

长期施肥对中国 3 种典型农田土壤活性有机碳库变化的影响

张璐¹, 张文菊¹, 徐明岗¹, 蔡泽江¹, 彭畅², 王伯仁¹, 刘骅³

(¹中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部作物营养与施肥重点开放实验室, 北京 100081; ²吉林农业科学院资源环境中心, 长春 130012; ³新疆农业科学院土壤肥料研究所, 乌鲁木齐 830000)

摘要:【目的】观测分析了中国 3 种典型农田土壤——黑土、灰漠土和红壤有机碳在时间与空间上对长期不同施肥措施的响应特征, 为农田土壤培肥提供理论依据。【方法】通过有机碳分组对比分析了长期施肥后土壤总有机碳与活性有机碳的含量与比例变化。【结果】16 年后, 不施肥 (CK) 灰漠土总有机碳、活性有机碳含量均呈显著下降趋势, 下降幅度分别为 11.7% 和 34.9%, 且活性有机碳占总有机碳的比例也显著下降了 5.4 个百分点; 长期施用氮肥 (N) 3 种土壤总有机碳含量基本保持不变, 但活性有机碳所占比例显著下降, 其中黑土下降幅度高达 9.5 个百分点; 化肥配施 (NP, NPK) 后, 黑土和灰漠土活性有机碳占总有机碳的比例仍显著下降, 红壤则略呈上升趋势; 有机无机配施 (NPKM, 1.5NPKM), 3 种土壤的总有机碳、活性有机碳及活性有机碳占总有机碳的比例均显著提高, 其中红壤上升幅度最大, NPKM 处理提高幅度分别为 80.6%、146.2% 和 7.5 个百分点, 其次是灰漠土, 分别提高了 64.4%、138.0% 和 5.0 个百分点; 实施秸秆还田 (NPKS) 后, 红壤的总有机碳、活性有机碳及活性有机碳占总有机碳的比例分别增加了 21.6%、59.0% 和 7.5 个百分点, 黑土和灰漠土则相对较稳定。【结论】活性有机碳占总有机碳比例对施肥措施反应敏感, 长期不施肥或只施氮肥多数导致土壤总有机碳含量和活性有机碳所占比例下降, 有机无机配施能维持和提高土壤有机碳含量和活性有机碳所占比例, 且效果优于秸秆还田, 优于化肥 (NPK) 配施。

关键词: 长期施肥; 有机碳; 活性有机碳; 黑土; 灰漠土; 红壤

Effects of Long-Term Fertilization on Change of Labile Organic Carbon in Three Typical Upland Soils of China

ZHANG Lu¹, ZHANG Wen-ju¹, XU Ming-gang¹, CAI Ze-jiang¹, PENG Chang², WANG Bo-ren¹, LIU Hua³

(¹Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, Ministry of Agriculture/Agricultural Resources and Regional Planning Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; ²Resources and Environment Centre, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130012; ³Institute of Soil and Fertilizers, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830000)

Abstract: 【Objective】 Based on 3 long-term experiments, temporal and spatial responses of total soil organic carbon (TOC) and labile organic carbon (LOC) in red soil, black soil and grey-desert soil to various long-term fertilizations were discussed. 【Method】 Fractionation method of soil organic carbon was applied to determine the contents of LOC and the percentage of LOC to TOC in black soil, grey-desert soil and red soil. 【Result】 Results showed that the content of TOC and LOC and the percentage of LOC to TOC under 16 years of non-fertilization (CK) in grey-desert soil decreased significantly by 11.7%, 34.9% and 5.4 percentage points, respectively. After long-term application of chemical nitrogen fertilizer (N), the content of TOC of the 3 soils kept no significant change throughout the studied period. However, the percentage of LOC to TOC for the 3 soils all decreased significantly. It decreased by 9.5 percentage points in black soil, which was the most of the 3 studied soils. After 16 years application of NP and NPK, the percentage of LOC to TOC in black soil and grey-desert soil decreased significantly. While there was increasing trend for

收稿日期: 2008-08-25; 接受日期: 2008-11-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40871148)、国家“十一五”重点科技支撑计划项目 (2006BAD05B09、2006BAD02A14)、基础性工作专项项目 (2007FY220400)

作者简介: 张璐 (1984—), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 研究方向为土壤碳氮转化与利用。Tel: 010-82108649; E-mail: z372069983@126.com。通信作者徐明岗 (1961—), 男, 研究员, 博士, 研究方向为土壤肥力演变与培育。Tel: 010-82108661; E-mail: mgxu@caas.ac.cn

red soil. There was significant increase in the contents of TOC and LOC and the percentage of LOC to TOC under long-term application of chemical fertilizers combined with manure (NPKM, 1.5 NPKM). After long-term application of NPKM, the contents of TOC, LOC and the percentage of LOC to TOC in red soil increased by 80.6%, 146.2% and 7.5 percentage points, respectively, which was the most. For grey-desert soil it was 64.4%, 138.0% and 5.0 percentage points, respectively. For long-term application of NPK with straw return (NPKS), the contents of TOC, LOC and the percentage of LOC to TOC in red soil increased by 21.6%, 59.0% and 7.5 percentage points. However, it was stable in black soil and grey-desert soil. 【Conclusion】 The percentage of LOC to TOC response sensitively to long-term fertilization and could be one of the indicators for the quality of soil organic carbon. Long-term non-fertilization and only chemical nitrogen fertilizers lead to decrease in the contents of total soil organic carbon and the percentage of LOC to TOC in most cases. Long-term application of NPKM could maintain and improve quality and quantity of soil organic carbon. The effect of long-term application of NPKM was better than that of NPKS, and they were both better than that of long-term application of NPK.

Key words: long-term fertilization; organic carbon; labile organic carbon; black soil; grey-desert soil; red soil

0 引言

【研究意义】土壤有机质不仅含有植物生长所必需的各种营养元素,而且是微生物生命活动的能源,对土壤的理化及生物学特性有深远的影响^[1]。而其中的有机碳库为表层陆地生态系统中最大的碳库,其微小变化将对大气 CO₂ 浓度产生重要影响^[2]。因此,土壤有机质不仅是一个重要的土壤肥力指标,而且对土壤圈、大气圈、生物圈的内在变化和物质循环均具有重要影响。土壤有机质是由一系列存在于土壤中结构不均一、主要成分为碳和氮的有机化合物组成,通常用有机碳来表示其数量特征。这一数量特征是其矿化分解与合成这两个过程的动态平衡,是土壤有机碳的容量特征,并不能很好地反映土壤有机碳的质量。近年来,越来越多的研究者发现,在土壤有机碳组成中,有一部分有机碳对外界环境变化响应非常敏感,与土壤的营养供应和作物生长密切相关,这部分有机碳被称为活性有机碳。活性有机碳是土壤有机碳的活性部分,它是指土壤中有效性较高、易被土壤微生物分解矿化、对植物养分供应有最直接作用的那部分有机碳,能够稳定被异养微生物利用作为能源及碳源^[3-9]。在众多的土壤活性有机碳研究方法中,Loginow 等^[10]提出的一种以土壤总有机碳(TOC)的组分对不同浓度(33、167、333 mmol·L⁻¹)高锰酸盐氧化作用的敏感性为基础的分组方法较为经典。以这 3 种浓度获得的土壤有机碳的 4 个级别中,以能被 333 mmol·L⁻¹ KMnO₄ 氧化的有机碳组分在种植作物时变化最为敏感^[11]。与全量有机碳相比,由于变化敏感的活性有机碳与土壤有效养分、土壤的物理性状、耕作措施等具有更密切的关系,因而已经成为土壤质量及土壤管理评价指标之一^[12]。【前人研究进展】大量研究表明,不均衡施用

化肥不仅会造成土壤有机碳含量降低,而且也导致活性有机碳的下降^[3,13-14],而施用有机肥或化肥有机肥配合施用能明显提高土壤总有机碳和活性有机碳的含量^[3,15-20],但由于受到气候、土壤母质和轮作方式等诸多因素的影响,土壤有机碳及其组分对相同施肥措施的响应在不同的区域存在较大差异^[21-23]。【本研究切入点】因此,研究并探讨土壤有机碳库在中国 3 个典型区域(东北,西北和南方)对相同施肥措施的响应特征的异同具有重要意义。【拟解决的关键问题】本研究以 3 个典型区域的长期定位试验为基础,选择东北黑土、西北灰漠土和南方红壤为研究对象,通过分析长期不同施肥下土壤总有机碳与活性有机碳的变化特征,探讨长期施肥对土壤有机碳库及其组分的影响,为土壤地力培育和农业可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究的 3 个长期定位试验分布于中国东北公主岭(黑土)、西北乌鲁木齐(灰漠土)和中南部祁阳(红壤),在气候和成土母质上具有明显的区域特征(表 1)。

试验均起始于 1990 年。试验处理均包括不施肥(CK)、单施 N 肥(N)、施 NP 肥(NP)、NPK 配施(NPK)、常量有机与无机肥配施(NPKM)、增量有机与无机配施(1.5NPKM)、秸秆还田配施 NPK 肥(NPKS)。公主岭黑土试验点为一年一熟玉米连作,肥料用量为年施用 N 165 kg·hm⁻², P₂O₅ 82.5 kg·hm⁻², K₂O 82.5 kg·hm⁻², 有机肥为猪粪或牛粪, NPKM 和 1.5NPKM 的有机肥的年施用量分别为 30 和 45 t·hm⁻², 小区面积 400 m², 无重复。乌鲁木齐灰漠土为一年一熟小麦-小麦-玉米轮作, 1990—1994 年肥料年施用量 N 为 99 kg·hm⁻², P₂O₅ 为 59 kg·hm⁻², K₂O

为 $19.8 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 1994 年后 N、 P_2O_5 、 K_2O 分别为 242、145、 $48 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 有机肥为羊粪, NPKM 处理的羊粪年施用量为 $30 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 1.5NPKM 处理的为 $45 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 小区面积 468 m^2 , 无重复。祁阳红壤为小麦-玉米一年两熟, 肥料用量为年施用 N $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, P_2O_5 $120 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, K_2O $120 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 有机肥为猪粪, NPKM 和 1.5NPKM 处理猪粪年施用量分别为 42 和 $63 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,

玉米季施肥量占施肥总量的 70%, 小区面积 196 m^2 , 随机排列, 重复 2 次。3 个试验点的 NPKM 及 1.5NPKM 中, 有机氮施用量占全氮的 70%, 有机肥不考虑磷、钾养分。3 个试验点各小区之间均用 70~100 cm 深水泥埂隔开, 地表露出 10 cm 加筑土埂, 避免漏水渗肥。东北公主岭和西北乌鲁木齐点根据需要, 干旱年份进行灌溉, 湖南祁阳点整个作物生育期无灌溉。3 个试

表 1 研究区域概况

Table 1 General situation of soils studied

土壤 Soil	黑土 Black soil	灰漠土 Grey-desert soil	红壤 Red soil
经纬度 Latitude	124°48'34"E, 43°30'23"N	87°46'45"E, 43°95'26"N	111°52'32"E, 26°45'12"N
海拔 Altitude (m)	220	600	120
年均温 Annual averaged temperature (°C)	4~5	7	18
无霜期 No-frost period (d)	125~140	156	300
年降雨量 Annual rainfall (mm)	450~600	310	1255
年蒸发量 Annual evaporation (mm)	1200~1600	2570	1470
年日照时数 Annual sunlight hours (h)	2500~2700	2594	1610
粘粒含量 Clay content (%)	26.7	20.2	41.0
成土母质 Soil parent	第四纪黄土状沉积物 Quaternary loess sediment	冲积母质 Striking parent	第四纪红色黏土 Quaternary red clay
有机碳 TOC ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	13.11	9.58	8.20
全氮 Total N ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	1.40	0.85	1.07
全磷 Total P ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	1.39	0.67	0.32
全钾 Total K ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	22.1	19.4	13.7
有效氮 Avail. N ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	114	65	79
速效磷 Avail. P ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	27.0	4.5	13.9
速效钾 Avail. K ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	190	188	104
pH	7.6	7.7	5.7

表中数据均为 0~20 cm 土层 Dates in the table are 0-20 cm soil layer

验点均采用常规耕作方式。

1.2 样品采集、处理与分析

各试验点每年作物收获后的 9—10 月每个小区用土钻进行多点取样, 采集 0~20 cm 土层土样, 混合制样, 风干后过筛, 采用多次重复法测定土壤总有机碳含量。本研究选择 3 个试验点各处理 1990、1994、2000 和 2006 年的土壤样品进行活性有机碳的测定, 其中湖南试验点 1994 年的历史样品缺失。

土壤总有机碳的测定采用常规 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 氧化法^[24]。土壤活性有机碳的测定采用 KMnO_4 氧化法^[9-10], 具体方法为: 称取 1~2 g 过 0.25 mm 筛的土壤样品于 50 ml 离心管中, 加入 $333 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ KMnO_4 25 ml, 振

荡 1 h, 离心 5 min (转速 2 000 r/min), 取上清液用去离子水按 1 : 250 稀释, 然后将稀释液在 565 nm 比色。根据 KMnO_4 浓度的变化求出样品的活性有机碳 (氧化过程中 $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ KMnO_4 消耗 $0.75 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 或 9 mgC)。

1.3 数据分析

数据的统计与分析采用 Excel 和 SPSS 软件进行。不同施肥处理之间差异显著性检验采用邓肯法 ($P < 0.05$)。土壤总有机碳随时间的变化趋势分析采用线性回归法, 回归方程达到 $P < 0.05$ 或 $P < 0.01$ 的显著水平, 认为其上升或下降; 否则认为土壤有机碳维持不变。

2 结果与分析

2.1 长期施肥下农田土壤总有机碳的变化特征

长期不同施肥下 3 种土壤总有机碳随时间的变化趋势存在一定差异(图 1, 表 2)。长期不施肥(CK)或只施氮肥(N), 东北黑土和南方红壤总有机碳基本持平, 说明黑土和红壤的自然地力基本能维持作物生产对土壤有机碳的消耗; 而新疆灰漠土长期不施肥土壤总有机碳显著下降, 16 年平均下降速率为 $0.06 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, 与土壤有机碳的起始值相比, 16 年下降幅度为 11.7%, 单施氮肥(N)较对照(CK)下降 5.9%, 其原因主要是西北地处于干旱半干旱地区, 土壤有机碳矿化强烈, 土壤有机碳不断被耗竭所致。N 和 NP 处理 16 年后, 黑土、灰漠土和红壤的总有机碳基本维持在起始水平。NPK 处理 16 年后, 黑土有机碳基本保

持不变, 灰漠土有机碳显著下降, 而红壤土壤有机碳则显著增加(表 2)。有机无机配施(NPKM、1.5 NPKM)下, 3 种土壤的总有机碳均呈显著增加趋势。其中 NPKM 处理, 黑土、灰漠土和红壤总有机碳的平均增加速率分别为 0.39 、 0.34 和 $0.37 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, 16 年后土壤有机碳比初始值上升比例分别为 42.8%、64.4%和 80.6%; 1.5 NPKM 处理有机碳增加速率则分别为 0.52 、 0.54 和 $0.45 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, 说明增量的有机无机配施处理仍能明显提高土壤有机碳水平。秸秆还田(NPKS) 16 年后, 黑土和灰漠土的总有机碳基本保持不变, 红壤有机碳显著上升, 上升了 21.6%。以上结果表明, 长期不施肥或仅施氮肥(N)和氮磷配施(NP), 东北黑土和南方红壤土壤有机碳仅能维持平衡, 而秸秆还田和有机无机配施不仅能遏制西北地区土壤有机碳下降趋势, 而且能有效提高 3 种土壤有机碳水平。

表 2 不同土壤总有机碳变化速率

Table 2 Changing rate of total organic carbon in different soils

土壤 Soil	土壤有机碳起始值 Initial organic carbon content ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	施肥处理 Fertilization treatment	总有机碳含量变化趋势 Change trend in total soil organic carbon content	
			趋势 Trend	速率 Rate ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)
黑土 Black soil	13.12	CK	持平 Unchanged	0.00
		N	持平 Unchanged	-0.01
		NP	持平 Unchanged	0.04
		NPK	持平 Unchanged	0.07
		NPKS	持平 Unchanged	0.07
		NPKM	上升 Increased**	0.39
灰漠土 Grey desert soil	9.58	1.5 NPKM	上升 Increased**	0.52
		CK	下降 Decreased*	-0.06
		N	持平 Unchanged	0.03
		NP	持平 Unchanged	0.01
		NPK	下降 Decreased*	-0.06
		NPKS	持平 Unchanged	0.02
红壤 Red soil	8.20	NPKM	上升 Increased**	0.34
		1.5 NPKM	上升 Increased**	0.54
		CK	持平 Unchanged	-0.01
		N	持平 Unchanged	0.03
		NP	持平 Unchanged	0.07
		NPK	上升 Increased*	0.13
		NPKS	上升 Increased*	0.13
		NPKM	上升 Increased**	0.37
		1.5 NPKM	上升 Increased**	0.45

*代表 5%水平显著; **代表 1%水平显著 * Significance at 5% level; ** Significance at 1% level

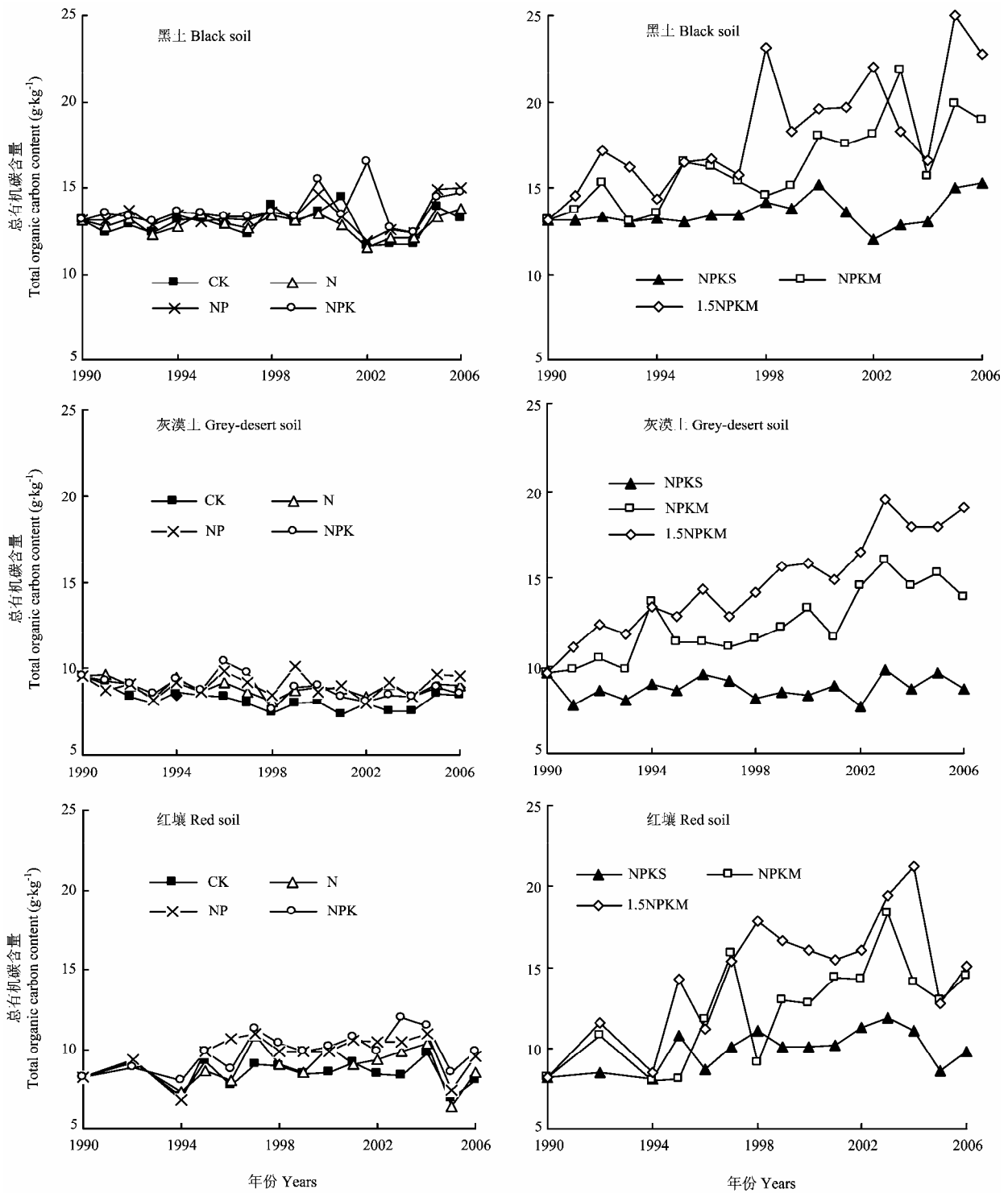


图 1 长期施肥下土壤总有机碳含量变化

Fig. 1 Changes of content of soil organic carbon under long-term fertilizations

2.2 长期施肥下农田土壤活性有机碳的变化特征

长期不施肥 (CK)、施化肥 (N、NP、NPK) 或秸秆还田 (NPKS) 条件下, 黑土的活性有机碳最高,

其次是红壤, 灰漠土最低; 而有机无机肥配施 (NPKM、1.5 NPKM) 下, 活性有机碳含量为黑土 > 灰漠土 > 红壤。这说明活性有机碳含量与土壤总有机碳含量密切

相关。

长期不同施肥下 3 种土壤活性有机碳随时间变化存在差异(图 2)。16 年不施肥(CK)与原始土壤相比,黑土和红壤活性有机碳基本维持不变,灰漠土则显著下降,下降幅度达 34.9%。与对照(CK)相比,

只施氮肥(N)处理 16 年后,黑土活性有机碳含量显著下降,下降幅度为 28.7%,红壤和灰漠土则基本维持起始水平。施化肥配施(NP、NPK)处理,黑土活性有机碳含量显著下降 16.2%,红壤显著上升 25.0%,灰漠土上升 29.5%,但差异不显著。有机无机配施

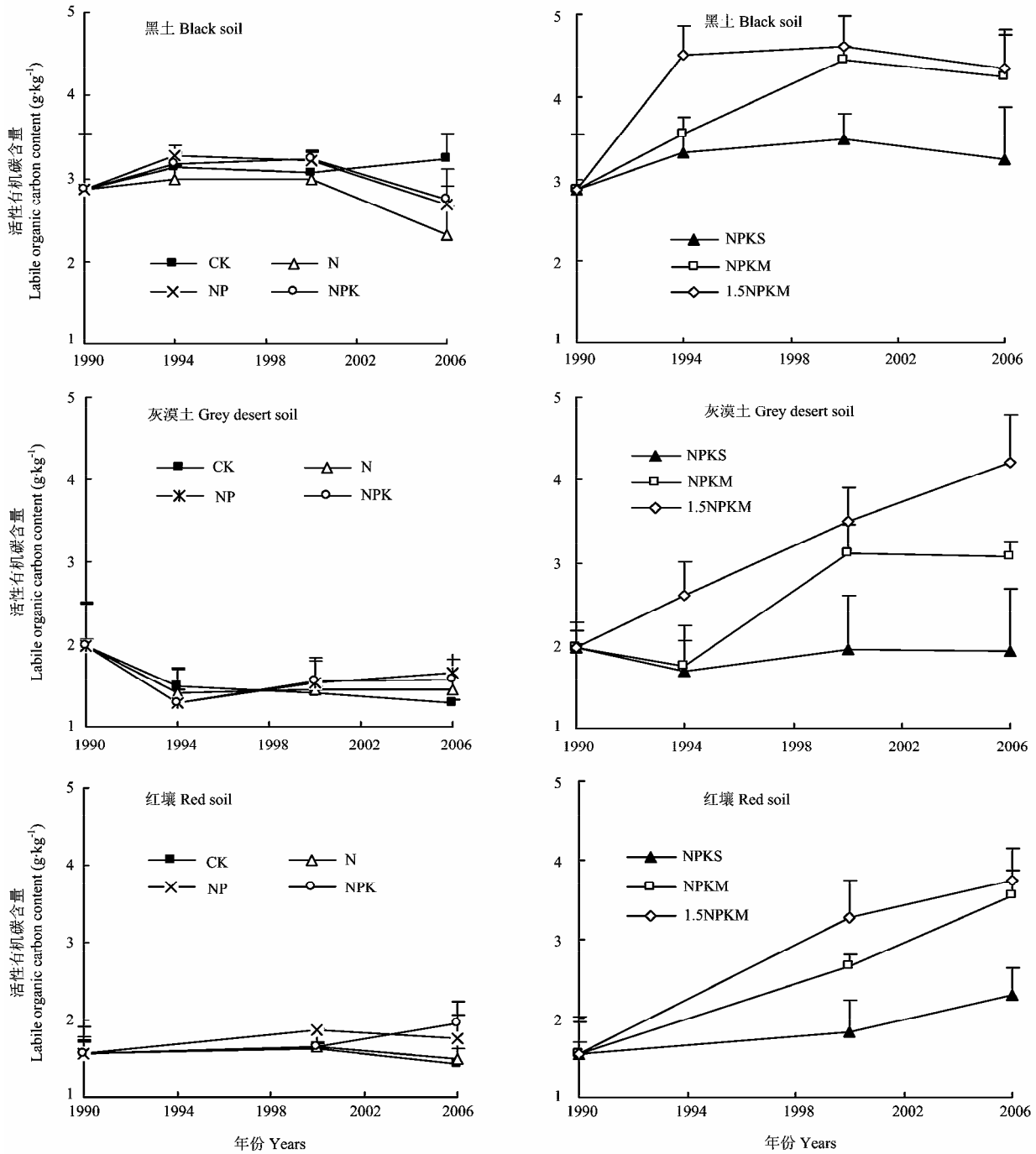


图 2 长期不同施肥土壤活性有机碳含量变化

Fig.2 Changes of content of soil labile organic carbon under long-term fertilizations

(NPKM、1.5NPKM) 下土壤活性有机碳含量随时间延长而显著增加, 黑土、灰漠土和红壤 NPKM 处理对照分别显著上升 31.4%、138.0% 和 146.2%, 1.5NPKM 处理显著上升幅度更大; 秸秆还田 (NPKS) 16 年后, 黑土和灰漠土活性有机碳含量较对照持平, 红壤显著提高了 59.0%。同一土壤上活性有机碳含量均为有机无机肥配合施用 > 秸秆还田 > 施化肥处理 > 不施肥处理。以上结果表明有机无机配施, 补充外源有机碳, 不仅提高了土壤总有机碳含量, 对活性有机碳的水平也具有明显的提升作用。

从土壤活性有机碳占总有机碳的比例变化来看, 不同施肥措施对 3 种土壤的影响也存在明显差异 (图 3)。不施肥处理 16 年后, 与原始土壤相比, 黑土活性有机碳占总有机碳的比例显著升高, 灰漠土和红壤则显著降低; 与对照 (CK) 相比, 只施氮肥 (N) 处理, 黑土活性有机碳占总有机碳的比例显著下降了 9.5 个百分点, 灰漠土和红壤基本持平; 化肥配施 (NP、NPK) 处理, 黑土活性有机碳占总有机碳比例显著下降 7.7 个百分点, 灰漠土稍有下降但变化不大, 红壤则显著上升 1.4 个百分点。以上可能是由于黑土遭受风蚀严重, 促进总有机碳的矿化与活性有机碳的损失, 所以活性有机碳占总有机碳比例下降。施有机肥 (NPKM、1.5NPKM) 处理活性有机碳占总有机碳的比例, 黑土基本持平, 灰漠土和红壤在 2006 年平均分别比对照土壤显著上升 6.6 和 7.1 个百分点; 秸秆还田 (NPKS) 处理, 3 种土壤活性有机碳占总有机碳的比例变化与有机无机配施类似。由此可见, 长期施用化肥主要提高土壤非活性有机碳含量, 不利于提高土壤有机碳质量。秸秆还田的土壤活性有机碳占总有机碳的比例低于有机无机肥配施的土壤, 而高于不施肥和施化肥的土壤, 表明长期施用有机肥会促进土壤总有机碳的转化, 转变成易被作物吸收利用的活性有机碳。从图 3 中还可以看出, 2006 年时, 不同土壤的活性有机碳占总有机碳的比例明显不同, 不施肥 (CK) 处理下, 黑土大于灰漠土和红壤; 施化肥 (N、NP、NPK)、秸秆还田 (NPKS)、施有机肥 (NPKM、1.5 NPKM) 处理下, 红壤大于黑土、灰漠土。可见, 化肥和有机肥在提高红壤活性有机碳占总有机碳的比例方面作用大于对其它 2 种土壤作用。

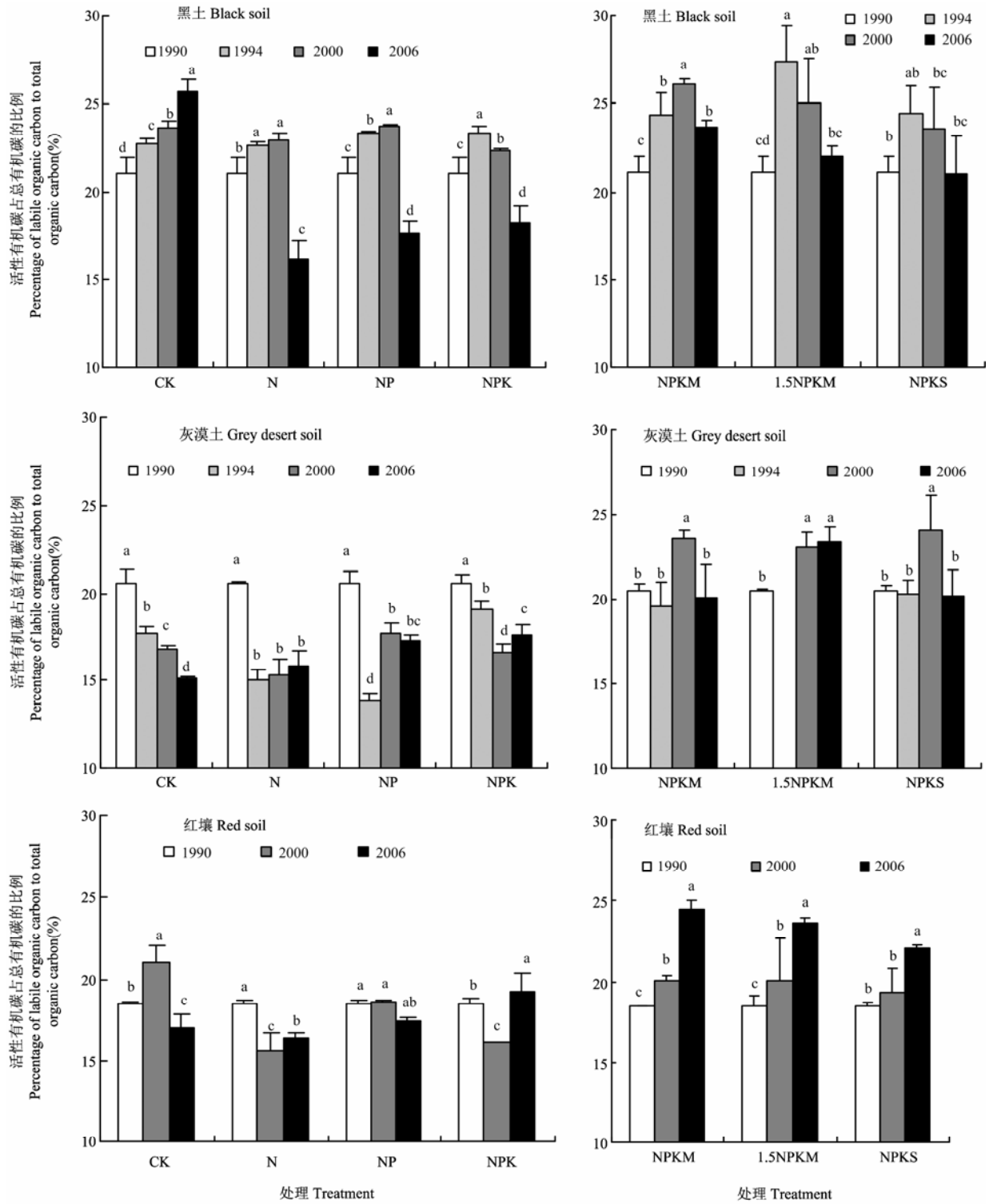
3 讨论

尽管土壤有机碳占土壤总重量的比例很小, 但它在土壤肥力、环境保护、农业可持续发展等方面均起

着极其重要的作用^[25], 其含量水平在很大程度上受到施肥、种植方式和耕作等人为管理措施的影响^[3,26]。一般认为农田土壤总有机碳含量与系统有机物质输入密切相关^[27]。在中国不同气候区, 由于气候条件和土壤类型的不同, 相同施肥对土壤有机碳库及组分的影响也存在差异。长期不施肥, 自然地力对土壤有机碳的消耗对土壤有机碳的平衡起决定作用。同处中温带的东北公主岭和西北乌鲁木齐试验点, 气候寒冷, 每年适宜于土壤微生物活动的时间相对南方短, 有利于土壤有机碳的保持, 但西北地处干旱地区, 蒸发强度大, 土壤有机碳矿化强烈, 另外, 西北灰漠土的黏粒含量较低, 土壤矿物对有机碳的物理性保护减弱, 因此, 长期不施肥或仅施化肥条件下根茬归还量不足以维持土壤有机碳的矿化损失, 土壤总有机碳和活性有机碳含量及比例均显著下降。而东北土壤肥力相对较高, 相同施肥措施下根茬的归还量较大, 不施肥或施化肥土壤有机碳能基本维持平衡^[28]。但长期施用化肥尽管没有降低土壤有机碳的数量, 但导致了土壤活性有机碳比例的下降, 即土壤有机碳质量下降。南方红壤地处亚热带地区, 水热条件充足, 土壤有机碳的周转较快, 但红壤质地黏重, 土壤矿物对有机碳的物理性保护作用强, 尽管其基础地力低, 根茬的归还量小, 长期不施肥或施化肥下土壤有机碳也能基本维持平衡, 但活性有机碳所占比例下降。NPK 配施下作物明显增产^[28], 土壤有机碳的数量显著增加。长期有机无机配施下, 西北干旱地区热量高, 光照强, 土壤在充足的养分条件下增产潜力大, 因此有机无机配施能明显提高灰漠土的总有机碳和活性有机碳含量。据张付申^[29]、王彩绒^[30]对陕西黑油土和黄绵土有机质氧化稳定性、土壤总有机质、活性有机质含量等的测定, 长期施用化肥对土壤易氧化有机质含量影响不大, 但有机肥和化肥配合施用能明显增加土壤易氧化有机质和总有机质的含量, 与本研究的结果基本一致。亚热带地区温、光、热资源丰富, 干湿季节明显, 植物生长量大, 生物积累快, 土壤微生物活动旺盛, 更有利于红壤有机碳数量和质量的提高, 这一结果也说明对于肥力较低的红壤, 施用化肥也能有效提高土壤活性碳的含量和比例, 有机无机配施的效果更为显著。

4 结论

长期不同施肥措施对土壤总有机碳和活性碳库的影响在时间和空间上存在明显差异。



图中小写字母表示同一处理不同年份间 5%水平上差异显著
The small letters of the graph show significance at 5% level in the same treatment but different years

图 3 长期不同施肥下土壤活性有机碳含量的比例变化

Fig. 3 Changes the percentage of labile organic carbon content to total soil organic carbon in soils with various long-term fertilizations

4.1 16 年不施肥或只施氮肥种植, 东北黑土与南方红壤总有机碳含量基本维持不变, 但加速了土壤活性有机碳的消耗, 红壤活性有机碳占总有机碳的比例显著下降, 长期不施肥西北灰漠土总有机碳数量和活性有机碳及比例均显著下降, 施氮肥比不施肥均有所上升。

4.2 NPK 配施与秸秆还田能有效维持东北黑土总有机碳与活性有机碳的含量与比例, 遏制西北灰漠土有机碳数量和活性有机碳比例的下降趋势, 提高南方红壤有机碳含量和活性碳所占的比例。

4.3 长期有机无机配施是提高 3 种典型土壤有机碳含量和活性有机碳所占比例的有效措施, 增施有机肥的效果更为显著。

References

- [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): 787-796.
Yang J C, Han X G, Hang J H, Pan Q M. The dynamics of soil organic matter in cropland responding to agricultural practices. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(4): 787-796. (in Chinese)
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304: 1623-1627.
- [3] 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. *土壤学报*, 2006, 43(3): 723-729.
Xu M G, Yu R, Wang B R. Labile organic matter and carbon management index in red soil under long-term fertilization. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 723-729. (in Chinese)
- [4] 刘云慧, 宇振荣, 张凤荣, 宋春梅, 刘 云. 县域土壤有机质动态变化及其影响因素分析. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(3): 294-301.
Liu Y H, Yu Z R, Zhang F R, Song C M, Liu Y. Dynamic change of soil organic matter and its affecting factors at county level. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(3): 294-301. (in Chinese)
- [5] Janzen H H. Soil organic matter characteristics after long-term cropping to various spring wheat rotations. *Canadian Journal of Soil Science*, 1987, 67: 845-856.
- [6] 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. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36: 669-681.
- [7] Yakovchenko V P, Sikora L J, Millner P D. Carbon and nitrogen mineralization of added particulate and macroorganic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(14): 2139-2146.
- [8] Johns M M, Skogley E O. Soil organic matter testing and labile carbon identification by carbonaceous resin capsules. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58: 751-758.
- [9] 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. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46: 1459-1466.
- [10] Lognini W, Wisniewski W, Gonet S S, Ciescinska B. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation. *Polish Journal of Soil Science*, 1987, 20: 47-52.
- [11] Conteh A, Blair G J, Macleod D A, Lefroy R D B. Soil organic carbon changes in cracking clay soils under cotton production as studied by carbon fractionation. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1997, 48: 1049-1058.
- [12] Jenkinson D S, Rayner J H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science*, 1977, 123(5): 298-305.
- [13] Insam H, Parkinson D, Domsch K H. Influence of macroclimate on soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 1989, 21(2): 211-221.
- [14] Raun W R, Johnson G V, Phillips S B, Westerman R L. Effect of long-term N fertilization on soil organic C and total N in continuous wheat under conventional tillage in Oklahoma. *Soil and Tillage Research*, 1998, 47: 323-330.
- [15] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, Lafond G P, Townley-Smith. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 1799-1806.
- [16] Havlin J L, Kissel D E, Maddux L D, Claasen M M, Long J H. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54: 448-452.
- [17] Six J, Elliott E T, Paustian K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63: 1350-1358.
- [18] 吴景贵, 姜 岩, 王明辉, 姜亦梅. 非腐解有机物培肥对苏打草甸水稻土腐殖质结合形态的影响. *吉林农业大学学报*, 1998, 20(2): 46-50.
Wu J G, Jiang Y, Wang M H, Jiang Y M. Effects of undecomposed organic materials on the combined states of soil humic substance in sodic meadow paddy soil. *Journal of Jilin Agricultural University*, 1998, 20(2): 46-50. (in Chinese)
- [19] 劳秀荣, 孙伟红, 王 真, 郝艳如, 张昌爱. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响. *土壤学报*, 2003, 40(4): 618-622.
Lao X R, Sun W H, Wang Z, Hao Y R, Zhang C A. Effect of matching

- use of straw and chemical fertilizer on soil fertility. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4): 618-622. (in Chinese)
- [20] 陈琼贤, 刘国坚, 段炳源, 张政勤. 有机无机肥料对土壤肥力和作物产量的影响研究初报. *热带亚热带土壤科学*, 1996, 5(1): 7-13.
Chen Q X, Liu G J, Duan B Y, Zhang Z Q. Preliminary study on effects of organic and mineral fertilizers on soil fertility and crop yield. *Tropical and Subtropical Soil Science*, 1996, 5(1): 7-13. (in Chinese)
- [21] Govi M, Francioso O, Ciavatta C, Sequi P. Influence of long-term residue and fertilizer applications on soil humic substances: A study by electrofocusing. *Soil Science*, 1992, 154(1): 8-13.
- [22] Jenkinson D S, Fox R H, Rayner J H. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen—the so-called ‘priming’ effect. *Journal of Soil Science*, 1985, 36: 425-444.
- [23] Powlson D S, Smith P, Coleman K, Smith J U, Glendining M J, Korschens M, Franko U. A European network of long-term sites for studies on soil organic matter. *Soil and Tillage Research*, 1998, 47: 263-274.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-34.
Bao S D. *Soil and Agricultural Analysis*. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2000: 30-34. (in Chinese)
- [25] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000: 32-49.
Huang C Y. *Soil Science*. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2000: 32-49. (in Chinese)
- [26] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emission, and net carbon flux from agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agriculture Ecosystems Environment*, 2002, 91: 217-232.
- [27] 刘巽浩, 高旺盛, 朱文珊. 秸秆还田的机理与技术模式. 北京: 中国农业出版社, 2001.
Liu X H, Gao W S, Zhu W S. *The Mechanism and Technical Mode of Straw Return*. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2001. (in Chinese)
- [28] 徐明岗, 梁国庆, 张夫道. 中国土壤肥力演变. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2006.
Xu M G, Liang G Q, Zhang F D. *Soil Fertility Evolution in China*. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2006. (in Chinese)
- [29] 张付申. 不同施肥处理对耩土和黄绵土有机质氧化稳定性的影响. *河南农业大学学报*, 1996, 30(1): 80-84.
Zhang F S. Effects of different applications of fertilizers to Lou soil and yellow loamy soil on the oxidable stability of soil. *Acta Agriculturae Universitatis Henanensis*, 1996, 30(1): 80-84. (in Chinese)
- [30] 王彩绒, 杨学云, 张付申. 施肥对土壤有机质的影响研究. *陕西农业科学*, 2000, (7): 13-15.
Wang C R, Yang X Y, Zhang F S. Study on the effect of fertilizing on soil organic matter. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2000, (7): 13-15. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)