

长期施用有机肥对草甸碱土碳库管理指数的影响

周 萌, 周连仁, 孟庆峰, 马献发

(东北农业大学 资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘 要: 基于 1995 年在黑龙江省大庆市肇州县进行的长期定位试验, 研究了长期施用有机肥对草甸碱土活性有机质和碳库管理指数的影响。采用 3 种浓度的 KMnO_4 (33, 167, 333 mmol/L) 氧化法测定了土壤高活性有机质、中活性有机质和活性有机质 3 部分含量。结果表明, 长期施用有机肥能增加草甸碱土活性有机质各组分含量和碳库管理指数。活性有机质各组分含量和碳库管理指数在施用有机肥 1~5 a 的处理间均呈上升的变化趋势, 并与玉米产量趋势相一致, 在施用有机肥第 5 a 时, 均达到最高值, 施用有机肥 5~16 a 的处理间, 均呈现逐渐下降趋势, 最终趋于稳定。中活性有机质和活性有机质与总有机质均达到极显著性正相关, 而高活性有机质与总有机质无显著性相关, 活性有机质各组分与碳库管理指数也均达到极显著性正相关。研究表明, 总有机质不能很好地评价草甸碱土的土壤肥力, 而中活性有机质、活性有机质和碳库管理指数能更为客观地反映草甸碱土的土壤肥力, 可作为草甸碱土改良的良好评价指标。

关键词: 草甸碱土; 活性有机质; 碳库管理指数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)05-0011-05

中图分类号: S156.4

Effects of Long-term Application of Organic Manure on Carbon Management Index in Meadow Alkaline Soil

ZHOU Meng, ZHOU Lian-ren, MENG Qing-feng, MA Xian-fa

(School of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China)

Abstract: Based on a long-term experiment in Zhaozhou County, Daqing City, Heilongjiang Province in 1995, the effects of long-term application of organic manure on labile organic matter (LOM) and carbon management index (CMI) were studied, which supplies evaluation indicators for improving meadow alkaline soil. Highly labile organic matter (HLOM), middle labile organic matter (MLOM) and LOM were determined using oxidation method at 3 KMnO_4 concentrations (33, 167 and 333 mmol/L). Results from the experiment indicated that LOM concentrations and CMIs were significantly increased by long-term application of organic manure in meadow alkaline soil. Each component of LOM concentrations and CMIs were increased by application of organic manure, and were consistent with crop yield increasing, respectively. After the 5 years of application of organic manure, each component of LOM concentrations and CMIs reached the highest values, respectively. But each component of LOM concentrations and CMIs were gradually decreased and finally stabilized. There were significant positive correlations among MLOM and LOM and total organic matter (TOM), but no correlation between HLOM and TOM. There was also highly significant positive correlation between each component of LOM and CMIs. The study indicates that TOM cannot be used as a good indicator of soil fertility in meadow alkaline soil. MLOM, LOM and CMI objectively reflect soil fertility in meadow alkaline soil and thus may be used as indicators for improving the soil.

Keywords: meadow alkaline soil; labile organic matter; carbon management index

盐碱土作为一种潜在耕地的后备土壤资源, 存在巨大的开发潜力。东北地区是我国土地盐碱化最严重的地区之一, 同时也是世界三大苏打盐碱土集中分布区域之一。长期以来国内外许多学者对盐渍土的

收稿日期: 2012-12-03

修回日期: 2012-12-31

资助项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目“松嫩平原中部盐碱化旱地节水控盐农业高效技术模式研究与示范”(200903001-06-6)

作者简介: 周萌(1988—), 女(汉族), 黑龙江省哈尔滨市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤改良。E-mail: meng4011@163.com。

通信作者: 马献发(1978—), 男(汉族), 黑龙江省克山县人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤改良与土壤肥力修复研究。E-mail: mx7856@163.com。

改良利用开展了广泛深入的研究,但有关长期施用有机肥对盐渍土改良效果的研究并不多见。

土壤有机质在土壤肥力中具有非常重要的作用,它不仅是一种稳定而长效的碳源物质,而且几乎含有作物所需要的各种营养元素,是衡量土壤肥力的重要指标之一^[1]。长期以来,许多学者已经在土壤有机质的定量方面做了大量的研究工作,但是,土壤有机质的含量不能很好地反映土壤质量的变化,它只是一个矿化分解和合成的平衡结果,不能反映转化速率等。20 世纪 70—80 年代,一些学者从有机质的分解转化方面入手,对有机质分组进行了更深入的研究,提出了活性有机质的概念。活性有机质即土壤有机质的活性部分,它是指土壤中有效性较高、对植物养分供应有最直接作用、易被土壤微生物分解矿化的那部分有机质^[2-4]。土壤活性有机质可以表征土壤物质循环特征,作为土壤潜在生产力和土壤管理措施变化引起土壤有机质变化的早期指标^[5]。Lefroy 等^[6]根据活性有机质建立了活性有机质库容指标(CPI),计算并提出了土壤碳库管理指数(CMI),并认为碳库管理指数能够作为土壤管理措施引起土壤有机质变化的指标。目前,我国对不同土壤碳库和活性有机质的研究都较多,但是对长期定位施用有机肥条件下,土壤中活性有机质的各组分含量和碳库管理指数的报道较少。本文基于长期定位实验,探讨长期施用有机肥对草甸碱土活性有机质含量和碳库管理指数的影响,以及活性有机质各组分与总有机质和碳库管理指数的相关性,为草甸碱土改良提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区设在黑龙江省大庆市肇州县,东经 125°27",北纬 45°7",地处松嫩平原中部,黑龙江省西部。研究区域气候类型为北温带大陆性季风气候,属第一积温带,年均活动积温 2 800 °C,无霜期 143 d,年降水量约 457.6 mm。其特点是春季多风、少雨、干旱;夏季酷热、多雨;秋季凉爽,易发生早霜;冬季寒冷、干燥。成土母质为更新世末期沉积的黄土状亚黏土,质地黏重。

1.2 试验设计

施用有机肥长期定位试验于 1995 年实施,有机肥种类为腐熟牛粪,共设置 7 个处理,分别为:不施牛粪的草甸碱土为对照(CK)、施用牛粪 1 a(S₁)、施用牛粪 2 a(S₂)、施用牛粪 5 a(S₅)、施用牛粪 7 a(S₇)、施用牛粪 11 a(S₁₁)和施用牛粪 16 a(S₁₆)。供试作物为玉米。土壤样品于 2011 年 4 月采自耕层(0—

20 cm)。每个处理选择 3 个样点,混合后采用“四分法”保留土壤样品约为 2 kg。去除石砾和作物残根等外侵物,通风阴凉处风干后,磨细过 0.25 mm 筛用于测定土壤总有机质与活性有机质各组分含量。

1.3 测定项目与方法

土壤活性有机质各组分的测定选用高锰酸钾氧化法^[7],即分别采用 33,167 和 333 mmol/L 浓度的 KMnO₄ 进行高活性有机质、中活性有机质和活性有机质测定。土壤总有机质(TOM)采用 K₂Cr₂O₇—H₂SO₄ 氧化法测定。以对照为参考土壤,CMI 计算方法如下。

$$(1) \text{碳库指数(CPI)} = \frac{\text{样品总有机质含量(g/kg)}}{\text{参照土壤总有机质含量(g/kg)}}$$

(2) 土壤碳的不稳定性,即碳库活度(L)等于土壤中的活性有机质(LOM)与非活性有机质(NLOM)之比:

$$L = \frac{\text{样本中的活性有机质(LOM)}}{\text{样本中的非活性有机质(NLOM)}}$$

(3) 碳损失及其对稳定性的影响可用活度指数(LI)表示:

$$LI = \frac{\text{样本的不稳定性(L)}}{\text{对照的不稳定性(L}_0\text{)}}$$

(4) 基于以上指标可以求得碳库管理指数(CMI):

$$CMI = CPI \times LI \times 100$$

1.4 统计分析

文中数据用 SASV 9 软件进行分析,采用 LSD 多重比较法进行处理间差异显著性分析($p \leq 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 长期施用有机肥对草甸碱土 TOM, NLOM 和 LOM 的影响

土壤有机质是土壤肥力的重要物质基础,在维持土壤结构,保持土壤水分和供应养分等方面具有重要作用,同时也与全球气候变化密切相关^[8]。

从图 1 中可以看出,与 CK 相比,连续施用有机肥草甸碱土的总有机质(TOM)和非活性有机质(NLOM)含量均呈上升趋势,在施肥的前 5 a 内 TOM 含量增长速率较快,之后的增长速率减缓。而活性有机质(LOM)呈现先增加后减少的趋势,施肥 5 a 时达到最高值,之后开始平稳下降。经 LSD 多重比较可知,除处理 S₁ 的 TOM 与 CK 间未达到显著性差异外,其他各处理与 CK 间均达到显著性差异水平($p \leq 0.05$),各处理的 LOM 和 NLOM 与 CK 间均达到显著性差异($p \leq 0.05$)。

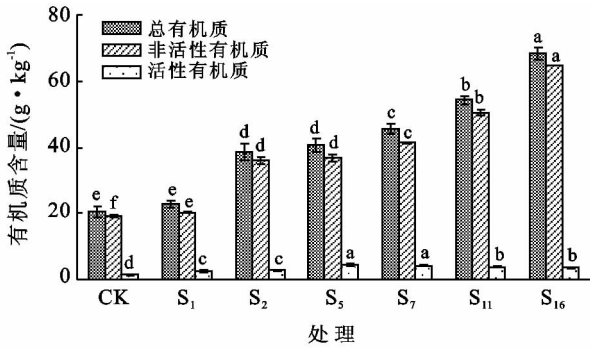


图 1 长期施用有机肥对草甸碱土总有机质、非活性有机质及活性有机质的影响

2.2 长期施用有机肥对草甸碱土 LOM 各组分含量的影响

土壤活性有机质不但能有效反映土壤质量在较大时空尺度上的变化,而且能敏感指示土壤性质的微小变化^[9]。因此,研究土壤活性有机质对于建立土地/土壤管理与土壤质量变化及其与生态效应之间的关系具有重要意义^[10-11]。

从图 2 中可以看出,活性有机质各组分含量相比较,低活性有机质含量最高,其次是中活性有机质,高活性有机质含量最低。各处理 LOM 组分含量具有相同的变化趋势,在有机肥连续施用 5 a 的处理(S₅)达到最大,而在之后的 11 a 内几乎都呈缓慢下降状态,最终趋于平稳。在连续施肥的前 5 a 内,各处理 LOM 组分含量均呈现出不同程度的增长趋势,并与玉米产量趋势相一致,其中 MLOM 和 LOM 的增长幅度大于 HLOM。经 LSD 多重比较可知,长期施用有机肥各处理与 CK 相比都达到显著性差异($p \leq 0.05$),说明长期施用有机肥都能增加草甸碱土的 LOM

各组分的含量,在施肥 5 a 时对 LOM 各组分含量的影响最明显。

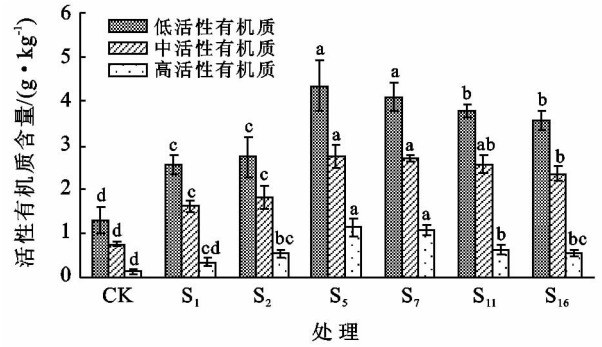


图 2 长期施用有机肥对草甸碱土活性有机质各组分的影响

2.3 长期施用有机肥对草甸碱土 CMI 的影响

从表 1 的结果可以看出,各处理 LI, CPI 和 CMI 均高于 CK。各处理的 CPI 均大于 1,即各处理的总碳含量均有所增加,表明长期施肥有利于有机质的累积。L 是指土壤 LOM 与 NLOM 的比值,它反映土壤 LOM 比值和土壤活性,除 S₁₆ 处理外,各处理 L 均大于 CK,表明长期施用有机肥有利于 LOM 的积累,且能改善土壤质量^[12]。各处理 CMI 与土壤 LOM 组分含量的有着相似的变化趋势:从施用有机肥 1 a (S₁)到 5 a(S₅)处理 CMI 呈现上升趋势,并与玉米产量趋势相一致,处理 S₅ 的 CMI 最高,与 CK 相比增加了 287.73,在施用有机肥 5 a 后,随着施用有机肥的年限增长,CMI 呈缓慢下降趋势,到施用有机肥 16 a 时,CMI 趋于稳定。经 LSD 多重比较可知,各处理与 CK 相比都达到差异显著水平($p \leq 0.05$),说明长期施用有机肥都能增加草甸碱土的 CMI,且在施肥 5 a 时对 CMI 的影响最明显。

表 1 长期施用有机肥对草甸碱土碳库管理指数(CMI)的影响

处理	总有机质/ (g·kg ⁻¹)	活性有机质/ (g·kg ⁻¹)	活度 L	活度指数 LI	碳库指数 CPI	碳库管理指数 CMI
CK	20.31	1.28d	0.07	1.00	1.00	100.00d
S ₁	22.78	2.57c	0.13	1.93	1.20	230.68c
S ₂	38.58	2.74c	0.08	1.18	2.00	235.17c
S ₅	40.81	4.35a	0.12	1.81	2.14	387.73a
S ₇	45.67	4.10a	0.10	1.45	2.46	357.40a
S ₁₁	54.25	3.78b	0.08	1.12	2.89	322.82b
S ₁₆	68.23	3.57b	0.06	0.81	3.70	298.42b

注:同一列不同字母代表显著性差异($p \leq 0.05$)。

2.4 长期施用有机肥对草甸碱土 LOM 各组分与 TOM 和 CMI 的相关性

各处理 LOM 组分与 TOM 和 CMI 的相关性如表 2 所示。LOM 各组分与 TOM 的相关性分析表明,MLOM 和 LOM 与 TOM 均达到了极显著正相关

($p \leq 0.01$),相关系数分别为 0.71 和 0.67,而 HLOM 与 TOM 没有显著的相关性。3 种 LOM 与 TOM 的相关性说明,LOM 既区别于 TOM 又与 TOM 紧密相连,它们是土壤总有机质的一部分,MLOM 和 LOM 可以更为敏感和直观地指示草甸碱土的土壤质量,而

HLOM 指示草甸碱土的土壤质量的效果不明显。

LOM 各组分与 CMI 的相关性分析表明,3 种 LOM 与 CMI 均达到极显著的正相关($p \leq 0.01$),具有很好的统计学意义,这表明 CMI 也能很好地反映土壤 LOM 的变化。LOM, MLOM 和 HLOM 与 CMI 的相关系数分别为:0.99, 0.94 和 0.87, 其中 MLOM 和 LOM 比 HLOM 与 CMI 的相关性高,这表明 MLOM 和 LOM 对土壤 LOM 的指示效果优于 HLOM。

表 2 草甸碱土活性有机质与总有机质和碳库管理指数的相关性

类型	高活性有机质	中活性有机质	低活性有机质	碳库管理指数	总有机质
高活性有机质	1				
中活性有机质	0.81**	1			
低活性有机质	0.86**	0.95**	1		
碳库管理指数	0.87**	0.94**	0.99**	1	
总有机质	0.41	0.71**	0.67**	0.61**	1

注: ** 表示在 0.01 水平上相关性显著。

3 讨论

通过比较有机肥不同施用年限的各处理 LOM 组分含量可知,在施用有机肥 5 a 内的各处理 LOM 组分含量均呈现出增长趋势,其中 MLOM 和 LOM 的增长幅度大于 HLOM,在施肥 5 a 时达到最高值,施用有机肥 5 a 后,LOM 各组分含量缓慢下降,在有机肥施用 16 a 时趋于稳定,而 TOM 和 NLOM 呈现逐年增加的趋势。这可能是因为随着施用有机肥的年限增加,最初施肥的 5 a 里 LOM 很快就达到了峰值,随时间推移,LOM 部分转化成为 NLOM,因此从施肥 5 a 到施肥 16 a,LOM 各组分含量都呈现下降趋势,并最终趋于稳定。这与倪进治等^[13]研究不同有机肥料对土壤生物 LOM 组分的动态的结果相一致,不同施肥潮土 LOM 组分经分离后,发现有机物施用后 LOM 在开始时迅速达到较高值,但是随着时间的推移逐渐下降并趋于稳定。徐明岗等^[14]也有类似结果的报道,发现红壤 HLOM 在开始 5 a 变化较大,10 a 后趋向于稳定。蔡太义等^[15]研究了不同年限免耕秸秆覆盖对土壤 LOM 和 CMI 的影响,指出 LOM 和 CMI 均在免耕覆盖的前 5 a 随着覆盖年限的延长而升高,5 a 后则呈逐渐下降趋势。

沈宏等^[16]研究认为,CMI 可灵敏反映农业生产措施对土壤碳库的影响,汪吉东等^[17]研究表明 LOM 是描述土壤质量和评价土壤管理水平的良好指标,邱莉萍等^[18]也认为 LOM 可以指示土地利用方式对

TOM 和 CMI 的影响,徐明岗等^[19]则指出,LOM 和 CMI 均应成为描述土壤质量和评价土壤管理的良好指标。本研究中 LOM 各组分与 CMI 均达到极显著正相关,MLOM 和 LOM 与 TOM 也有极显著的正相关性,而 HLOM 与 TOM 未达到显著性相关。其原因可能在于:TOM 只是一个矿化分解和合成的平衡结果,短时期内数量的变化不能得到灵敏的反映^[20],而 LOM 具有移动快,稳定性差,易氧化,易分解,易矿化,能被微生物直接利用的特点,故与土壤质量的关系更为密切,从而能准确快速地反映长期施用有机肥对土壤碳库的影响和对土壤生产力的变化。相关分析也表明,CMI 能很好地反映土壤碳素动态变化的灵敏性和有效性,为培肥地力、增加土壤 LOM 含量提供了量化依据。本试验各处理 LOM 组分含量在施用有机肥的前 5 a 内均呈现出不同程度的增加,其中 MLOM 和 LOM 的增长幅度大于 HLOM。综上,用 TOM 不能很好评价土壤有机质的质量,而 MLOM 和 LOM 及 CMI 能更为客观地反映土壤质量状况,应成为长期施用有机肥改良草甸碱土的良好评价指标,这与徐明岗等^[19]的结论类似。

4 结论

(1) 有机肥施用 1~5 a 处理,活性有机质各组分与碳库管理指数呈上升趋势,于第 5 a 达到最高,并与玉米产量相一致;有机肥施用 5~16 a 处理,呈下降趋势,最终趋于稳定。

(2) 中活性有机质和活性有机质与总有机质均达到极显著正相关;高活性有机质与总有机质未达到显著性相关。

(3) 活性有机质各组分与碳库管理指数均达到极显著正相关。

[参 考 文 献]

- [1] 林葆,林继雄,李家康. 长期施肥作物产量和土壤肥力变化[M]. 北京:农业科技出版社,1996:1-179.
- [2] 刘云慧,宇振荣,张风荣,等. 县域土壤有机质动态变化及其影响因素分析[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(3):294-301.
- [3] Janzen H H. Soil organic matter characteristics after long-term cropping to various spring wheat rotations[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1987,67(4):845-856.
- [4] Whitbread A M, Lefroy R D B, Blair G J. A survey of the impact of cropping on soil physical and chemical properties in north-western New South Wales[J]. Australia Journal of Soil Research, 1998,36(4):669-681.

(下转第 68 页)

(2) 植株的抗拉拔能力大小为芦竹>五节芒>醉鱼草>苗期光皮桦。植株的整株抗拉拔性,与根系生物量密切相关。4 种盆栽植物的中心矿渣紧实度大小为苗期光皮桦>醉鱼草>芒草>芦竹>空白。矿渣紧实度与根系生物量之间为负相关,相关性显著。

(3) 4 种植物对矿渣的抗蚀性均有明显增强效应,醉鱼草、五节芒及芦竹对矿渣抗蚀增强系数均在 0.95 及以上,矿渣受侵蚀减缓率与植株根系总重、根径<1 mm及根径>1 mm 根系生物量呈正相关关系。

(4) 4 种植物对矿渣的抗冲性均有明显的增强效应,但是不同物种对矿渣的抗冲性增强效应不同。芦竹对矿渣抗冲性的增强效果最明显,增强效果最弱的为苗期光皮桦。4 种植物对矿渣抗冲性增强效应差异性极显著($p<0.05$)。植物对矿渣抗冲性增强值与植物根系生物量呈显著正相关。

[参 考 文 献]

- [1] 吴烈善,彭省临. 金属矿山生态环境问题及其防治对策[J]. 南方国土资源,2004(11):118-120.
- [2] 雷梅,岳庆玲,陈同斌,等. 湖南柿竹园矿区土壤重金属含量及植物吸收特征[J]. 生态学报,2005,25(5):1146-1151.
- [3] 赵新宇,赵岭,王立刚. 阿伦河流域水土保持林土壤抗蚀性研究[J]. 防护林科技,2000(3):21-23.
- [4] 付兴涛,张丽萍,喻理飞,等. 植物苗期根系抗侵蚀特性试验研究:以构树和顶坛花椒为例[J]. 水土保持学报,2008,22(33):5-9.
- [5] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator: model documentation[C]// Technical Bulletin No. 1768. Washington D C: US Department of Agriculture, 1990:235.
- [6] 徐少君,曾波. 三峡库区 5 种耐水淹植物根系增强土壤抗侵蚀效能研究[J]. 水土保持学报,2008,22(6):13-18.
- [7] 罗汝英. 森林土壤学[M]. 北京:北京科学出版社,1983,367-370.
- [8] 吴淑安,蔡强国. 土壤表土中植物根系影响其抗蚀性的模拟降雨试验研究:以张家口试验区为例[J]. 干旱区资源与环境,1999,13(3):35-42.
- [9] 戴全厚,张力,刘艳军. 嫩江大堤植物根系固土护堤功能研究[J]. 水土保持通报,1998,18(6):8-11.
- [10] 张科利,彭文英,杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报,2007,44(1):7-13.
- [11] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究[J]. 水土保持学报,1998,4(1):93-96.
- [12] 刘晚苟,山仑,邓西平. 植物对土壤紧实度的反应[J]. 植物生理学通讯,2001,37(3):254-260.
- [13] 张小全,吴可红. 森林细根生产与周转研究[J]. 林业科学,2001,37(3):126-135.
- [14] 李勇,徐晓琴,朱显谟,等. 植物根系与土壤抗冲性[J]. 水土保持学报,1993,7(3):11-18.
- [12] 吴小丹,蔡立湘,鲁艳红,等. 长期不同施肥制度对红壤性水稻土活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 土壤肥料科学,2008,24(12):283-288.
- [13] 倪进治,徐建民,谢正苗,等. 不同有机肥料对土壤生物活性有机质组分的动态影响[J]. 植物营养与肥料学报,2001,7(4):374-378.
- [14] 徐明岗,于荣,王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. 土壤学报,2006,43(5):723-729.
- [15] 蔡太义,黄耀威,黄会娟,等. 不同年限免耕秸秆覆盖对土壤活性有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 生态学杂志,2011,30(9):1962-1968.
- [16] 沈宏,曹志洪,王志明. 不同农田生态系统土壤碳库管理指数的研究[J]. 自然资源学报,1999,14(3):20-210.
- [17] 汪吉东,张永春,俞美香,等. 不同有机无机肥配合施用对土壤活性有机质含量及 pH 值的影响[J]. 江苏农业学报,2007,23(6):573-578.
- [18] 邱莉萍,张兴昌,程积民. 土地利用方式对土壤有机质及其碳库管理指数的影响[J]. 中国环境科学,2009,29(1):84-89.
- [19] 徐明岗,于荣,孙小凤,等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(4):459-465.
- [20] 杨景成,韩兴国,黄建辉,等. 土壤有机质对农田管理措施的动态响应[J]. 生态学报,2003,23(4):787-796.

(上接第 14 页)

- [5] Dalai R C, Mayer R J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland(IV): Loss of organic carbon from different density fractions[J]. Australian Journal of Soil Research, 1986,24(2):301-309.
- [6] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7):1459-1466.
- [7] Logninow W, Wisniewski W, Strony W M, et al. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation[J]. Polish Journal of Soil Science, 1987, 20(1):47-52.
- [8] 肖胜生,董云社,齐玉春,等. 草地生态系统土壤有机碳库对人为干扰和全球变化的响应研究进展[J]. 地球科学进展,2009,24(10):1138-1148.
- [9] 姜培坤. 不同林分下土壤活性有机碳库研究[J]. 林业科学,2005,41(1):10-13.
- [10] 薛蕙,刘国彬,潘彦平,等. 黄土丘陵区人工刺槐林土壤活性有机碳与碳库管理指数演变[J]. 中国农业科学,2009,42(4):1458-1464.
- [11] Martin H, Markus R. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks[J]. Nature, 2008,451(7176):289-292.