丘陵区不同土地利用方式土壤活性有机碳含量特征研究[J]. *水土保持学报*, 2014, **28**(2): 221-225, 231.
- Hu Y H, Peng J J, Jiang S L, *et al.* Study on soil active organic carbon in different land use patterns of the middle Sichuan Region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **28**(2): 221-225, 231.

环境科学

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenhe River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NP1	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)