

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 24 期
Vol.30 No.24
2010



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



生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

中国科学院科学出版基金资助出版

第 30 卷 第 24 期 2010 年 12 月 (半月刊)

目 次

三江平原残存湿地斑块特征及其对物种多样性的影响	施建敏, 马克明, 赵景柱, 等 (6683)
叶片碳同位素对城市大气污染的指示作用	赵德华, 安树青 (6691)
土地利用对崇明岛围垦区土壤有机碳库和土壤呼吸的影响	张容娟, 布乃顺, 崔 军, 等 (6698)
缓/控释复合肥料对土壤氮素库的调控作用	董 燕, 王正银 (6707)
北京海淀公园绿地二氧化碳通量	李 霞, 孙 睿, 李 远, 等 (6715)
三峡库区消落带生态环境脆弱性评价	周永娟, 仇江啸, 王 姣, 等 (6726)
应用碳、氮稳定同位素研究稻田多个物种共存的食物网结构和营养级关系	张 丹, 闵庆文, 成升魁, 等 (6734)
基于弹性系数的江苏省能源生态足迹影响因素分析	杨足膺, 赵 媛, 付伍明 (6741)
中国土地利用多功能性动态的区域分析	甄 霖, 魏云洁, 谢高地, 等 (6749)
遮荫处理对东北铁线莲生长发育和光合特性的影响	王云贺, 韩忠明, 韩 梅, 等 (6762)
臭氧胁迫对冬小麦光响应能力及 PS II 光能吸收与利用的影响	郑有飞, 赵 泽, 吴荣军, 等 (6771)
地表覆草和覆膜对西北旱地土壤有机碳氮和生物活性的影响	谢驾阳, 王朝辉, 李生秀 (6781)
喀斯特峰丛洼地旱季土壤水分的空间变化及主要影响因子	彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 等 (6787)
极干旱区深埋潜水蒸发量的测定	李红寿, 汪万福, 张国彬, 等 (6798)
灌木林土壤古菌群落结构对地表野火的快速响应	徐赢华, 张 涛, 李 智, 等 (6804)
稻田免耕和稻草还田对土壤腐殖质和微生物活性的影响	区惠平, 何明菊, 黄 景, 等 (6812)
造纸废水灌溉对黄河三角洲盐碱地土壤酶活性的影响	董丽洁, 陆兆华, 贾 琼, 等 (6821)
神农宫扁角菌蚊幼虫种群分布及其与环境因子的相关性	顾永征, 李学珍, 牛长缨 (6828)
三亚珊瑚礁水域纤毛虫种类组成和数量分布及与环境因子的关系	谭烨辉, 黄良民, 黄小平, 等 (6835)
淞江鲈在中国地理分布的历史变迁及其原因	王金秋, 成 功 (6845)
黄海中南部小黄鱼生物学特征的变化	张国政, 李显森, 金显仕, 等 (6854)
甲基溴消毒对番茄温室土壤食物网的抑制	陈云峰, 曹志平 (6862)
离子树脂法测定森林穿透雨氮素湿沉降通量——以千烟洲人工针叶林为例	盛文萍, 于贵瑞, 方华军, 等 (6872)
乡土植物芦苇对外来入侵植物加拿大一枝黄花的抑制作用	李愈哲, 尹 昕, 魏 维, 等 (6881)
遂渝铁路边坡草本植物多样性季节动态和空间分布特征	王 倩, 艾应伟, 裴 娟, 等 (6892)
古尔班通古特沙漠原生梭梭树干液流及耗水量	孙鹏飞, 周宏飞, 李 彦, 等 (6901)
碟果虫实种子萌发对策及生态适应性	刘有军, 刘世增, 纪永福, 等 (6910)
原始兴安落叶松林生长季净生态系统 CO ₂ 交换及其光响应特征	周丽艳, 贾丙瑞, 曾 伟, 等 (6919)
五种红树植物通气组织对人工非潮汐生境的响应	伍卡兰, 彭逸生, 郑康振, 等 (6927)
亚高寒草甸不同生境植物群落物种多度分布格局的拟合	刘梦雪, 刘佳佳, 杜晓光, 等 (6935)
内蒙古荒漠草原地表反照率变化特征	张 果, 周广胜, 阳伏林 (6943)
中国沙棘克隆生长对灌水强度的响应	李甜江, 李根前, 徐德兵, 等 (6952)
增温与放牧对矮蒿草甸 4 种植物气孔密度和气孔长度的影响	张立荣, 牛海山, 汪诗平, 等 (6961)
基于 ORYZA2000 模型的北京地区早稻适宜播种期分析	薛昌颖, 杨晓光, 陈怀亮, 等 (6970)
专论与综述	
区域生态安全格局研究进展	刘 洋, 蒙古军, 朱利凯 (6980)
植物功能性状与湿地生态系统土壤碳汇功能	王 平, 盛连喜, 燕 红, 等 (6990)
农田水氮关系及其协同管理	王小彬, 代 快, 赵全胜, 等 (7001)
虫害诱导挥发物的生态调控功能	王国昌, 孙晓玲, 董文霞, 等 (7016)
土壤微生物资源管理、应用技术与学科展望	林先贵, 陈瑞蕊, 胡君利 (7029)
问题讨论	
从演化的角度评价北京市经济系统可持续发展趋势	黄茹莉, 徐中民 (7038)
基于植物多样性特征的武汉市城市湖泊湿地植被分类保护和恢复	郑忠明, 宋广莹, 周志翔, 等 (7045)
濒危兰科植物再引入技术及其应用	陈宝玲, 宋希强, 余文刚, 等 (7055)
研究简报	
实验条件下华北落叶松和白杆苗期生长策略的差异比较	张芸香, 李海波, 郭晋平 (7064)
基于源-库互反馈的温室青椒坐果时空动态模拟	马韞韬, 朱晋宇, 胡包钢, 等 (7072)
西双版纳小磨公路及其周边道路对蛇类活动的影响	孙 戈, 张 立 (7079)
温度变化对藻类光合电子传递与光合放氧关系的影响	张 曼, 曾 波, 张 怡, 等 (7087)
黄土区六种植物凋落物与不同形态氮素对土壤微生物量碳氮含量的影响	王春阳, 周建斌, 董燕婕, 等 (7092)
食细菌线虫 <i>Caenorhabditis elegans</i> 的取食偏好性	肖海峰, 焦加国, 胡 锋, 等 (7101)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 424 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 48 * 2010-12	

稻田免耕和稻草还田对土壤腐殖质和微生物活性的影响

区惠平¹, 何明菊¹, 黄景¹, 朱桂玉¹, 顾明华^{1, 2, *}, 黎晓峰^{1, 2}, 沈方科^{1, 2}

(1. 广西大学农学院, 广西南宁 530005; 2. 广西大学肥料研究所, 广西南宁 530005)

摘要: 为了阐明免耕和稻草还田土壤固碳机制, 研究了无稻草还田免耕 (NT)、无稻草还田常耕 (CT)、稻草还田免耕 (NTS) 和稻草还田常耕 (CTS) 对水稻不同生育期不同土层 (0—5, 5—12, 12—20 cm) 土壤腐殖质形态、含量及微生物活性的影响。结果表明, 免耕 (NT 和 NTS) 处理显著增加 0—5 cm 土层土壤游离松结态、联结态和稳紧结态腐殖质含量和游离松结态腐殖质占总腐殖质的比例, 且免耕对土壤各结合态腐殖质含量的影响程度有随生育期的推后而增加的趋势; 5—12 cm 和 12—20 cm 土层土壤各结合态腐殖质含量和 0—20 cm 各土层微生物活性有减少趋势; 在水稻分蘖期免耕对微生物活性影响很弱, 在水稻拔节—灌浆期免耕处理显著降低 5—12 cm 土层土壤微生物活性, 相反, 免耕却增加水稻成熟期 0—5 cm 土层的微生物活性; 另一方面, 稻草还田 (CTS 和 NTS) 显著提高土壤各结合态腐殖质含量, 尤其是 0—5 cm 土层、游离松结态腐殖质及水稻生育后期; CTS 处理显著增加分蘖期—孕穗期 0—20 cm 土层的呼吸强度, 而稻草还田显著增加孕穗期—成熟期 0—5 cm 土层的纤维素分解强度。可见, 通过增加土壤腐殖质含量和各结合态腐殖质含量并改变微生物活性免耕有利于表土层碳的固定作用, 而免耕与稻草还田相结合更有利于土壤碳的积累。

关键词: 稻田; 免耕; 稻草还田; 腐殖质; 微生物活性

Effect of no-tillage and rice straw manuring on the combined forms of humus and microbial activities in paddy soil

OU Huiping¹, HE Mingju¹, HUANG Jing¹, ZHU Guiyu¹, GU Minghua^{1, 2, *}, LI Xiaofeng^{1, 2}, SHEN Fangke^{1, 2}

1 College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530005, China

2 Fertilizer Institute, Guangxi University, Nanning 530005, China

Abstract: Humus is important in increasing the biological stability of soil organic carbon, and agricultural management practices may significantly influence soil humus and microbial activity. However, how soil humus and microbial activity change with tillage practices is not well understood. Therefore, the effects of no-tillage without rice straw manuring (NT), conventional tillage without rice straw manuring (CT), no-tillage with rice straw manuring (NTS) and conventional tillage with rice straw manuring (CTS) on the contents of total and different forms of humus and microbial activity at different soil layers (0—5, 5—12, 12—20 cm) at different growth stages of rice plant were studied in this study. Result indicated that no-tillage (NT and NTS) not only increased the contents of total and different forms of soil humus but also increased the proportion of loosely-combined humus to total humus at the 0—5 cm soil layer, but it tends to reduce the contents of total and different forms of humus at the 5—12 cm and 12—20 cm soil layers and soil microbial activities at the 0—20 cm soil layer. The contents of total humus, loosely-combined humus and tightly-combined humus at the 0—5 cm soil layer in NT treatment was not significantly higher at the tillering stage compared to those in the CT treatment. In contrast, the contents of total and different forms of humus in both NT and NTS treatments were significant higher ($P < 0.05$) than those in CT and CTS treatments during the elongation to ripening stage. The microbial activity in response to the treatments varied

基金项目: 广西壮族自治区自然科学基金项目 (0728013); 广西大学研究生科研创新课题 (2007105930901M73) 资助

收稿日期: 2009-11-19; **修订日期:** 2010-09-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gumh@gxu.edu.cn

during the growth stage of the rice plant. Compared to the conventional tillage treatments (CT and CTS), the no-tillage treatments significantly decreased the microbial activity at the 5—12 cm soil layer during the elongation to filling stage, increased it at the 0—5 cm soil layer at the ripening stage, and had no significant difference at the tillering stage. Rice straw manuring treatments (CTS and NTS) significantly increased the contents of total and different forms of soil humus, especially loosely-combined humus, and such effect was much significant at the 0—5 cm soil layer during the late growth stage for NTS treatment and during the early growth stage for CTS treatment. In addition, rice straw manuring increased soil respiration intensity significantly during the tillering to booting stage for CTS treatment and at the ripening stage for NTS treatment, and it promoted soil cellulose decomposition intensity at the 0—5 cm layer during the booting to ripening stage for both NTS and CTS treatments. It was evidenced that soil microbial activity was promoted during the whole growth stage of rice plant under CTS and during the late growth stage of rice plant under NTS. These results suggest that no-tillage treatment can effectively protect soil organic carbon in different forms of soil humus, thus it increased the organic carbon content substantially. Moreover, the no-tillage treatment reduced soil microbial mineralization, thus it significantly mitigated CO₂ emission from agricultural soils. Therefore, the no-tillage can improve soil organic carbon sequestration in the surface soil by elevating the contents of total and different forms of humus and modulate the microbial activity, while the no-tillage combined with rice straw manuring can increase soil carbon accumulation.

Key Words: paddy soil; no-tillage; rice straw manuring; humus; microbial activity

随着全球温室气体浓度的升高,土壤碳库及其的变化研究日益受到重视^[1-3]。大量研究表明土壤是能够大幅度缓解大气 CO₂ 浓度上升的沉积库^[4-6]。目前对土壤有机碳固定的机制有了一定的认识。农田土壤有机碳的稳定在很大程度上受团聚体颗粒组的物理保护和土壤矿物质(氧化铁铝)的化学保护影响^[7-10]。土壤腐殖质作为有机碳的主要部分,与土壤的不同介质结合在一起^[11],根据其结合的牢固程度可分为游离松结态、联结态、稳结态和紧结态。不同结合形态腐殖质的稳定性不同。徐建民^[12]研究表明,铁键结合态腐殖质抗氧化性最强,钙键结合态居中,铝键结合态最弱,而铁铝键结合态腐殖质的抗氧化能力决定于铁键和铝键结合态的相对组成。了解腐殖质形态组成及相应微生物活性的变化有助于阐明土壤有机碳的稳定特性。

免耕和稻草还田是保护性耕作的核心技术,随着全球气候的变化和保护性耕作的大面积推广应用,国内外关于免耕土壤碳库变化的研究日益增多。然而,以往的研究主要关注免耕下耕作层有机碳和活性碳的变化^[2-3]。对腐殖质形态,尤其将腐殖质形态变化与土壤微生物活性结合的综合研究很少。本研究通过大田试验,研究免耕和稻草还田下稻田腐殖质组分及微生物活性的变化,以阐明免耕稻田土壤有机碳的稳定特性,为稻田土壤碳固定机理研究提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在广西大学农学院教学科研基地进行,处于亚热带季风气候区,年平均降雨量为 1300 mm,年均温度在 21.7℃ 左右。试验于第四纪红土母质发育的水稻土上进行,土壤基本理化性状见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of the test soil

土层 Soil depth /cm	有机质 Organic matter /(g/kg)	全 N Total N /(g/kg)	碱解氮 Alkali-hydrolyzable N /(mg/kg)	速效磷 Available P /(mg/kg)	速效钾 Available K /(mg/kg)	pH (H ₂ O)
0—5	41.4	2.3	214.8	53.3	148.6	6.48
5—12	30.0	1.8	144.6	40.1	62.5	6.52
12—20	28.2	1.8	134.5	33.5	39.7	6.49

1.2 试验设计

试验设 4 个处理:无稻草还田常耕抛秧(CT)、无稻草还田免耕抛秧(NT)、稻草还田常耕抛秧(CTS)、稻草还田免耕抛秧(NTS)。随机区组设计,每小区 3 次重复,每小区面积 21m^2 。常耕(CT 和 CTS)处理小区经翻耕、灌水沤田、耙田并平整后抛秧。免耕(NT 和 NTS)处理小区按免耕抛秧技术规程处理稻田和抛栽秧苗。稻草还田处理小区按 6000 kg/hm^2 稻草用量于抛秧前 15d 均匀施放。各处理均施 N 195 kg/hm^2 、 P_2O_5 54 kg/hm^2 、 K_2O 135 kg/hm^2 。氮肥、钾肥分别按 4:3:3、6:4:0(基肥分蘖肥穗肥)的比例分次施用,磷肥全部作基肥 1 次施用。小区四周作筑高 30 cm、宽 20 cm 田基,田基覆塑料薄膜并埋入土 30 cm 以防肥水渗透。水稻返青-分蘖期田间保持 0—3 cm 浅水层,分蘖末期排水搁田,幼穗分化期至抽穗期湿润灌溉,成熟期干湿交替灌溉。

供试水稻品种为金优 253,采用塑盘旱育秧,2007 年 3 月 13 日播种,在 4 月 15 日秧苗长到 2 叶 1 心时抛秧,每小区 2100 株苗。田间管理按“广西水稻免耕抛秧栽培技术要点”^[13]要求进行。

1.3 土壤样品采集及处理

分别于水稻分蘖期、拔节期、孕穗期、灌浆期和成熟期采取 0—5 cm、5—12 cm 和 12—20 cm 土层的土样,每小区随机采 3 个点,除去动植物残体、沙砾,混匀,一部分立即分析土壤微生物活性,其余部分风干、粉碎、过 1 mm 筛后备用。

土壤微生物活性以微生物的呼吸强度和纤维素分解强度表示,分别采用碱液吸收法和埋片法^[14]进行测定;游离松结态腐殖质、联结态腐殖质和稳紧结态腐殖质,采用熊毅法进行测定^[15],3 者之和为总腐殖质含量。

1.4 数据分析

试验数据采用邓肯多重比较法和成对样本 t 检验法进行差异显著性统计。

2 结果与分析

2.1 稻田免耕和稻草还田对土壤腐殖质形态、含量的影响

免耕显著影响土壤腐殖质形态和含量,但是对不同土层的影响有明显差异。在 0—5 cm 土层,游离松结态腐殖质、联结态腐殖质、稳紧结态腐殖质和总腐殖质含量在水稻整个生育期免耕处理(NT 和 NTS)均显著高于常耕处理(CT 和 CTS)(图 1 和表 2)。相反,在 5—12 cm 土层和 12—20 cm 土层土壤不同形态的腐殖质含量免耕处理均低于或相当于常耕处理。这些结果说明,免耕方式对腐殖质组分的影响主要表现在 0—5 cm 土层。

免耕对土壤腐殖质的影响与水稻的生育期有关。在水稻分蘖期,NT 与 CT 处理间 0—5 cm 土层土壤腐殖质、联结态腐殖质和稳紧结态腐殖质含量的差异并不显著,相反,其他水稻生育期内(除了灌浆期的 NT 处理),免耕处理均显著提高 0—5 cm 土层中土壤总腐殖质和各结合态腐殖质水平,并且,免耕对土壤腐殖质含量和组分的影响有随着生育期的推后而增强的趋势。

稻草还田对不同土层的腐殖质形态、含量影响一致(图 1 和表 2)。在 0—5 cm、5—12 cm 和 12—20 cm 土层游离松结态腐殖质、联结态腐殖质、稳紧结态腐殖质和总腐殖质含量稻草还田处理(NTS 和 CTS)均高于无稻草还田处理(NT 和 CT)。然而稻草还田对不同土层腐殖质形态的影响程度有明显差异。在 0—5 cm 土层,免耕下稻草还田显著提高水稻各生育期游离松结态腐殖质、稳紧结态腐殖质和总腐殖质含量和水稻孕穗期后联结态腐殖质含量,常耕下稻草还田显著提高水稻孕穗期前各种形态腐殖质及总腐殖质含量,而在水稻孕穗期后变化不明显;5—12 cm 和 12—20 cm 土层,稻草还田对腐殖质形态、含量的影响明显变弱。稻草还田后,5—12 cm 和 12—20 cm 土层土壤总腐殖质及各结合态腐殖质的含量显著提高或与无稻草还田的相当。

稻草还田对土壤腐殖质的影响与水稻的生育期有关。在水稻分蘖期—孕穗期,虽然稻草还田显著提高 0—5 cm 土层土壤腐殖质、游离松结态腐殖质、稳紧结态腐殖质含量,但其对 0—5 cm 土层土壤联结态腐殖质及 5—12 cm 和 12—20 cm 土层的各形态腐殖质含量的影响整体而言并不显著。在水稻生育后期(灌浆—成熟期),稻草还田均显著提高各土层土壤总腐殖质和各结合态腐殖质含量。

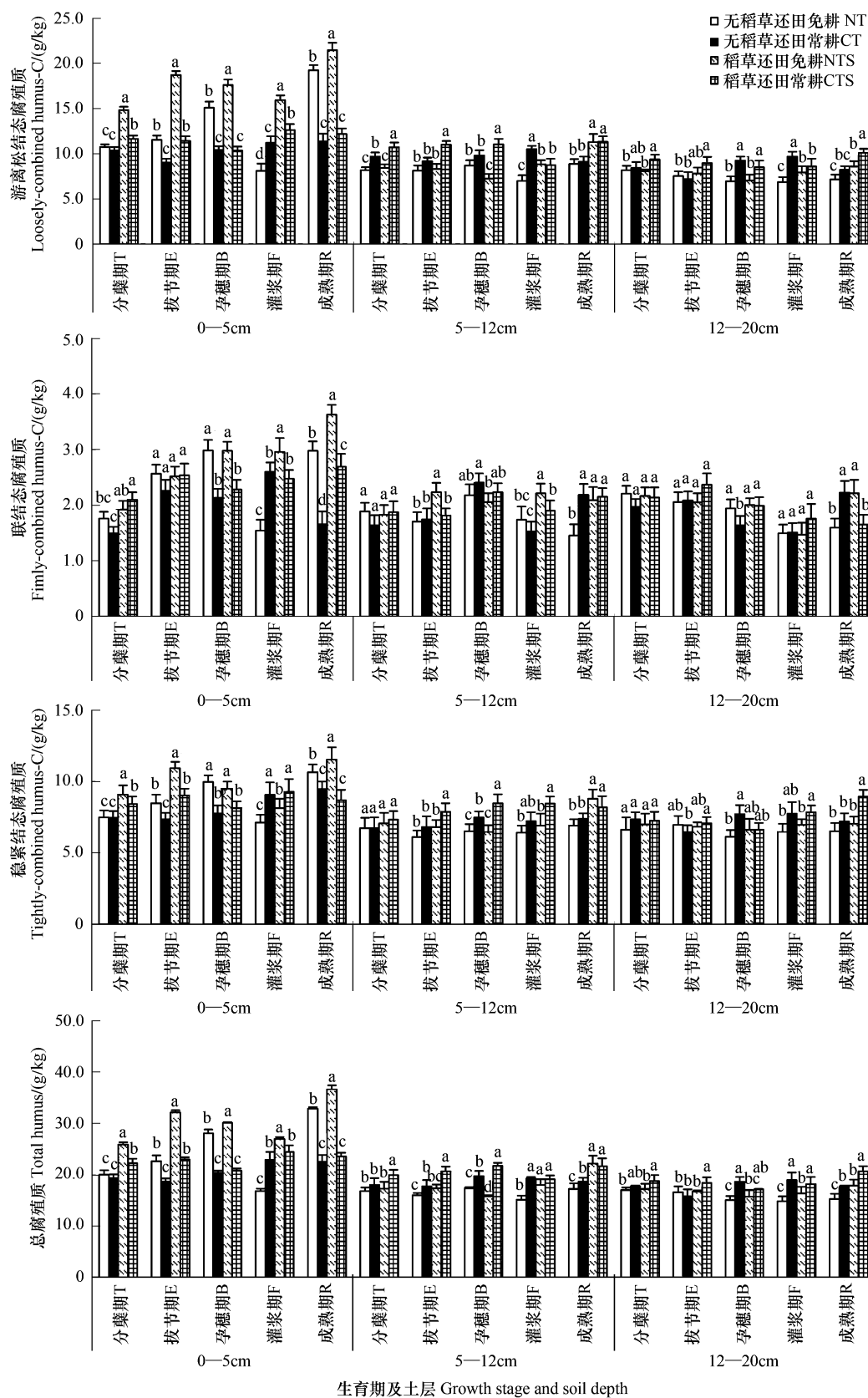


图1 稻田免耕和稻草还田对不同土层土壤游离松结态腐殖质、联结构态腐殖质、稳紧结态腐殖质和总腐殖质含量的影响

Fig.1 Effect on loosely combined humus-C, firmly combined humus-C, tightly combined humus-C and total humus-C at different soil depths under no-till and straw manuring

同一土层同一生育期不同小写字母代表处理间差异显著 ($P < 0.05$)

表 2 腐殖质形态含量成对双样本 *t* 检验

Table 2 Pair two-sample *t* test for combined forms and content of humus

土层/cm Soil depth	<i>t</i>	松结态腐殖质 Loosely-combined humus-C	联结态腐殖质 Fimly-combined humus-C	稳紧结态腐殖质 Tightly-combined humus-C	总腐殖质 Total humuc-C	<i>t</i> _{0.05}	<i>t</i> _{0.01}
0—5	<i>t</i> _(NT-CT)	2.4218	2.7272	2.5442	2.6701	2.3534	4.5407
	<i>t</i> _(NTS-CTS)	4.9859	1.8186	1.6756	3.8744	2.1319	3.7470
	<i>t</i> _(NTS-NT)	4.1018	1.5814	2.3012	3.9528	2.1319	3.7470
	<i>t</i> _(CTS-CT)	2.9015	1.9421	1.2016	2.9435	2.1319	3.7470
5—20	<i>t</i> _(NT-CT)	3.5392	5.9187	3.5506	4.2507	1.8331	2.8214
	<i>t</i> _(NTS-CTS)	3.9127	0.4670	2.7642	4.0906	1.8331	2.8214
	<i>t</i> _(NTS-NT)	1.7076	2.0810	2.9445	2.3162	1.8331	2.8214
	<i>t</i> _(CTS-CT)	1.6301	1.0228	2.3688	2.6760	1.8331	2.8214

0—5 cm 土层: *t*_(NT-CT) 中 *n* = 4 (不包括灌浆期), 其它 *n* = 5; 5—20 cm 土层: *n* = 10

2.2 稻田免耕和稻草还田对腐殖质形态比例的影响

如表 3 和表 4 所示,稻田耕层土壤腐殖质均以游离松结态腐殖质为主,其次是稳紧结态腐殖质,联结态腐殖质最少。与常耕处理相比,免耕处理明显提高 0—5 cm 土层游离松结态的比例(占总腐殖质的比例),而降低了联结态和稳紧结态的比例,相反,在 5—12 cm 土层,免耕处理显著降低游离松结态而提高联结态和稳紧结态的比例,12—20 cm 土层的总体变化趋势与 5—12 cm 土层类似。NTS 处理显著提高 0—5 cm 土层游离松结态和降低稳紧结态的比例,而 CTS 处理对 0—5 cm 土层各形态腐殖质比例的影响不显著。在 5—12 cm 和 12—20 cm 稻草还田对各形态腐殖质比例的影响也不显著。

表 3 腐殖质形态占总腐殖质的百分比 %

Table 3 The proportion of combined forms to total humus

项目 Item		0—5 cm				5—12 cm				12—20 cm			
		NT	CT	NTS	CTS	NT	CT	NTS	CTS	NT	CT	NTS	CTS
游离松结态/腐殖质 Loosely combined humus-C/ total humus	分蘖期 T	53.8	53.6	57.4	52.6	48.7	53.7	48.7	53.8	48.1	47.5	46.9	50.1
	拔节期 E	51.1	48.5	58.2	49.7	51.2	51.8	48.0	53.2	45.6	45.9	46.9	48.8
	孕穗期 B	53.9	51.4	58.6	49.9	50.1	49.8	46.0	50.9	46.4	49.8	45.0	49.8
	灌浆期 E	48.3	49.0	59.0	51.9	46.2	54.6	49.3	45.8	46.4	51.2	48.6	47.2
	成熟期 R	58.6	50.6	58.6	51.8	51.6	48.9	50.9	52.4	46.9	46.7	48.2	48.9
联结态/腐殖质 Fimly combined humus-C/ total humus	分蘖期 T	8.8	7.8	7.4	9.5	11.2	9.1	10.5	9.4	13.0	11.1	12.6	11.4
	拔节期 E	11.4	12.1	7.8	11.0	10.7	9.9	12.9	8.8	12.5	13.2	12.3	12.9
	孕穗期 B	10.6	10.5	9.9	11.0	12.5	12.2	13.0	10.3	12.9	8.8	12.8	11.6
	灌浆期 E	9.2	11.3	10.9	10.1	11.5	7.9	12.3	9.9	10.1	8.0	9.0	9.7
	成熟期 R	9.1	7.4	9.9	11.4	8.5	11.7	9.4	9.9	10.4	12.6	12.4	8.0
稳紧结态/腐殖质 Tightly combined humus-C/ total humus	分蘖期 T	37.4	38.6	35.1	38.0	40.0	37.2	40.7	36.8	38.9	41.4	40.5	38.5
	拔节期 E	37.5	39.4	34.0	39.3	38.2	38.3	39.1	38.0	42.0	40.9	40.8	38.3
	孕穗期 B	35.5	38.1	31.6	39.2	37.4	37.9	41.0	38.9	40.6	41.4	42.2	38.6
	灌浆期 E	42.5	39.6	30.1	38.0	42.3	37.5	38.4	44.2	43.6	40.8	42.4	43.1
	成熟期 R	32.4	42.0	31.5	36.8	40.0	39.4	39.7	37.7	42.6	40.7	39.4	43.1

2.3 稻田免耕和稻草还田对土壤微生物活性的影响

免耕对土壤微生物活性的影响显著(图 2)。0—5 cm、5—12 cm 和 12—20 cm 土层土壤呼吸强度和纤维素分解强度免耕处理均低于常耕处理。*t* 检验结果(表 5)表明,免耕处理与常耕处理间呼吸强度差异达到显著水平,而 NT 处理与 CT 处理纤维素分解强度间也有显著差异,这些结果说明,免耕方式下稻田土壤微生物活性下降。

表 4 腐殖质形态占总腐殖质比例的成对双样本 *t* 检验

Table 4 Pair two-sample *t* test for proportion of combined forms to total humus

土层/cm Soil depth	<i>t</i>	松结态腐殖质/ 总腐殖质 Loosely-combined humus-C to total humus-C	联结态腐殖质/ 总腐殖质 Fimly-combined humus-C to total humus-C	稳紧结态腐殖质/ 总腐殖质 Tightly-combined humus-C to total humus-C	<i>t</i> _{0.05}	<i>t</i> _{0.01}
0—5	<i>t</i> _(NT-CT)	2.0103	1.0030	1.9655	2.3534	4.5407
	<i>t</i> _(NTS-CTS)	10.2217	2.1570	6.3740	2.1319	3.7470
	<i>t</i> _(NTS-NT)	2.9248	0.6964	2.2785	2.1319	3.7470
	<i>t</i> _(CTS-CT)	0.6953	0.8056	1.1939	2.1319	3.7470
5—20	<i>t</i> _(NT-CT)	1.7445	1.1718	1.4992	1.8331	2.8214
	<i>t</i> _(NTS-CTS)	2.3652	2.6069	0.6963	1.8331	2.8214
	<i>t</i> _(NTS-NT)	0.3696	1.1192	0.1925	1.8331	2.8214
	<i>t</i> _(CTS-CT)	0.0836	0.3738	0.1772	1.8331	2.8214

0—5 cm 土层: *t*_(NT-CT) *n* = 4 (不包括灌浆期), 其它 *n* = 5; 5—20 cm 土层: *n* = 10

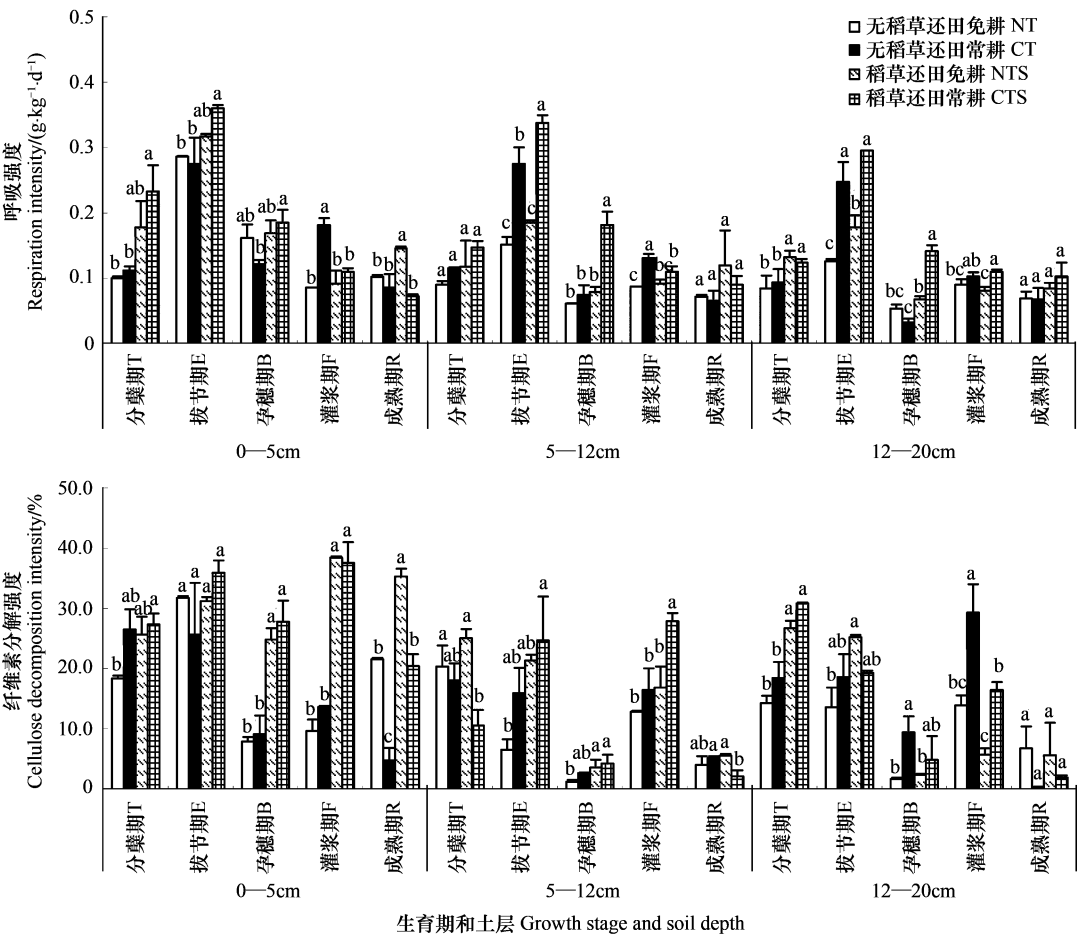


图 2 稻田免耕和稻草还田对水稻不同生育期和不同土层土壤呼吸强度、纤维素分解强度的影响

Fig. 2 Effect on respiration intensity and cellulose decomposition intensity at different soil depths in different rice growth stage under no-tillage and straw manuring

同一土层同一生育期不同小写字母代表处理间差异显著 ($P < 0.05$)

免耕对不同水稻生育期土壤微生物活性的影响不同(图 2)。在水稻分蘖期,免耕处理对土壤微生物活性的影响不显著。然而,在水稻拔节期,免耕处理显著降低 5—12 cm 和 12—20 cm 土层土壤呼吸强度;在水稻

孕穗—灌浆期,免耕处理有降低土壤呼吸强度和纤维素分解强度的趋势;在成熟期,免耕处理显著提高了0—5 cm 耕层土壤呼吸和纤维素分解强度。这些结果说明,免耕对土壤微生物活性的影响主要在水稻生长中后期,显著降低水稻旺盛生长期(拔节—灌浆期)5—20 cm 土层的微生物活性,而显著提高水稻成熟期土壤微生物活性。

稻草还田显著影响稻田土壤的微生物活性(图2和表5)。各土层土壤呼吸强度和纤维素分解强度稻草还田处理均高于或相当于无稻草还田处理,这说明稻草还田增强了土壤的微生物活性。

不同耕作方式下稻草还田对水稻不同生育期土壤微生物活性的影响不同(图2)。与CT处理相比,CTS处理显著提高水稻分蘖期—孕穗期0—20 cm 土层土壤呼吸强度,然而除了在成熟期0—5 cm 土层NTS处理显著高于NT处理外,其他水稻生育期不同土层土壤呼吸强度NTS处理与NT处理差异不显著;在孕穗期—成熟期,稻草还田显著提高0—5 cm 土层土壤纤维素分解强度。这说明免耕结合稻草还田主要影响了水稻生长后期(孕穗期—成熟期)0—5 cm 土层的微生物活性,而常耕结合稻草还田在水稻整个生育期均显著提高土壤微生物活性。

表5 微生物活性成对双样本t检验表
Table 5 Pair two-sample t test for microbial activities

<i>t</i>	呼吸强度 Respiration intensity	纤维素分解强度 Cellulose decomposition intensity	<i>t</i> _{0.05}	<i>t</i> _{0.01}
<i>t</i> _(NT-CT)	2.0469	2.6747	1.7959	2.7181
<i>t</i> _(NTS-CTS)	3.8685	0.8580		
<i>t</i> _(NTS-NT)	4.6398	3.0590	1.7613	2.6245
<i>t</i> _(CTS-CT)	3.0016	1.9463		

0—5 cm 土层: *t*_(NT-CT) 中 *n* = 4 (不包括灌浆期), 其它 *n* = 5; 5—20 cm 土层: *n* = 10.

3 讨论

3.1 腐殖质形态、含量和微生物活性对免耕的响应

耕作是影响土壤腐殖质含量的重要农业措施之一。本研究结果表明,免耕显著提高0—5 cm 土层腐殖质形态含量。Slepetiene 和 Slepetys^[16]的研究也发现,常耕转为少耕或休闲后,0—10 cm 和 10—20 cm 土层的腐殖质含量增加。本研究还发现,免耕显著提高0—5 cm 土层游离松结态腐殖质占总腐殖质的比例,这与Ding^[17]等的结果相似。免耕使0—5 cm 土层土壤胡敏酸的分子结构趋于简单,表层土壤的胡敏酸活性增强。这些结果表明,免耕处理提高0—5 cm 土层的土壤腐殖质含量和活性。

松结态腐殖质主要来源于新鲜有机质。免耕处理对有机碳的积累仅限于土壤表层(<5 cm)^[18-19]。免耕条件下水稻根系浅植及稻草还田表施使土壤中的各种酶和微生物无法对稻草进行充分腐解,腐解速率慢^[20]。这可能是免耕处理提高0—5cm 土层腐殖质含量的原因。游离松结态腐殖质比例的显著提高也可能与土壤pH、离子浓度密切相关。徐建民^[11]研究表明,游离松结态腐殖质主要是铁、铝联结有机矿质复合体。在富含有机质的土层中,pH降低,Fe³⁺、Al³⁺浓度较高,络合平衡有利于形成三价离子络合物^[21],因此反应过程中pH的下降常作为络合物形成的标志^[12]。

本研究发现,0—5cm 土层土壤呼吸强度和纤维素分解强度有随游离松结态含量的增加而降低趋势。江晓东等^[22]认为该差异主要由于土壤温度的差异引起的。Yoo^[23]则认为免耕与传统耕作间碳矿化的差异主要受土壤结构的显著影响。而李贵桐^[24]和刘明^[25]研究表明土壤微生物C/N比是影响土壤呼吸强度的重要因素,微生物C/N高则呼吸强度减弱。传统耕作容易形成以C/N比较低的细菌占优势的微生物群落结构,而免耕条件下则容易形成以C/N较高的丝状真菌占优势的微生物群落结构^[26],这必然引起免耕土壤微生物C/N增加,同时免耕土壤真菌中类菌丝的活跃生长又进一步促进土壤颗粒的联结和团聚体的形成^[27],增强土壤碳的物理保护,降低微生物分解。可见,土壤微生物活性对耕作的响应受多因素的综合影响。本试验耕作层微生物活性的降低在一定程度上也反映了免耕土壤环境有助于降低微生物对土壤碳的分解。然而在成熟期免

耕处理显著增加 0—5 cm 土层土壤的微生物活性,这可能与免耕土壤具有良好的持水性能有关。

3.2 腐殖质形态含量与微生物活性对稻草还田响应

还田稻草的微生物降解显著影响着土壤的碳库组成。Sa^[20]研究表明秸秆的输入量与碳含量呈显著正相关。在本试验中,无论是免耕条件下还是常耕条件下,稻草还田均能明显提高水稻不同生育期不同土层土壤各结合态腐殖质含量和微生物活性。这可能是因为土壤中大多数微生物属于有机营养型,稻草还田为土壤微生物提供了较充足的能源和营养源,加速了其自身合成代谢,相应其活性随之升高。这与朱春冒^[28]、段华平^[29]等的研究相一致。秸秆还田方式影响秸秆腐解速率。传统耕作由于秸秆与土壤的充分混合使得秸秆分解率显著高于免耕^[30]。因此这可能就是水稻分蘖期-孕穗期 CTS 处理显著增加 0—20 cm 土层土壤呼吸强度,而 NTS 处理对土壤微生物活性影响不大的原因。从微生物活性和腐殖质组分含量同时提高的关系可以说明稻草还田后土壤腐殖化大于矿化,这表明施用稻草是耕作中维持和提高土壤腐殖质的一种有效措施。

3.3 腐殖质形态含量与有机碳固定的关系

土壤不同形态腐殖质含量显著影响着土壤碳的固定。Paustian 等^[31]和周萍^[8]指出腐殖质与土壤矿物的化学结合是有机碳稳定、防止微生物降解的重要机制。免耕和稻草还田土壤各结合态腐殖质和总腐殖质含量的显著增加表明免耕和稻草还田通过腐殖质与矿物质的结合增加土壤碳的稳定性,这对提高土壤有机碳固存、减缓大气 CO₂ 的急剧增加有着重要的作用。Huang^[32]和 Lu 等^[33]的结果也证明了这一点。秸秆还田、免耕或少耕结合秸秆还田是近 20a 中国农田表层土壤碳增加的重要原因^[32]。这些结果说明免耕和稻草还田下土壤碳固定与腐殖质形态含量有正效应关系。

致谢:感谢刘昔辉、何佳、康轩、王蕾、陈宏和潘家星等协助土壤样品的采集与分析。

References:

- [1] Yang J C, Han X G, Huang J H, Pan Q M. The dynamics of soil organic matter in cropland responding to agricultural practices. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(4): 787-795.
- [2] Li L, Wu F L, Zhang H L, Chen F. Organic carbon and carbon pool management index in soil under conservation tillage in two-crop paddy field area. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1): 0248-0253.
- [3] Song M W, Li A Z, Cai L Q, Zhang R Z. Effects of different tillage methods on soil organic carbon pool. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 622-626.
- [4] Su Y Z, Zhao H L. Advances in researches on soil organic carbon storages, affecting factors and its environmental effects. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(3): 220-228.
- [5] Yang J C, Han X G, Huang J H, Pan Q M. Effect of land use change on carbon storage in terrestrial ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(8): 1385-1390.
- [6] Pan G X, Li L Q, Wu L S, Zhang X H. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils. *Global Change Biology*, 2004, 10(1): 79-92.
- [7] Zhou P, Song G H, Pan G X, Li L Q, Zhang X H. SOC accumulation in three major types of paddy soils under long-term agro-ecosystem experiments from south China I. physical protection in soil micro-aggregates. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(6): 1063-1071.
- [8] Zhou P, Song G H, Pan G X, Li L Q, Zhang X H. SOC enhancement in three major types of paddy soils in a long-term agro-ecosystem experiment in south China II. Chemical binding and protection in micro-aggregate size fractions. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(2): 263-273.
- [9] Laurie J Osher, Pamela A Matson, Ronald A. Effect of land use change on soil carbon in Hawaii. *Biogeochemistry*, 2003, 65(2): 213-232
- [10] Wright A L, Hons F M. Carbon and nitrogen sequestration and soil aggregation under sorghum cropping sequences. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 41(2): 95-100.
- [11] Xu J M, Yuan K N. Studies on organo-mineral complexes in soil VII. formation and binding characteristics of soil combined humus. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(2): 151-158.
- [12] Xu J M, Sai F, Yuan K N. Studies on organo-mineral complexes in soil VI. Preliminary studies on the transformation between different organo-mineral complexes. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(2): 168-178.
- [13] Guangxi Agriculture Information Web. Technical Specification for Rice Parachute Transplantation Farming With No-tillage Adoption. [2010-1-11]. <http://www.gxny.gov.cn/web/2006-02/96668.htm>.
- [14] Xu G H, Zheng H Y. Manual on Analysis Methods of Soil Microbiology. Beijing: China Agriculture Press, 1986.
- [15] Xiong Y. Soil Colloid (The Second Volume). Research Method of Soil Colloid. Beijing: Science Press, 1985.
- [16] Slepiciene A, Slepetyts J. Status of humus in soil under various long-term tillage systems. *Geoderma*, 2005, 127(3/4): 207-215.
- [17] Ding G, Novak J M, Amarasiriwardena D, Hunt P G, Xing B. Soil organic matter characteristics as affected by tillage management. *Soil Science*

- Society of America Journal, 2002, 66(2): 421-429.
- [18] 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.
- [19] Bauer P J, Frederick J R, Novak J M, Hunt P G. Soil CO₂ flux from a Norfolk loamy sand after 25 years of conventional and conservation tillage. *Soil Tillage Research*, 2006, 90(1/2): 205-211.
- [20] Sá J C M, Cerri C C, Dick W A, Lal R, Filho S P V, Piccolo M C, Feigl B E. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a brazilian oxisol. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(5): 1486-1499.
- [21] Yu T R, Chen Z C. *Chemical Processes on Soil*. Beijing: Science Press, 1990.
- [22] Jiang X D, Chi X J, Ning T Y, Li Z J. Effects of minimum tillage and no-tillage patterns on soil respiration. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(2): 253-256.
- [23] Yoo G, Wander M M. Influence of tillage practices on soil structural controls cover carbon mineralization. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(2): 651-659.
- [24] Li G T, Zhang B G, Li B G. Effect of straw pretreatment on soil microbial biomass and respiration activity. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(12): 2225-2228.
- [25] Liu M, Li Z P, Lu L, Che Y P. Changes in soil respiration and microbial functional diversity of paddy soil under different fertilizer amendments. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(3): 1108-1115.
- [26] Beare M H. Fungal and bacterial pathways of organic matter decomposition and nitrogen mineralization in arable soil//Brussaard L, Ferrera-Cerrato Reds. *Soil Ecology in Sustainable Agricultural Systems*. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1997: 37-70.
- [27] Tisdall J M, Smith S E, Rengasamy P. Aggregation of soil by fungal hyphae. *Australian Journal of Soil Research*, 1997, 35(1): 55-60.
- [28] Zhu C M, Li Z F, Wu W L, Yang P Z. Carbon and nitrogen mineralization of incubated sweet maize and white clover straw. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(3): 423-428.
- [29] Duan H P, Niu Y Z, Li F B, Bian X M. Effects of tillage styles and straw return on soil carbon sequestration and crop yields of direct seeding rice. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2009, 25(3): 706-708.
- [30] Burgess M S, Mehrys G R, Madramootoo C A. Decomposition of grain-corn residues (*Zea mays* L.): a litterbag study under three tillage systems. *Canadian Journal of Soil Science*, 2002, 82(2): 127-138.
- [31] Paustian K, Parton W J, Persson J. Modeling soil organic matter in organic amended and N fertilized long term plots. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(2): 476-488.
- [32] Huang Y, Sun W J. Changes in topsoil organic carbon of croplands in mainland China over the last two decades. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(51): 1785-1803.
- [33] Lu F, Wang X K, Han B, Ouyang Z Y, Duan X N, Zheng H, Miao H. Soil carbon sequestration by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland. *Global Change Biology*, 2009, 15(2): 281-305.

参考文献:

- [1] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 潘庆民. 土壤有机质对农田管理措施的动态响应. *生态学报*, 2003, 23(4): 787-795.
- [2] 李琳, 伍芬琳, 张海林, 陈阜. 双季稻区保护性耕作下土壤有机碳及碳库管理指数的研究. *农业环境科学学报*, 2008, 27(1): 0248-0253.
- [3] 宋明伟, 李爱宗, 蔡立群, 张仁陟. 耕作方式对土壤有机碳库的影响. *农业环境科学学报*, 2008, 27(2): 622-626.
- [4] 苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展. *中国沙漠*, 2002, 22(3): 220-228.
- [5] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 潘庆民. 土地利用变化对陆地生态系统碳贮量的影响. *应用生态学报*, 2003, 14(8): 1385-1390.
- [7] 周萍, 宋国藩, 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉. 南方3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. *土壤学报*, 2008, 45(6): 1063-1071.
- [8] 周萍, 宋国藩, 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉. 三种南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 II. 团聚体内有机碳的化学结合机制. *土壤学报*, 2009, 46(2): 263-273.
- [11] 徐建民, 袁可能. 土壤有机矿质复合体研究 VII. 土壤结合态腐殖质的形成特点及其结合特征. *土壤学报*, 1995, 32(2): 151-158.
- [12] 徐建民, 赛夫, 袁可能. 土壤有机矿质复合体研究 IX. 钙键复合体和铁铝键复合体中腐殖质的性状特征. *土壤学报*, 1999, 36(2): 168-178.
- [14] 许光辉, 郑洪元. *土壤微生物分析方法手册*. 北京: 农业出版社, 1986.
- [15] 熊毅. *土壤胶体(第二册)土壤胶体研究法*. 北京: 科学出版社, 1985.
- [18] 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] 于天仁, 陈志诚. *土壤发生中的化学过程*. 北京: 科学出版社, 1990.
- [22] 江晓东, 迟淑筠, 宁堂原, 李增嘉. 少免耕模式对土壤呼吸的影响. *水土保持学报*, 2009, 23(2): 253-256.
- [24] 李贵桐, 张宝贵, 李保国. 秸秆预处理对土壤微生物量及呼吸活性的影响. *应用生态学报*, 2003, 14(12): 2225-2228.
- [25] 刘明, 李忠佩, 路磊, 车玉萍. 添加不同养分培养下水稻土微生物呼吸和群落功能多样性变化. *中国农业科学*, 2009, 42(3): 1108-1115.
- [28] 朱春茂, 李志芳, 吴文良, 杨培珠. 甜玉米/白三叶草秸秆还田的碳氮矿化研究. *中国生态农业学报*, 2009, 17(3): 423-428.
- [29] 段华平, 牛永志, 李凤博, 卞新民. 耕作方式和秸秆还田对直播稻产量及稻田土壤碳固定的影响. *江苏农业学报*, 2009, 25(3): 706-708.

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1~9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 30 卷 第 24 期 (2010 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 24 2010

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: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