

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

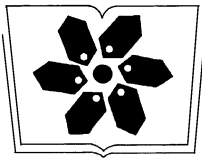
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第1期 Vol.32 No.1 **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 1 期

2012 年 1 月 (半月刊)

目 次

局域种群的 Allee 效应和集合种群的同步性	刘志广, 赵 雪, 张丰盘, 等 (1)
叶片毛尖对齿肋赤藓结皮凝结水形成及蒸发的影响	陶 冶, 张元明 (7)
长江口锋面附近咸淡水混合对浮游植物生长影响的现场培养	王 奎, 陈建芳, 李宏亮, 等 (17)
河流流量对流域下垫面特性的响应	田 迪, 李叙勇, Donald E. Weller (27)
中国中东部平原亚热带湿润区湖泊营养物生态分区	柯新利, 刘 曼, 邓祥征 (38)
基于氮磷比解析太湖苕溪水体营养现状及应对策略	聂泽宇, 梁新强, 邢 波, 等 (48)
滇池外海蓝藻水华爆发反演及规律探讨	盛 虎, 郭怀成, 刘 慧, 等 (56)
采伐干扰对华北落叶松细根生物量空间异质性的影响	杨秀云, 韩有志, 张芸香, 等 (64)
松嫩草原榆树疏林对不同干扰的响应	刘 利, 王 赫, 林长存, 等 (74)
天山北坡不同海拔梯度山地草原生态系统地上净初级生产力对气候变化及放牧的响应	周德成, 罗格平, 韩其飞, 等 (81)
草原化荒漠草本植物对人工施加磷素的响应	苏洁琼, 李新荣, 冯 丽, 等 (93)
自然和人工管理驱动下盐城海滨湿地景观格局演变特征与空间差异	张华兵, 刘红玉, 郝敬锋, 等 (101)
晋、陕、宁、蒙柠条锦鸡儿群落物种多样性对放牧干扰和气象因子的响应	周 伶, 上官铁梁, 郭东罡, 等 (111)
华南地区 6 种阔叶幼苗叶片形态特征的季节变化	薛 立, 张 柔, 奚如春, 等 (123)
河西走廊不同红砂天然群体种子活性相关性	苏世平, 李 毅, 种培芳 (135)
江西中南部红壤丘陵区主要造林树种碳固定估算	吴 丹, 邵全琴, 李 佳, 等 (142)
酸雨和采食模拟胁迫下克隆整合对空心莲子草生长的影响	郭 伟, 李钧敏, 胡正华 (151)
棉铃虫在 4 个辣椒品种上的寄主适合度	贾月丽, 程晓东, 蔡永萍, 等 (159)
烟草叶面积指数的高光谱估算模型	张正杨, 马新明, 贾方方, 等 (168)
不同作物田烟粉虱发生的时空动态	崔洪莹, 戈 峰 (176)
长期施肥对稻田土壤固碳功能菌群落结构和数量的影响	袁红朝, 秦红灵, 刘守龙, 等 (183)
新银合欢篱对紫色土坡地土壤有机碳固持的作用	郭 甜, 何丙辉, 蒋先军, 等 (190)
一株产漆酶土壤真菌 F-5 的分离及土壤修复潜力	茆 婷, 潘 澄, 徐婷婷, 等 (198)
木论喀斯特自然保护区土壤微生物生物量的空间格局	刘 璐, 宋同清, 彭晚霞, 等 (207)
岷江干旱河谷 25 种植物一年生植株根系功能性状及相互关系	徐 琨, 李芳兰, 苟水燕, 等 (215)
黄土高原草地植被碳密度的空间分布特征	程积民, 程 杰, 杨晓梅, 等 (226)
棉铃发育期棉花源库活性对棉铃对位叶氮浓度的响应	高相彬, 王友华, 陈兵林, 等 (238)
耕作方式对紫色水稻土有机碳和微生物生物量碳的影响	李 辉, 张军科, 江长胜, 等 (247)
外源钙对黑藻抗镉胁迫能力的影响	闵海丽, 蔡三娟, 徐勤松, 等 (256)
强筋与弱筋小麦籽粒蛋白质组分与加工品质对灌浆期弱光的响应	李文阳, 闫素辉, 王振林 (265)
专论与综述	
蛋白质组学研究揭示的植物根盐胁迫响应机制	赵 琪, 戴绍军 (274)
流域生态风险评估研究进展	许 妍, 高俊峰, 赵家虎, 等 (284)
土壤和沉积物中黑碳的环境行为及效应研究进展	汪 青 (293)
研究简报	
青藏高原紫穗槐主要形态特征变异分析	梁坤伦, 姜文清, 周志宇, 等 (311)
菊属与蒿属植物苗期抗蚜虫性鉴定	孙 娅, 管志勇, 陈素梅, 等 (319)
滨海泥质盐碱地衬膜造林技术	景 峰, 朱金兆, 张学培, 等 (326)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 332 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-01



封面图说: 白鹭展翅为梳妆, 玉树临风巧打扮——这是大白鹭繁殖期时的美丽体态。大白鹭体羽全白, 身长 94—104cm, 寿命 20 多年。是白鹭中体型最大的。繁殖期的大白鹭常常在湿地附近的大树上筑巢, 翩翩飞舞吸引异性, 其繁殖期背部披有蓑羽, 脸颊皮肤从黄色变成兰绿色, 嘴由黄色变成绿黑色。大白鹭是一个全世界都有它踪迹的广布种, 一般单独或成小群, 在湿地觅食, 以小鱼、虾、软体动物、甲壳动物、水生昆虫为主, 也食蛙、蝌蚪等。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201101210110

李辉, 张军科, 江长胜, 郝庆菊, 吴艳, 谢德体. 耕作方式对紫色水稻土有机碳和微生物生物量碳的影响. 生态学报, 2012, 32(1): 0247-0255.

Li H, Zhang J K, Jiang C S, Hao Q J, Wu Y, Xie D T. Long-term tillage effects on soil organic carbon and microbial biomass carbon in a purple paddy soil. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(1): 0247-0255.

耕作方式对紫色水稻土有机碳和微生物 生物量碳的影响

李 辉^{1,2}, 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:以位于西南大学的农业部紫色土生态环境重点野外科学观测试验站始于 1990 年的长期定位试验田为对象,研究了冬水田平作(DP)、水旱轮作(SH)、垄作免耕(LM)及垄作翻耕(LF)等 4 种耕作方式对紫色水稻土有机碳(SOC)和微生物生物量碳(SMBC)的影响。结果表明,4 种耕作方式下 SOC 和 SMBC 均呈现出在土壤剖面垂直递减趋势,翻耕栽培下其降低较均匀,而免耕栽培下其富集在表层土壤中。同一土层不同耕作方式间 SOC 和 SMBC 的差异在表层最大,随着土壤深度的增加,各处理之间的差异逐渐减小。在 0—60 cm 剖面中,SOC 含量依次为:LM(17.6 g/kg)>DP(13.9 g/kg)>LF(12.5 g/kg)>SH(11.3 g/kg),SOC 储量也依次为:LM(158.52 Mg C/hm²)>DP(106.74 Mg C/hm²)>LF(93.11 Mg C/hm²)>SH(88.59 Mg C/hm²),而 SMBC 含量则依次为:LM(259 mg/kg)>SH(213 mg/kg)>LF(160 mg/kg)>DP(144 mg/kg)。与其它 3 种耕作方式比较,LM 处理显著提高 SOC 含量和储量以及 SMBC 含量。对土壤微生物商(SMBC/SOC)进行分析发现,耕作方式对 SOC 和 SMBC 的影响程度并不一致。SMBC 与 SOC、全氮、全磷、全硫、碱解氮、有效磷均呈现极显著正相关($P<0.01$),与有效硫呈显著正相关($P<0.05$);表明 SMBC 可以作为表征紫色水稻土壤肥力的敏感因子。

关键词:耕作方式; 土壤有机碳; 土壤微生物生物量碳; 微生物商; 紫色水稻土

Long-term tillage effects on soil organic carbon and microbial biomass carbon in a purple paddy soil

LI Hui^{1,2}, 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: Changes in soil organic carbon (SOC) storage are closely related to soil quality and the long-term sustainability of agriculture. Accurate assessments of the effects of tillage system on soil organic matter sequestration are needed. A small difference in SOC contents can substantially change soil C storage estimates because the terrestrial carbon pool is so large. Sequestration of C in soils represents a mechanism to reduce atmospheric CO₂ levels, but the extent to which soils can sequester C varies with climate, cropping system, and tillage practices. Soil C sequestration represents the accumulation of soil organic matter, and is the difference between C inputs by plants and organic matter decomposition. Hence, microbial activity is an important factor influencing C sequestration potential in soils.

The impacts of different tillage systems on SOC and soil microbial biomass carbon (SMBC) were studied in this paper.

基金项目:国家自然科学基金项目(41005069,40975095 和 40805050); 教育部博士点新教师基金(200806351014); 中央高校基本科研业务费专项资金(XDJK2009B026); 西南大学生态学重点学科“211”工程三期建设项目资助

收稿日期:2011-01-21; 修订日期:2011-08-22

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

The tillage experimental site (30°26'N, 106°26'E) is located at the farm of Southwest University in Chongqing, China. The experiment was initiated in 1990 and included four tillage treatments; 1) conventional tillage with rotation of rice and winter fallow system (DP), where regular tillage practices were used for rice with three times of plowing and harrowing annually, and after the rice harvest, the field was submerged with water; 2) conventional tillage with rotation of rice and rape system (SH), where tillage was the same as in the DP treatment, but the field was alternately submerged and drained for rice and rape cultivation; 3) no-till and ridge culture with rotation of rice and rape system (LM), where ridges (five in each plot) with the top of 25 cm width were intervened with the ditches of 30 cm width and 35 cm depth, with no tillage practices performed, rape cultivated on the top of the ridges with the water level being maintained just to the bottom of the ditch, and the field submerged in water to cultivate rice after rape being harvested; 4) tillage and ridge culture with rotation of rice and rape system (LF), where ridges were made as in LM treatment, but ridges were made every year for cultivating rice after rape harvest. Soils sampling at the depths of 0–10, 10–20, 20–30, 30–40, 40–50 and 50–60 cm were performed with a soil drill after the rape harvest in the spring of 2009.

The results showed that the contents of SOC and SMBC both decreased with the increase of soil depth under four tillage systems; however LM treatment enriched SOC and SMBC contents near the soil surface. The differences of SOC and SMBC contents in the same soil layer among the four tillage systems were the largest in 0–10 cm soil layer and the lowest in 50–60 cm soil layer. In the whole soil layer (0–60 cm), the order of SOC contents was LM (17.57 g/kg) > DP (13.91 g/kg) > LF (12.50 g/kg) > SH (11.29 g/kg), SOC storage was LM (158.52 MgC/hm²) > DP (106.74 MgC/hm²) > LF (93.11 MgC/hm²) > SH (88.59 MgC/hm²), and SMBC contents was LM (258.88 mg/kg) > SH (213.23 mg/kg) > LF (159.71 mg/kg) > DP (144.08 mg/kg). Compared with the other three treatments, LM treatment significantly increased the content and storage of SOC, and SMBC content. Analysis of microbial quotient showed that tillage systems had different impacts on SOC and SMBC. SMBC were significantly correlated with soil organic carbon, total nitrogen, alkali-hydrolyzed nitrogen, total phosphorus, effective phosphorus, total sulfur and effective sulfur which suggested SMBC could be a sensitive indicator for characterizing changes of purple paddy soil fertility in Southwest China.

Key Words: tillage system; soil organic carbon; soil microbial biomass carbon; soil microbial quotient; purple paddy soil

土壤是联接大气圈、水圈、生物圈和岩石圈的纽带,是碳循环的重要组成部分,制约着全球碳循环动态。据估计,以有机质形式存在于土壤中的碳量(1400—1600 Pg)约为陆地生物碳量的3倍,为大气碳库的2倍^[1]。土壤有机碳(SOC)较小幅度的变化都可能引起大气中CO₂浓度的显著改变,从而影响全球气候^[2]。土壤微生物作为土壤有机质和养分(N、P、S等)转化和循环的驱动力,参与土壤中有有机物质的分解、腐殖质的形成、土壤养分转化和循环等各个生化过程^[3]。土壤微生物量能反映参与调控土壤中能量和养分循环以及有机物质转化的对应微生物数量,被认为是土壤活性养分的储库,是植物生长可利用养分的重要来源,研究不同耕作方式下土壤微生物特征的差异对于提高土壤肥力,合理和可持续地利用土壤资源具有重要意义^[4-5]。

耕作方式对农田SOC及土壤微生物量碳(SMBC)的分布具有强烈的影响。不同耕作方式下,SOC的固定和矿化既可能充当碳源,也可能充当碳汇,从而对全球大气CO₂浓度起着重要的调节作用^[6]。耕作方式不同,导致土壤温度和湿度以及进入土壤中的肥料和植物残渣的数量也不同,从而影响了土壤中养分的矿化、运输、吸收和利用,造成土壤养分的差异,由此对土壤中的SMBC产生强烈的影响^[7]。许多研究者把土壤中碳的损失归因于土壤的耕作方式,并认为通过合理的农业管理措施,还可以对损失的碳进行恢复^[8]。有研究认为保护性耕作,尤其是免耕管理是农田土壤碳截存最有效的措施之一^[9-12]。但也有研究认为免耕只是改变了碳在土层中的分布,使其在表层富集,但对土壤碳截存并无作用^[13-15]。Baker等^[16]将这种研究上的分歧归结于土壤样品的采集深度,认为浅土采样对于全面评价耕作制度对土壤碳截存的影响是不充分的,免耕对土壤碳截存的影响研究必须建立在深层次土壤样品采集的基础上。另外,有研究表明,耕作方式对土壤碳的效应在长

期耕作措施下比短期更为明显,因此,采用长期耕作试验来分析不同耕作方式对 SOC 和 SMBC 的影响更为研究者所关注^[5,15]。

紫色水稻土是四川盆地广泛分布的耕作土壤,是西南地区主要的水稻土类型。本文以西南地区紫色水稻土作为研究对象,通过采集 0—60 cm 深度的土壤样品,探讨了长期(19a)不同耕作方式对 SOC 和 SMBC 含量的影响。

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 °C,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 值 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 试验处理

试验共设 4 个处理:(1)冬水田平作(中稻-休闲),简称 DP。代表四川盆地稻田传统耕作方法,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,水稻收获后将稻茬 2748.0—3301.5 kg·hm⁻²·a⁻¹和杂草 1912.5—3154.5 kg·hm⁻²·a⁻¹翻入土中,并灌冬水休闲;(2)水旱轮作(中稻-油菜),简称 SH。代表四川盆地稻田传统耕作方法,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,将稻茬 2697.0—3532.5 kg·hm⁻²·a⁻¹翻入土中,种油菜。油菜生长期,尽可能地保持四边沟内无积水。油菜收获后,淹水,翻耕将油菜残茬 768.0—987.0 kg·hm⁻²·a⁻¹和杂草 6217.5—8004.0 kg·hm⁻²·a⁻¹翻入土中,种水稻;(3)垄作免耕(中稻-油菜),简称 LM。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,稻茬 3562.5—4024.5 kg·hm⁻²·a⁻¹覆盖,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,第 2 年油菜收获后将油菜残茬 742.5—940.5 kg·hm⁻²·a⁻¹和杂草 8746.5—10011.0 kg·hm⁻²·a⁻¹埋在沟底,灌水,水面与垄顶齐平,种植水稻;(4)垄作翻耕(中稻-油菜),简称 LF。作垄规格、水分管理以及残茬还田量均与处理(3)相同,油菜收获后,重新作垄种稻。

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。

1.3 研究方法

1.3.1 野外采样

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 1 个层次,分别采集 0—10、10—20、20—30、30—40、40—50 和 50—60 cm 土壤样品。土样采回后,取部分样品风干,用于测定土壤有机碳含量,其余新鲜土样,放入 4 °C 冰箱中保存待测土壤微生物量碳。

1.3.2 室内分析

取风干后的土壤样品,磨细过 0.25 mm 筛,采用干烧法测定 SOC 含量,所用仪器为 Multi N/C 2100 分析仪(德国),采用氯仿熏蒸浸提法测定 SMBC 含量^[17],土壤容重采用环刀法测定^[18],环刀的体积为 100 cm³,每个土层采集 3 个重复样品。土壤全氮采用半微量凯式定氮法测定^[18],碱解氮采用碱解扩散法测定^[18];土壤全硫采用 Mg(NO₃)₂氧化-BaSO₄比浊法测定^[18],有效硫采用磷酸盐-乙酸浸提-硫酸钡比浊法测定^[18];土壤全磷采用酸溶-钼锑抗比色法测定^[18],有效性磷采用碳酸氢钠法测定^[18]。

1.3.3 等质量 SOC 储量计算方法^[19]

在 1970 年以前,在大多数文献里,SOC 储量只是简单的用含量(g C/kg 土壤)表示,虽然通常情况下,SOC 储量的确随着含量的增加而升高,但一些研究的定量估算却说明了一个简单的事实,即每单位土地面积或体积土壤的有机碳量不但取决于有机碳含量,还取决于土壤容重和土壤体积^[19]。现在有很多研究者以含量、土壤容重和土壤体积三者的乘积来计算有机碳。然而,这种计算方法仍然不充分,因为没有考虑到不相等的土壤质量^[14]。Ellert 和 Bettany^[19]也认为以一定深度的单位土地面积上的有机碳量来表示碳储量是不准确的,因为绝对的土壤表面高度或土壤体积会随农田管理措施的不同而有所差异,因而采用等质量方法可以解决这一问题。现在等质量方法来评估农事管理对 SOC 储量的影响在土壤学界已被广泛应用^[19],而国内对这种方法的应用目前还不多见^[20]。

$$M_{\text{soil}} = \rho_b \cdot T \cdot 10000 \quad (1)$$

$$T_{\text{add}} = \frac{(M_{\text{soil, equiv}} - M_{\text{soil, surface}}) \times 0.0001}{\rho_{b, \text{subsurface}}} \quad (2)$$

$$M_{\text{element}} = M_{\text{soil}} \cdot \text{conc} \cdot 0.001 \quad (3)$$

式中, M_{soil} 为单位面积土壤质量(Mg/hm²); ρ_b 为土壤容重(g/cm³); T 为土壤深度(m); T_{add} 为要达到等质量土壤需要另加的亚表层土壤深度(m); $M_{\text{soil, equiv}}$ 为最大的土壤质量(Mg/hm²); $M_{\text{soil, surface}}$ 为其他质量小于 $M_{\text{soil, equiv}}$ 的处理的表层土壤质量之和(Mg/hm²); $\rho_{b, \text{subsurface}}$ 为亚表层土壤容重(g/cm³),在此实验中为 60—70 cm 土层的土壤容重; M_{element} 为 SOC 储量(Mg C/hm²);conc 为土壤 SOC 含量(g/kg)。SOC 单位面积上等质量 SOC 储量等于表层土壤 SOC 储量加上要达到该土壤质量需要另加的土壤深度的 SOC 储量。

2 结果与讨论

2.1 耕作方式对土壤有机碳含量的影响

4 种耕作方式下,SOC 含量随着土壤深度的增加,SOC 含量总体上呈逐渐降低的趋势(表 1)。翻耕农田 SOC 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 SOC 主要富集在 0—10 cm 土层内,与 0—10 cm 土层相比,10—20 cm 土层 SOC 含量迅速减少了 9.36 g/kg,而 DP、SH 和 LF 处理则分别降低了 4.41、0.22 和 2.54 g/kg。SOC 的深度分布特征与土壤剖面的发育过程密切相关,随深度增大,有机质的来源数量不断减少,而成土时间增加,分解作用导致的有机质含量降低幅度增大,有机质含量不断减少^[21]。导致翻耕与免耕农作 SOC 垂直分布差异的原因主要有以下两点:首先,免耕方式下有机残存物质在表层连续的积累,植物秸秆的覆盖会形成有利的条件,使土壤表面的 SOC 在表层分布;同时免耕方式下表层的覆盖物质有利于蚯蚓和其他生物的生存,这些生物能够使得 SOC 在土壤表层分布^[22]。而翻耕会将归还到土壤表层的秸秆及表层的有机质翻到土壤以下 20—40 cm 的范围,从而降低了土壤表层的有机碳,使深层土壤中层有机碳含量提高,这与冲积母质发育的土壤剖面相似^[23];其次,植物的根系分布。Baker 等^[16]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。根系分布随深度的差异以及由耕作引起的土壤物理环境的差异,都会导致 SOC 含量在深度分布上的系统差异。

由表 1 可以看出,在土壤剖面的各个层次上,垄作免耕的 SOC 含量都高于其它处理。同一土层不同耕作方式间 SOC 含量的差异在表层最大,随着土壤深度的增加而逐渐降低。在 0—10cm 土层,SOC 含量最高的垄作免耕和含量最低的水旱轮作相差 20.6 g/kg,在以下的 5 个土层中,SOC 含量最高值和最低值的差异逐渐减小,分别为 11.47、13.83、10.49、10.75 g/kg 和 5.79 g/kg。导致这种现象的主要原因是耕作对 SOC 的影响主要集中在表层,而在 30cm 以下,SOC 含量主要受土壤成土过程的影响,耕作的影响逐渐减小。本文研究结果与 Sa^[24]等在巴西氧化土地区以及 Chen^[25]等在中国黄土高原地区所得出的研究结果是一致的。

表 1 4 种耕作方式下土壤有机碳含量/(g/kg)

Table 1 SOC contents under different tillage systems

土壤深度 Soil depth/(cm)	DP	SH	LM	LF
0—10	18.78 aB	13.85 abC	34.46 aA	16.87 aBC
10—20	14.37 abBC	13.63 abC	25.10 bA	14.33 aC
20—30	12.69 bBC	17.08 aB	24.75 bA	17.18 aB
30—40	17.45 aAB	10.78 bcC	21.27 cA	15.22 aBC
40—50	11.99 bB	8.98 cBC	17.85 dA	7.10 bC
50—60	12.15 bA	7.21 cB	13.00 eA	7.88 bB

① DP: 冬水田平作 Conventional tillage with rotation of rice and winter fallow system; SH: 水旱轮作 Conventional tillage with rotation of rice and rape system; LM: 垄作免耕 No-till and ridge culture with rotation of rice and rape system; LF: 垄作翻耕 Tillage and ridge culture with rotation of rice and rape system; ②表中各列相同小写字母及各行大写字母分别表示同一处理不同深度和同一土壤深度不同处理有机碳在 5% 水平上的差异性,不同字母表示差异显著

在 0—60 cm 的土壤深度内,有机碳的平均含量为 LM(22.74 g/kg)>DP(14.57 g/kg)>LF(13.10 g/kg)>SH(11.92 g/kg)。单因素方差分析发现,LM 处理与 SH、LF 处理之间的 SOC 差异达到了极显著水平($P<0.01$),与 DP 处理之间的差异达到了显著水平($P<0.05$),说明 LM 处理较其它 3 种耕作方式能显著提高 SOC 含量。冬水田平作常年淹水,其强烈的厌氧环境有利于 SOC 的积累。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,土壤水热状况改善,通透性增强^[26],SOC 分解加快,但垄作免耕 1a 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;而且免耕农作对土壤结构的扰动强度和频率都很小,减少了耕作的侵蚀和水蚀作用,使土壤中水稳性团聚体增多,因而使 SOC 含量升高。垄作翻耕和水旱轮作尽管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,翻耕降低了土壤含水量,机械破坏水稳性团聚体,压实导致气孔数量减少,从而使 SOC 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^[26],因而 SOC 含量最低。

2.2 耕作方式对土壤有机碳储量的影响

表 2 列出了各 4 种耕作处理下不同深度的 SOC 储量见表 2。DP 处理长期淹水,土粒分散,结构差,土壤容重很低,0—10 cm 土层土壤容重只有 0.75 g/cm³,起垄后,消除了水层对土壤结构的不良影响,土壤颗粒逐渐团聚,土壤容重明显增加;SH 处理由于土壤水分含量最低,土壤容重最高。因此,SH 处理下 0—60 cm 土壤质量最大,为 7640 Mg/hm²。LF、DP 以及 LM 处理要达到此土壤质量需要增加的土壤深度分别为 3.36、7.57、6.52 cm,相应增加的 SOC 储量分别为 4.02、12.51 和 11.18 Mg C/hm²。各耕作方式下 SOC 储量的高低顺序依次为 LM(158.52 MgC/hm²)>DP(106.74 MgC/hm²)>LF(93.11 MgC/hm²)>SH(88.59 MgC/hm²)。与对照 DP 处理相比,LM 处理 SOC 储量增加了 49%,而 LF 及 SH 处理则分别降低了 12.77% 和 17.00%。单因素方差分析表明,LM 处理 SOC 储量极显著高于其它 3 种处理($P<0.01$),是提高紫色水稻土有机碳储量的有效措施。

大量研究表明,相对于翻耕农作,免耕农作能够提高土壤 SOC 储量,增加土壤碳截存。比如,Carvalho 等^[9]通过在巴西亚马逊流域的塞拉多区一个短期的免耕试验,发现在 0—30 cm 的土层内,由传统耕作转变为免耕土壤碳截存速率为 0.38 MgC·hm⁻²·a⁻¹)。Ussiri 和 Lal^[10]的研究发现,经过 43 年的免耕实验后耕层土壤有机质含量为(80.0±3.7)MgC/hm²,而犁耕和耙耕分别为(45.3±1.7)MgC/hm²和(44.8±3.7)MgC/hm²,相对于传统的翻耕,免耕对 SOC 截存有明显的优势。有研究表明,相对于传统耕作方式,巴西热带免耕土壤 0—20 cm 土层碳截存的平均速率为 0.35 MgC·hm⁻²·a⁻¹,亚热带免耕土壤为 0.48 MgC·hm⁻²·a⁻¹,北美温带土壤为 0.34 MgC·hm⁻²·a⁻¹^[11]。免耕改变了土壤的物理和生物状况,促进了土壤团聚体的形成,降低了 SOC 分解速率,从而提高了土壤碳截存速率,各地免耕土壤碳截存速率的差异主要受土壤性质、气候、秸秆还田量、免耕持续时间、作物种植方式等因素的制约^[12]。

但也有很多研究发现,与传统耕作方式相比,免耕 SOC 储量并没有显著性差异。比如,Yang 等^[13]、

Hermle 等^[14]、Deen 和 Katita^[15]的研究均发现免耕对 SOC 储量无明显影响。有研究认为实验地的自然条件,尤其是土壤类型和气候条件对研究结论有着非常重要的影响^[27]。Gregorich 等^[28]在对加拿大东西部的实验中发现,在西部,免耕方式下土壤中有机碳储量的增加速率为 $0.32 \text{ MgC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,而在东部,免耕方式下土壤中总有机碳储量呈负增长,速率为 $-0.07 \text{ MgC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。免耕对东部的这种影响主要是与当地的耕作深度、土壤类型、气候条件以及秸秆的还田量和还田方式差异有关,因为在东部,传统耕作深度要大于西部,同时湿冷的气候,灌溉条件和土壤通气性差,减弱了还田秸秆的分解。Yang 等^[13]以及 Hermle 等^[14]的研究也表明,冷湿气候下免耕对土壤碳截存并无明显作用,本研究的试验点属于亚热带湿润气候,也许气候类型的不同是造成研究结果差异的一个原因。

表 2 4 种耕作方式下土壤有机碳储量/(MgC/hm^2)

Table 2 Soil organic carbon storage by depth under four tillage systems

土壤深度 Soil depth/(cm)	DP	SH	LM	LF
0—10	14.06bB	15.51abB	30.32aA	14.85bB
10—20	12.79bB	13.63bB	22.84bA	12.75bB
20—30	13.58bC	20.84aB	28.21aA	19.93aBC
30—40	21.82aAB	15.09abB	24.24bA	19.94aAB
40—50	15.70bB	13.29bBC	23.92bA	10.36bC
50—60	16.28bA	10.24bB	17.81cA	11.26bB
0—60	94.23b BC	88.59C	147.34A	89.09C
增加的土壤深度 The additional soil thickness/(cm)	7.57	0.00	6.52	3.36
增加土壤所对应的 SOC 数量 The additional SOC storage/($\text{Mg C}/\text{hm}^2$)	12.51A	0.00C	11.18A	4.02B
总 SOC 储量 Total SOC storage/($\text{Mg C}/\text{hm}^2$)	106.74B	88.59D	158.52A	93.11CD

2.3 耕作方式对土壤微生物量碳的影响

不同耕作方式下 SMBC 含量随土壤深度的增加而降低(图 1),翻耕处理下降低地比较稳定,而免耕处理下则呈现表层富集现象。LM 处理在 0—10 cm 土层出现富集,10—20 cm 土层的 SMBC 含量较 0—10 cm 土层降低了 221.78 mg/kg ,而 DP、SH、LF 处理的变化值依次为 49.02 、 99.42 mg/kg 和 71.56 mg/kg 。SMBC 的垂直递减特征与 Nyamadzawo 等^[4]的研究结果一致,SMBC 主要来源于作物残体、根系分泌物以及有机肥料的输入^[29],本试验田所有耕作处理均不施有机肥,所以免耕和翻耕农作下 SMBC 的剖面分布差异主要是因还田残茬以及植物根系的分布不同所致,与前面所述的 SOC 的剖面分布差异原因相似。

由图 1 可以看出,同一土层不同耕作方式间 SMBC 的差异在表层最大,随着土壤深度的增加而降低。在 0—10 cm 土层,垄作免耕 SMBC 含量最高,冬水田平作最低,二者之间的差值为 318.00 mg/kg 。单因素方差分析表明,在 0—10 cm 土层,免耕与翻耕处理之间的差异达到极显著性水平($P=0.003$)而在其它 5 个土层,免耕与翻耕处理之间的差异均不显著($P>0.05$)。其原因是免耕处理下还田残茬及植物根系主要集中分布于表土层,有利于微生物的生存和繁衍;而翻耕条件下,土壤外源有机质和土壤原有有机质的矿化分解要比免耕土壤强烈,有机物质输入量的减少使得 SMBC 含量也较低,由此导致表层 SMBC 含量免耕处理大于翻耕。但随着土壤深度的增加,免耕处理下 SMBC 含量降低较快,而翻耕处理降低的比较缓慢,因此随着土层的逐渐加深,各处理方式间的差异逐渐减小。

0—60 cm 土壤深度内,LM 处理 SMBC 含量最高,平均值为 258.88 mg/kg ,然后依次是 SH(213.23 mg/kg)、LF(159.71 mg/kg)和 DP(144.08 mg/kg)。相对于翻耕土壤,免耕提高了 SMBC 的含量,Nyamadzawo 等^[4]、Pandey 等^[5]和 Franchini 等^[30]也发现耕作降低了 SMBC 的含量。LM、LF 及 SH 处理每年有 2 季作物残

茬还田,而 DP 处理只有 1 季,有机物料作为微生物呼吸的底物,其输入增多可提高微生物活性,使 SMBC 含量升高。研究表明^[26],与 DP 处理相比,LM 处理土壤微生物数量增多,细菌、真菌、放线菌、好气性纤维分解菌和好气性固氮菌增加 50% 以上,土壤呼吸强度、纤维素分解强度、脲酶和转化酶分别增加 25.4%、34.8%、7.6% 和 29.9%。而且,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%,分蘖期每穴根系增加 50—120 条,平均每天增加新根 2—5 条,白根数量增加 5%—10%,黑根数量减少 6%—15%^[26]。土壤微生物数量增多、土壤生化强度和酶活性增强以及作物根系强壮等,都使得垄作免耕土壤微生物活性高,新陈代谢旺盛。

SMBC 是 SOC 最活跃的部分,直接影响 SOC 的转化过程。与 DP 处理相比,SH 处理 SOC 含量降低了 18%,SMBC 含量增加了 48%;LF 处理 SOC 含量降低了 10%,SMBC 含量增加了 11%;LM 处理 SOC 含量增加了 56%,SMBC 含量增加了 80%。显然,与 SOC 相比,SMBC 对耕作方式的变化更为敏感。这与很多研究结果相吻合^[4-5,30]。

2.4 耕作方式对土壤微生物商的影响

微生物商是指 SMBC 与 SOC 含量的百分比。由表 3 可以看到,各耕作方式下土壤微生物商的垂直分布规律并不明显,大体上呈现为先升高后降低的趋势,各耕作方式下土壤微生物商均在 10—20 cm 土层达到最大,这与熊鸿焰^[31]在川西平原水稻土的研究结果一致。由于 SOC 和 SMBC 含量在耕作制度变化过程中受到的影响程度“不同”,从而导致微生物商的差异,在 0—60 cm 土壤深度内,SH 处理土壤微生物商最高,平均值为 1.76%,然后依次是 LF(1.27%)、LM(1.09%)和 DP(0.98%)。冬水田平作微生物商显著低于水旱轮作($P = 0.036$),说明 DP 处理终年淹水的土壤环境有利于有机碳的积累,但不利于微生物生物量的提高;而 SH 处理在干湿交替和每季翻耕的状况下,不利于有机碳的积累,但有利于微生物生物量的提高。

表 3 4 种耕作方式下土壤微生物商/%

Table 3 The profile distribution of soil microbial quotient under four tillage systems

土壤深度 Soil depth/cm	DP	SH	LM	LF
0—10	1.09	1.77	1.20	1.36
10—20	1.76	2.38	1.52	2.10
20—30	1.21	1.55	0.97	0.67
30—40	0.63	1.78	0.88	0.69
40—50	0.66	1.79	1.02	1.53
50—60	0.53	1.28	0.94	1.24

任天志等^[32]认为,在标示土壤过程或土壤健康变化时,微生物商要比微生物碳或全碳单独应用有效得多,因为商是一个比值,能够避免在使用绝对量或对不同有机质含量的土壤进行比较时出现的一些问题。土壤微生物商能够较为准确地反映土地利用和管理措施对土壤的影响,如果土壤被过度利用,土壤微生物碳库将会以较快的速率下降,最终造成土壤有机质含量和微生物商的降低^[30]。目前国内关于微生物生物量的研究中对微生物商的指示作用报道已有一些报道,有研究认为,土壤微生物商对土地利用变化的响应更加敏感,可以预示 SOC 的变化方向^[33],但也有研究认为,土壤微生物商并不能指示土壤有机质含量的积累差异^[34-35]。本研究的数据分析表明,土壤微生物商与有机碳的变化并不一致,原因可能如刘守龙等^[34]的研究得出的推

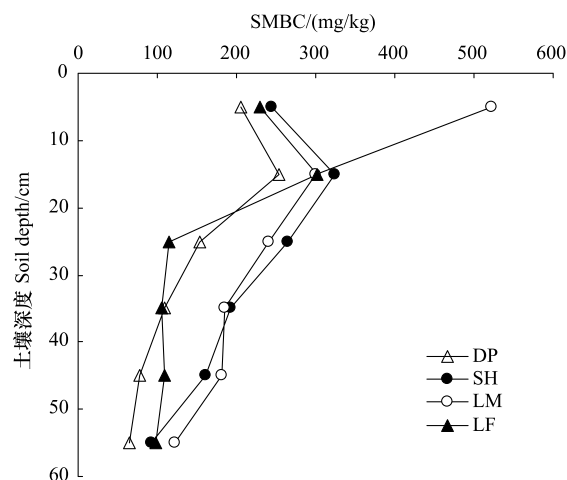


图 1 不同耕作方式下 SMBC 的剖面分布

Fig. 1 The vertical distribution of SMBC under different tillage systems

DP: 冬水田平作; SH: 水旱轮作; LM: 垄作免耕; LF: 垄作翻耕

论:微生物商的变化可以作为有机碳变化的早期指标,当土壤有机碳的变化刚刚产生或未达到平衡状态时,该指标具有一定的指示作用,但当土壤有机碳达到了平衡状态后仍以有机碳总量为指标较好。本研究中的试验田已具有将近 20a 的耕作历史,在长期的耕作下,土壤有机碳可能已达到了平衡状态。

2.5 土壤微生物生物量碳与土壤养分的相关性分析

SMBC 与土壤养分的相关性分析结果表明(表 4),SMBC 与 SOC、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全硫均呈现极显著正相关($P < 0.01$),与有效硫为显著正相关($P = 0.03$),与前人的研究一致^[35],进一步证实 SMBC 可以作为表征土壤肥力的敏感因子,能在一定程度上指示土壤养分供应水平和肥力高低。土壤微生物量库的微小变化都会影响到养分的循环和有效性,而结构良好、有机碳和水分含量较高的土壤,能为土壤微生物活动提供优良的生境,有利于土壤微生物的生长。

表 4 土壤微生物生物量碳与土壤养分指标的相关性

Table 4 Correlations between SMBC and soil nutrient indices

土壤养分指标 Soil nutrient indices	回归关系 Regression model	<i>R</i>	<i>P</i>
有机碳 Soil organic carbon	$y = 29.51x + 8989.80$	0.699	<0.01
全氮 Total nitrogen	$y = 2.52x + 829.21$	0.763	<0.01
碱解氮 Alkali-hydrolyzed nitrogen	$y = 0.17x + 66.47$	0.705	<0.01
全磷 Total phosphor	$y = 0.40x + 218.65$	0.758	<0.01
有效磷 Available phosphor	$y = 0.08x + 4.84$	0.747	<0.01
全硫 Total sulfur	$y = 0.73x + 185.53$	0.853	<0.01
有效硫 Available sulfur	$y = 0.03x + 9.46$	0.610	<0.05

3 结论

通过西南地区紫色水稻土长期(19a)的耕作定位试验发现,SOC 和 SMBC 含量在土壤剖面上具有明显的垂直递减趋势,翻耕农作下其含量降低的比较稳定,而免耕农作下则呈现为表层富集现象。与其它 3 种耕作方式相比,长期垄作免耕能够增加 SOC 含量和储量以及 SMBC 含量,是提高紫色水稻土有机碳以及土壤质量的有效措施。

紫色水稻土各耕作处理下的土壤微生物商与有机碳含量的变化并不一致,因此将其作为长期耕作过程中土壤质量演变的评价指标值得商榷,在 SOC 达到平衡的状态下,采用 SOC 总量作为指标可能更好。相关分析表明,SMBC 与土壤有机碳、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全硫及有效硫都有很好的相关性,可作为表征土壤肥力的敏感因子。

References:

- [1] Eswaran H, van den Berg E, Reich R. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(1): 192-194.
- [2] Houghton R A, Skole D L, Nobre C A, Hackler J L, Lawrence K T, Chomentowski W H. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature*, 2000, 403(6767): 301-304.
- [3] Insarn H, Mitchell C C, Dornaar J F. Relationship of soil microbial biomass and activity with fertilization practice and crop yield of three Ultisols. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, 23(5): 459-464.
- [4] Nyamadzawo G, Nyamangara J, Nyamugafata P, Muzulu A. Soil microbial biomass and mineralization of aggregate protected carbon in fallow-maize systems under conventional and no-tillage in Central Zimbabwe. *Soil and Tillage Research*, 2009, 102(1): 151-157.
- [5] Pandey C B, Chaudhari S K, Dagar J C, Singh G B, Singh R K. Soil N mineralization and microbial biomass carbon affected by different tillage levels in a hot humid tropic. *Soil and Tillage Research*, 2010, 110(1): 33-41.
- [6] Wu Q B, Wang X K, Ren Y F. Application of CO₂ infrared analyzer to measurement of mineralization of soil organic carbon. *Soils*, 2006, 38(3): 304-308.
- [7] McGrath D A, Smith C K, Gholz H L, de Assis Oliveira F. Effects of land-use change on soil nutrient dynamics in Amazônia. *Ecosystems*, 2001, 4(7): 625-645.
- [8] Liebig M A, Morgan J A, Reeder J D, Ellert B H, Gollany H T, Schuman G E. Greenhouse gas contributions and mitigation potential of agricultural practices in northwestern USA and western Canada. *Soil and Tillage Research*, 2005, 83(1): 25-52.
- [9] Carvalho J L N, Cerri C E P, Feigl B J, Piccolo M C, Godinho V P, Cerri C C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. *Soil and Tillage Research*, 2009, 103(2): 342-349.

- [10] Ussiri D A N, Lal R. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(1): 39-47.
- [11] Bayer C, Martin-Neto L, Mielniczuk J, Pavinato A, Dieckow J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil and Tillage Research*, 2006, 86(2): 237-245.
- [12] Marland G, Garten C T Jr, Post W M, West T O. Studies on enhancing carbon sequestration in soils. *Energy*, 2004, 29(9/10): 1643-1650.
- [13] Yang X M, Drury C F, Wander M M, Kay B D. Evaluating the effect of tillage on carbon sequestration using the minimum detectable difference concept. *Pedosphere*, 2008, 18(4): 421-430.
- [14] Hermle S, Anken T, Leifeld J, Weisskopf P. The effect of the tillage system on soil organic carbon content under moist, cold-temperate conditions. *Soil and Tillage Research*, 2008, 98(1): 94-105.
- [15] Deen W, Kataki P K. Carbon sequestration in a long-term conventional versus conservation tillage experiment. *Soil and Tillage Research*, 2003, 74(2): 143-150.
- [16] Baker J M, Ochsner T E, Venterea R T, Griffis T J. Tillage and soil carbon sequestration-what do we really know?. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2007, 118(1/4): 1-5.
- [17] Vance E D, Borokes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil micorbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707.
- [18] Bao S D. *Soil and Agrochemistry Analysis*. Beijing: China Agricultural Press, 2005: 30-34.
- [19] Ellert B H, Bettany J R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995, 75(4): 529-538.
- [20] Liang A Z, Zhang X P, Yang X M, Drury C F. Short-term effects of tillage on soil organic carbon storage in the plow layer of black soil in northeast China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(6): 1287-1293.
- [21] Chen Q Q, Shen C D, Sun Y M, Peng X L, Yi W X, Li Z A, Jiang M T. Mechanism of distribution of soil organic matter with depth due to evolution of soil profiles at the Dinghushan Biosphere Reserve. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1): 1-8.
- [22] Franzluebbers A J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research*, 2002, 66(2): 95-106.
- [23] Ma Y J, Chen J F. *Change in Paddy Soil Materials and Its Effect on Eco-Environment*. Beijing: Science Press, 1999.
- [24] de Moraes Sá J C, Cerri C C, Lal R, Dick W A, Piccolo M C, Feigl B E. Soil organic carbon and fertility interactions affected by a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(1): 56-64.
- [25] Chen H Q, Hou R X, Gong Y S, Li H W, Fan M S, Kuzyakov Y. Effects of 11 years of conservation tillage on soil organic matter fractions in wheat monoculture in Loess Plateau of China. *Soil and Tillage Research*, 2009, 106(1): 85-94.
- [26] Xie D T, Chen S L. *Theory and Technique of Paddy Field under Soil Virginization*. Chongqing: Chongqing Press, 2002.
- [27] Jarecki M K, Lal R. Soil organic carbon sequestration rates in two long-term no-till experiments in Ohio. *Soil Science*, 2005, 170(4): 280-291.
- [28] Gregorich E G, Rochette P, VandenBygaart A J, Angers D A. Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada. *Soil and Tillage Research*, 2005, 83(1): 53-72.
- [29] Kandeler E, Palli S, Stemmer M, Gerzabek M H. Tillage changes microbial biomass and enzyme Activities in particle-size fractions of a Haplic Chernozem. *Soil Biologyand Biochemistry*, 1999, 31(9): 1253-1264.
- [30] Franchini J C, Crispino C C, Souza R A, Torres E, Hungria M. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 2007, 92(1/2): 18-29.
- [31] Xiong H Y. *Microbial characters in no-tillage soil with paddy-upland rotation*. Sichuan Agricultural University, 2008
- [32] Ren T Z, Grego S. Soil bioindicators in sustainable agriculture. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(1): 68-75.
- [33] Wang X L, Su Y R, Huang D Y, Xiao H A, Wang L G, Wu J S. Effects of land use on soil organic C and microbial biomass C in hilly red soil region in subtropical China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(4): 750-757.
- [34] Liu S L, Su Y R, Huang D Y, Xiao H A, Wu J S. Response of Cmic-to-Corg to land use and fertilization in subtropical region of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(7): 1411-1418.
- [35] Xu H Q, Zhang J E, Feng L F, Quan G M, Mao D J, Qin Z. Effects of different land use patterns on microbial biomass carbon and nitrogen in Guangdong Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4112-4118.

参考文献:

- [6] 吴庆标, 王效科, 任玉芬. CO₂红外分析仪在土壤有机碳矿化中的测试与应用研究. *土壤*, 2006, 38(3): 304-308.
- [18] 鲍士旦. *土壤农化分析*. 北京: 中国农业出版社, 2005: 30-34.
- [20] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, Drury C F. 耕作方式对耕层黑土有机碳库储量的短期影响. *中国农业科学*, 2006, 39(6): 1287-1293.
- [21] 陈庆强, 沈承德, 孙彦敏, 彭少麟, 易惟熙, 李志安, 姜漫涛. 鼎湖山土壤有机质深度分布的剖面演化机制. *土壤学报*, 2005, 42(1): 1-8.
- [23] 马毅杰, 陈家坊. *水稻土物质变化与生态环境*. 北京: 科学出版社, 1999: 8-26.
- [26] 谢德体, 陈绍兰. *水田自然免耕的理论与技术*. 重庆: 重庆出版社, 2002.
- [31] 熊鸿焰. *水旱轮作条件下免耕土壤微生物学特性研究*. 四川农业大学, 2008.
- [32] 任天志, Grego S. 持续农业中的土壤生物指标研究. *中国农业科学*, 2000, 33(1): 68-75.
- [33] 王小利, 苏以荣, 黄道友, 肖和艾, 汪立刚, 吴金水. 土地利用对亚热带红壤低山区土壤有机碳和微生物碳的影响. *中国农业科学*, 2006, 39(4): 750-757.
- [34] 刘守龙, 苏以荣, 黄道友, 肖和艾, 吴金水. 微生物商对亚热带地区土地利用及施肥制度的响应. *中国农业科学*, 2006, 39(7): 1411-1418.
- [35] 徐华勤, 章家恩, 冯丽芳, 全国明, 毛丹娟, 秦钟. 广东省不同土地利用方式对土壤微生物量碳氮的影响. *生态学报*, 2009, 29(8): 4112-4118.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.32 ,No.1 January ,2012(Semimonthly)

CONTENTS

Allee effects of local populations and the synchrony of metapopulation	LIU Zhiguang, ZHAO Xue, ZHANG Fengpan, et al (1)
Effects of leaf hair points on dew deposition and rainfall evaporation rates in moss crusts dominated by <i>Syntrichia caninervis</i> , Gurbantunggut Desert, northwestern China	TAO Ye, ZHANG Yuanming (7)
The influence of freshwater-saline water mixing on phytoplankton growth in Changjiang Estuary	WANG Kui, CHEN Jianfang, LI Hongliang, et al (17)
The responses of hydrological indicators to watershed characteristics	TIAN Di, LI Xuyong, Donald E. Weller (27)
Lake nutrient ecosystems in the east-central moist subtropical plain of China	KE Xinli, LIU Man, DENG Xiangzheng (38)
The current water trophic status in Tiaoxi River of Taihu Lake watershed and corresponding coping strategy based on N/P ratio analysis	NIE Zeyu, LIANG Xinqiang, XING Bo, et al (48)
Reversion and analysis on cyanobacteria bloom in Waihai of Lake Dianchi	SHENG Hu, GUO Huaicheng, LIU Hui, et al (56)
Effects of cutting disturbance on spatial heterogeneity of fine root biomass of <i>Larix principis-rupprechtii</i>	YANG Xiuyun, HAN Youzhi, ZHANG Yunxiang, et al (64)
Responses of elm (<i>Ulmus pumila</i>) woodland to different disturbances in northeastern China	LIU Li, WANG He, LIN Changcun, et al (74)
Impacts of grazing and climate change on the aboveground net primary productivity of mountainous grassland ecosystems along altitudinal gradients over the Northern Tianshan Mountains, China	ZHOU Decheng, LUO Geping, HAN Qifei, et al (81)
Response of herbaceous vegetation to phosphorus fertilizer in steppe desert	SU Jieqiong, LI Xinrong, FENG Li, et al (93)
Spatiotemporal characteristics of landscape change in the coastal wetlands of Yancheng caused by natural processes and human activities	ZHANG Huabing, LIU Hongyu, HAO Jingfeng, et al (101)
Response of species diversity in <i>Caragana Korshinskii</i> communities to climate factors and grazing disturbance in Shanxi, Shaanxi, Ningxia and Inner Mongolia	ZHOU Ling, SHANGGUAN Tieliang, GUO Donggang, et al (111)
Seasonal change of leaf morphological traits of six broadleaf seedlings in South China	XUE Li, ZHANG Rou, XI Ruchun, GUO Shuhong, et al (123)
Correlation analysis on <i>Reaumuria soongorica</i> seed traits of different natural populations in Gansu Corridor	SU Shiping, LI Yi, CHONG Peifang (135)
Carbon fixation estimation for the main plantation forest species in the red soil hilly region of southern-central Jiangxi Province, China	WU Dan, SHAO Quanqin, LI Jia, et al (142)
Effects of clonal integration on growth of <i>Alternanthera philoxeroides</i> under simulated acid rain and herbivory	GUO Wei, LI Junmin, HU Zhenghua (151)
Difference of the fitness of <i>Helicoverpa armigera</i> (Hübner) fed with different pepper varieties	JIA Yueli, CHENG Xiaodong, CAI Yongping, et al (159)
Hyperspectral estimating models of tobacco leaf area index	ZHANG Zhengyang, MA Xinming, JIA Fangfang, et al (168)
Temporal and spatial distribution of <i>Bemisia tabaci</i> on different host plants	CUI Hongying, GE Feng (176)
Abundance and composition of CO ₂ fixating bacteria in relation to long-term fertilization of paddy soils	YUAN Hongzhao, QIN Hongling, LIU Shoulong, et al (183)
Effect of <i>Leucaena leucocephala</i> on soil organic carbon conservation on slope in the purple soil area	GUO Tian, HE Binghui, JIANG Xianjun, et al (190)
Isolation and the remediation potential of a Laccase-producing Soil Fungus F-5	MAO Ting, PAN Cheng, XU Tingting, et al (198)
Spatial heterogeneity of soil microbial biomass in Mulun National Nature Reserve in Karst area	LIU Lu, SONG Tongqing, PENG Wanxia, et al (207)
Root functional traits and trade-offs in one-year-old plants of 25 species from the arid valley of Minjiang River	XU Kun, LI Fanglan, GOU Shuiyan, et al (215)
Spatial distribution of carbon density in grassland vegetation of the Loess Plateau of China	CHENG Jimin, CHENG Jie, YANG Xiaomei, et al (226)
Effect of nitrogen concentration in the subtending leaves of cotton bolls on the strength of source and sink during boll development	GAO Xiangbin, WANG Youhua, CHEN Binglin, et al (238)
Long-term tillage effects on soil organic carbon and microbial biomass carbon in a purple paddy soil	LI Hui, ZHANG Junke, JIANG Changsheng, et al (247)
Effects of exogenous calcium on resistance of <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle to cadmium stress	MIN Haili, CAI Sanjuan, XU Qinsong, et al (256)
Comparison of grain protein components and processing quality in responses to dim light during grain filling between strong and weak gluten wheat cultivars	LI Wenyang, YAN Suhui, WANG Zhenlin (265)
Review and Monograph	
Salt-responsive mechanisms in the plant root revealed by proteomic analyses	ZHAO Qi, DAI Shaojun (274)
The research progress and prospect of watershed ecological risk assessment	XU Yan, GAO Junfeng, ZHAO Jiahu, et al (284)
A review of the environmental behavior and effects of black carbon in soils and sediments	WANG Qing (293)
Scientific Note	
Variation in main morphological characteristics of <i>Amorpha fruticosa</i> plants in the Qinghai-Tibet Plateau	LIANG Kunlun, JIANG Wenqing, ZHOU Zhiyu, et al (311)
Identification of aphid resistance in eleven species from <i>Dendranthema</i> and <i>Artemisia</i> at seedling stage	SUN Ya, GUAN Zhiyong, CHEN Sumei, et al (319)
Research of padded film for afforestation in coastal argillaceous saline-alkali land	JING Feng, ZHU Jinzhao, ZHANG Xuepei, et al (326)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学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 1 期 (2012 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 1 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:100717	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