

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

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

重庆市 PM _{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子	吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)
2012 ~ 2013 年间北京市 PM _{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析	杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)
南京地区大气 PM _{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析	姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)
太原市大气 PM _{2.5} 中碳质组成及变化特征	张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)
朔州市市区 PM _{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征	刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)
中国 2013 年 1 月 PM _{2.5} 重污染过程卫星反演研究	薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)
高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究	廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)
重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量	覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)
海南五指山大气气态总汞含量变化特征	雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)
树叶烟尘中的有机碳和元素碳	陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)
介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析	姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)
长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价	母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)
河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素	王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)
岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)
岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析	卢丽, 王喆, 裴建国 (862)
两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例	闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)
三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)
夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析	梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)
南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比	程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)
夏季大辽河河口区水体反硝化及其影响因素	杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)
太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性	叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)
汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析	王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)
三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化	黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)
太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算	金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)
贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析	苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)
物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用	史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)
磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响	殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)
矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究	王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)
PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝	和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)
微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用	宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)
生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究	汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)
污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究	罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)
高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律	卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)
MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制	郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)
基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响	滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)
天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究	何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)
开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价	李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)
不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响	邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)
种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘灵飞 (1053)
江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价	金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)
镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用	章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)
高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响	李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)
黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究	李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)
单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究	叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)
不同有机物料中的磷形态特征研究	邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)
北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究	施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)
燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述	段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)
菌根真菌金属耐性机制研究进展	陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)
亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展	沈李东 (1133)
《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)	

不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响

邱晓蕾¹, 宗良纲^{1*}, 刘一凡¹, 杜霞飞¹, 罗敏², 汪润池²

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 环境保护部有机食品发展中心, 南京 210042)

摘要: 结合在有机农场近 10 年的定位研究, 通过同步采样分析, 比较了有机种植和常规种植两种不同模式下土壤团聚体组成、分配及团聚体内有机碳组分的差异。结果表明, 常规种植模式下随着团聚体粒级的减小, 团聚体 4 个粒级 (>1 mm、 $1 \sim 0.5$ mm、 $0.5 \sim 0.25$ mm 和 <0.25 mm) 的含量均值分别为 23.75%、15.15%、19.98% 和 38.09%, 而有机种植模式下各粒级团聚体 (>1 mm、 $1 \sim 0.5$ mm、 $0.5 \sim 0.25$ mm 和 <0.25 mm) 的含量分别为 9.73%、18.41%、24.46% 和 43.90%, <0.25 mm 微团聚体含量显著高于常规种植。有机种植模式提高了土壤有机碳和全氮含量, 平均值分别为 $17.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。有机种植模式下相同粒级间, 团聚体中重组有机碳平均含量显著高于常规种植, 且重组有机碳在 <0.25 mm 这部分稳定性有机碳主要储存场所的微团聚体中富集。有机种植模式下易氧化态碳在 >1 mm 大团聚体中的含量显著高于常规种植, 其它粒级间没有显著差异, 易氧化态碳在 >1 mm 大团聚体中富集。有机种植模式增加了土壤有机碳及其组分含量, 缓解了耕作对团聚体的破坏, 并增强了有机碳的稳定性。有机种植有利于土壤固碳, 这为进一步加快我国有机农业的发展提供了理论依据。

关键词: 有机种植; 土壤固碳; 土壤团聚体; 重组有机碳; 易氧化态碳

中图分类号: X144; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-1045-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.03.038

Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions

QIU Xiao-lei¹, ZONG Liang-gang^{1*}, LIU Yi-fan¹, DU Xia-fei¹, LUO Min², WANG Run-chi²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Organic Food Development Centre, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

Abstract: Combined with the research in an organic farm in the past 10 years, differences of soil aggregates composition, distribution and organic carbon fractions between organic and conventional cultivation were studied by simultaneous sampling analysis. The results showed that the percentages of aggregates (>1 mm, $1-0.5$ mm, $0.5-0.25$ mm and <0.25 mm) in the conventional cultivation were 23.75%, 15.15%, 19.98% and 38.09%, while those in organic cultivation were 9.73%, 18.41%, 24.46% and 43.90%, respectively. The percentage of <0.25 mm micro-aggregates was significantly higher in organic cultivation than that in conventional cultivation. Organic cultivation increased soil organic carbon (average of $17.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and total nitrogen contents (average of $1.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). Among the same aggregates in organic cultivation, the average content of heavy organic carbon fraction was significantly higher than that in conventional cultivation. This fraction accumulated in <0.25 mm micro-aggregates, which were main storage sites of stable organic carbon. In organic cultivation, the content of labile organic carbon in >1 mm macro-aggregates was significantly higher than that in conventional cultivation, while no significant difference was found among the other aggregates, indicating that the labile organic carbon was enriched in >1 mm macro-aggregates. Organic cultivation increased the amounts of organic carbon and its fractions, reduced tillage damage to aggregates, and enhanced the stability of organic carbon. Organic cultivation was therefore beneficial for soil carbon sequestration. The findings of this research may provide theoretical basis for further acceleration of the organic agriculture development.

Key words: organic cultivation; soil carbon sequestration; soil aggregates; heavy fraction of organic carbon; labile organic carbon

农田土壤作为全球碳库中最活跃的部分, 对温室效应与气候变化具有重要影响^[1]。中国是重要的农业大国, 提高农田土壤固碳能力对减缓温室效应具有深远意义。影响土壤有机碳固定的主要因素有气候条件、耕作制度、土壤理化性质和土壤管理措施等^[2~5], 不恰当的农业管理措施容易引起农田土壤碳库的损失, 由碳汇转为碳源。有机农业作为国际社会共识的具有环保理念的农业发展模式, 有利于发挥农业的减排作用, 而且通过施入生物物质和粪肥等有机投入品, 实施保护地耕作、轮作等农业措

施, 能增强土壤固碳作用^[6,7]。Melero 等^[8]比较了有机和常规轮作系统, 结果表明有机种植可以显著改善土壤性质, 提高有机质含量、促进微生物活性和土壤酶活。Birkhofer 等^[9]在长期有机种植系统中也获得了相同的结论。本课题组前期对有机种植系统持续 10 a 的定位研究表明, 有机种植不仅提高了土

收稿日期: 2014-09-05; 修订日期: 2014-11-05

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAK19B00)

作者简介: 邱晓蕾(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境质量与食品安全, E-mail: 2012103046@njau.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: zonglg@njau.edu.cn

壤有机质含量,同时促进了土壤腐殖质组分特性的变化,有利于土壤腐殖化进程^[10].我国有机农业起步较晚,但发展迅速,目前对有机农业的研究主要是相关制度、管理规范的制定,对有机和常规种植的比较研究大多是土壤肥力特性等方面,而针对有机种植模式下土壤有机碳积累特性和土壤团聚体对固碳作用影响机制的研究还鲜见报道.

土壤团聚体是组成土壤结构的基本单位,土壤团聚过程中导致颗粒分布的不同不仅影响着土壤系统中的水肥气热,而且对土壤固碳也具有重要作用^[11,12].因此,本研究立足于全球气候变化和农业可持续发展的大背景,以南京溧水普朗克有机农场长期定位监测的土壤为对象,比较有机种植和常规种植模式下土壤团聚体组成及团聚体内有机碳特性的差异,从土壤物理化学方面探究土壤的固碳机制,

以期完善农业生产的土壤施肥管理措施提供理论依据,合理调整农业产业结构,进一步加快我国有机农业的发展进程.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

从2003年开始,以南京溧水普朗克有机农场作为试验基地,采用GPS定位技术分别选取具有代表性的3个有机种植(OR)和3个常规种植(CN)监测地块,每个采样地块面积为0.5 hm².该农场为亚热带季风气候,年均降雨量1 037 mm,年均气温15.5℃,年均日照2 146 h.试验开始前,各个地块均抛荒数年,土壤养分含量较低.供试土壤为由黄棕壤发育演变的菜园土,2003年供试土壤表层(0~20 cm)基本理化性质见表1.

表1 不同种植模式下土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties under different cultivation patterns

种植模式	有机碳 /g·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	全磷 /g·kg ⁻¹	有效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹	pH
有机(OR)	9.34 ± 0.49a	1.31 ± 0.12a	0.21 ± 0.04a	19.35 ± 2.98a	148.8 ± 13.1a	5.86 ± 0.09a
常规(CN)	9.27 ± 0.23a	1.36 ± 0.07a	0.19 ± 0.05a	18.40 ± 0.71a	138.5 ± 23.6a	5.82 ± 0.21a

1.2 试验设置

本研究选择有机(OR)和常规(CN)两种不同的种植模式.其中有机种植模式下设置3个地块分别

为OA、OB、OC,于2003年获得有机认证,常规种植模式下设置3个地块分别为CA、CB、CC,不同地块GPS定位信息、管理方式和种植作物类型见表2.

表2 试验区信息

Table 2 Information of experimental area

种植模式	各个地块的经纬度	管理方式	种植作物
有机种植(OR)	31°35'10"N, 119°03'55"E 31°35'10"N, 119°03'58"E 31°35'12"N, 119°04'01"E	经过有机认证的商品有机肥,灯诱法捕虫,无植保化学投入品	油菜,白菜,萝卜,胡萝卜,生菜,西红柿,青菜,黄瓜等采用轮作的方式
常规种植(CN)	31°35'45"N, 119°04'07"E 31°35'44"N, 119°03'59"E 31°35'36"N, 119°04'03"E	化肥、植保化学投入品	油菜,白菜,萝卜,胡萝卜,生菜,西红柿,青菜,黄瓜等采用轮作的方式

各地块均采用轮作的方式种植蔬菜,蔬菜种类有油菜、白菜、萝卜、胡萝卜、生菜、西红柿、青菜和黄瓜等.有机种植地块所施用有机肥(有机质含量≥250 g·kg⁻¹,速效氮612.5 mg·kg⁻¹,pH 6.24)均经过OFDC有机认证,平均每季施用量7.5 t·hm⁻²,生产中采用物理和生物措施防治病虫害.常规种植模式主要施用尿素(N≥46%),过磷酸钙(P₂O₅≥16%)、氯化钾(K₂O≥50%),平均每季施氮量为200~400 kg·hm⁻²,按氮、磷、钾质量比1:0.35:0.15的比例施肥;植保化学投入品为市售多菌灵、阿维菌素及分除虫菊酯(使用量为生产上推荐用量).其他栽培管理措施保持一致.

1.3 样品采集与测定方法

本研究于2013年4月初采集上述两种不同种植模式各3个地块的土壤样品,采用棋盘法在每个地块选择8~10个采样点,采集0~20 cm耕层土样,混合均匀后按四分法保留1 kg左右,经自然风干,研磨过筛供相关化学指标测定用.用于团聚体测定的土壤样品采样时应尽量保持土块结构的完整,避免挤压,采集0~20 cm耕层土样,保留1 kg左右,自然风干备用.

土壤基本理化性质采用常规方法测定^[13].土壤易氧化态碳(LOC)采用333 mmol·L⁻¹高锰酸钾氧化法测定^[14].

团聚体的分级:采用湿筛法^[15],利用自动振荡筛对土壤团聚体进行分级,共分4个粒级(>1 mm、1~0.5 mm、0.5~0.25 mm和<0.25 mm)。具体操作:称取风干土样100 g,置于孔径为1 mm、0.5 mm和0.25 mm组成的套筛的最上层,套筛下面的水桶调整其水面高度至最上层筛子里的土样刚好淹没的状态。然后用蒸馏水在室温条件下浸润5 min,再以每次30 min的速度在水中振荡2 min。结束后将筛子上的团聚体冲洗到烧杯中,<0.25 mm的团聚体需要在筒中沉降24 h。收集的各级团聚体样品连同烧杯在50℃下烘干,称重,计算各粒级团聚体的百分含量,同时将烘干的团聚体磨细过0.25 mm、0.149 mm筛后备用。

土壤密度分组采用鲁如坤^[16]的方法,并根据文献^[17]进行改进。称取5 g研磨过0.25 mm孔径土壤筛的风干土样于50 mL离心管中,加入25 mL 1.8 g·cm⁻³ ZnBr₂重液,振荡1 h后以3 000 r·min⁻¹离心10 min,将上层液体倒入烧杯,重新加入重液,重复上述过程2~3次,直至重液中无轻组物质,离心管剩余物质为土壤重组。用100 mL 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂溶液洗涤,再用200 mL蒸馏水冲洗。于60℃下烘干,称重,计算重组百分比。将烘干后的重组土样研磨过筛,测定其有机碳含量,再乘以重组百分比计算该重组有机碳含量。

1.4 数据处理

数据处理通过Excel 2003软件进行,显著性检验采用SPSS 16.0软件。

土壤团聚体稳定性用平均重量直径(MWD)表示:

$$MWD = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i$$

式中, r_i 是第*i*个筛子孔径(mm), $r_0 = r_1$, $r_n = r_{n+1}$, m_i 为第*i*个筛子的团聚体重量百分比。

各粒级团聚体中重组有机碳储量 = 该粒级重组有机碳含量 × 该粒级团聚体百分数

各粒级团聚体中轻组有机碳储量 = 该粒级总有机碳含量 × 该粒级团聚体百分数 - 该粒级团聚体中重组有机碳储量

2 结果与分析

2.1 不同种植模式下土壤团聚体的分布

土壤中形成的不同团聚体与种植模式有着密切的关系,因而有机种植和常规种植的土壤不同粒级团聚体分布存在差异。如图1所示,有机种植模式

下随着团聚体粒级的减小,团聚体百分含量均值分别为9.73%、18.41%、24.46%和43.90%,呈现逐级增加的趋势,而常规种植模式下随团聚体粒级的减小,各粒级团聚体百分含量分别为23.75%、15.15%、19.98%和38.09%,>1 mm大团聚体所占比例高于另外两种大团聚体。两种种植模式下都是<0.25 mm的微团聚体的比例最高。

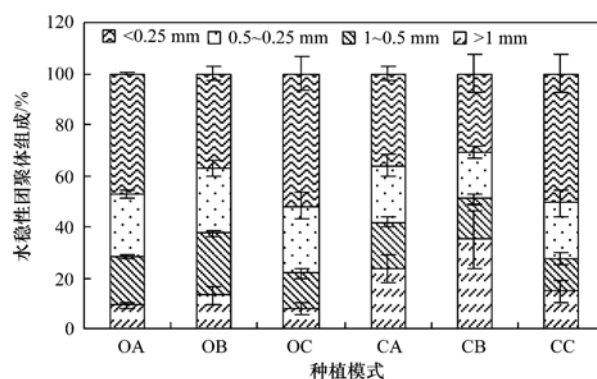


图1 不同种植模式下土壤团聚体组成

Fig. 1 Distribution of soil aggregates under different cultivation patterns

与常规种植相比,除了CC地块,有机种植模式下土壤>1 mm的大团聚体含量显著低于常规种植($P < 0.05$);除了OB和CC地块,<0.25 mm的微团聚体在有机种植模式下百分含量要高于常规种植,差异显著($P < 0.05$);1~0.5 mm和0.5~0.25 mm的团聚体在两种种植模式下没有差异。以上表明有机种植模式下促进了土壤微团聚体的形成,同时使土壤>1 mm的大团聚体所占比例减少。

不同种植模式不仅对土壤团聚体分布产生影响,也会导致团聚体稳定性的不同。有机种植模式下土壤团聚体的平均重量直径总体上小于常规种植(图2),即团聚体稳定性低于常规种植。其原因主要是受耕作的影响,更为精耕细作的种植模式使土壤>1 mm的大团聚体受到破坏,大团聚体所占比例减少,

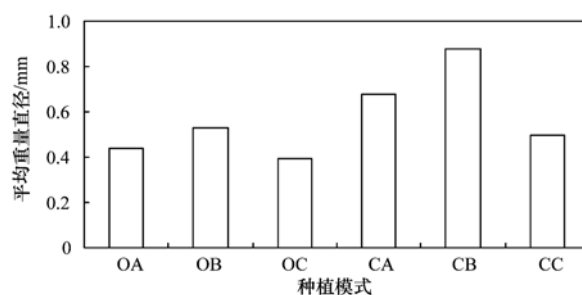


图2 不同种植模式对土壤团聚体平均重量直径(MWD)的影响

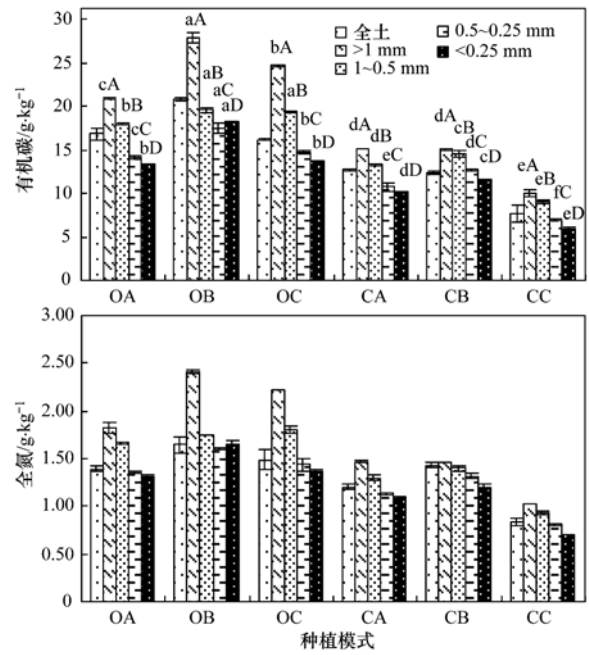
Fig. 2 Mean weight diameter (MWD) in soil aggregates under different cultivation patterns

微团聚体增加. 而微团聚体比大团聚体稳定性更高, 有机种植模式增加了稳定性更高的微团聚体数量.

2.2 不同种植模式下土壤团聚体中有机碳、全氮的分布

土壤的不同团聚体影响着团聚体内有机碳和全氮含量的分布规律. 如图 3 所示, 有机种植模式下 3 个地块土壤的平均有机碳含量为 $17.95\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 显著高于常规种植的 $10.91\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 有机种植模式下随土壤团聚体粒级的减小, 土壤有机碳平均含量分别为 24.44 、 18.92 、 15.39 和 $15.11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 而常规种植下则分别为 13.40 、 12.26 、 10.12 和 $9.22\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 两种种植模式下的有机碳含量均随团聚体粒级的减小而降低, 即大团聚体有机碳含量高于微团聚体, 且不同粒径间的有机碳含量均表现出显著性差异 ($P < 0.05$); 相同粒径间, 有机种植模式下的有机碳含量均显著高于常规种植 ($P < 0.05$). 全氮的分布规律与有机碳的一致, 有机种植模式下土壤全氮含量为 $1.51\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 同样显著高于常规种植的 $1.16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

从各粒径团聚体的 C/N 比来看 (表 3), 两种种植模式下的 C/N 比随团聚体粒级的减小基本呈现下降的趋势, C/N 比降低的部分表示有机质降解程度的增加^[18], 说明有机碳在微团聚体中的稳定性要高于大团聚体. 有机种植模式下 C/N 比从 $>1\text{ mm}$ 大团聚体到 $<0.25\text{ mm}$ 微团聚体的变化范围为 $11.57 \sim 10.01$, 而常规种植模式下 C/N 比从大团聚体到微团聚体的变化范围为 $10.26 \sim 8.55$. 相同粒



图中小写字母若不同, 表明在不同地块相同粒径团聚体间差异显著 ($P < 0.05$); 大写字母若不同, 表明在相同地块不同粒径团聚体间差异显著 ($P < 0.05$). 下同

图 3 不同种植模式下土壤团聚体中有机碳、全氮含量

Fig. 3 Contents of organic carbon and total nitrogen in soil aggregates under different cultivation patterns

级间, 有机种植的 C/N 比高于常规种植, 说明常规种植模式下有机碳降解程度更高, 这是由于有机种植模式每年有新鲜有机肥的投入, C/N 比高, 而常规种植模式没有充足的有机物料投入, 土壤有机碳逐渐分解, 含量减少.

表 3 不同种植模式下土壤各粒径水稳性团聚体 C/N 比

Table 3 C/N ratio in soil aggregates under different cultivation patterns

团聚体粒径/mm	OA	OB	OC	CA	CB	CC
>1	11.45	11.57	11.09	10.26	10.26	9.74
$1 \sim 0.5$	10.74	11.18	10.77	10.19	10.38	9.65
$0.5 \sim 0.25$	10.39	10.83	10.21	9.44	9.65	8.55
<0.25	10.25	11.09	10.01	9.28	9.58	8.56

2.3 不同种植模式下土壤团聚体中重组有机碳的分布

土壤中重组有机碳矿化速率较低^[19,20], 对重组有机碳的研究可以揭示土壤碳汇功能的意义. 图 4 显示了不同种植模式下各粒径团聚体中的重组有机碳含量. 从中可以看出, 与常规种植相比, 相同粒径间有机种植模式下土壤团聚体中的平均重组有机碳含量高于常规种植, 且差异显著 ($P < 0.05$), 说明在有机种植模式下各团聚体中储存了较多的稳定性有机碳. 在 3 种大团聚体中, 重组有机碳含量随着粒

级的减小而降低, 这与有机碳的分布规律一致. 而 $<0.25\text{ mm}$ 的微团聚体中重组有机碳含量则出现上升的趋势, 含量高于 $0.5 \sim 0.25\text{ mm}$ 团聚体中的重组有机碳约 $0.70 \sim 3.30\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 除了 CC 地块, 其它 5 个地块均有此规律, 且通过单因素方差分析, 差异显著 ($P < 0.05$). 通过计算各粒径团聚体中重组有机碳占该粒径总有机碳的比例看出, 随着粒径的减小, 大团聚体中重组有机碳的占比分别为 84% 、 89% 和 91% , 而微团聚体中比例甚至达到了 100% . 以上说明重组有机碳在微团聚体中富集, 进一步说

明微团聚体中储存的有机碳更为稳定,而有机种植模式更易于重组有机碳的积累.

表 4 是各粒级团聚体中重组和轻组有机碳的储量,从中可以看出,有机种植模式下,随着团聚体粒级的减小重组有机碳的储量有增加的趋势,常规种植模式下也有类似的趋势,但 >1 mm 的大团聚体也储存了较多的重组有机碳. 相比于常规种植,有机种植模式下 <0.25 mm 的微团聚体中储存了更多的重组有机碳. 两种种植模式下轻组有机碳储量均随着团聚体粒级的减小而降低. 说明随着粒级的减小,土壤有机碳趋于稳定.

2.4 不同种植模式下团聚体中易氧化态碳的分布

土壤中易氧化态碳是用333 mmol·L⁻¹高锰酸

表 4 不同种植模式下土壤团聚体中重组有机碳和轻组有机碳储量 /g·kg⁻¹

Table 4 Reserve of organic carbon in heavy and light fractions in soil aggregates under different cultivation patterns/g·kg ⁻¹												
团聚体粒级 /mm	OA		OB		OC		CA		CB		CC	
	重组	轻组	重组	轻组	重组	轻组	重组	轻组	重组	轻组	重组	轻组
>1	1.41	0.41	2.49	1.07	1.45	0.44	3.34	0.09	5.04	0.09	1.25	0.20
1~0.5	2.92	0.37	3.51	1.05	2.19	0.42	2.25	0.09	2.20	0.02	1.02	0.11
0.5~0.25	2.91	0.39	3.35	0.90	3.38	0.37	2.21	0.08	2.23	0.02	1.35	0.09
<0.25	6.04	0.08	6.08	0.46	7.02	0.00	4.07	0.00	3.97	0.00	3.03	0.00

钾氧化的一部分有机碳,其周转时间较短,可作为土壤活性有机碳的指标^[21]. 从表 5 可以看出,有机种植模式下全土的易氧化态碳(LOC)含量变化范围为 2.78~3.72 g·kg⁻¹,而常规种植模式下 LOC 含量范围为 1.37~3.16 g·kg⁻¹. 有机种植和常规种植模式下各粒级团聚体中 LOC 的分布规律不同. 有机种植模式下,>1 mm 大团聚体中的 LOC 均显著高于其他团聚体,1~0.5 mm、0.5~0.25 mm 随之含量下降,但 OB 地块并没有表现出显著性差异,<0.25 mm 微团聚体中的 LOC 分布没有明显规律. 与有机种植不同,常规种植模式下

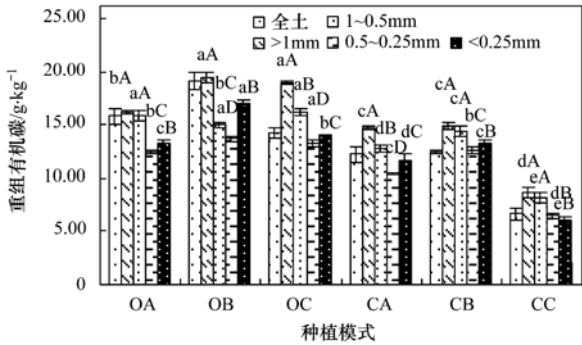


图 4 不同种植模式下土壤团聚体中重组有机碳含量

Fig. 4 Contents of organic carbon in heavy fraction in soil aggregates under different cultivation patterns

3 个地块间 LOC 含量的变化无明显规律,大体上粒级小的团聚体 LOC 含量略低,但并非全部有显著差异.

相同粒级团聚体间,有机种植模式下 >1 mm 大团聚体中的 LOC 平均含量为 5.53 g·kg⁻¹,明显高于常规种植的 3.24 g·kg⁻¹(*P*<0.01),1~0.5 mm、0.5~0.25 mm 和 <0.25 mm 这 3 种粒级间的 LOC 含量也表现为有机种植略高于常规种植,但没有显著性差异. 由此说明,LOC 在有机种植和常规种植间的差异主要体现在 >1 mm 的大团聚体中,且 LOC 更易于在 >1 mm 的大团聚体中富集.

表 5 不同种植模式下土壤团聚体中易氧化态碳含量¹⁾/g·kg⁻¹

Table 5 Contents of labile organic carbon in soil aggregates under different cultivation patterns/g·kg ⁻¹						
种植模式	OA	OB	OC	CA	CB	CC
全土	2.91±0.23	3.72±0.24	2.78±0.46	3.16±0.11	2.70±0.18	1.37±0.21
>1 mm	5.09±0.00 abA	5.66±0.89 aA	5.83±0.69 aA	4.44±0.17 bA	2.88±0.68 cAB	2.41±0.34 cA
1~0.5 mm	3.39±0.34 bB	3.52±0.00 abB	4.37±0.00 aB	3.36±0.34 bB	3.48±0.85 abA	2.05±0.51 cA
0.5~0.25 mm	2.18±0.34 bC	3.39±0.53 aB	2.55±0.17 abC	2.40±0.34 bC	2.64±0.00 abAB	1.09±0.51 cB
<0.25 mm	2.91±0.34 abBC	3.77±0.36 aB	2.18±0.34 bC	3.00±0.17 abBC	2.40±0.00 bB	1.09±0.51 cB

1) 表中小写字母若不同,表明在不同地块相同粒级团聚体间差异显著(*P*<0.05);大写字母若不同,表明在相同地块不同粒级团聚体间差异显著(*P*<0.05)

3 讨论

3.1 不同种植模式下土壤团聚体组成及团聚体碳、氮
土壤团聚体对土壤固碳具有重要意义. 研究表明,土壤表层约 90% 的有机碳储存在团聚体中^[22].

土壤有机质和土壤团聚体存在相互作用的关系,土壤有机质与原生矿物颗粒结合成稳定的土壤团聚体,稳定的团聚体又为土壤有机质提供物理保护^[23~26].

有机质作为团聚体重要的胶结剂,可提高土壤

中大团聚体的数量^[27],促进团聚体的形成和稳定性^[28,29]. Six 等^[30]的研究提出了以“大团聚体周转”为核心的团聚体形成模型,认为新鲜有机物质的投入将促进土壤大团聚体的形成,而大团聚体内颗粒有机物则有助于微团聚体的形成,在颗粒有机物分解或其他干扰过程中大团聚体破碎,进而释放出微团聚体.在本研究中,有机种植模式下大团聚体比例降低,团聚体稳定性低于常规种植,这是因为有机农场经济受市场的影响,供试有机蔬菜地单位面积的轮作频率、复种指数高于常规种植.根据 Six 等^[30]的研究,耕作过程破坏了大团聚体,释放出更多的微团聚体,所以导致在这种有机种植模式下大团聚体百分含量减少,微团聚体增多.但有机种植模式下投入大量的有机肥,各粒级团聚体中有机碳含量高于常规种植,更多的有机胶体可以促进土壤的团聚作用,从而在一定程度上缓解耕作对团聚体的破坏.

另一方面,C/N 比可作为有机物腐殖化程度的指标^[31],C/N 比越低,有机物的腐解程度越高.在本研究中,C/N 比随着团聚体粒级的减小而降低,表明有机物在细颗粒组分的腐解程度高于大颗粒组分,意味着微团聚体中有机碳稳定性逐渐增加.郭素春等^[32]分析了潮土团聚体中有机碳的分子结构,发现随着团聚体粒级的减小,烷基碳/烷氧碳比率增加,有机质腐解程度增强,这与本研究的结果一致.有机种植模式下 <0.25 mm 的微团聚体中储存了约 40.7% 的有机碳,而常规种植微团聚体中储存的有机碳约为 33.1%.有机种植增加了微团聚体的百分含量,虽然大团聚体受到耕作的影响,稳定性较低,但总体上形成的团聚体特性有利于土壤的固碳作用,有机种植模式下较多的微团聚体储存的有机碳更多,且更稳定.

3.2 不同种植模式下土壤团聚体中有机碳组分

土壤中有机的周转时间从几年到几千年不等.根据周转时间的长短,可将土壤有机碳分成三个不同碳库即活性碳库(周转时间为几年),缓效性碳库(几年到几十年)和惰性碳库(几百到几千年)^[33,34].对土壤有机碳进行分组可以更好地探究有机碳在团聚体中的固存机制.

重组有机质主要存在于有机无机复合体中,是与矿物结合的一部分有机质,可以代表缓效性和惰性碳库.徐江兵等^[35]的研究表明,施用有机肥后土壤中的矿物结合态有机碳有较大幅度的提高.廖敏等^[36]研究了长期不同施肥管理对稻田土壤有机碳

的影响,其中施入有机肥能显著提高重组有机碳含量,并提高重组有机碳在总有机碳中的百分比.本研究中有有机种植模式下施用有机肥后重组有机碳含量增加,受总有机碳含量低的影响,常规种植模式下轻组、重组有机碳的储量都低于有机种植.相比于有机种植,常规种植模式下轻组有机碳减少了 80% 以上,而重组有机碳减少了 40% 左右,说明在有机物料投入较少的情况下,有机碳优先分解活性组分.微团聚体对有机碳的物理保护作用阻碍了微生物对有机碳的分解,重组有机碳在微团聚体中明显富集,因此微团聚体中的重组有机碳是土壤有机碳固存的重要部分,可能是有机种植模式有利于土壤固碳的机制所在.

易氧化态碳是土壤中不稳定的一部分有机碳,其周转时间较短,对土地利用变化反应较为敏感,属于有机碳中的活性有机碳.不同种植模式会影响土壤易氧化态碳的积累.有机种植模式下 >1 mm 大团聚体中的 LOC 含量明显高于常规种植,而其他粒级团聚体中的 LOC 含量均没有显著性差异,说明 LOC 在大团聚体中的明显富集,周萍等^[37]的研究也得到了一致的结果.施用有机肥增加了土壤中的新鲜有机质,进而增加了土壤中的 LOC,这与张瑞等的研究结果一致^[38],而 LOC 在大团聚体中富集,说明新鲜有机质首先储存于大团聚体中,这也验证了大团聚体中的有机碳较不稳定.常规种植模式下,LOC 含量较低,原因是有机碳含量低,且随着有机碳的矿化,大团聚体之间 LOC 含量的差异逐渐缩小.有机种植模式下各粒级土壤活性有机碳的分配比例(LOC/SOC)范围为 17.4%~22.8%,常规种植为 19.6%~24.2%.由此可见,虽然有机种植模式下 LOC 含量高于常规种植,但其分配比例却并没有显著提高.说明有机种植不仅增加了土壤总有机质含量,促进了活性有机碳的增长,提高土壤速效养分,另一方面重组有机碳的增加也促进了缓效性和惰性碳库的积累,因而能促进土壤固碳.

4 结论

(1)不同种植模式影响着土壤团聚体的分布及稳定性.有机种植模式下随着团聚体粒级的减小,团聚体百分含量逐渐增加,<0.25 mm 的微团聚体占比最高,而常规种植模式下,>1 mm 大团聚体所占比高于 1~0.5 mm 和 0.5~0.25 mm 这两种大团聚体,<0.25 mm 的微团聚体百分含量显著低于有机种植.有机种植模式下有机碳含量显著提高,

能促进土壤的团聚作用,在一定程度上缓解耕作对团聚体的破坏。

(2) 土壤团聚体中有机碳组分分析结果表明,团聚体内碳、氮含量及 C/N 比随着团聚体粒级的减小而降低,重组有机碳在微团聚体中富集,而易氧化态碳在大团聚体中富集,表明随着团聚体粒级的减小有机碳趋于稳定。

(3) 有机种植模式下土壤中较多的微团聚体储存的有机碳更多,且更稳定,更利于重组有机碳的积累,增强有机碳的稳定性,促进土壤固碳。

参考文献:

- [1] Ouyang W, Qi S S, Hao F H, *et al.* Impact of crop patterns and cultivation on carbon sequestration and global warming potential in an agricultural freeze zone [J]. *Ecological Modelling*, 2013, **252**: 228-237.
- [2] Xiong X, Grunwald S, Myers D B, *et al.* Interaction effects of climate and land use/land cover change on soil organic carbon sequestration [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **493**: 974-982.
- [3] Choudhury S G, Srivastava S, Singh R, *et al.* Tillage and residue management effects on soil aggregation, organic carbon dynamics and yield attribute in rice-wheat cropping system under reclaimed sodic soil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, **136**: 76-83.
- [4] Miller A J, Amundson R, Burke I C, *et al.* The effect of climate and cultivation on soil organic C and N [J]. *Biogeochemistry*, 2004, **67**(1): 57-72.
- [5] Brar B S, Singh K, Dheri G S, *et al.* Carbon sequestration and soil carbon pools in a rice-wheat cropping system: effect of long-term use of inorganic fertilizers and organic manure [J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, **128**: 30-36.
- [6] Küstermann B, Kainz M, Hülsbergen K J. Modeling carbon cycles and estimation of greenhouse gas emissions from organic and conventional farming systems [J]. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 2008, **23**(1): 38-52.
- [7] Jarecki M K, Lal R. Crop management for soil carbon sequestration [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2003, **22**(6): 471-502.
- [8] Melero S, Porras J C R, Herencia J F, *et al.* Chemical and biochemical properties in a silty loam soil under conventional and organic management [J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, **90**(1-2): 162-170.
- [9] Birkhofer K, Bezemer T M, Bloem J, *et al.* Long-term organic farming fosters below and aboveground biota: Implications for soil quality, biological control and productivity [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(9): 2297-2308.
- [10] 褚慧, 宗良纲, 汪张懿, 等. 不同种植模式下菜地土壤腐殖质组分特性的动态变化[J]. *土壤学报*, 2013, **50**(5): 931-939.
- [11] Yoo G, Yang X M, Wander M M. Influence of soil aggregation on SOC sequestration: A preliminary model of SOC protection by aggregate dynamics [J]. *Ecological Engineering*, 2011, **37**(3): 487-495.
- [12] 刘中良, 宇万太, 周桦, 等. 不同有机肥输入量对土壤团聚体有机碳组分的影响[J]. *土壤学报*, 2011, **48**(6): 1149-1157.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 30-172.
- [14] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, **46**(7): 1459-1466.
- [15] 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.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 111-119.
- [17] Freixo A A, de A Machado P L O, dos Santos H P, *et al.* Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, **64**(3-4): 221-230.
- [18] Kiem R, Knicker H, Kögel-Knabner I. Refractory organic carbon in particle-size fractions of arable soils I: distribution of refractory carbon between the size fractions [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, **33**(12): 1683-1697.
- [19] Whalen J K, Bottomley P J, Myrold D D. Carbon and nitrogen mineralization from light- and heavy-fraction additions to soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**(10): 1345-1352.
- [20] 尹云锋, 蔡祖聪. 利用 $\delta^{13}\text{C}$ 方法研究添加玉米秸秆下红壤总有机碳和重组有机碳的分解速率[J]. *土壤学报*, 2007, **44**(6): 1022-1027.
- [21] Tian J, Lu S H, Fan M S, *et al.* Labile soil organic matter fractions as influenced by non-flooded mulching cultivation and cropping season in rice-wheat rotation [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, **56**: 19-25.
- [22] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, **28**(4-5): 665-676.
- [23] Wang H, Guan D S, Zhang R D, *et al.* Soil aggregates and organic carbon affected by the land use change from rice paddy to vegetable field [J]. *Ecological Engineering*, 2014, **70**: 206-211.
- [24] Six J, Bossuyt H, Degryze S, *et al.* A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, **79**(1): 7-31.
- [25] Chevallier T, Blanchart E, Albrecht A, *et al.* The physical protection of soil organic carbon in aggregates: a mechanism of carbon storage in a Vertisol under pasture and market gardening (Martinique, West Indies) [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, **103**(2): 375-387.

- [26] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. *Journal of Soil Science*, 1982, **33**(2): 141-163.
- [27] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 不同施肥处理对黑垆土各粒级团聚体中有机碳含量分布的影响[J]. *土壤学报*, 2010, **47**(5): 931-938.
- [28] 郭菊花, 陈小云, 刘满强, 等. 不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体的分布及有机碳、氮含量的影响[J]. *土壤*, 2007, **39**(5): 787-793.
- [29] 史奕, 陈欣, 沈善敏. 有机胶结形成土壤团聚体的机理及理论模型[J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(11): 1495-1498.
- [30] 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.
- [31] Baldock J A, Oades J M, Waters A G, *et al.* Aspects of the chemical structure of soil organic materials as revealed by solid-state ^{13}C NMR spectroscopy [J]. *Biogeochemistry*, 1992, **16**(1): 1-42.
- [32] 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.
- [33] Elliott E T, Paustian K, Frey S D. Modeling the measurable or measuring the modelable: A hierarchical approach to isolating meaningful soil organic matter fractionations [J]. *Evaluation of Soil Organic Matter Models*, 1996, **38**: 161-179.
- [34] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, *et al.* Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, **51**(5): 1173-1179.
- [35] 徐江兵, 李成亮, 何园球, 等. 不同施肥处理对旱地红壤团聚体中有机碳含量及其组分的影响[J]. *土壤学报*, 2007, **44**(4): 675-682.
- [36] 廖敏, 彭英, 陈义, 等. 长期不同施肥管理对稻田土壤有机碳库特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, **25**(6): 129-133, 138.
- [37] 周萍, 宋国菡, 潘根兴, 等. 南方三种典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 I. 团聚体物理保护作用[J]. *土壤学报*, 2008, **45**(6): 1063-1071.
- [38] 张瑞, 张贵龙, 姬艳艳, 等. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 277-282.

CONTENTS

Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in Chongqing	WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i> (759)
Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Beijing During 2012-2013	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (768)
Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM _{1.1} from Nanjing	JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (774)
Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Taiyuan, China	ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (780)
Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shouzhou City	LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (787)
Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China	XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i> (794)
Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i> (801)
Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing	QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i> (809)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan	LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (817)
Organic and Element Carbon in Foliar Smoke	CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i> (824)
Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge	JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (831)
Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas	MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i> (839)
Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors	WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i> (847)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (855)
Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River	LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo (862)
Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i> (869)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (879)
Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season	LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (888)
Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation	CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i> (898)
Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors	YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei (905)
Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i> (914)
Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake	WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (922)
Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China	HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (928)
Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu	JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (936)
Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beiji River	GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (946)
Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus	SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (955)
Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation	YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i> (963)
Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material	WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i> (969)
Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles	HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (980)
Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst	SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i> (989)
Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange	WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (995)
Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System	LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (1000)
Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content	ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i> (1006)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR	GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i> (1013)
Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell	TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (1021)
Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite	HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i> (1027)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China	LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i> (1037)
Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions	QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i> (1045)
Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province	ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i> (1053)
Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk	JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i> (1060)
Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (1069)
Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow	LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i> (1075)
Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China	LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1084)
Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts	YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i> (1092)
Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials	DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1098)
Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing	SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i> (1105)
Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants	DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (1117)
Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi	CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (1123)
Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria	SHEN Li-dong (1133)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 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