

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究 孙建林,常文静,陈正侠,曾辉(1513)

北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究 崔彤,程婧晨,何万清,任培芳,聂磊,徐东耀,潘涛(1523)

2006~2010年珠三角地区 SO₂ 特征分析 李菲,谭浩波,邓雪娇,邓涛,徐婉筠,冉靓,赵春生(1530)

环境空气 PM_{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试 王强,钟琪,迟颖,张杨,杨凯(1538)

燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放 裴冰(1544)

南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应 方峰,王磊,席雪飞,胡佳俊,付小花,陆兵,徐殿胜(1550)

基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算 冯驰,金琦,王艳楠,赵丽娜,吕恒,李云梅(1557)

贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,罗进,蒋浩(1565)

东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析 高磊,陈建耀,王江,柯志庭,朱爱萍,许凯(1573)

河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究 刘肖,杨琰,彭涛,赵景耀,任小凤,张银环,聂旭东,李建仓,凌新有,张志钦(1582)

石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响 肖时珍,熊康宁,蓝家程,张晖,杨龙(1590)

旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异 赵瑞一,梁作兵,王尊波,于正良,江泽利(1598)

有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响 孙玉川,王永启,梁作兵,袁道先(1605)

山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究 曹霏霏,杨丽原,庞绪贵,王炳华,王云倩(1615)

摇蚊幼虫扰动下沉沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应 史晓丹,李勇,李大鹏,王忍,邓猛,黄勇(1622)

南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响 郝卓,高扬,张进忠,徐亚娟,于贵瑞(1630)

不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响 黄雪娇,刘晓晨,李振轮,石纹豪,杨珊(1639)

荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响 汪小雄,姜成春,李锦卫,汪晓军(1648)

黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用 陈亚楠,袁玲(1655)

饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制 丁春生,孟壮,徐洋洋,缪佳(1662)

水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性 凌晓,胡晨燕,程明,谷建(1668)

化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响 张灿,刘文君,史文,安代志,白森,徐稳(1674)

牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性 马锋锋,赵保卫,刁静茹,钟金魁,李安邦(1678)

丁二酸改性茶油树木屑吸附附的研究 张晓峰,陈迪云,彭燕,刘永胜,熊雪莹(1686)

SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响 张静,肖太民,张晶,曹丽亚,杜亚威,刘春,张磊(1694)

TiO₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制 郭宏生,刘亚楠,乔琪,魏红,董呈幸,薛洁,李克斌(1700)

新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能 王刚,杜凤龄,常青,徐敏(1707)

基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量 曾善文,王泽宇,高敬,刘东,张代钧,卢培利(1713)

分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制 黄帅,刘宏波,殷波,马惠君,符波,刘和,白洁(1720)

通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响 张喻,韩融,陆文静,王洪涛,明中远,王强,夏伟(1727)

生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究 吴青,崔延瑞,汤晓晓,杨慧娟,孙剑辉(1733)

百乐克(BIOLAK)活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析 田美,刘汉湖,申欣,赵方庆,陈帅,姚永佳(1739)

异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性 梁贤,任勇翔,杨垒,赵思琪,夏志红(1749)

菌株 *Arthrobacter* sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学 任磊,史延华,贾阳,姚雪松,Ruth Nahurira,弥春霞,闫艳春(1757)

短短芽胞杆菌及其芽胞对苾的降解 刘芷辰,叶锦韶,彭辉,刘则华,邓庭进,尹华,廖丽萍(1763)

垃圾填埋场抗生素抗性基因初探 李蕾,徐晶,赵由才,宋立岩(1769)

不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查 麦晓蓓,陶然,杨扬,张敏,林剑华,满滢(1776)

硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响 柳蓉,龙焰,王立立,何婷,叶锦韶(1785)

山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性 严俊霞,李洪建,李君剑,武江星(1793)

施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响 姜继韶,郭胜利,王蕊,刘庆芳,王志齐,张彦军,李娜娜,李如剑,吴得峰,孙棋棋(1802)

宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估 张文超,吕森林,刘丁或,刘品威,米持真一,王效举,王青耀(1810)

宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义 张俊辉,王瑾,张健,房妮,夏敦胜(1818)

长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征 毛霞丽,陆扣萍,孙涛,张小凯,何丽芝,王海龙(1827)

矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响 李君剑,刘峰,周小梅(1836)

三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究 肖焯,黄志刚,武海涛,吕宪国(1842)

钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应 黄昭露,陈泉源,周娟,谢墨函(1849)

石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应 杨茜,吴蔓莉,聂麦茜,王婷婷,张明辉(1856)

可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究 卫泽斌,陈晓红,吴启堂,谭蒙(1864)

绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性 金诚,赵转军,南忠仁,王胜利,武文飞,王厚成(1870)

硫酸对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响 王丹,李鑫,王代长,饶伟,杜光辉,杨军,化党领(1877)

臭氧对几种楠木气体交换参数的影响 李苗苗(1888)

某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索 蔡锋,赵士波,陈刚才,鲜思淑,杨清玲,周贤杰,余海(1902)

《环境科学》征订启事(1543) 《环境科学》征稿简则(1756) 信息(1667,1726,1809,1848)

长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征

毛霞丽^{1,2}, 陆扣萍^{1,2}, 孙涛^{1,2}, 张小凯^{1,2}, 何丽芝^{1,2}, 王海龙^{1,2*}

(1. 浙江农林大学环境与资源学院, 临安 311300; 2. 浙江农林大学浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 临安 311300)

摘要: 依托浙江水网地区稻田长期定位施肥试验(1996~2013年), 利用固态¹³C核磁共振波谱技术, 研究长期不同施肥措施下土壤各颗粒组分有机碳含量及其化学结构特征。结果表明, 与不施肥对照(CK)相比, 秸秆与化肥配施(NPKRS)、栏肥与化肥配施(NPKOM)、单施化肥(NPK)和单施栏肥(OM)处理均显著($P < 0.05$)增加了砂粒(2~0.02 mm)、粉粒(0.02~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm)组分中有机碳含量; 而单施秸秆(RS)处理仅显著增加砂粒组分有机碳含量。此外, 与单施化肥处理相比, 有机肥和化肥配施促进了新增有机碳在粉粒和黏粒组分的分配, 更有利于新增有机碳的稳定。应用¹³C-NMR波谱技术进行结构表征, 结果表明粉粒和黏粒组分有机碳的化学结构存在明显差异, 粉粒组分烷氧碳、芳香碳的相对含量高于黏粒, 而烷基碳、羰基碳的相对含量低于黏粒。长期有机肥与化肥配施下粉粒和黏粒烷基碳相对含量较单施有机肥处理分别降低9.1%~11.9%和13.7%~19.9%, 烷氧碳的相对含量则分别增加2.9%~6.3%和13.4%~22.1%, 表明有机肥与化肥配施处理降低了粉粒和黏粒组分有机碳的分解程度。长期单施化肥处理下粉粒和黏粒组分有机质的芳化度和疏水性低于单施有机肥处理和不施肥处理, 有机质的矿化稳定性较低。长期有机肥与化肥配施, 尤其是NPKOM处理, 通过增加化学抗性化合物和碳水化合物的积累, 并且减缓活性组分的分解提高粉粒和黏粒组分有机碳含量, 是促进稻田土壤有机碳可持续积累的有效措施。

关键词: 长期定位试验; 稻田土壤; 施肥; 颗粒分组; ¹³C核磁共振波谱技术; 化学结构

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1827-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.05.043

Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China

MAO Xia-li^{1,2}, LU Kou-ping^{1,2}, SUN Tao^{1,2}, ZHANG Xiao-kai^{1,2}, HE Li-zhi^{1,2}, WANG Hai-long^{1,2*}

(1. School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Lin'an 311300, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A&F University, Lin'an 311300, China)

Abstract: Effects of chemical fertilizers and organic manure on the soil organic carbon (SOC) content in particle size fractions of paddy soil were investigated in a 17-year long-term fertilization field experiment in Zhejiang Province, China. The inherent chemical composition of silt- and clay-associated SOC was evaluated with solid-state ¹³C-NMR spectroscopy. Compared to CK (no fertilizer treatment), NPKRS (NPK fertilizers plus rice straw), NPKOM (NPK fertilizers plus organic manure), NPK (NPK fertilizers) and OM (organic manure alone) treatments significantly ($P < 0.05$) increased the SOC content of sand- (2-0.02 mm), silt- (0.02-0.002 mm) and clay-sized (<0.002 mm) fractions. However, no significant difference was observed in the accumulation of silt- and clay-associated SOC between CK and rice straw (RS) treatments. Besides, in comparison with plots applied with NPK fertilizers alone, combined application of organic amendments and NPK fertilizers facilitated the storage of newly sequestered SOC in silt- and clay-sized fractions, which could be more conducive to the stability of SOC. Based on ¹³C-NMR spectra, both silt and clay fractions were composed of Alkyl-C, O-alkyl-C, Aromatic-C and carbonyl-C. Changes in the relative proportion of different C species were observed between silt and clay fractions; the clay fraction had relatively more Alkyl-C, carbonyl-C and less O-alkyl-C, Aromatic-C than those in the silt fraction. This might be ascribed to the fact that the organic matter complexed with clay was dominated by microbial products, whereas the silt appeared to be rich in aromatic residues derived from plants. The spectra also showed that the relative proportion of different C species was modified by fertilization practices. In comparison with organic amendments alone, the relative proportion of Alkyl-C was decreased by 9.1%-11.9% and 13.7%-19.9% under combined application of organic amendments and chemical fertilizers, for silt and clay, respectively, and that of O-alkyl-C was increased by 2.9%-6.3% and 13.4%-22.1%, respectively. These results indicated that NPKOM and NPKRS treatments reduced the decomposition rate of SOC. The aromaticity, hydrophobicity and, hence, chemical recalcitrance of silt- and clay-associated SOC in the NPK fertilizer treatments were lower than those of the organically amended plots and unfertilized treatments, indicating decreased recalcitrance of SOC against decomposition. We concluded that long-term application of organic manure combined with chemical fertilizers, either through increased accumulation of both

收稿日期: 2014-11-13; 修订日期: 2014-12-17

基金项目: 浙江省科技厅公益性技术应用研究项目(2013C32025); 浙江农林大学科研发展基金(人才引进)项目(2010FR097)

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

* 通讯联系人, E-mail: nzhailongwang@gmail.com

recalcitrant compounds and carbohydrates or reduced decomposition of organic matter, was a sustainable strategy for facilitating carbon accumulation of the paddy soil investigated in this study.

Key words: long-term fertilization field experiment; paddy soil; fertilization practices; particle size fractionation; solid-state ^{13}C -NMR spectroscopy; chemical composition

在农田生态系统中,施肥可以通过长期输入不同数量或质量的有机质而影响土壤总有机碳水平及其稳定性^[1,2],是影响土壤中有有机碳的转化和积累最重要的农业措施之一.大量研究表明^[3-6],长期单施有机肥或者有机肥与化肥配施较单施化肥处理能显著增加稻田土壤有机碳含量,然而对于不同施肥处理下各组分有机碳化学结构变化的认识还十分有限.固态 ^{13}C 核磁共振波谱技术(^{13}C -NMR),由于其非破坏性且可进行半定量分析的特点,可有效地对土壤有机质的化学结构进行分析^[7,8].应用 ^{13}C -NMR技术发现,长期施用有机肥不仅增加了土壤胡敏素的有机碳含量,还改变了胡敏素的化学组成,使土壤的结构向着烷基化和疏水性程度增加的方向发展,有利于有机碳的稳定与积累^[7].可见,对土壤有机质化学结构的分析可以更全面地反映农业措施对土壤有机碳的影响.

土壤中约有50%~100%的有机碳与土壤颗粒相结合^[9],且依据土壤颗粒大小进行分组对有机质的影响较小^[1],因此土壤颗粒分组能更好地反映不同管理措施下土壤有机质的实际变化特征^[10].已有研究指出^[11],与天然草地土壤相比,牧草管理措施下砂粒组分有机碳的含量显著降低,而粉粒和黏粒组分保护的土壤有机碳抗分解能力相对较强.此外,施肥措施对于不同颗粒组分有机碳的影响也已受到广泛关注.许多研究发现施用有机肥不仅可显著增加各颗粒组分有机碳含量^[12,13],还能增加粉粒和黏粒组分化学抗性烷基碳的相对含量^[8].长期施用有机肥较单施化肥更有利于土壤粉粒和黏粒组分有机碳的积累和稳定.目前国内对于不同管理措施下土壤各颗粒组分有机碳的变化特征的研究主要集中于施肥对土壤各颗粒组分有机碳含量及其分布的影响上^[14,15],而对长期施用有机肥或者化肥处理下稻田土壤不同颗粒结合的有机碳化学结构的变化并不十分清楚,尤其是浙江省水稻种植区的研究还鲜见报道.

本研究依托浙江水网地区稻田长期定位施肥试验,采用物理颗粒分组方法:①测定分析了不同施肥处理下各颗粒结合有机碳含量及其分布特征;②应用 ^{13}C -NMR波谱技术研究不同施肥处理下粉粒和黏粒组分有机碳的化学结构特征,以期阐明长期

施肥下不同颗粒组分有机碳数量和性质上的变化特征提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长期定位试验地位于浙江省杭州市西湖区双浦镇杭富村(N 30°5',E 120°3').供试土壤为河流冲积物发育的潴育型水稻土,土壤质地属粉砂质黏壤土.试验始于1996年,试验前耕层(0~20 cm)土壤基本理化性质为:土壤pH值5.69、有机质含量29.0 g·kg⁻¹、全氮1.70 g·kg⁻¹、全磷0.53 g·kg⁻¹、全钾22.6 g·kg⁻¹、土壤容重1.24 g·cm⁻³.

试验设置对照(CK)、秸秆与化肥配施(NPKRS)、栏肥与化肥配施(NPKOM)、单施化肥(NPK)、单施秸秆(RS)以及单施栏肥(OM),共6个处理.其中,对照处理为长期不施肥;NPKRS处理为施N 270 kg·(hm²·a)⁻¹、P₂O₅ 90 kg·(hm²·a)⁻¹、K₂O 150 kg·(hm²·a)⁻¹和风干秸秆3 000 kg·(hm²·a)⁻¹;NPKOM处理为施N 270 kg·(hm²·a)⁻¹、P₂O₅ 90 kg·(hm²·a)⁻¹、K₂O 150 kg·(hm²·a)⁻¹和施腐熟栏肥15 000 kg·(hm²·a)⁻¹;NPK处理为施N 270 kg·(hm²·a)⁻¹、P₂O₅ 90 kg·(hm²·a)⁻¹、K₂O 150 kg·(hm²·a)⁻¹;RS处理为施风干秸秆3 000 kg·(hm²·a)⁻¹;OM处理为施腐熟栏肥15 000 kg·(hm²·a)⁻¹.试验采取随机区组排列,每个处理3次重复,每个小区面积为30 m².试验种植方式为麦-稻轮作.

1.2 测定方法

1.2.1 样品采集

于2013年5月小麦收割后采集表层0~20 cm原状土样.每个小区随机采集多个土壤样品,混合成1个复合样品,在通风透气处自然风干后过2 mm筛,用于颗粒分组.

1.2.2 土壤颗粒分组及有机碳、全氮测定

土壤颗粒分组以国际制为标准,依据Guggenberger等^[16,17]的方法进行土壤颗粒分组.称取10.00 g风干土样,加入40 mL 0.1 mol·L⁻¹的NaOH溶液,经化学及物理处理充分分散并成悬浮液定容后,根据Stokes定律和用土粒在静水中的沉降规

律, 小于 0.02 mm 的粉粒 (0.02 ~ 0.002 mm) 和黏粒 (<0.002 mm) 颗粒则用吸管从中吸取一定量的各级颗粒, 以上步骤至少重复 3 次以上. 容器中剩余颗粒组分则为砂粒 (2 ~ 0.02 mm). 各颗粒组分子于 50°C 烘

干, 称重. 不同颗粒中总有机碳含量测定采用重铬酸钾外加热法测定, 全氮采用凯氏法测定^[18].

供试各颗粒组分新增有机碳的含量的计算公式为:

$$\text{新增有机碳含量}(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}) = \frac{\text{施肥处理下该级颗粒中有机碳含量}(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}) \times \text{施肥处理下该级颗粒含量}(\%)}{100} - \frac{\text{CK 处理下该级颗粒中有机碳含量}(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}) \times \text{CK 处理下该级颗粒含量}(\%)}{100}$$

1.2.3 粉粒和黏粒组分有机质结构表征

粉粒 (0.02 ~ 0.002 mm) 和黏粒 (<0.002 mm) 土壤样品过 100 目筛, 称取 8.000 g 于离心管中, 加入 50 mL 10% HF 溶液, 振荡 1 h, 3 000 r·min⁻¹ 离心 10 min, 移去上清液, 继续用 HF 处理, 共处理 8 次, 振荡时间分别为 4 次 × 1 h, 3 次 × 12 h, 1 次 × 24 h. HF 处理完后用 20 mL 蒸馏水洗至中性 (5 ~ 6 次), 经 HF 溶液处理后的残余物在 40°C 烘箱中烘干, 用玛瑙研钵研磨, 待测. 该过程可以除去样品中的 Fe³⁺ 和 Mn²⁺ 等磁性物质, 提高仪器分析的信噪比.

待测样品通过核磁共振仪 (AVANCE II 300 MH, 布鲁克公司) 测定, 采用固态¹³C-交叉极化魔角旋转技术, 转子直径为 7 mm, 光谱频率为 75.5 MHz、旋转频率为 5 000 Hz、接触时间为 2 ms、循环延迟时间为 2.5 s. 核磁共振功能基团面积积分用 MestReC 软件进行.

1.2.4 数据分析

数据处理与分析采用软件为 Excel 2007 和 SPSS 17.0 软件, 用最小显著差数法 (LSD) 进行显著

性检验.

2 结果与分析

2.1 施肥处理下各颗粒组分有机碳含量、碳氮比

由表 1 可知, 不同大小颗粒有机碳含量的变化趋势主要表现为: 黏粒 > 粉粒 > 砂粒, 且各颗粒组分有机碳对施肥措施的响应不同. 与不施肥处理 (CK) 相比, 单施化肥 (NPK) 和单施栏肥 (OM) 处理下砂粒、粉粒和黏粒组分有机碳含量较对照处理均显著 ($P < 0.05$) 增加; 而单施秸秆 (RS) 处理下, 除了砂粒组分有机碳含量与对照处理有显著性差异外, 其余组分的有机碳含量均不受施用秸秆的影响. 化肥与栏肥配施 (NPKOM) 与化肥与秸秆 (NPKRS) 配施处理下, 各颗粒组分有机碳含量均显著增加, 其中 NPKOM 处理下增加效果最为显著, 砂粒、粉粒和黏粒组分有机碳含量的增幅分别为 26.6%、28.0% 和 28.8%. 此外, 表 1 还显示, 所有处理下不同大小颗粒结合的有机质的碳氮比呈现与有机碳含量相反的变化趋势, 即砂粒组分 C/N 值最大, 而黏粒组分 C/N 值最小.

表 1 不同施肥处理下不同大小颗粒的有机碳含量和碳氮比¹⁾

Table 1 Organic carbon contents and C/N ratios of particle-size separates under different fertilizer treatments

施肥处理	有机碳含量/g·kg ⁻¹			碳氮比		
	砂粒 2~0.02 mm	粉粒 0.02~0.002 mm	黏粒 <0.002 mm	砂粒 2~0.02 mm	粉粒 0.02~0.002 mm	黏粒 <0.002 mm
CK	6.4 ± 0.3 c	18.2 ± 0.2 d	45.5 ± 1.9 c	18.7 ± 0.2 bc	14.3 ± 0.2 c	9.6 ± 0.3 c
NPKRS	7.6 ± 0.6 b	21.3 ± 1.1 b	54.3 ± 3.3 ab	19.9 ± 0.6 ab	15.9 ± 0.3 a	10.9 ± 0.2 a
NPKOM	8.1 ± 0.3 b	23.3 ± 0.7 a	58.6 ± 4.0 a	18.6 ± 1.1 c	16.0 ± 0.6 a	11.1 ± 0.4 a
NPK	7.7 ± 0.5 b	19.5 ± 0.5 c	50.4 ± 1.8 b	20.3 ± 0.6 a	14.3 ± 0.1 c	10.3 ± 0.2 b
RS	7.8 ± 0.5 b	18.3 ± 0.1 d	44.8 ± 0.9 c	18.2 ± 0.3 c	14.9 ± 0.3 bc	9.4 ± 0.2 c
OM	8.9 ± 0.2 a	21.7 ± 0.5 b	52.6 ± 2.1 b	20.5 ± 1.1 a	15.4 ± 0.6 ab	10.2 ± 0.3 b

1) 同一列中不同小写字母表示不同处理间分析差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 施肥处理下新增有机碳的分布

与 CK 处理相比, 施肥处理下新增有机碳在各颗粒组分上的分布情况如图 1 所示. NPKRS、NPKOM 处理下, 新增有机碳在各颗粒组分中的平均分布比例为: 黏粒 (52.5%) > 粉粒 (41.4%) > 砂

粒 (6.1%). OM 处理下新增有机碳在黏粒和粉粒的分布比例相近, 分别为 41.9% 和 41.1%; 而 NPK 处理下新增有机碳在黏粒的分布比例 (39.8%) 低于其在粉粒组分的分布比例 (47.3%). RS 处理下, 新增有机碳仅集中分布在砂粒和粉粒组分上. 可

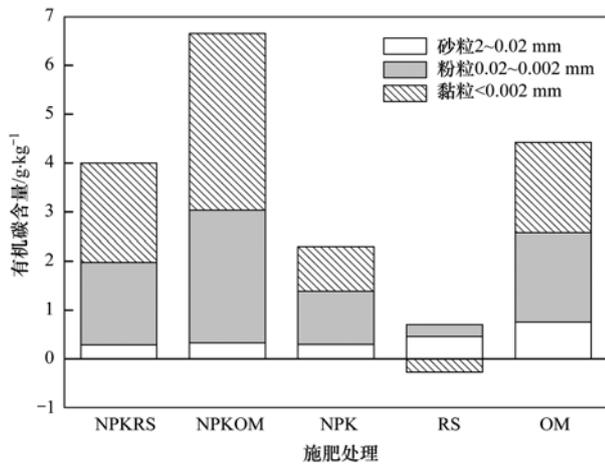


图 1 各施肥处理下不同大小矿物颗粒有机碳的变化

Fig. 1 Change in the content of organic carbon associated with particle-size separates under different fertilizer treatments

表 2 ^{13}C -NMR 图谱中各主要吸收峰的归属^[7,19,20]

Table 2 Tentative assignment of the major peaks in the ^{13}C -NMR spectra

化学位移范围	归属
0 ~ 45	系脂肪族化合物(角质和软木脂)中与甲基 C(δ 为 0 ~ 25)或聚亚甲基(δ 为 25 ~ 45) C
45 ~ 60	主要共振峰在 $\delta = 56$ 附近,系木质素来源的甲氧基或者含氮烷基 C
60 ~ 90	主要共振峰在 $\delta = 73$ 附近,系碳水化合物(纤维素、半纤维素和其他高分子碳水化合物以及醇类)中 C2 至 C6 结构
90 ~ 110	主要共振峰在 $\delta = 105$ 附近,系双烷氧碳(多糖和缩酮)
110 ~ 145	共振峰主要在 $\delta = 115$ 和 $\delta = 130$ 附近,主要为被羧基或者羧甲基取代的芳基 C 以及与 O、N 等取代基间位的连 H 芳基 C
145 ~ 160	主要共振峰在 $\delta = 150$ 附近,系木质素来源的被氧取代的酚基 C
160 ~ 190	主要共振峰在 $\delta = 174$ 附近,系羧酸、酯和酰胺 C

2.3.2 核磁共振波谱定量分析

由表 3 可知,土壤粉粒和黏粒组分有机质以烷氧碳为主(28.2% ~ 38.2%),其次为烷基碳(20.1% ~ 33.2%),再者为羰基碳(19.5% ~ 24.3%),芳香碳所占的比例相对较小(13.8% ~ 21.3%)。所有处理下,黏粒组分烷基碳和羰基碳的相对含量较粉粒组分分别增加 22.4% ~ 46.3% 和 4.8% ~ 19.7%,而烷氧碳和芳香碳的相对百分含量较粉粒组分分别降低 8.7% ~ 23.0% 和 20.7% ~ 28.8%,这与定性分析波谱特征的结果一致。甲氧基/含氮烷基碳(δ 为 45 ~ 60)和芳基碳(δ 为 110 ~ 145)分别是黏粒组分烷氧碳和芳香碳相对含量降低的主要原因。此外,由图 3 可知,所有处理黏粒组分有机质的芳化度明显低于粉粒组分,而其疏水性较粉粒组分高。

由表 3 还可知,与 RS 和 OM 相比,NPKRS、NPKOM 和 NPK 处理粉粒和黏粒组分烷氧碳的相对含量分别增加 2.9% ~ 7.1% 和 14.7% ~ 22.1%。与此同时,NPKRS 和 NPKOM 处理降低了粉粒和黏粒组分烷基碳的相对含量及其疏水性;而 NPK 处

理,施肥措施显著影响新增有机碳在各颗粒组分的分布。

2.3 粉粒和黏粒组分有机碳的结构表征

2.3.1 核磁共振波谱定性分析

所测核磁共振谱图主要分为 4 个功能区:烷基碳区(δ 为 0 ~ 45)、烷氧碳区(δ 为 45 ~ 110)、芳香碳区(δ 为 110 ~ 160)以及羰基碳区(δ 为 160 ~ 190)。对于各功能区更加详细的解释见表 2。各施肥处理下核磁共振谱图的形状基本一致(图 2),但是各功能区吸收峰的强度有差异,可见长期施肥虽并未对黏粒和粉粒结合的有机质的化学组成产生明显的影响,但施肥措施改变了各类 C 原子的相对含量。定性分析谱图还可知,黏粒组分有机质在烷基碳区、羰基碳区吸收峰的强度高于粉粒组分,而烷氧碳区、芳基碳区吸收峰的强度则低于粉粒组分。

理降低了粉粒和黏粒组分芳香碳的相对含量及其芳化度(图 3)。此外,施用栏肥的处理(NPKOM 和 OM)还提高了粉粒组分羰基碳的相对含量。施肥措施不仅影响各类型 C 的分布,而且还影响其绝对含量(表 4)。除了单施化肥和单施秸秆处理,其他施肥处理下各类型 C 的绝对含量均高于 CK 处理,其中以 NPKOM 处理下增幅最为明显,其烷基碳、烷氧碳、芳香碳和羰基碳分别较 CK 处理增加 6.8% ~ 15.6%、34.5% ~ 37.5%、25.6% ~ 32.9% 和 34.9% ~ 40.0%。

3 讨论

3.1 长期施肥对各颗粒组分有机碳含量的影响

本研究中,随着土壤粒径的减小,土壤颗粒结合的有机碳含量显著增加(表 1)。这与 Christensen 等^[21]和庞祥锋等^[22]的研究结果一致。这可能是因为土壤粒径愈细,比表面积愈大^[23],且黏粉粒还可通过配位体交换、氢键及疏水键、多价阳离子桥等作用吸附有机碳^[24]。与此同时,由于有机碳与土壤颗粒结合紧密,与空气接触少,因此很难被土壤微生物

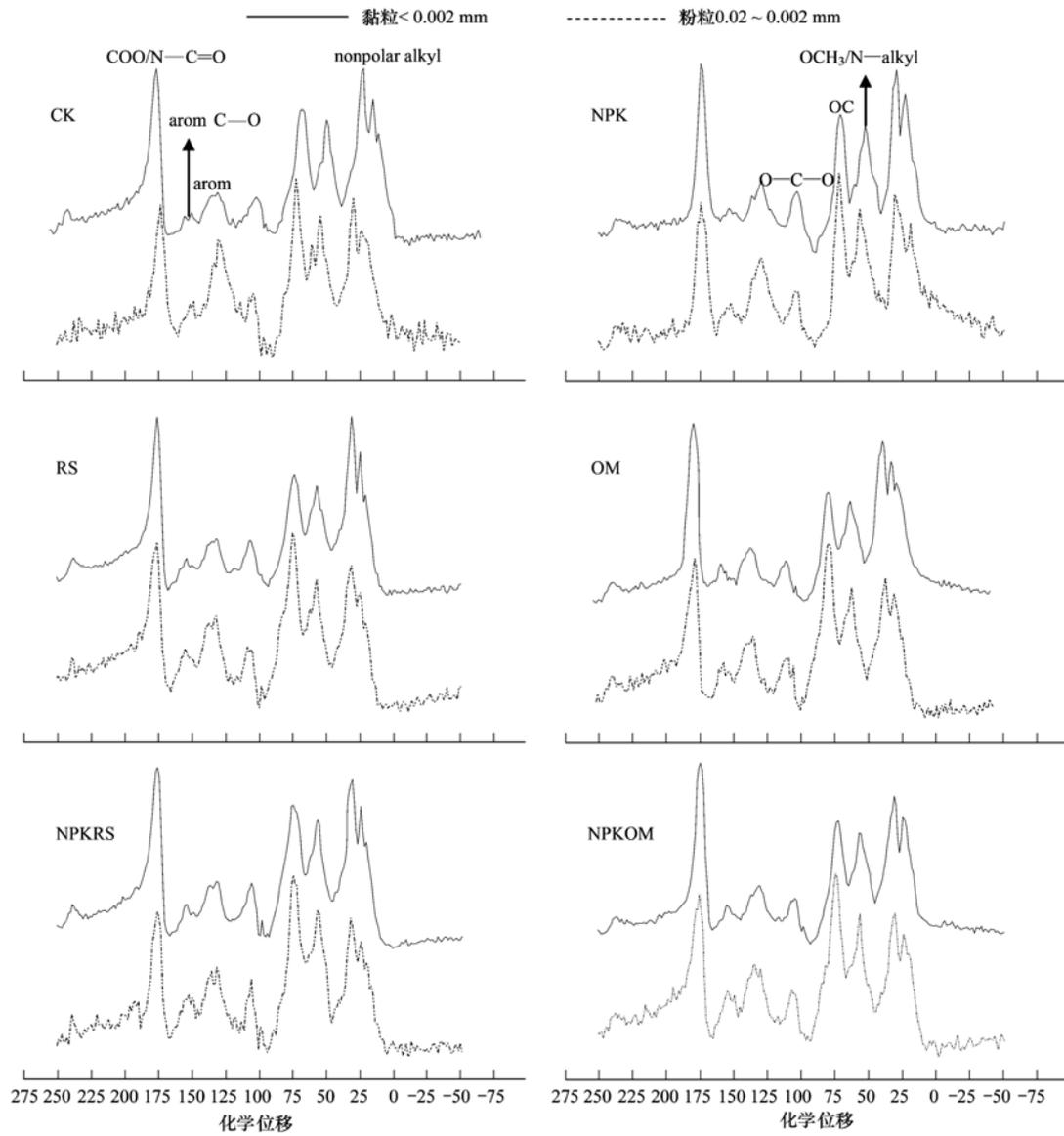


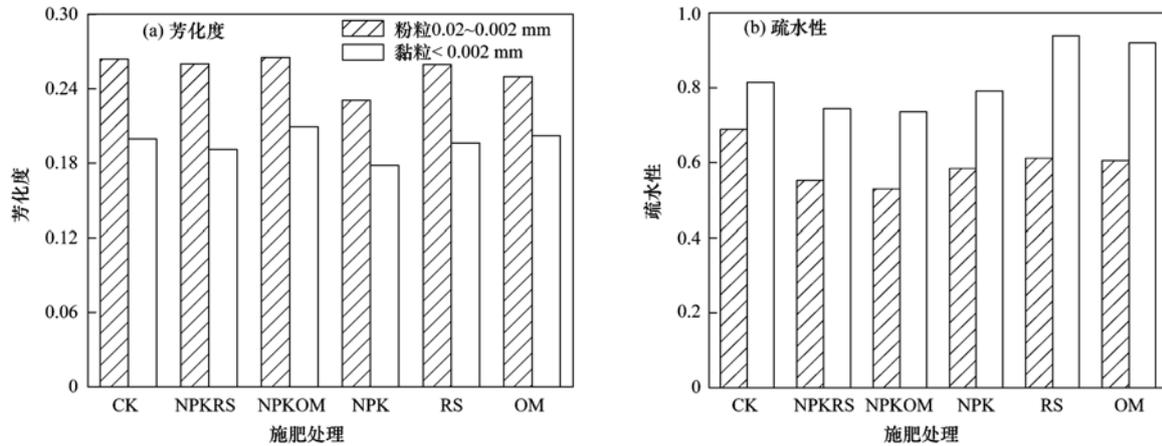
图 2 不同施肥处理下黏粒和粉粒土壤有机质的¹³C-NMR 图谱

Fig. 2 ¹³C-NMR spectra of clay- and silt- associated soil organic matter under different fertilizer treatments

表 3 不同施肥处理下粉粒和黏粒土壤有机质各类型 C 的相对含量/%

Table 3 Relative proportions of the different carbon species in silt- and clay- soils under different fertilizer treatments/%

处理	颗粒大小	烷基碳	烷氧碳				合计	芳香碳		羰基碳
			甲氧基/含氮烷基碳	含氧烷基碳	乙缩醛碳	芳基碳		酚基碳	合计	
CK		24.2	13.1	16.1	6.0	35.1	15.5	5.8	21.3	19.5
NPKRS		20.9	13.5	17.9	6.3	37.7	14.1	6.5	20.6	20.9
NPKOM	粉粒	20.1	14.3	16.7	7.0	38.0	13.9	7.1	21.0	20.9
NPK	0.02 ~ 0.002 mm	22.4	13.9	17.2	7.1	38.2	13.4	4.8	18.2	21.2
RS		22.9	14.0	16.1	5.7	35.7	14.3	5.9	20.2	21.2
OM		22.2	13.1	16.9	6.5	36.6	13.6	6.0	19.6	21.7
CK		29.6	11.5	15.5	4.8	31.8	10.7	4.7	15.3	23.3
NPKRS		28.0	11.8	16.5	6.1	34.4	10.1	4.6	14.7	22.9
NPKOM	黏粒	26.6	11.1	15.8	6.4	33.3	10.8	5.1	15.9	24.3
NPK	< 0.002 mm	30.4	11.0	15.5	6.6	33.1	9.6	4.2	13.8	22.7
RS		33.2	10.1	14.3	5.0	29.3	10.5	4.8	15.3	22.2
OM		32.4	10.3	13.6	4.4	28.2	10.3	5.3	15.5	23.9



芳化度 = 芳香碳 / (烷基碳 + 烷氧碳 + 芳香碳); 疏水性 = (烷基 C + 芳香 C) / (烷氧 C + 羰基 C)

图 3 不同施肥处理下粉粒和黏粒有机质的芳化度、疏水性

Fig. 3 Variations in aromaticity and hydrophobicity of silt- and clay-associated soil organic matter under different fertilizer treatments

表 4 不同施肥处理下粉粒和黏粒土壤有机质各类型 C 的绝对含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 4 Absolute amounts of the different carbon species in silt- and clay- soils under different fertilizer treatments/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

处理	烷基碳		烷氧碳		芳香碳		羰基碳	
	0.02 ~ 0.002 mm	<0.002 mm						
CK	4.4	13.5	6.4	14.5	3.9	7.0	3.5	10.6
NPKRS	4.4	15.2	8.0	18.7	4.4	8.0	4.4	12.4
NPKOM	4.7	15.6	8.8	19.5	4.9	9.3	4.9	14.3
NPK	4.4	15.3	7.5	16.7	3.5	6.9	4.1	11.5
RS	4.2	14.9	6.5	13.1	3.7	6.8	3.9	10.0
OM	4.8	17.0	7.9	14.8	4.2	8.2	4.7	12.6

物分解利用^[22]. 本研究中各粒级颗粒有机质碳氮比的变化也说明有机质经过逐步分解,粉粒和黏粒组分趋向形成比较稳定的腐殖质化合物^[1]. 本研究还发现,除了单施秸秆处理仅显著增加砂粒组分有机碳含量,其他施肥处理下砂粒、粉粒和黏粒组分有机碳含量均较对照显著增加,其中 NPKOM 处理下有机碳含量增加效果最为明显. 产生以上现象可能与不同施肥处理下有机碳的输入水平有关. 在本研究中 RS 处理下秸秆还田量较低,且作物产量偏低^[25]导致各颗粒组分有机碳积累不明显. 而施用有机栏肥或者化肥的处理,一方面通过增加作物产量而相应增加作物根系及其分泌物和作物残落物输入,另一方面通过施用栏肥直接输入大量有机质. 此外,施用有机肥和化肥可以增强土壤微生物活动,并且增加代谢分泌物,加速新增有机碳由粗颗粒转移至粉粒、黏粒组分,进而促进粉粒和黏粒组分有机碳的积累^[10].

由于土壤中不同大小颗粒的表面化学性质不同,其结合的有机碳的数量、化学性质存在区别^[26,27],因此各颗粒组分对于土壤有机碳的稳定作用也存在差异. 研究指出,土壤中砂粒结合有机碳

含量与粉粒和黏粒结合有机碳含量的比值较大,表明土壤有机碳较易矿化;反之,土壤有机碳较稳定、不易被生物所利用^[15,27]. 本研究中, NPKOM 和 NPKRS 处理促进了新增有机碳向黏粒组分转移,且这两种施肥处理下与黏粒、粉粒结合的新碳约占全部新碳的 94%; 而 NPK 处理下与黏粒结合的新碳少于与粉粒结合的含量,RS 处理下,新增有机碳主要分布在砂粒(图 1). 由此可见,本研究中有机肥与化肥配施较单施化肥和单施秸秆更有利于土壤新增有机碳的稳定.

3.2 长期施肥下土壤粉粒与黏粒组分有机碳的化学结构特征

目前已有许多研究表明,土壤碳的稳定性与有机质的化学组成密切相关^[28,29]. 因此,研究不同施肥措施下土壤有机碳的变化特征,不仅要分析土壤粉粒和黏粒组分有机碳含量的变化,还应考虑其化学结构组成对施肥处理的响应.

3.2.1 土壤粉粒和黏粒有机质的分子结构特征

本研究结果表明,土壤粉粒和黏粒组分有机质主要由烷氧碳、烷基碳、芳香碳和羰基碳组成. 周萍等^[28]应用¹³C-NMR 核磁共振技术对红壤性水稻

土和黄泥土本体土及各粒径团聚体中颗粒有机质 (POM) 的化学结构组成进行研究, 也表明两种水稻土 POM 均由以上 4 种类型的碳结构组成。

大量研究发现, 随着土壤颗粒粒径的减小, 烷氧碳的比例明显下降, 烷基碳的比例提高^[17,23]。本研究中, 土壤粉粒组分烷氧碳、芳香碳的相对含量高于黏粒组分, 而烷基碳、羧基碳的相对含量低于黏粒组分。这可能是由于不同粒级颗粒结合的有机质的分解程度不同^[1]。Christensen^[21] 和 Lützw 等^[30] 也指出与黏粒结合的有机质主要为微生物代谢产物或者微生物残体, 烷基碳和羧基碳的相对含量较高; 而粉粒组分较高比例的芳香碳主要来自于植物性来源的残留物的选择性保留。Feller 等^[31] 在对粉粒和黏粒有机质的碳水化合物组成的研究中发现, 黏粒组分有较高的二氨基庚二酸(主要来源于原核生物的细胞壁), 也证实了黏粒组分中微生物来源的化合物较粉粒组分高。此外, 粉粒组分有机质的疏水性也低于黏粒(图 3)。粉粒和黏粒组分有机质化学结构特征的差异进一步解释了黏粒组分有机碳的稳定性高于粉粒。

3.2.2 施肥对土壤有机质分子结构特征的影响

本研究结果表明, 与单施有机肥的处理相比, 在施用有机肥的基础上增施化肥降低了粉粒和黏粒组分烷基碳的相对含量, 相应地增加了烷氧碳的相对含量, 从而降低了烷基碳/烷氧碳的比值。根据 Kiem 等^[20] 和李翠兰等^[32] 的报道, 烷基 C/烷氧 C 比值可作为表征有机质腐殖化或分解程度的高低的指标, 比值越小则有机质的分解程度越低。可见, 在本研究中, 有机肥与化肥配施处理较有机肥单施处理有效地降低有机质的分解程度。原因可能是由于该试验区有机肥和化肥配施下其产量显著高于有机肥单施处理^[25], 因而增加了植物根系、分泌物和残落物的输入^[14]。Baumann 等^[33] 曾指出根系分泌物和残落物的烷氧碳比例高达 73.2%。笔者推测这些有机物质的大量输入可提高土壤有机质中烷氧碳的比例。另外, 有机肥与化肥配施处理显著促进了水稳性大团聚体的形成, 并且显著增加团聚体的稳定性, 这可以强化对有机质的物理保护, 从而在一定程度上降低了土壤有机质的分解程度^[1]。另一方面, 从绝对含量(表 4)看, 虽然 NPKOM 处理下烷基碳的相对含量明显低于其他处理, 但 NPKOM 处理下难分解的烷基碳和芳香碳绝对含量以及较易分解的烷氧碳的绝对含量均高于 CK、RS、NPK 和 NPKRS 处理。这可能是该处理下有大量来源于栏肥、微生物

代谢产物的化学抗性化合物以及作物根茬、作物凋落物、根系分泌物输入所致^[34]。从上述分析可以看出, NPKOM 处理主要是通过增加化学抗性化合物和碳水化合物的积累, 并且减缓活性组分的分解提高粉粒和黏粒组分有机碳含量。

与 NPKOM 和 NPKRS 处理相比, NPK 和 CK 处理增加了粉粒和黏粒组分有机质烷基碳的相对含量; 于此同时 NPK 处理下芳香碳的相对含量低于其他所有处理。这与郭素春等^[1] 对长期施用化肥潮土的有机碳分子结构的变化特征的研究结果一致。由于这两个处理下有机物质主要来源于植物根系、根系分泌物和作物残落物, 因此本研究认为这种变化是由于有机碳的再分配所致。Zhang 等^[35] 认为长期施用无机肥可以提高微生物活性和有机碳分解酶活性, 进而促进了可利用碳源的分解, 使抗性物质烷基碳相对积累。根据谷阳等报道^[36], 长期施用化肥除了可以引起微生物活性的增强还可加速土壤植物来源木质素的周转。CK 处理下烷基碳相对含量较高主要是由于在有机质输入较少的条件下, 周转周期较短(几年至几十年)的化合物会逐渐分解, 抗性化合物相对积累。Kiem 等^[20] 研究免耕、不施肥施种植作物以及化肥与栏肥配施 3 种处理下有机质的结构特征时也得到了相同的结论。本研究中粉粒和黏粒烷基碳/烷氧碳和芳基碳/芳香碳比值的变化同样表明 NPK 和 CK 处理加速了植物性来源有机质的分解^[20]。此外, 已有许多研究表明土壤有机质的疏水性程度越高, 有机质的矿化稳定性越高^[29,32]。NPK 处理下, 粉粒和粉粒有机质的疏水性低于 OM、RS 和 CK 处理, 且其有机质的芳化度明显低于其他所有处理(图 3), 这也解释了 NPK 下粉粒组分有机碳含量较低的原因^[37]。

4 结论

(1) 长期施肥显著促进了各颗粒组分有机碳的积累, 其中以 NPKOM 处理下增幅最明显(26.6% ~ 28.8%)。此外, 有机肥与化肥配施较单施化肥处理更有利于新增有机碳的稳定。

(2) 应用¹³C-NMR 波谱技术进行结构表征, 结果表明粉粒和黏粒组分有机质主要由烷基碳、烷氧碳、芳香碳和羧基碳组成, 其中粉粒组分烷氧碳、芳香碳的相对含量高于黏粒, 而烷基碳、羧基碳的相对含量低于黏粒。长期有机肥与化肥配施下粉粒和黏粒烷基碳相对含量较单施有机肥处理低, 而烷氧碳的相对含量则较单施有机肥处理高, 粉粒和黏

粒组分有机质的分解程度降低,该施肥措施有利于土壤有机碳的积累.长期单施化肥处理下粉粒和粉粒有机质的芳化度和疏水性都低于单施有机肥和不施肥处理,有机质的矿化稳定性较低.

参考文献:

- [1] 郭素春, 郁红艳, 朱雪竹, 等. 长期施肥对潮土团聚体有机碳分子结构的影响[J]. 土壤学报, 2013, **50**(5): 922-930.
- [2] Mao J, Olk D C, Fang X, *et al.* Influence of animal manure application on the chemical structures of soil organic matter as investigated by advanced solid-state NMR and FT-IR spectroscopy [J]. *Geoderma*, 2008, **146**(1-2): 353-362.
- [3] 冀建华, 刘秀梅, 侯红乾, 等. 鄱阳湖生态区长期施肥对稻田土壤碳汇效应与固碳潜力的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(2): 187-194.
- [4] 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.
- [5] 陈海心, 孙本华, 冯浩, 等. 应用 DNDC 模型模拟关中地区农田长期施肥条件下土壤碳含量及作物产量[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(9): 1782-1790.
- [6] 孙玉桃, 廖育林, 郑圣先, 等. 长期施肥对双季稻种植下土壤有机碳库和固碳量的影响[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(3): 732-740.
- [7] 张晋京, 窦森, 朱平, 等. 长期施用有机肥对黑土胡敏素结构特征的影响——固态¹³C核磁共振研究[J]. 中国农业科学, 2009, **42**(6): 2223-2228.
- [8] Gerzabek M H, Antil R S, Kögel-Knabner I, *et al.* How are soil use and management reflected by soil organic matter characteristics: a spectroscopic approach [J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, **57**(4): 485-494.
- [9] Schulten H R, Leinweber P. Influence of long-term fertilization with farmyard manure on soil organic matter: Characteristics of particle-size fractions [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1991, **12**(2): 81-88.
- [10] 张敬业, 张文菊, 徐明岗, 等. 长期施肥下红壤有机碳及其颗粒组分对不同施肥模式的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, **18**(4): 868-875.
- [11] Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles [J]. *Plant and Soil*, 1997, **191**(1): 77-87.
- [12] Wu T, Schoenau J J, Li F, *et al.* Influence of fertilisation and organic amendments on organic-carbon fractions in heilu soil on the loess plateau of China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, **168**(1): 100-107.
- [13] 佟小刚, 徐明岗, 张文菊, 等. 长期施肥对红壤和潮土颗粒有机碳含量与分布的影响[J]. 中国农业科学, 2008, **41**(11): 3664-3671.
- [14] 樊廷录, 王淑英, 周广业, 等. 长期施肥下黑垆土有机碳变化特征及碳库组分差异[J]. 中国农业科学, 2013, **46**(2): 300-309.
- [15] 刘骅, 佟小刚, 马兴旺, 等. 长期施肥下灰漠土矿物颗粒结合有机碳的含量及其演变特征[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(1): 84-90.
- [16] Guggenberger G, Zech W. Soil organic matter composition under primary forest, pasture, and secondary forest succession, region huetao norte, costa rica [J]. *Forest Ecology and Management*, 1999, **124**(1): 93-104.
- [17] Guggenberger G, Zech W, Haumaier L, *et al.* Land-use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soils: II. CPMAS and solution ¹³C NMR analysis [J]. *European Journal of Soil Science*, 1995, **46**(1): 147-158.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2005. 30-60.
- [19] Solomon D, Lehmann J, Kinyangi J, *et al.* Long-term impacts of anthropogenic perturbations on dynamics and speciation of organic carbon in tropical forest and subtropical grassland ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2007, **13**(2): 511-530.
- [20] Kiem R, Knicker H, Körschens M, *et al.* Refractory organic carbon in C-depleted arable soils, as studied by ¹³C NMR spectroscopy and carbohydrate analysis [J]. *Organic Geochemistry*, 2000, **31**(7-8): 655-668.
- [21] Christensen B T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates [A]. In: Stewart B A (Ed). *Advances in Soil Science* [M]. New York: Springer, 1992.
- [22] 庞祥锋, 宇万太, 苏壮, 等. 下辽河平原潮棕壤不同粒级碳和氮分布研究[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(11): 2081-2085.
- [23] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover [J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, **52**(3): 345-353.
- [24] Diekow J, Mielniczuk J, Knicker H, *et al.* Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilisation [J]. *Plant and Soil*, 2005, **268**(1): 319-328.
- [25] 徐祖祥. 西湖平原区连续 13 年定位施肥对麦、稻产量及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, **17**(1): 16-21.
- [26] 闫颖, 何红波, 白震, 等. 有机肥对棕壤不同粒级有机碳和氮的影响[J]. 土壤通报, 2008, **39**(4): 738-742.
- [27] Hassink J. Decomposition rate constants of size and density fractions of soil organic matter [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, **59**(6): 1631-1635.
- [28] 周萍, Piccolo A, 潘根兴, 等. 三种南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 III. 两种水稻土颗粒有机质结构特征的变化[J]. 土壤学报, 2009, **46**(3): 398-405.
- [29] Song X Y, Spaccini R, Pan G, *et al.* Stabilization by hydrophobic protection as a molecular mechanism for organic carbon sequestration in maize-amended rice paddy soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **458-460**: 319-330.
- [30] Lützw M V, Kögel-knabner I, Ekschmitt K, *et al.* SOM fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms [J]. *Soil Biology and Biochemistry*,

- 2007, **39**(9): 2183-2207.
- [31] Feller C, Beare M H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics [J]. *Geoderma*, 1997, **79**(1-4): 69-116.
- [32] 李翠兰, 张晋京, 高强, 等. 松辽平原春玉米高产农田土壤有机碳特征[J]. *水土保持学报*, 2013, **27**(5): 159-163.
- [33] Baumann K, Marschner P, Kuhn T K, *et al.* Microbial community structure and residue chemistry during decomposition of shoots and roots of young and mature wheat (*Triticum aestivum* L.) in sand [J]. *European Journal of Soil Science*, 2011, **62**(5): 666-675.
- [34] 罗璐, 周萍, 童成立, 等. 长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 692-697.
- [35] Zhang J J, Dou S, Song X Y. Effect of long-term combined nitrogen and phosphorus fertilizer application on ¹³C CPMAS NMR spectra of humin in a typical hapludoll of northeast China [J]. *European Journal of Soil Science*, 2009, **60**(6): 966-973.
- [36] 谷阳, 刘宁, 何红波, 等. 不同施肥管理对农田土壤木质素积累的影响[J]. *土壤通报*, 2013, **44**(6): 1470-1476.
- [37] Zhou P, Pan G X, Spaccini R, *et al.* Molecular changes in particulate organic matter (POM) in a typical Chinese paddy soil under different long-term fertilizer treatments [J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, **61**(2): 231-242.

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-lu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoextraction of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行