太湖地区 3 种水稻土不同温度培养中有机碳库变化及其对升温的响应

周运超 ,潘根兴* ,李恋卿 ,张旭辉 ,张平究(南京农业大学农业资源与生态环境研究所 ,南京 210095 ,E- mail :gxpan @njau .edu .cn)

摘要 :全球变暖下土壤有机碳储存的变化是土壤与全球变化研究的热点问题 .本研究选择了 3 种太湖地区代表性水稻土的表层土壤 , 分别进行 20 ℃和 25 ℃ 的室内恒温培养 , 监测培养过程中总有机碳 .溶解性有机碳和微生物量碳的变化动态 , 试图了解这些土壤的有机碳分解过程对全球变暖的响应特点 .结果表明 ,这些土壤培养中总有机碳变化可以用一级衰变动力学方程或对数衰减方程描述 ,但动力学特征依培养温度的不同而异 . 升温大大促进了铁渗水耕人为土和潜育水耕人为土中有机碳的分解与呼吸损失 , 而铁聚水耕人为土没有显著变化 .供试土壤总有机碳损失的 Q_{10}系数分别为 : 潜育水耕人为土(11.1 ~ 14.1) > 铁渗水耕人为土(4.4 ~ 6.4) > 铁聚水耕人为土(0.63 ~ 0.73) .这一方面说明温度敏感性在同一地带的不同土壤间的差异超过文献上报道的不同气候带的差异 , 但另一方面揭示了水稻土可能是一类对全球升温敏感响应的人为土 .溶解性有机碳和微生物量的碳的变化还提示不同温度培养下水稻土微生物群落结构可能改变 ,因而影响到土壤有机碳库的生物有效性在温度条件下的变化 .可以认为 , 土壤升温下有机碳的变化不但与土壤有机碳的性质有关 , 而且与土壤性质控制下的生物条件的改变有关 . 故土壤升温下有机碳的损失不仅仅是温度对分解过程的反应速度的影响 . 当然 , 对于不同土壤间的这种差异还需从有机碳-土壤环境-土壤生物的相互关系上做进一步的工作 .

关键词 :太湖地区 ; 水稻土 ; 有机碳库 ; 土壤升温 ; 全球变化
中图分类号 :S153.6 文献标识码 :A 文章编号 :0250-3301(2003) 01-06-0046

Change of Organic Carbon Pools and the Responses to Soil Warming during Laboratory Incubations under Different Temperatures of 3 Kinds of Paddy Soils in Tai Lake Region, China

Zhou Yunchao, Pan Genxing* , Li Lianqing, Zhang Xuhui, Zhang Pingjiu(Institute of Resources, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095 , E- mail : gxpan @njau .edu .cn)

Abstract : Change of soil organic carbon (SOC) storage under global warming scenarios was paid much attention of the soil and global change studies. To address the features of SOC loss of paddy soils in response to global warming, the authors used 3 representative paddy soils from the Tai Lake region, China to incubate at laboratory respectively under 20 ℃ and 25 ℃ and the change dynamics of total organic carbon(TOC) , soluble organic carbon (DOC) and microbial biomass carbon (MBC) were monitored in time intervals. The TOC dynamics could be described with primary reaction equations with the constants varied with soil types and incubation temperature. While soil warming strengthened TOC loss of a Fe-leached Stagnic Anthrosol and a Gleyic Stagnic Anthrosol, no significant difference of TOC was detected in a Fe-accumulic Stagnic Anthosol under different temperature incubations. Q_{10} quotient, a measurement of soil SOC sensitivity to warming, of the studied soils decreased in the order: 11 .1 ~ 14.1 for the Gleyic Stagnic Anthrosol < 4.4 ~ 4.6 for Fe-leached Stagnic Anthrosol < 0.63 ~ 0.73 for the Fe-accumulic Stagnic Anthosol. This indicated that paddy soils could be a group of human managed soils with sensitive response to global warming, whereas the inter-soil group difference in this sensitivity may be greater than that existing between the soils from different eco-zones. The different patterns of DOC and MBC change during the incubation of the 3 studied soils were indicative of different features of soil mi-

基金项目 :国家自然科学基金项目(40171052)
作者简介 :周运超(1964 ~) ,男 ,副教授 ,博士 ,主要研究土壤有机碳与碳循环 .
收稿日期 :2002-03-29 ;修订日期 :2002-06-04
* 联系人

crobial community of the studied 3 types of paddy soils, which influenced the carbon bio-availability under different temperatures. Thus, change of SOC pools due to soil warming can be accounted for not only by nature of SOC of the soils but changes of microbial activity and even the community associated with soil properties. This study evidences that SOC loss due to soil warming is not a temperature-controlled kinetically decomposition process at least. Further studies should be dedicated on the SOC loss in relation to the interactions between SOC-soil minerals-soil micro-biota.

Keywords: Tai Lake region; paddy soils; organic carbon pools; soil warming; global change

土壤是地球系统最主要的碳库[1].陆地植被和土壤碳库的变化对于大气 CO_2 的源汇效应有重要的影响[2].在 Leith (1973) 建立了植被碳库对温度变化的响应关系,提出升温 10 ℃对植被碳库变化的影响幅度将近在 1 ~ 2 倍间[3]以后,Kirschbaum (1994) 利用文献上土壤培养的资料,首先建立了无水分限制条件下不同地带土壤有机碳分解对升温的响应关系,认为升温下土壤有机碳库的损失幅度远远大于植被碳库,且高温度地区较不敏感而寒冷地区极其敏感[4].Boden 等(1998)、MacDonald 等(1999) 和 Leirois 等(1999) 采用实验室培养法,分别研究了美国 Massachusetts 州 Harvard 地灰化土、美国大湖区森林灰化土和西班牙 Galicia 地暗色森林土等全土或不同层次有机碳分解或 CO_2 释放对土壤升温的响应[5~7].他们的结果说明升温 10 ℃可提高土壤原有有机碳呼吸速率高达 200 %.这些研究尚未涉及农业土壤.本研究试图探讨:①水稻土有机碳库对于变暖的响应及其幅度;②这种响应在不同土壤类型间是否存在差异及其可能的原因.期盼对于全球变化下我国农业土壤中有机碳库的稳定性的研究以及为阐明区域土壤的特点对于全球变暖的响应机制积累依据.

1　材料和方法

1.1　供试土壤

太湖地区 3 种代表性水稻土——白土、乌泥土和黄泥土[8],分别属于铁渗水耕人为土、潜育水耕人为土和铁聚水耕人为土[9],1999 年 12 月采于江苏省吴县市,所用样品采自表层 0 ~ 20cm 土层.土壤从野外采回后风干,磨碎,过 2mm 筛备用.供试土壤的基本性质见表 1.

表 1　供试土壤基本性质

Table 1　Basic properties of studied soils

土壤类型	pH(H_2O)	SOC/g·kg^{-1}	CEC/cmol(+)·kg^{-1}	游离氧化铁/g·kg^{-1}	粘粒/g·kg^{-1}	C/N	H/F
白土	4.92	16.41	14.8	16.9	248	10.4	0.71
乌泥土	6.13	16.81	15.0	25.6	255	10.6	0.66
黄泥土	6.17	16.11	20.2	18.0	323	9.7	0.80

1.2　试验方法

试验采用室内恒温培养.将 150g 土置于口径 10cm 的塑料杯中,加去离子水使土壤含水量为 40 %左右(达土壤田间持水量水平),放入已调至恒温的培养箱中,箱内维持相对湿度 80 %,并分别在第 0d、7d、14d、28d、56d、112d 取出土样,于低温柜 - 18 ℃下冷冻保存.试验结束时将所有样品放入冷藏柜(4 ℃) 下解冻,备分析.分别进行 20 ±0.5 ℃和 25 ±0.5 ℃ 2 个系列恒温培养.试验作 2 次重复,取平均值.

1.3　分析方法

解冻后的土壤样品全部磨碎过 2mm 筛,混匀,进行总有机碳(TOC),土壤微生物量碳(MBC) 和溶解性有机碳(DOC) 等项测定[10].

2　结果与分析

2.1　总有机碳的变化

供试土壤在 20 ℃和 25 ℃　2 个恒温培养系列中的 TOC 变化的动态曲线示于图 1A, 1B 和 1C.潜育水耕人为土和铁渗水耕人为土在 25 ℃下的碳损失明显较 20 ℃下强烈,培养到第 112 天时,其总有机碳损失量分别达到 1.58g·kg^{-1}、1.24 g·kg^{-1};而铁聚水耕人为土 2 种温

度下 TOC 变化相似.经典土壤学认为,土壤有机碳的衰减遵循一级反应的动力学方程,即可以用指数方程来描述[11].3 种土壤有机碳在不同温度下的含量变化都显著地符合指数方程.但 25 ℃培养下趋向于对数线性衰减.而铁聚水耕人为土 2 种温度培养下均呈这种衰减规律(表 2).因此,不同性质的水稻土培养中的动力学特征是有所不同的.

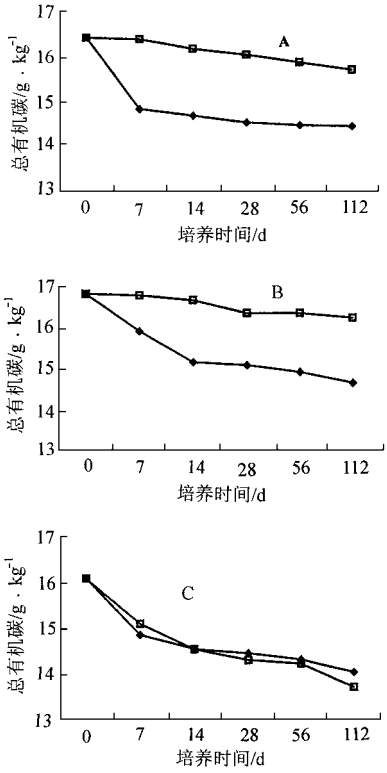

图 1 不同温度培养下土壤中 TOC 的变化动态
(A.铁渗水耕人为土;B.潜育水耕人为土;C.铁聚水耕人为土.空心点,20 ℃;实心点,25 ℃)

Fig.1 Dynamics of soil TOC under 20 ℃ and 25 ℃ (A.Fe-leached Stagnic Anthrosols;B.Gleyic Stagnic Anthrosols;C.Fe-accumulic Stagnic Anthrosols.Hole.20 ℃;Bold.25 ℃)

2.2 溶解性有机碳的变化

土壤中 DOC 是一类分子量较小的有机化合物,为有机碳分解的中间产物[11].培养前 DOC 含量以铁渗水耕人为土最高(达 170 mg·kg⁻¹),而潜育水耕人为土与铁聚水耕人为土均在 100 mg·kg⁻¹ 水平.图 2 显示不同温度培养下溶解性土壤有机碳随时间的变化.供试土壤 25 ℃培养下的 DOC 含量均极显著高于 20 ℃

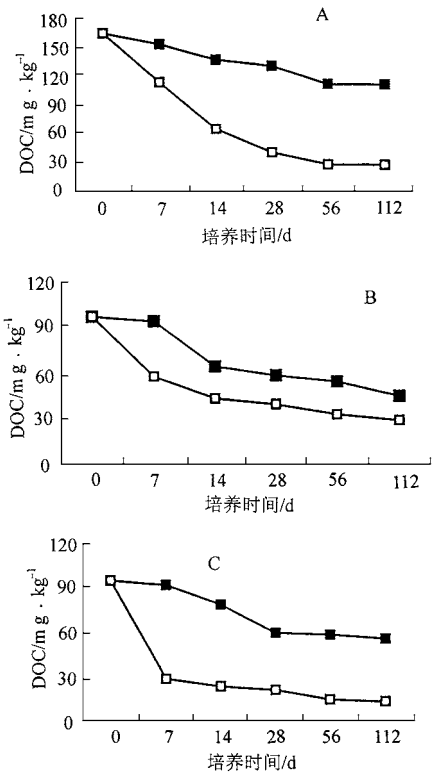

图 2 不同温度培养下土壤中 DOC 的变化动态
(A.铁渗水耕人为土;B.潜育水耕人为土;C.铁聚水耕人为土,空心点.20 ℃;实心点.25 ℃)

Fig.2 Dynamics of DOC under 20 ℃ and 25 ℃ (A.Fe-leached Stagnic Anthrosols;B.Gleyic Stagnic Anthrosols;C.Fe-accumulic Stagnic Anthrosols.Hole.20 ℃;Bold.25 ℃)

培养下.这可归结于较高温度有机碳分解的促进使中间产物增多[6].与 TOC 的变化特点相反,3 种土壤在 20 ℃培养下 DOC 含量的变化符合指数或对数动力学方程,而 25 ℃下却呈线性降低特征.说明较高温度下 TOC 分解产生的供源使 DOC 库保持一定平衡.20 ℃培养下,供试 3 种土壤的 DOC 库均平衡于 30 mg·kg⁻¹ 的水平.而 25 ℃培养下潜育水耕人为土和铁聚水耕人为土最终的 DOC 含量保持在 50 ~ 70 mg·kg⁻¹ 的水平,仅为铁渗水耕人为土的一半左右,说明前 2 种土壤的 DOC 库显得不稳定,生物利用性较高.表 3 列出了培养进程中供试土壤 DOC/TOC 比值的变化,示明分解过程中活泼有机碳趋于耗

竭,但其耗竭的最终水平仍取决于温度条件. 25 ℃下的分解维持较高的 DOC/ TOC 比值.

表 2　供试土壤在不同温度下恒温培养中的 TOC 衰减动力学方程

Table 2　Kinetic equations of TOC decay during incubation under different temperatures

土壤	动力学方程(20 ℃)	R^2	动力学方程(25 ℃)	R^2
铁渗水耕人为土	$TOC = 16.619e^{-0.010t}$	0.984	$TOC = 16.001e^{-0.021t}$	0.628
	$TOC = -0.154t + 16.611$	0.984	$TOC = -0.319t + 16.007$	0.618
	$TOC = -0.412\ln t + 16.522$	0.878	$TOC = -1.041\ln t + 16.033$	0.827
潜育水耕人为土	$TOC = 16.986e^{-0.008t}$	0.930	$TOC = 16.839e^{-0.030t}$	0.870
	$TOC = -0.134t + 16.981$	0.930	$TOC = -0.401t + 16.813$	0.860
	$TOC = -0.362\ln t + 16.910$	0.856	$TOC = -1.026\ln t + 16.730$	0.973
铁聚水耕人为土	$TOC = 16.199e^{-0.029t}$	0.910	$TOC = 15.952e^{-0.023t}$	0.800
	$TOC = -0.428t + 16.160$	0.786	$TOC = -0.349t + 15.938$	0.899
	$TOC = -1.263\ln t + 16.046$	0.981	$TOC = -1.076\ln t + 15.896$	0.935

$T_{0.001} = 0.764$, 自由度 = 5

2.3　土壤微生物量碳变化

土壤有机碳分解及呼吸损失是土壤中微生物主导的过程.土壤微生物量碳可以指示土壤中微生物群落的数量与有机碳的生物活性[11]. 从图 3 可见,风干土在满足水分条件后,微生物产生恢复生长,故培养前期微生物量碳出现回升,其幅度各土壤间有明显差异.各土壤在培养后期微生物量均趋于下降,这是由于生物可利用碳的耗竭.铁渗水耕人为土和潜育水耕人为土在 25 ℃培养期下前期微生物量都有较大幅度的增长,后者的增长持续到第 56 天.这说明前 2 种土壤的有机碳的生物利用性较高,温度的升高使微生物出现爆发性生长,短期(培养 1 周内)出现 DOC 的峰值,而后快速降低.而铁聚水耕人为土 2 种温度下微生物量几乎不变,再次表现出土壤有机碳的稳定性而不易被微生物利用.

3　讨论和结论

不管是土壤培养的实验研究[5~7]还是对文献资料的统计分析研究[4], 都表明土壤有机碳的分解与呼吸损失在升温下受到显著促进,其效应可以用 Q_{10} 系数来表征. Giardina 等(2000)根据野外长期的暖化试验和不同纬度带的森林土壤有机碳分解的对比,认为单独提高土壤温度并不提高森林矿质土壤中有机碳分解速率[12],并且提出了生物物理因素控制的问题,其他的研究也提出升温下的有机碳变化与湿度因子有密切的关系[5,7].水稻土是常湿润的人为土壤,本试验中即使水分条件满足下,不同土壤

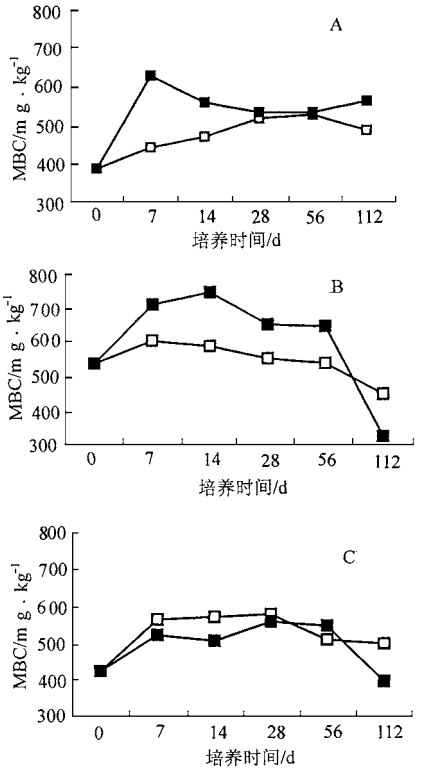

图 3　不同温度培养下土壤 MBC 的变化动态

(A.铁渗水耕人为土;B.潜育水耕人为土;C.铁聚水耕人为土.空心点 .20 ℃;实心点 .25 ℃)

Fig.3 Dynamics of MBC during incubation under 20 ℃ and 25 ℃ (A. Fe-leached Stagnic Anthrosols; B. Gleyic Stagnic Anthrosols; C. Fe-accumulic Stagnic Anthrosols. Hole .20 ℃, Bold .25 ℃)

中有机碳分解速率与呼吸损失的升温效应仍有显著的差别(表 4) .尽管统计资料显示 Q_{10}系数由 0 ℃地区的 8 到 30 ℃地区的 < 2[3], 温带森林土壤室内培养试验的 Q_{10}系数为 2[5] 、1 ~ 2[6] ,2 ~ 4[7] .供试的 3 种土壤的 Q_{10}系数变异范围极大,铁渗水耕人为土和潜育水耕人为土大大超出了上述已有报道的范围.这一特点值得在全球变化研究中进一步注意.

表 3 不同土壤培养中 DOC/ TOC 比值的变化

Table 3 Variation of DOC/ TOC ratio of the soils during incubation under different temperature

土壤	培养温度/ ℃	培养时间/ d					
		0	7	14	28	56	112
铁渗水耕人为土	25	0.010	0.010	0.009	0.009	0.008	0.008
	20	0.010	0.007	0.004	0.003	0.002	0.002
潜育水耕人为土	25	0.006	0.006	0.004	0.004	0.004	0.003
	20	0.006	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002
铁聚水耕人为土	25	0.006	0.006	0.005	0.004	0.004	0.004
	20	0.006	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001

表 4 不同土壤培养中总有机碳呼吸损失强度及温度敏感性比较/ $mg\cdot(kg\cdot d)^{-1}$

Table 4 Comparison of temperature sensitivity and TOC decaying intensity from respiration/ $mg\cdot(kg\cdot d)^{-1}$

土壤	总损失碳/ %		平均损失速率(C) / $mg\cdot(kg\cdot d)^{-1}$		温度效应(C) / $mg\cdot(kg\cdot d\cdot 度)^{-1}$	Q_{10}系数	
	25 ℃	20 ℃	25 ℃	20 ℃		指数模型	对数模型
白土	12.06	4.50	17.68	6.59	2.22	4.41	6.38
乌泥土	13.01	3.61	28.45	5.42	4.61	14.06	11.10
黄泥土	12.94	14.96	18.61	21.52	- 0.58	0.63	0.73

不同土壤有机碳分解的温度敏感性的差异可能牵涉土壤有机碳的保护机制和不同微生物群落分解作用的相互影响.无论野外地理资料[4]还是同一土壤不同层次的培养结果[6~7]都提示有机质丰富的土壤对升温更敏感.本文采用的土壤总有机碳含量相近,C/ N 比接近.但铁渗水耕人为土和潜育水耕人为土的 H/ F 比低于铁聚水耕人为土,而 H/ F 较高意味着后者有机碳的芳构化程度较高,有机质较复杂,分子量较大,不易被微生物分解.不过,这些土壤的有机碳变化的温度敏感性显得与更多因素有关.这些土壤的有机碳库分配和保护机制[11,13]的性质不同.土壤中有机碳表现为与无机矿物质成分的结合而被物理保护[13], 成为微团聚体保护碳[14].供试土壤在 25 ℃培养下 TOC 衰减动力学显得符合 CENTURY 模型理论,即土壤中有机碳分为活性碳库、慢速交换碳库和惰性碳库[10],而新鲜或简单的有机碳表现为活性碳库,被保护的有机碳依其稳定程度成为慢速交换碳库或惰性碳库.土壤中粘粒和氧化物是稳定程度不同的保护剂.铁聚水耕人为土因粘粒和晶质氧化铁含量较高[7],并形成稳定的铁质有机络合物-鳝血[15].这些成团聚体复合的有机碳越多,慢速交换碳库和惰性碳库越大,土壤有机碳的生物有效性越低.据已有的研究,铁聚水耕人为土中 250 ~ 20μm 的微团聚体含量在 40 % ~ 55 %,而其他 2 种土壤均在 30 %以下[16],有机碳的保护作用明显较强,而另外 2 种土壤中因升高温度促进了微生物对弱保护有机碳的利用.

不同土壤在升温培养中有机碳变化规律的差异还可能与微生物群落组成的不同及其在升温下的变化有关.Zogg(1997) 运用磷酯脂肪酸(PLFA) 技术研究了美国 Michigan 一个森林灰

土在培养 15 ℃和 25 ℃下微生物群落的变化,认为升温 10 ℃下(Q_{10}系数为 2)得到的有机碳呼吸损失的是由于温度导致的微生物群落的改变,而高温下的微生物能够分解低温微生物不能分解的有机碳[17]. Mac-Donald 等的结果也表明无论是变暖或变冷,土壤的微生物群落都发生了改变[5],因而有机碳损失的温度敏感性并不是一个简单的呼吸速率的温度效应问题.本试验中 25 ℃培养下增加的有机碳损失与培养一周后微生物量的增长吻合(R^2 为 0.97),而且 20 ℃培养下微生物 C/N 在 10 ~ 11,但 25 ℃培养一周后微生物 C/N 比扩大到 30 ~ 40,这些微生物能分解慢速碳库,它们在 25 ℃培养下前期快速繁殖使土壤中有机碳迅速衰竭,因而表现出极强的有机碳损失对温度的敏感性.不过,铁聚水耕人为土中微生物在 2 种温度培养下几乎没有发生变化,这是由于该土壤有机碳稳定性较高,升温没有促进微生物对这种保护性碳库的利用.

参考文献:

1 Lal R. World soils and greenhouse effect[J]. IGBP Global Change Newsletter., 1999, **37**:4 ~ 5.

2 Scholes B. Will the terrestrial carbon sink saturate soon[J]? IGBP Global Change Newsletter., 1999, **37**:2 ~ 3.

3 Leith H. Primary production: terrestrial ecosystems[J]. Human Ecology., 1973, **1**:303 ~ 332.

4 Kirschbaum M F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1995, **27**:753 ~ 760.

5 Bowden R D, Newkirk K M, Rullo G M. Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1998, **30**: 1591 ~ 1597.

6 MacDonald N W, Randlett D L, Donald Z R. Soil Warming and Carbon Loss from a Lake States Spodosol[J]. Soil Science Society of America Journal., 1999, **63**:211 ~ 218.

7 Leirois M C, Trasar-Cepeda C, Seoane S et al. Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, **31**:327 ~ 335.

8 江苏省土壤普查办公室. 江苏土壤. 北京: 中国农业出版社, 1995.232 ~ 357.

9 龚子同等著. 中国土壤系统分类. 北京:科学出版社, 1999.114 ~ 194.

10 中国土壤学会编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.106 ~ 109, 228 ~ 231.

11 Gregorich E G, Janzen H H. Microbially Mediated Processes: Decomposition. In: Sumner M E (Editor-in-chief). Handbook of Soil Science. Boca Raton-London-New York-Washington D C: 2000. C107 ~ C119.

12 Baldock J A, Nelson P N. Soil Organic Matter. In: Sumner M E (Editor-in-chief). Handbook of Soil Science. Boca Raton-London-New York-Washington D C: 2000. B25 ~ B71.

13 Giardina C P, Ryan M. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature [J]. Nature, 2000, **404**(20):858 ~ 861.

14 Hassink J. Preservation of Plant Residues in Soils Differing in Unsaturated Protective Capacity[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1996, **60**:487 ~ 491.

15 Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral associated organic matter[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1996, **60**:801 ~ 807.

16 李庆逵主编. 中国水稻土. 北京:科学出版社, 1992.11 ~ 13.

17 潘根兴,李恋卿,龚 伟.太湖地区水稻土有机碳的分布和分异[J].科技通报,2000, **16**(6):421 ~ 426.

18 Zogg G P, Zak D R, Ringelberg D B et al. Compositional and functional shifts in microbial communities due to soil warming[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, **61**:475 ~ 481.