

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 14 期 Vol.32 No.14 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 14 期

2012 年 7 月 (半月刊)

目 次

海滨沙地砂引草对沙埋的生长和生理适应对策.....	王 进,周瑞莲,赵哈林,等 (4291)
外源 K ⁺ 和水杨酸在缓解融雪剂对油松幼苗生长抑制中的效应与机理 ...	张 营,李法云,严 霞,等 (4300)
钱塘江中游流域不同空间尺度环境因子对底栖动物群落的影响.....	张 勇,刘朔孺,于海燕,等 (4309)
贡嘎山东坡非飞行小型兽类物种多样性的垂直分布格局.....	吴永杰,杨奇森,夏 霖,等 (4318)
基于斑块的红树林空间演变机理分析方法.....	李春干,刘素青,范航清,等 (4329)
亚热带六种天然林树种细根养分异质性.....	熊德成,黄锦学,杨智杰,等 (4343)
浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应	何 月,樊高峰,张小伟,等 (4352)
亚热带 6 种天然林树种细根呼吸异质性.....	郑金兴,熊德成,黄锦学,等 (4363)
亚高山/高山森林土壤有机层氨氧化细菌和氨氧化古菌丰度特征	王 奥,吴福忠,何振华,等 (4371)
耕作方式对紫色水稻土轻组有机碳的影响.....	张军科,江长胜,郝庆菊,等 (4379)
火烧对长期封育草地土壤碳固持效应的影响.....	何念鹏,韩兴国,于贵瑞,等 (4388)
闽江河口潮汐湿地二氧化碳和甲烷排放化学计量比.....	王维奇,曾从盛,仝 川,等 (4396)
2010 年夏季珠江口海域颗粒有机碳的分布特征及其来源	刘庆霞,黄小平,张 霞,等 (4403)
新疆冷泉沉积物葡萄糖利用细菌群落多样性的稳定同位素标记分析.....	楚 敏,王 芸,曾 军,等 (4413)
土壤微生物群落多样性解析法:从培养到非培养.....	刘国华,叶正芳,吴为中 (4421)
伊洛河河岸带生态系统草本植物功能群划分	郭屹立,卢训令,丁圣彦 (4434)
濒危植物蒙古扁桃不同地理种群遗传多样性的 ISSR 分析	张 杰,王 佳,李浩宇,等 (4443)
强潮区较高纬度移植红树植物秋茄的生理生态特性.....	郑春芳,仇建标,刘伟成,等 (4453)
冬季高温对白三叶越冬和适应春季“倒春寒”的影响	周瑞莲,赵 梅,王 进,等 (4462)
中亚热带细柄阿丁枫和米槠群落细根的生产和死亡动态.....	黄锦学,凌 华,杨智杰,等 (4472)
欧美杨水分利用效率相关基因 <i>PdEPF1</i> 的克隆及表达	郭 鹏,金 华,尹伟伦,等 (4481)
再力花地下部水浸提液对几种水生植物幼苗的化感作用.....	缪丽华,王 媛,高 岩,等 (4488)
无致病力青枯雷尔氏菌对烟草根系土壤微生物脂肪酸生态学特性的影响.....	郑雪芳,刘 波,蓝江林,等 (4496)
基于更新和同化策略相结合的遥感信息与水稻生长模型耦合技术的研究.....	王 航,朱 艳,马孟莉,等 (4505)
温度和体重对克氏双锯鱼仔鱼代谢率的影响.....	叶 乐,杨圣云,刘 敏,等 (4516)
夏季西南印度洋叶绿素 a 分布特征.....	洪丽莎,王春生,周亚东,等 (4525)
大沽排污河生态修复河道水质综合评价及生物毒性影响.....	王 敏,唐景春,朱文英,等 (4535)
李肖叶甲成虫数量及三维空间格局动态.....	汪文俊,林雪飞,邹运鼎,等 (4544)
专论与综述	
基于景观格局的城市热岛研究进展	陈爱莲,孙然好,陈利顶 (4553)
沉积物质量评价“三元法”及其在近海中的应用	吴 斌,宋金明,李学刚,等 (4566)
问题讨论	
中国餐厨垃圾处理的现状、问题和对策	胡新军,张 敏,余俊锋,等 (4575)
研究简报	
稻秸蓝藻混合厌氧发酵沼液及其化学物质对尖孢镰刀菌西瓜专化型生长的影响.....	刘爱民,徐双锁,蔡 欣,等 (4585)
佛山市农田生态系统的生态损益.....	叶延琼,章家恩,秦 钟,等 (4593)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 314 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 33 * 2012-07



封面图说: 噶龙山南坡的高山湖泊——喜马拉雅山南坡的噶龙山光照强烈、雨量充沛,尽管是海拔 4500 多米的高寒地区,山上的草甸依然泛着诱人的翠绿色,冰川和雪山的融水汇集在山梁的低洼处形成了一个又一个的高山湖泊,由于基底的差别和水深的不同,使得纯净清澈的冰雪融水在湖里呈现出不同的颜色,湖面或兰或绿,颜色或深或浅,犹如一块块通透透明的翡翠镶嵌在绿色的绒布之中。兰天下面,白云落在山间,通往墨脱的公路像丝带一样随随便便地缠绕着,一幅美丽的自然生态画卷就这样呈现在你的面前。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201106300981

张军科, 江长胜, 郝庆菊, 吴艳, 谢德体. 耕作方式对紫色水稻土轻组有机碳的影响. 生态学报, 2012, 32(14): 4379-4387.

Zhang J K, Jiang C S, Hao Q J, Wu Y, Xie D T. Effect of tillage systems on light fraction carbon in a purple paddy soil. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(14): 4379-4387.

耕作方式对紫色水稻土轻组有机碳的影响

张军科^{1,2}, 江长胜^{1,2}, 郝庆菊^{1,2,*}, 吴 艳^{1,2}, 谢德体^{1,2}

(1. 西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 西南大学资源环境学院, 重庆 400715;

2. 重庆市三峡库区农业面源污染控制工程技术研究中心, 重庆 400716)

摘要:以位于西南大学实验农场的长期免耕试验田为研究对象,通过 0—60 cm 分层采集土壤样品的方法,探讨了不同耕作方式——冬水田平作(DP)、水旱轮作(SH)、垄作免耕(LM)及垄作翻耕(LF)对土壤轻组有机碳的影响。结果表明,重组有机碳是土壤总有机碳的主体,约占土壤总有机碳的 69.56%—95.66%,在土壤剖面上随土壤深度的增加其分配比例逐渐升高;其次是自由轻组有机碳,约占土壤总有机碳的 5.03%—26.43%,从土壤表层向下,其分配比例迅速下降;闭合轻组有机碳最低,仅占土壤总有机碳的 1.37%—4.93%,其分配比例随土壤深度的变化不明显。在 0—60 cm 土壤深度内,不同耕作方式下自由轻组有机碳的平均含量为 LM(4.36 g/kg) > DP(2.11 g/kg) > LF(1.74 g/kg) > SH(1.46 g/kg),相应的有机碳分配比例分别为 17.1%、14.0%、12.2% 和 11.3%;闭合轻组有机碳的平均含量为 LM(0.82 g/kg) > DP(0.51 g/kg) > LF(0.36 g/kg) > SH(0.34 g/kg),相应的有机碳分配比例分别为 3.36%、3.45%、2.71% 和 3.00%。因此,在西南地区紫色水稻土上实行垄作免耕能提高轻组有机碳的含量及其分配比例,从而改善土壤有机碳质量。另外,与土壤总有机碳、重组有机碳及闭合轻组有机碳相比,自由轻组有机碳对耕作方式的变化最敏感,是指示土壤有机碳变化的良好指标。

关键词:耕作方式;自由轻组有机碳;闭合轻组有机碳;紫色水稻土

Effect of tillage systems on light fraction carbon in a purple paddy soil

ZHANG Junke^{1,2}, JIANG Changsheng^{1,2}, HAO Qingju^{1,2,*}, WU Yan^{1,2}, XIE Deti^{1,2}

1 Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing, 400715, China

2 Chongqing Engineering Research Center for Agricultural Non-point Source Pollution Control in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 400716, China

Abstract: Physical fractionation of soil organic carbon (SOC) has been useful in distinguishing specific carbon pools that are responsive to management and identifying the physical control of organic matter. Density fractionation allows the separation of SOC fractions from different locations in the soil and degree of association with mineral particles. The free light fraction carbon (F-LFC) includes loose organic particles in the soil and particulate organic carbon adhering to the exterior of secondary organomineral complexes, which is chemically very close to litter and has generally a very fast decomposition rate. The occluded light fraction carbon (O-LFC) is the fraction of uncomplexed organic matter that is trapped and physically protected within secondary complexes (intra-aggregate organic carbon). This fraction shows a more advanced degree of decomposition and a slower turnover. The heavy fraction carbon (HFC) is composed mainly of highly decomposed material and has a very slow decomposition rate. Changes in these different fractions, especially in the low-density fractions, may be more sensitive to management-induced impacts on soil than the total SOC or the complicated heavy fraction organic carbon. However, there are few direct data quantifying these two light fractions and their contributions to total SOC storage

基金项目:国家自然科学基金项目(41005069, 40975095 和 40805050); 西南大学生态学重点学科“211”工程三期建设项目; 西南大学大型仪器开放基金(201028)

收稿日期: 2011-06-30; 修订日期: 2011-11-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: haoqingju@163.com

as related to changes in tillage practices.

The impact of tillage on SOC fractions has been of great interest in recent years. The tillage experiment was located at the farm of Southwest University (30°26'N, 106°26'E) in Chongqing since 1990. In this paper four tillage treatments including conventional tillage with rice only system (DP), conventional tillage with rotation of rice and rape system (SH), no-till and ridge culture with rotation of rice and rape system (LM), and ridge culture with rotation of rice and rape system (LF) were selected as research objectives to measure the contents of different soil carbon fractions. Soil sampling at the depths of 0—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—50 and 50—60 cm was performed with a soil drill after the rape harvest in the spring of 2009.

Results indicated that most carbon (69.6%—92.7%) was held in the HF, carbon dynamics in the whole soil were controlled by the behavior of this fraction. The proportion of F-LF carbon to the total SOC was 5.03%—26.43%. O-LF contained the least amount of organic carbon (1.37%—4.93%) of total SOC. In the four tillage soils the greatest contents of F-LFC, O-LFC and HFC were found in the 0—10cm depth. In the whole soil layer (0—60cm), the order of F-LFC contents was LM (4.36g/kg) > DP (2.11g/kg) > LF (1.74 g/kg) > SH (1.46 g/kg), and the corresponding proportions of F-LFC to total SOC were 17.12, 14.00, 12.17 and 11.29%, respectively. The order of O-LFC contents was LM (0.82 g/kg) > DP (0.51 g/kg) > LF (0.36 g/kg) > SH (0.34 g/kg), and the corresponding proportions were 3.36, 3.45, 3.00 and 2.71%, respectively. Compared with the other tillage systems, LM treatment significantly increased the contents and proportions of the two light fraction carbons which suggested LM could improve the soil quality in a purple paddy soil in Southwest China. Additionally, the data analysis showed that F-LFC was the most sensitive pool of organic carbon to detect changes in SOC due to soil tillage.

Key Words: Tillage system; Free light fraction carbon; Occluded light fraction carbon; Purple paddy soil

土壤有机碳是土壤质量和健康的重要指标^[1]。但是在土壤有机碳背景值很大的情况下,利用总有机碳来评价土地利用或管理方式的变化对土壤碳动态的影响是非常困难的。因此,分离更敏感的易变有机碳组分有助于阐明土壤有机碳动态。有机碳的物理分组是进行土壤有机碳研究的一个有力工具,物理分组几乎不对有机碳的结构造成破坏,分离的有机碳组分能够反映有机碳的结构与功能,尤其能够反映有机碳的周转特征^[2]。物理密度分组通常将土壤分为自由轻组(Free Light Fraction, F-LF)、闭合轻组(Occluded Light Fraction, O-LF)和重组(Heavy Fraction, HF)。自由轻组有机碳包含土壤中的松散有机颗粒以及粘附在次级有机-无机复合体外的颗粒有机碳,在化学性质上与枯落物非常接近,通常具有非常快的分解速率^[2]。闭合轻组有机碳是陷于次级复合体中受物理保护的有机碳,是在团聚体充分分散后分离得到的轻组组分,分解程度较高但周转速率较慢。重组的比重较大,主要是由高度分解后的物质组成,分解速率非常缓慢^[2]。这些不同组分的变化,尤其是低密度组分的变化,在由耕作方式引起的土壤有机碳变化上可能比总有机碳更敏感^[3]。虽然土壤轻组物质仅占土壤质量的一小部分,但其碳含量一般显著高于全土的碳含量。轻组物质的碳氮比高,周转速度快,代表着易变土壤有机质的主要部分,被认为是土壤生物调节过程的重要基质和土壤肥力指标,具有很强的生物学活性^[4]。

紫色水稻土是西南地区重要的水稻土类型,而冬水田是该地区普遍分布的一种特殊类型的稻田种植方式,这种稻田一年只种植一季中稻,其余时间淹水空闲。针对冬水田的烂脚泥深、土温低以及产量低的缺点,20世纪70年代我国著名的已故土壤学家侯光炯院士成功开发出了冬水田自然免耕技术-稻田垄作免耕技术。该技术对冬水田具有重要的改良作用,是发挥冬水田生产潜力一个比较可靠的方法^[5],并在西南地区得到了广泛的推广和应用。Zhang等^[6]通过在中国三江平原的研究认为,耕作导致重组碳在土壤有机碳中的积累,在自然湿地以及短期耕作(<5a)土壤碳动态主要受自由轻组有机碳的控制,而在长期耕作(>5a)土壤碳动态则由重组有机碳控制。但也有研究报道自然及农田土壤有机碳动态都受重组碳的控制,约95%的土壤有机

碳都保存在这一组分中^[3]。大量研究表明,轻组有机碳因具有较高的生物活性,对土地利用以及农田管理方式的变化比总有机碳更敏感^[3,6-10],但也有研究者认为不论是自由轻组有机碳还是闭合轻组有机碳均不适于做土地利用变化早期的指示指标^[11]。Boone^[12]报道农田土壤表层轻组有机碳占总有机碳的比例为1%—25%,取决于农田管理措施。然而,目前有关耕作方式变化对这两种轻组有机碳的影响研究还比较少。另外,关于耕作方式对西南地区紫色水稻土有机碳的影响方面已经开展了一些研究工作^[13-14],但多数局限于总有机碳水平上。因此,本研究以西南地区紫色水稻土为研究对象,应用物理密度分组方法,探讨耕作方式变化对土壤有机碳组分的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

稻田长期垄作免耕定位试验始于1990年,设在重庆市北碚区西南大学试验农场(106°26'E,30°26'N),海拔230 m,年平均气温18.3℃,年平均降雨量1105.4 mm,5—9月降雨量占全年雨量的70%,年均日照1276.7 h,年平均无霜期334 d。土壤为紫色砂泥岩母质上发育的中性紫色水稻土,其基本理化性质为:pH 7.1,有机质23.1 g/kg,全氮1.7 g/kg,全磷0.8 g/kg,全钾22.7 g/kg,碱解氮120.1 mg/kg,有效磷7.5 mg/kg,速效钾71.1 mg/kg,粘粒144.2 g/kg。试验前一直采用冬水田平作的耕作方式。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计

本试验共设4个处理(表1)。每个处理小区面积为20 m²,4次重复,随机区组排列。各处理的施肥量均为:N 125 kg/hm²(尿素);P₂O₅ 60 kg/hm²(过磷酸钙);K₂O 75 kg/hm²(氯化钾)。每年油菜和水稻的施肥都是过磷酸钙作底肥一次施用;尿素用量的2/3作底肥,1/3作追肥;氯化钾底肥和追肥各半。

表1 试验处理描述
Table 1 The description of experimental treatments

耕作方式 Tillage system	简称 For short	种植方式 Crop pattern	管理方式 Management mode	残茬还田量(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹) Quantity of residue back to the soil
冬水田平作 Conventional tillage with rice and winter fallow system	DP	中稻-休闲	终年处于淹水状态,保持水层深度为3 cm左右;按传统方法每年三犁三耙翻耕植稻,耕作深度为25—30 cm,水稻收获后灌水冬闲;	水稻还田量:2748.0—3301.5 油菜还田量:0.0 杂草还田量:1912.5—3154.5 总还田量:4660.5—6456.0
水旱轮作 Conventional tillage with rotation of rice and rape system	SH	中稻-油菜	翻耕、淹水平作种植水稻,水稻收获后,四边开沟排干稻田积水,翻耕,种油菜;油菜生长期,尽可能地保持四边沟内无积水	水稻还田量:2697.0—3532.5 油菜还田量:768.0—987.0 杂草还田量:6217.5—8004.0 总还田量:9682.5—12523.5
垄作免耕 No-till and ridge culture with rotation of rice and rape system	LM	中稻-油菜	作垄规格为:一垄一沟55 cm,垄顶宽25 cm,沟宽30 cm,沟深35 cm,每小区作5垄;水稻移栽到成活期间水面与垄顶齐平,全年其余时间保持沟内水深25—30 cm(即垄露出水面5—10 cm);水稻收获后排水降低水位,将沟内的稀泥扶到垄上,种植油菜;油菜生长期,沟内水位5—10 cm(即垄露出水面20—25 cm),保持垄埂浸润	水稻还田量:3562.5—4024.5 油菜还田量:742.5—940.5 杂草还田量:8746.5—10011.0 总还田量:13051.5—14976.0
垄作翻耕 Ridge culture with rotation of rice and rape system	LF	中稻-油菜	作垄规格及水分管理方式与垄作免耕相同;油菜和水稻种植前,翻耕土壤	水稻还田量:2697.0—3532.5 油菜还田量:768.0—987.0 杂草还田量:6217.5—8004.0 总还田量:9682.5—12523.5

1.2.2 样品采集

于2009年4月下旬油菜收获后采集土壤样品,每种耕作制度随机选择3个样点,垄作免耕和垄作翻耕采样点选择在垄上。采集不同深度的土壤样品,以10 cm为一个层次,分别采集0—10,10—20,20—30,30—40,

40—50 cm 和 50—60 cm 土壤样品。同一耕作制度下相同土层的土壤样品采集后混合,用四分法取出足够的样品,去除石砾和植物根系,风干后过 2 mm 筛,保存于密闭自封袋中备用。

1.2.3 分析方法

按照 Golchin 等^[15]和 Roscoe 等^[16]的方法,依据物理保护程度的不同,将有机碳分为 3 类:没有保护的(没经过超声波提取的自由轻组)、闭合的(经超声波后提取的轻组)和保护的重组。具体方法如下:(1)称取过 2 mm 筛的风干土样 20 g,放入 200 mL 离心管中,加 100 mL NaI 溶液($d = 1.8 \text{ g/cm}^3$),用手轻轻摇动,室温静置过夜。次日将悬浮物离心 15 min (3500 r/min)后以抽吸的方式收回,再将抽吸的悬浮液倒入装有 0.45 μm 滤膜的滤斗中抽气过滤,将滤纸上的物质先用 100 mL 的 CaCl_2 (0.01 mol/L) 洗涤,再用至少 200 mL 蒸馏水洗涤后,将滤纸上的物质用水冲洗到提前称重的 50 mL 烧杯中。然后,再向离心管加 100 mL NaI 溶液,重复上述过程,将 2 次的提取物混合,静置 24 h,在 60 $^{\circ}\text{C}$ 下烘至恒重,然后称重,该组分即为自由轻组;(2)向离心管内继续加 100 mL NaI 溶液,充分震荡,用超声波细胞粉碎机(JYD-650 系列,上海)在 100 W 条件下分散 15 min,静止 4 h 后离心,离心和过滤同上,并重复 2 次。然后烘干和称重,方法同上,这一组分为闭合轻组;(3)向离心管内加 100 mL 蒸馏水,振荡 20 min,离心 20 min (4000 r/min),弃去上清液,重复洗涤 3 次,在 60 $^{\circ}\text{C}$ 下烘至恒重,称重,这一组分为重组。

以上各组分用玛瑙研钵研磨,过 60 目筛,各组分有机碳含量采用 Multi N/C 2100 分析仪(德国耶拿公司)干烧法测定。

$\text{F-LFC 含量 (g/kg)} = \text{自由轻组土中有机碳含量 (g/kg)} \times \text{自由轻组土质量占土壤\%}$

$\text{O-LFC 含量 (g/kg)} = \text{闭合轻组土中有机碳含量 (g/kg)} \times \text{闭合轻组土质量占土壤\%}$

$\text{F-LFC 分配比例 (\%)} = \text{F-LFC 含量} / \text{TOC 含量} \times 100\%$

$\text{O-LFC 分配比例 (\%)} = \text{O-LFC 含量} / \text{TOC 含量} \times 100\%$

$\text{HFC 分配比例 (\%)} = \text{HFC 含量} / \text{TOC 含量} \times 100\%$

式中,F-LFC 为自由轻组有机碳;O-LFC 为闭合轻组有机碳;HFC 为重组有机碳,TOC 为土壤总有机碳。

1.3 统计分析

采用 Excel 2003 软件作图。试验数据通过方差分析(ANOVA)程序进行统计分析,采用多重比较方法(LSD)比较各处理间差异显著性;通过线性方程拟合各组分有机碳含量与土壤总有机碳含量之间的关系。

2 结果

2.1 耕作方式对土壤碳组分的影响

不同耕作方式下,自由轻组有机碳含量具有明显的垂直分布特征(图 1),即随着土壤深度的增加,呈现明显的垂直递减规律性。翻耕农田自由轻组有机碳含量自上而下的降低比较平稳,而长期免耕农田呈现出明显的表层富集现象。LM 处理自由轻组有机碳主要富集在 0—10 cm 土层内,10—20 cm 土层迅速减少了 3.21 g/kg,而 DP、SH 及 LF 处理则分别降低了 1.12、1.72、0.21 g/kg 和 0.79 g/kg。对 0—60 cm 整个土层而言,不同耕作方式下自由轻组有机碳的平均含量为 LM(4.36 g/kg) > DP(2.11 g/kg) > LF(1.74 g/kg) > SH(1.46 g/kg)。单因素方差分析表明,LM 处理自由轻组有机碳显著高于 DP 和 LF 处理($P < 0.05$),极显著高于 SH 处理($P < 0.01$)。紫色水稻土自由轻组有机碳含量为免耕农作高于翻耕农作。

由图 1 可以看出,不同耕作方式下,闭合轻组有机碳含量随着土壤深度的增加总体呈降低趋势。但与自由轻组有机碳不同的是闭合轻组有机碳在土壤剖面上的垂直变化不明显。LM、DP 以及 LF 处理的最大值都出现在 0—10 cm 土层,分别为 1.38、0.76 g/kg 和 0.56 g/kg;而 SH 处理的最高值出现在 20—30 cm 土层,为 0.49 g/kg。同一土层不同耕作方式之间闭合轻组有机碳的差异随土壤深度的增加总体上呈降低的趋势。从 0—10 cm 至 50—60 cm 土层,同一土层不同耕作处理间闭合轻组有机碳最大值与最小值之间的差值分别为 1.05、0.72、1.03、0.30、0.39 和 0.32 g/kg。在整个 0—60 cm 土壤范围内,不同耕作方式土壤闭合轻组有机碳平均含量为 LM(0.82 g/kg) > DP(0.51 g/kg) > LF(0.36 g/kg) > SH(0.34 g/kg)。单因素方差分析表明,LM 极

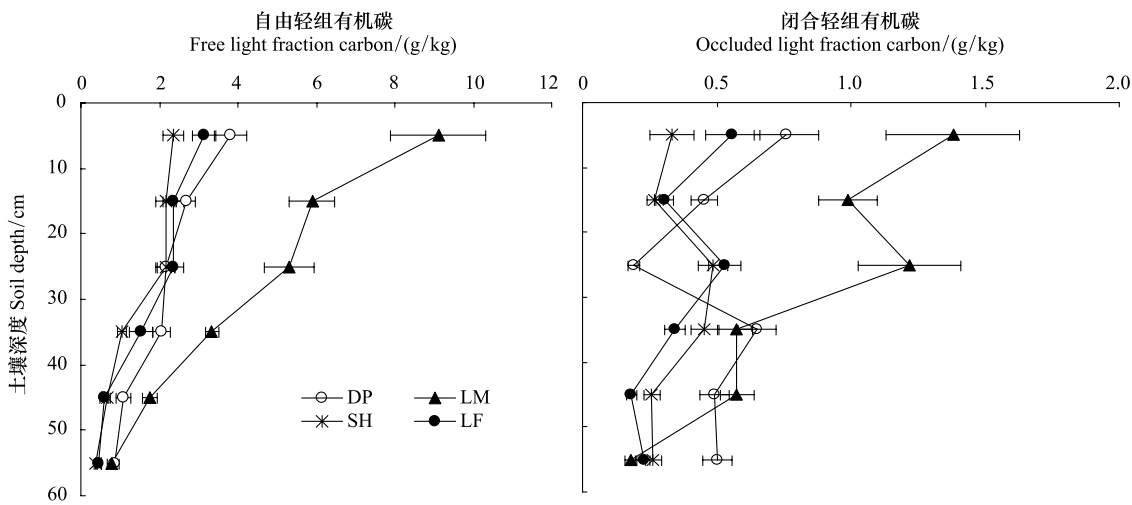


图1 不同耕作方式下自由轻组有机碳及闭合轻组有机碳的含量

Fig. 1 The contents of soil free light fraction carbon and occluded light fraction carbon under different tillage systems

DP 为冬水田平作,SH 为水旱轮作,LM 为垄作免耕,LF 为垄作翻耕

显著高于 LF 和 SH 处理($P < 0.01$),显著高于 DP 处理($P < 0.05$)。与自由轻组有机碳相同,紫色水稻土闭合轻组有机碳含量也表现为免耕农作高于翻耕农作。

在 0—60 cm 的土壤深度内,LM、DP、LF 及 SH 处理 TOC 的平均含量分别 22.74、14.57、13.10 g/kg 和 11.92 g/kg,LM 处理 TOC 含量极显著高于 SH、LF 处理($P < 0.01$),显著高于 DP ($P < 0.05$),表明 LM 处理较其它 3 种耕作方式能显著提高土壤有机碳含量。以冬水田平作处理为对照,其它耕作方式下土壤碳组分与之相对比,发现 LM 处理下土壤总有机碳及其碳组分的变化均为正值,而 LF 和 SH 处理下变化均为负值(表 2)。表明 DP 处理转变为 LM 后土壤总有机碳的累积来源于自由轻组有机碳、闭合轻组有机碳以及重组有机碳的增加,而 DP 处理转变为 LF 和 SH 后土壤有机碳的损失归因于这 3 种碳组分的减少。

通过表 2 可以看出,耕作方式的转变引起的自由轻组有机碳的变化幅度最大,其次为闭合轻组有机碳,总有机碳和重组有机碳的变化最小。表明重组有机碳对耕作方式的变化不如总有机碳敏感,而自由轻组有机碳和闭合组分有机碳对耕作方式的变化均比总有机碳敏感,但相比之下,自由轻组有机碳比闭合轻组有机碳对耕作方式变化的敏感性更高。因此,选择自由轻组有机碳代替总有机碳作为敏感性指标评价耕作方式对土壤碳的影响更为合适和灵敏。

表 2 其它耕作制度与冬水田平作相比土壤碳组分的变化/%

Table 2 The changes of soil carbon fractions in other three tillage systems compared with DP treatment											
LM				LF				SH			
TOC	F-LFC	O-LFC	HFC	TOC	F-LFC	O-LFC	HFC	TOC	F-LFC	O-LFC	HFC
56.07	106.66	61.18	46.93	-10.10	-17.56	-29.52	-7.96	-18.17	-30.78	-32.26	-15.35

2.2 耕作方式对土壤碳组分分配比例的影响

表 3 为不同耕作方式下各组分有机碳分配比例随土壤深度的变化。从有机碳在各组分的分布可以看出,在 0—60 cm 土壤深度范围内,各个土层均为重组有机碳分配比例最高,自由轻组次之,闭合轻组最低。从土壤深度分布可以看出,随土壤深度增加,不同耕作方式下自由轻组有机碳分配比例迅速下降,由 0—10 cm 土层的 17.10%—26.43% 下降到 50—60 cm 土层的 5.03%—5.90%;而重组有机碳分配比例则逐渐增大,由 0—10 cm 土层 69.56%—80.49% 升高到 50—60 cm 土层的 88.73%—92.73%;闭合轻组有机碳的分配比例变化不明显,不同耕作方式下约为 1.37%—4.93%。由表 2 可以看出,在 0—60 cm 深度内,不同耕作方式下自由轻组有机碳分配比例为 LM(17.12%) > DP(14.00%) > LF(12.17%) > SH(12.19%),相对于传统耕作方

式 DP 处理,LM 提高了自由轻组有机碳分配比例,而 LF 和 SH 则降低了自由轻组有机碳分配比例。不同耕作方式下闭合轻组有机碳分配比例相差不大,LM、DP、SH、LF 分别为 3.36%、3.45%、3.00% 和 2.71%。

表 3 自由轻组有机碳、闭合轻组有机碳以及重组有机碳在不同耕作方式下的分配比例/%

Table 3 Proportions of F-LFC, O-LFC and HFC to total soil organic carbon in different tillage systems

		0—10cm	10—20cm	20—30cm	30—40cm	40—50cm	50—60cm	平均 Mean
DP	F-LFC	20.28	18.67	17.07	11.69	9.13	7.14	14.00
	O-LFC	4.05	3.16	1.51	3.72	4.11	4.13	3.45
	HFC	75.67	78.17	81.42	84.59	86.76	88.73	82.56
SH	F-LFC	17.10	15.82	12.61	9.76	7.44	5.03	11.29
	O-LFC	2.41	1.98	2.84	4.21	2.89	3.67	3.00
	HFC	80.49	82.20	84.55	86.03	89.67	91.31	85.71
LM	F-LFC	26.43	23.48	21.44	15.65	9.82	5.90	17.12
	O-LFC	4.01	3.95	4.93	2.69	3.22	1.37	3.36
	HFC	69.56	72.57	73.63	81.66	86.96	92.73	79.52
LF	F-LFC	18.64	16.42	13.65	10.09	8.35	5.88	12.17
	O-LFC	3.32	2.12	3.08	2.27	2.56	2.90	2.71
	HFC	78.04	81.45	83.27	87.65	89.10	91.22	85.12

2.3 各组分中有机碳的积累

自由轻组、重组以及 0—30 cm 土层闭合组分中有机碳含量与总有机碳呈显著或极显著正相关(表 4),随总有机碳含量的增加而增加;30 cm 土壤深度以下闭合组分中的有机碳含量与总有机碳相关性不显著。

表 4 不同土层自由轻组、闭合轻组以及重组中有机碳含量与总有机碳之间的关系

Table 4 Relationships between fractions carbon and total soil organic carbon in different soil depths

土壤深度 Soil depth/cm	F-LFC	O-LFC	HFC
0—10	$y=0.33x-2.35, R^2=0.999^{**}$	$y=0.05x-0.24, R^2=0.959^{**}$	$y=0.62x+2.59, R^2=0.999^{**}$
10—20	$y=0.32x-2.10, R^2=0.993^{**}$	$y=0.06x-0.50, R^2=0.873^{*}$	$y=0.62x+2.60, R^2=0.996^{**}$
20—30	$y=0.23x-1.04, R^2=0.786^{*}$	$y=0.08x-0.76, R^2=0.969^{**}$	$y=0.69x+1.80, R^2=0.964^{**}$
30—40	$y=0.21x-1.36, R^2=0.922^{**}$	$y=0.02x+0.25, R^2=0.307$	$y=0.78x+1.11, R^2=0.992^{**}$
40—50	$y=0.11x-0.25, R^2=0.989^{**}$	$y=0.04x-0.02, R^2=0.164$	$y=0.85x+0.27, R^2=0.999^{**}$
50—60	$y=0.08x-0.15, R^2=0.912^{*}$	$y=0.01x+0.18, R^2=0.061$	$y=0.91x-0.03, R^2=0.994^{**}$

y 分别代表 F-LFC、O-LFC 和 HFC 值, x 为总有机碳含量; * 表示在 $P<0.05$ 水平上显著; ** 表示在 $P<0.01$ 水平上显著

在 0—30 cm 土层,自由轻组、闭合轻组以及重组中有机碳含量与总有机碳呈显著或极显著正相关,说明 0—30 cm 土层总有机碳的积累受到各组分中碳积累的影响。在 30 cm 土壤深度以下,自由轻组和重组中有机碳含量与总有机碳相关性显著,而闭合组分碳与总有机碳相关性不明显,说明在 30cm 土壤深度以下,土壤总有机碳的积累只受自由轻组和重组碳数量的影响,闭合组分碳对总有机碳的影响很小。

3 讨论

物理分组在利用密度方法进行分离土壤有机碳时,根据有机碳稳定性的差异,可以将有机碳分为自由轻组有机碳、闭合轻组有机碳和重组有机碳,其中,自由轻组有机碳和闭合轻组有机碳统称为轻组有机碳。轻组有机碳是由可识别的处于不同分解阶段的植物残体,真菌的菌丝和孢子、种子、动物残体、微生物残骸以及一些吸附在有机碎屑上的矿质颗粒组成^[17]。其化学成分主要是碳水化合物、蛋白、多酚(如木质素)和烷基化合物组成^[18],它在形成和稳定土壤结构,尤其是稳定土壤大团聚体(>250 μm)中起着重要作用^[19]。重组有机碳是由轻组有机碳经彻底分解后残留的或重新合成的、以芳香族物质为主体的有机物质(主要是腐殖质)组成,是存在于有机-无机复合体中的有机质态碳,结构稳定^[2]。

自由轻组有机碳与闭合轻组有机碳含量随着土壤深度的增加,整体上都呈现出逐渐降低的趋势,钟春棋^[20]通过对闽江口湿地不同土地利用方式下土壤有机碳的研究也发现,水田土壤轻组有机碳含量随土壤深度增加呈逐渐减小的趋势,另外,谢锦升等^[21]在亚热带山地丘陵红壤区以及刘梦云等^[22]在黄土台塬也发现了相似的研究结果。轻组有机碳主要由不同分解阶段的植物残体组成,Boone^[12]通过对美国威斯康星州两个栎树林的研究表明,地上凋落物和地下根系是土壤轻组有机碳的主要来源;杨玉盛等^[23]通过对亚热带地区格氏栲天然林和人工林的研究指出,活细根生物量的分布变化可解释不同土层约 80% 的轻组有机碳含量和储量变化。轻组有机碳随土壤深度的增加而降低,主要是由植物残体和根系在土壤剖面的分布决定的。免耕农作下自由轻组有机碳表现出明显的表层富集现象,而在翻耕农作下则降低的比较平稳,导致这种现象的原因可能主要是由以下两点造成的:首先,免耕农作下还田的秸秆积累在土壤表层,而翻耕会将归还到土壤表层的秸秆翻到土壤下层,从而使深层土壤中轻组有机碳的含量提高;其次,免耕和翻耕农作体系中植物根系的分布不同。Baker 等^[24]发现免耕和翻耕方式下植物根系的分布深度不同,免耕不利于植物根系向土壤深处发展和生长,因此免耕农田植物根系的分布深度较翻耕农田要浅;而且,不同耕作制度下根密度分布也存在明显差异,根密度通常在免耕土壤表层较大,而在耕作土壤深层较大。

不同耕作制度自由轻组有机碳及闭合轻组有机碳含量均为垄作免耕最高,冬水田平作和垄作翻耕次之,水旱轮作最低。冬水田作为一种特殊的稻田种植方式,常年淹水,厌氧环境强烈,不利于轻组有机碳的分解而使其积累在土壤中。冬水田平作转变为垄作免耕后,尽管通过田间微地形的改变,使土壤的水热状况改善和通透性增强^[5],导致轻组有机碳分解加快,但垄作免耕一年种 2 季,每年有机残茬还田量比冬水田平作多 8390—8519 kg/hm²,有机物质的积累量增大;另外,研究表明^[5],与冬水田平作相比,垄作免耕下水稻根系粗壮、白嫩,支根和根毛发达,10 cm 以下土层根系增加 6%—15%。残茬还田量的增加以及作物根系的增强等,都使垄作免耕轻组有机碳含量升高。轻组有机碳作为土壤有机碳的活性组分而易氧化分解,尽管垄作翻耕和水旱轮作每年的作物残茬还田量也高于冬水田平作,但由于起垄提高了土壤的通透性,降低了土壤含水量,而且翻耕时土壤的水稳性团聚体被机械破坏,导致轻组有机碳分解加快而使其含量降低;水旱轮作由于干湿交替作用显著,有机质的矿化作用比浸润状态下的垄作更强^[5],因而导致轻组有机碳含量最低。

Roscoe 等^[16]、王刚等^[25]采用与本实验相同的土壤分级程序研究了各组分有机碳的动态,Roscoe 等^[16]通过对南美大草原原生植被下的土壤研究发现,自由轻组有机碳由 0—2 cm 土层的 38% 下降为 67—110 cm 土层的 1.86%,而重组有机碳则由 61% 升高到 98%,闭合轻组有机碳的垂直变化不明显,约为 1%。王刚等^[25]通过对子午岭森林灰褐土的研究表明,重组有机碳的比例由 0—10 cm 土层的 72.57% 升高到 60—80 cm 土层的 95.39%;而自由轻组则由 0—10 cm 的 25.27% 下降到 60—80 cm 土层的 3.72%;闭合轻组有机碳仅占总有机碳的 1%—2%。本研究中闭合轻组有机碳分配比例比以上的研究都要稍高一些,在 3% 左右,这种差异可能是由土地利用方式、土壤类型以及植被类型的差异造成的,也有可能是受重液密度的影响,不同的研究中所使用的重液密度也不尽相同。但我们的研究和上述的研究都表明,轻组有机碳的组成以自由轻组中的有机碳为主,其在土壤剖面上具有明显的垂直递减性;以闭合轻组有机碳为辅,其随土壤深度的变化不明显。

由表 3 可以看出,对西南地区紫色水稻土总有机碳的积累来说,重组碳的作用最大,自由轻组碳次之,闭合组分碳的作用最小。通过表 4 可以看出,在土壤表层,自由轻组、闭合组分以及重组中的有机碳增加均是总有机碳积累的重要来源,但随着土壤深度的增加,自由轻组以及闭合组分的作用逐渐减弱。闭合组分在 30 cm 土壤深度以下,与总有机碳含量的相关性不明显,说明进入闭合组分的有机碳具有很高的随机性。

在很多的相关文献中,都是将土壤直接通过超声波或化学分散剂充分分散土壤,破坏土壤结构后研究重组和轻组中土壤有机碳含量。Boone^[12]通过文献综述后发现,农田表层土壤轻组有机碳分配比例为 1%—25%;也有研究表明^[26],农田生态系统中耕层轻组有机碳分配比例低于 20%。研究中,除了垄作免耕的轻组有机碳比例较高外,其它 3 种耕作方式土壤轻组有机碳分配比例均在报道范围之内。轻组有机碳是土壤碳库中活性较大的碳,是土壤碳库质量的重要指标,其占土壤总有机碳的比例则反映了土壤有机碳库的质量高

低^[4]。以传统耕作方式冬水田平作为对照, 垄作免耕自由轻组有机碳和闭合轻组有机碳分别增加了 106.66% 和 61.18%, 表明冬水田平作经垄作免耕后能积极有效地提高土壤有机碳质量。这与 Tan 等^[8]的研究结果相似, 他们的研究发现, 免耕土壤中轻组有机碳含量比传统耕作高 94%。Malhi 和 Kutcher^[27]的研究也发现, 免耕方式下土壤中轻组有机碳含量显著高于传统耕作。

本文的数据分析表明, 经过近 20a 的耕作试验, 免耕有利于土壤有机碳及其组分的蓄持, 而翻耕则会降低其含量, 相比于总有机碳、重组有机碳以及闭合轻组有机碳, 自由轻组有机碳的变化幅度最大, 这与 Zhang 等^[6]在中国东北三江平原、Freixo 等^[7]在巴西南部南里奥格兰德州以及 Roscoe 和 Buurman^[3]在巴西热带稀树大草原的研究结果一致, 他们发现耕作会虽然也会导致总有机碳、重组有机碳以及闭合轻组有机碳的降低, 但自由轻组有机碳的降低速率却是最高的。这些研究结果均表明自由轻组有机碳对由管理方式引起的变化比总有机碳更敏感。

4 结论

(1) 在土壤总有机碳中, 重组有机碳占明显优势, 其分配比例随土壤深度的增加而升高; 自由轻组次之, 其分配比例随土壤深度的增加而降低; 闭合组分中的有机碳最低, 其分配比例的垂直变化不明显;

(2) 垄作免耕土壤自由轻组有机碳及闭合轻组有机碳的含量及其分配比例均高于其它耕作方式, 表明在西南地区紫色水稻土上实行垄作免耕能提高土壤有机碳质量;

(3) 自由轻组有机碳对耕作方式的变化最敏感, 是指示土壤有机碳变化的良好指标。

References:

- [1] Ding G, Novak J M, Amarasiriwardena, D, Hunt P G, Xing B. Soil organic matter characteristic as affected by tillage management. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66: 421-429.
- [2] Christensen B T. Physical fraction of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Advances in Soil Science*, 1992, 20: 1-90.
- [3] Roscoe R, Buurman P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerrado Oxisol. *Soil & Tillage Research*, 2003, 70: 107-119.
- [4] Xie J S, Yang Y S, Xie M S, Yang S H, Yang Z J. Advance of research on light fraction organic matter in soil. *Journal of Fujian College of Forest*, 2006, 26(3): 281-288.
- [5] Xie D T, Chen S L. Theory and technique of paddy field under soil virginization. Chongqing, Chongqing Press, 2002.
- [6] Zhang J B, Song C C, Yang W Y. Tillage effects on soil carbon fractions in the Sanjiang Plain, Northeast China. *Soil & Tillage Research*, 2007, 93: 102-108.
- [7] Freixo A A, de A Machado P L O, dos Santos H P, Silva C A, de S Fadigas F. Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, 2002, 64: 221-230.
- [8] Tan Z, Lal R, Owens L, Izaurralde R C. Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice. *Soil & Tillage Research*, 2007, 92: 53-59.
- [9] Gong W, Yan X Y, Wang J Y, Hu T X, Gong Y B. Long-term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat-maize cropping system in northern China. *Geoderma*, 2009, 149: 318-324.
- [10] Yang C M, Yang L Z, Ouyang Z. Organic carbon and its fractions in paddy soil as affected by different nutrient and water regimes. *Geoderma*, 2005, 124: 133-142.
- [11] Leifeld J, Kögel-Knabner I. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use? *Geoderma*, 2005, 124: 143-155.
- [12] Boone R D. Light fraction soil organic matter: origin and contribution to net nitrogen mineralization. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26: 1459-1468.
- [13] Tang X H, Shao J A, Huang X X, Wei C F, Xie D T, Pan G X. Distribution of soil organic carbon in purple paddy field under long-term non-tillage ridge culture. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2): 235-243.
- [14] Huang X X, Wei C F, Gao M, Xie D T. Tillage effect on organic carbon in a purple paddy soil. *Pedosphere*, 2006, 23(3): 415-424.
- [15] Golchin A, Oades J M, Skjemstad J O. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ¹³C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. *Australian Journal of Soil Research*, 1994, 32: 285-299.

- [16] Roscoe R, Buurman P, Velthorst E J, Vasconcellos CA. Soil organic matter dynamics in density and particle size fractions as revealed by the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotopic ratio in Cerrado's oxisol. *Geoderma*, 2001, 104: 185-202.
- [17] Spycher G, Sollins P, Rose S. Carbon and nitrogen in the light fraction of forest soil: Vertical distribution and seasonal patterns. *Soil Sci.*, 1983, 135: 79-87.
- [18] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, Lafond G P, Townley-Smith L. Light fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 1799-1808.
- [19] Kay B D. Soil structure and organic carbon, a review//Lal R, Kimble J M, Follett R F, Stewart B A, eds. *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 1998, 169-197.
- [20] Zhong C Q. Impact of land use changes on the soil organic carbon of the Min River estuarine wetlands. *Fujian Normal University*, 2009
- [21] Xie J S, Yang Y S, Xie M S, Chen G S, Yang Z J, Huang S D. Effects of vegetation restoration on soil organic matter of light fraction in eroded degraded red soil in subtropics of China. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(1): 170-175.
- [22] Liu M Y, Chang Q R, Yang X Y. Soil carbon fractions under different land use types in the tablelands of the Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6): 1418-1425
- [23] Yang Y S, Liu Y L, Chen G S, Li L, Xie J S, Lin P. Content and distribution of unprotected soil organic carbon in natural and monoculture plantation forests of *Castanopsis kawakamii* in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1): 1-8.
- [24] Baker J M, Ochsner T E, Venterea R T, Griffis T J. Tillage and carbon sequestration — what do we really know?. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2007, 118: 1-5.
- [25] Wang G, Wang C Y, Wang W Y, Wang Q J. The ability and biochemical characteristic of protected soil organic carbon fractions in Ziuling forest grey drab soil. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(24): 2562-2567.
- [26] Wander M M, Traina S J. Organic matter fractions from organically and conventionally managed soils. I. Carbon and nitrogen distribution. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60: 1081-1087.
- [27] Malhi S S, Kutcher H R. Small grains stubble burning and tillage effects on soil organic C and N, and aggregation in northeastern Saskatchewan. *Soil & Tillage Research*, 2007, 94: 353-361

参考文献:

- [4] 谢锦升, 杨玉盛, 解明曙, 杨少红, 杨智杰. 土壤轻组有机质研究进展. *福建林学院学报*, 2006, 26(3): 281-288.
- [5] 谢德体, 陈绍兰. 水田自然免耕的理论与技术. 重庆出版, 2002.
- [13] 唐晓红, 邵景安, 黄雪夏, 魏朝富, 谢德体, 潘根兴. 垄作免耕下紫色水稻土有机碳的分布特征. *土壤学报*, 2007, 44(2): 235-243.
- [20] 钟春棋. 土地利用变化对闽江口湿地土壤有机碳的影响研究. 福建师范大学硕士学位论文, 2009.
- [21] 谢锦升, 杨玉盛, 解明曙, 陈光水, 杨智杰, 黄石德. 植被恢复对退化红壤轻组有机质的影响. *土壤学报*, 2008, 45(1): 170-175.
- [22] 刘梦云, 常庆瑞, 杨香云. 黄土台塬不同土地利用方式下土壤碳组分的差异. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6): 1418-1425.
- [23] 杨玉盛, 刘艳丽, 陈光水, 李灵, 谢锦升, 林鹏. 格氏栲天然林与人工林土壤非保护性有机碳研究. *生态学报*, 2004, 24(1): 1-8.
- [25] 王刚, 王春燕, 王文颖, 王启基. 子午岭森林灰褐土保护有机碳的能力及各密度组分生化特征. *科学通报*, 2004, 49(24): 2562-2567.

CONTENTS

Growth and physiological adaptation of <i>Messerschmidia sibirica</i> to sand burial on coastal sandy	WANG Jin, ZHOU Ruilian, ZHAO Halin, et al (4291)
Alleviation effect and mechanism of exogenous potassium nitrate and salicylic acid on the growth inhibition of <i>Pinus tabulaeformis</i> seedlings induced by deicing salts	ZHANG Ying, LI Fayun, YAN Xia, et al (4300)
Influence of different spatial-scale factors on stream macroinvertebrate assemblages in the middle section of Qiantang River Basin	ZHANG Yong, LIU Shuoru, YU Haiyan, et al (4309)
Species diversity and distribution pattern of non-volant small mammals along the elevational gradient on eastern slope of Gongga Mountain	WU Yongjie, YANG Qisen, XIA Lin, et al (4318)
A patch-based method for mechanism analysis on spatial dynamics of mangrove distribution	LI Chungan, LIU Suqing, FAN Huangqing, et al (4329)
Nutrient heterogeneity in fine roots of six subtropical natural tree species	XIONG Decheng, HUANG Jinxue, YANG Zhijie, et al (4343)
Variation of vegetation NDVI and its response to climate change in Zhejiang Province	HE Yue, FAN Gaofeng, ZHANG Xiaowei, et al (4352)
Heterogeneity in fine root respiration of six subtropical tree species	ZHENG Jinxing, XIONG Decheng, HUANG Jinxue, et al (4363)
Characteristics of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea abundance in soil organic layer under the subalpine/alpine forest	WANG Ao, WU Fuzhong, HE Zhenhua, et al (4371)
Effect of tillage systems on light fraction carbon in a purple paddy soil	ZHANG Junke, JIANG Changsheng, HAO Qingju, et al (4379)
Effects of prescribed fire on carbon sequestration of long-term grazing-excluded grasslands in Inner Mongolia	HE Nianpeng, HAN Xingguo, YU Guirui, et al (4388)
Stoichiometry of carbon dioxide and methane emissions in Minjiang River estuarine tidal wetland	WANG Weiqi, ZENG Congsheng, TONG Chuan, et al (4396)
Distribution and sources of particulate organic carbon in the Pearl River Estuary in summer 2010	LIU Qingxia, HUANG Xiaoping, ZHANG Xia, et al (4403)
The glucose-utilizing bacterial diversity in the cold spring sediment of Shawan, Xinjiang, based on stable isotope probing	CHU Min, WANG Yun, ZENG Jun, et al (4413)
Culture-dependent and culture-independent approaches to studying soil microbial diversity	LIU Guohua, YE Zhengfang, WU Weizhong (4421)
The classification of plant functional types based on the dominant herbaceous species in the riparian zone ecosystems in the Yiluo River	GUO Yili, LU Xunling, DING Shengyan (4434)
Genetic diversity of different eco-geographical populations in endangered plant <i>Prunus mongolica</i> by ISSR Markers	ZHANG Jie, WANG Jia, LI Haoyu, ZHANG Huirong, et al (4443)
Ecophysiological characteristics of higher-latitude transplanted mangrove <i>Kandelia candel</i> in strong tidal range area	ZHENG Chunfang, QIU Jianbiao, LIU Weicheng, et al (4453)
The effect of artificial warming during winter on white clover (<i>Trifolium repens</i> Linn): overwintering and adaptation to coldness in late spring	ZHOU Ruilian, ZHAO Mei, WANG Jin, et al (4462)
Estimating fine root production and mortality in subtropical <i>Altingia grilipes</i> and <i>Castanopsis carlesii</i> forests	HUANG Jinxue, LING Hua, YANG Zhijie, et al (4472)
The cloning and expression of WUE-related gene (<i>PdEPF1</i>) in <i>Populus deltoides</i> × <i>Populus nigra</i>	GUO Peng, JIN Hua, YIN Weilun, et al (4481)
The allelopathy of aquatic rhizome and root extract of <i>Thalia dealbata</i> to seedling of several aquatic plants	MIAO Lihua, WANG Yuan, GAO Yan, et al (4488)
Effect of the avirulent strain of <i>Ralstonia solanacearum</i> on the ecological characteristics of microorganism fatty acids in the rhizosphere of tobacco	ZHENG Xuefang, LIU Bo, LAN Jianglin, et al (4496)
Coupling remotely sensed information with a rice growth model by combining updating and assimilation strategies	WANG Hang, ZHU Yan, MA Mengli, et al (4505)
Effects of water temperature and body weight on metabolic rates of Yellowtail clownfish <i>Amphiprion clarkii</i> (Pisces: Perciformes) during larval development	YE Le, YANG Shengyun, LIU Min, et al (4516)
The distribution of chlorophyll a in the Southwestern Indian Ocean in summer	HONG Lisha, WANG Chunsheng, ZHOU Yadong, et al (4525)
Evaluation of the effects of ecological remediation on the water quality and biological toxicity of Dagou Drainage River in Tianjin	WANG Min, TANG Jingchun, ZHU Wenyong, et al (4535)
Quantitative dynamics of adult population and 3-D spatial pattern of <i>Ceoporus variabilis</i> (Baly)	WANG Wenjun, LIN Xuefei, ZOU Yunding, et al (4544)
Review and Monograph	
Studies on urban heat island from a landscape pattern view: a review	CHEN Ailian, SUN Ranhao, CHEN Liding (4553)
Sediment quality triad and its application in coastal ecosystems in recent years	WU Bin, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (4566)
Discussion	
Food waste management in China: status, problems and solutions	HU Xinjun, ZHANG Min, YU Junfeng, et al (4575)
Scientific Note	
Effects of microchemical substances in anaerobic fermented liquid from rice straw and cyanobacteria on <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>niveum</i> growth	LIU Aimin, XU Shuangsoo, CAI Xin, et al (4585)
Ecological benefit-loss analysis of agricultural ecosystem in Foshan City, China	YE Yanqiong, ZHANG Jiaen, QIN Zhong, et al (4593)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 32 卷 第 14 期 (2012 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 14 (July, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元