

应用 DNDC 模型分析施肥与翻耕方式对土壤有机碳含量的长期影响

王立刚^{1,2} 邱建军² 马永良¹ 王迎春^{1,3}

(1. 中国农业大学 资源与环境学院,北京 100094; 2. 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所,北京 100081; 3. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所,北京 100081)

摘要 利用中国农业大学曲周实验站的氮磷化肥配施长期定位试验和翻免耕长期定位试验数据验证 DNDC(脱氮—分解)模型,说明其模型模拟值与实测值之间吻合程度较好,证明 DNDC 模型可以用来模拟当地土壤有机碳(SOC)含量的动态变化。对 2 个试验长期(100 a)的模拟结果表明:对于氮磷化肥配施试验,对照、单施氮肥和单施磷肥的处理 SOC 含量呈现下降趋势,氮肥与磷肥配合施用的处理土壤有机碳含量均呈上升的趋势,每年施用氮肥(纯 N)270 kg·hm⁻²配合施用磷肥(P₂O₅)135 kg·hm⁻²的处理 SOC 含量与初始值相比增加了 31%。对于翻免耕试验,免耕并施用 112.5 kg·hm⁻²氮肥(纯 N)再配合每年秸秆还田 4 500 kg·hm⁻²的处理比初始值增加了 62%,翻耕并施用 187.5 kg·hm⁻²氮肥、150 kg·hm⁻²磷肥再配合每年秸秆还田 4 500 kg·hm⁻²的处理 SOC 含量比初始值增加了 56%。从 DNDC 模型模拟得出,实行秸秆还田或增加作物生物产量还田及免耕等耕作措施将有效持续的增加 SOC 含量,提高土壤的可持续利用能力。

关键词 DNDC 模型; 土壤有机碳; 施肥; 翻耕方式

中图分类号 S 153.6; Q 148

文章编号 1007-4333(2004)06-0015-05

文献标识码 A

Apply DNDC model to analysis long-term effect of soil organic carbon content under different fertilization and plough mode

Wang Ligang¹, Qiu Jianjun¹, Ma Yongliang², Wang Yingchun³

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China;

2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China;

3. Institute of Agro-environment and Sustainable Development, CAAS, Beijing 100081, China)

Abstract DNDC (denitrification decomposition) model was validated by using long-term experiments with different treatments of fertilization and tillage at Quzhou experimental station of China Agricultural University. There was a high similarity between the simulated values and measured values. The DNDC model could simulate the dynamics of local soil organic carbon (SOC) under the current cultivation. The results derived from two tested simulations for long-term periods (100 years) showed that SOC decreased in the treatments of no fertilization nitrogen and phosphorus, but increased by 31% in the treatments applied nitrogen (270 kg/hm² (pure N)) and phosphorus (135 kg/hm² (P₂O₅)) together. In the treatment of no tillage, 112.5 kg/hm² (pure N) and straw addition of at a rate of 4 500 kg/hm² year, SOC increased by 62%. It also increased by 56% in the soils with traditional tillage, 187.5 kg/hm² (pure N), 150 kg/hm² (P₂O₅) and straw addition at a rate of 4 500 kg/hm² year. It was thus implied that that SOC could be increased through the measures of either straw addition, fertilizer application or no tillage.

Key words DNDC model; soil organic carbon; fertilize; tillage

土壤的长期肥力是维持农业生态系统稳产高产和环境安全的最基本条件,而土壤肥力取决于土壤

碳储量的多少^[1]。农业土壤一般被认为是大气温室效应气体的提供者。美国和加拿大的土壤科学家

收稿日期: 2004-06-21

基金项目: 黄淮海平原曲周试区“十五”攻关课题资助项目(项目号)

作者简介: 王立刚,博士,主要从事农业系统模拟与土壤碳氮循环研究。

认为,新近采用的农业措施,特别是少耕和免耕已使美加两国土壤由碳源变为碳的贮存库^[2]。因而,有必要对促进土壤固碳、减少土壤有机碳(SOC)损失的农业管理措施作更深入的研究。

准确评价农业措施对SOC变化的影响意义重大。在众多有关SOC变化趋势研究中,通常的方法是根据长期定位试验对特定土地管理利用方式下SOC的变化做出总结和预测。随着研究技术手段的发展,一些陆地生态系统SOC模型被成功地应用于长期定位试验观测数据的整合与预测中^[3]。到目前为止,已有十几个模型发表,这其中较为成熟的模型有CENTURY、DNDC、NCSSOIL和RothC等,这些模型已成为研究全球变化与陆地生态系统(GCTE)的主要手段^[4]。而在这些模型里, DNDC模型以其比较精确的模拟结果和简单的参数输入被广泛应用。

黄淮海平原是我国的粮食主产区,目前面临着在种植业结构调整的形势下如何保持可持续发展的后劲,进一步稳产高产,如何保持土壤的长期肥力成为瓶颈问题。本研究就是利用DNDC模型模拟长期定位试验土壤SOC的变化,验证该模型在黄淮海平原地区应用的可行性,以及在保持现有生产水平下,预测未来不同农业管理措施对SOC变化的影响,为该地区农业土壤培肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 DNDC模型简介

DNDC(“脱氮-分解”)模型是美国New Hampshire大学发展起来的,目标是模拟农业生态系统中碳和氮的生物地球化学循环,时间步长以日为单位,是目前国际上最为成功的模拟生物地球化学循环的模型之一^[1~4]。模型由6个子模型构成,分别模拟土壤气候、农作物生长、有机质分解、硝化、反硝化和发酵过程,这些过程描述了土壤有机质的产生、分解和转化,最后给出土壤有机碳各组份动态含量及CO₂、N₂O、CH₄、NO和N₂等温室气体通量。运行模型的输入数据包括逐日气象数据(气温及降水)、土壤性质(容重、质地、初始有机碳含量及酸碱度)、土地利用(农作物种类和轮作)和农田管理(翻耕、施肥、灌溉、秸秆还田比例和除草等),点位模型只要根据作物种植情况输入数据,便可进行1年至多年的模拟。该模型具有模拟功能强大、输入参数容易获得、软件界面友好等优点,适用于农业生态系统。

1.2 田间试验设计

试验地点在中国农业大学曲周实验站,实验站位于河北省邯郸市曲周县北部,为黑龙港地区上游,属内陆冲积平原浅层咸水型盐渍化低产地区。在黄淮海平原地区具有一定的代表性。

试验一:氮磷(NP)化肥配施试验

该试验从1983年秋开始至2001年秋,土壤有机质6.6 g·kg⁻¹,pH8.0。种植方式为冬小麦—夏玉米轮作。采用3×3设计,即氮磷2因素3水平构成9个处理:CK, N₁, N₂, P₁, P₂, N₁P₁, N₁P₂, N₂P₁, N₂P₂。其中N₁, N₂分别表示施用N肥(纯N)135, 270 kg·hm⁻²; P₁, P₂表示施用P肥(P₂O₅)67.5, 135 kg·hm⁻²。小区面积4.2 m×11 m=46.2 m²,采用随机分组设计,重复3次,氮肥2季作物各施用50%,其中小麦底肥、追肥各一次,磷肥作为小麦底肥一次施入。

试验二:翻免耕试验

试验于1985年10月在中国农业大学曲周站进行,供试土壤为改良后的盐化潮土,土壤有机质为7.0 g·kg⁻¹,pH7.8。种植方式为冬小麦—夏玉米轮作,一年两熟。试验采用正交设计,9个处理,3次重复,小区面积为:11 m×3 m=33 m²。纵向保护行宽不小于1 m,横向保护行宽不小于2 m。试验处理见表1。

表1 翻免耕试验处理

Table 1 Text to treatments of phough and no tillage

编号	处理	编号	处理
1	翻 ₁ N ₁ P ₁ 秆 ₁ (CK)	6	翻 ₂ N ₃ P ₁ 秆 ₂
2	翻 ₁ N ₂ P ₂ 秆 ₂	7	免 ₁ N ₁ P ₃ 秆 ₂
3	翻 ₁ N ₃ P ₃ 秆 ₃	8	免 ₂ N ₂ P ₁ 秆 ₃
4	翻 ₂ N ₁ P ₂ 秆 ₃	9	免 ₃ N ₃ P ₂ 秆 ₁
5	翻 ₂ N ₂ P ₃ 秆 ₁		

注:秆₁,秆₂,秆₃分别为秸秆还田量0,2250,4500 kg·(hm²·a)⁻¹;N₁,N₂,N₃分别为氮肥施用量0,112.5,187.5 kg·(hm²·a)⁻¹;P₁,P₂,P₃分别为磷肥施用量0,75.0,150.0 kg·(hm²·a)⁻¹;翻₁,翻₂分别为播种前覆盖麦秸后翻地和先翻地播种后覆盖麦秸,翻地深度均为30 cm;免为免耕。

施肥方法:氮肥作底肥和拔节肥,各占总施肥量的50%;磷肥作底肥一次施用。

1.3 基本参数的获取与设置

气象数据:每天的降水与气温由曲周实验站自动气象观测站实际观测得到。土壤数据:主要包括容重、质地、土壤有机质及酸碱度等数据,土壤有机质2001年以前的数据由中国农业大学马永良、郝晋

珉和邯郸农业学校的牛灵安提供^[5,6],2001 年为笔者测定的结果。作物及田间管理数据(翻耕、施肥、灌溉、秸秆还田比例和除草等):根据历年来 2 个试验的田间管理措施记载。

2 结果与分析

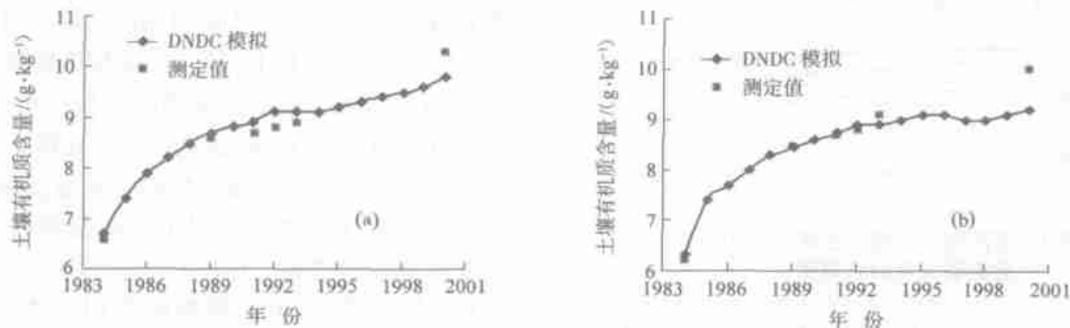
2.1 模型的验证

DNDC 模型已在世界许多地区得到验证并开展了应用研究^[4,7],DNDC 模型在我国也已有验证和相关方面的应用研究^[1,8,9],本文从模拟分析耕地土壤碳变化的角度出发,利用实验站长期定位试验的实际测定结果,从模型模拟土壤有机碳动态方面进一步验证 DNDC 模型。对于模拟的每一个处理结果都通过田间观测结果与模拟结果的一个相关系数 r 与均差 M 来表示:

$$M = (\text{模拟值}_i - \text{实测值}_i) / n$$

式中 i 指 SOC 测定的每一年, n 指 SOC 测定的总年数^[7]。对每一次模拟同时也提供模拟的土壤有机碳结果与田间观测结果。这里只选用氮磷化肥(NP)配施的处理 9(N₂P₂)和处理 6(N₁P₁)、翻免耕试验处理 3(翻₁N₃P₃ 秆₃)和处理 9(免₁N₃P₂ 秆₁)对模型进行验证。

从图 1 可以看出氮磷化肥(NP)配施有利于土壤有机质含量的增加,DNDC 模型模拟结果与实测值之间表现出较强的一致性,有机质含量变化趋势也基本相同,即从试验开始到 1990 年增加的较快,而 1990 年以后,都呈现缓慢的增长态势。处理 9(N₂P₂)模拟值与实测值比较 $r = 0.9736$, $M = 0.067 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,处理 6(N₁P₁)模拟值与实测值之间 $r = 0.9727$, $M = -0.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。



(a) 每年施用纯 N 270 kg · hm⁻² 配合施用 P₂O₅ 135 kg · hm⁻² 的处理;

(b) 每年施用纯 N 135 kg · hm⁻² 配合施用 P₂O₅ 67.5 kg · hm⁻² 的处理

图 1 氮磷化肥配施试验土壤有机质实测值与 DNDC 模型模拟值的比较

Fig. 1 SOC values simulated with DNDC model and measured on the treatment-9 (N₂P₂) and treatment-6 (N₁P₁)

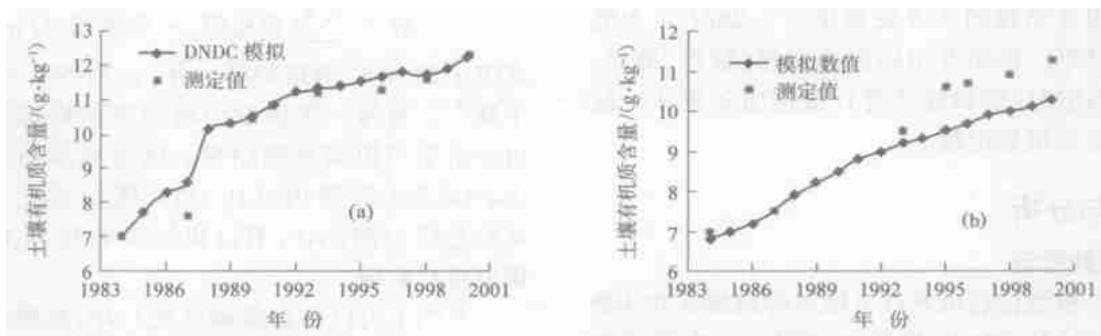
翻免耕试验处理 3(翻₁N₃P₃ 秆₃)由于每年 4 500 kg · hm⁻² 秸秆还田配合 NP 肥的使用,归还土壤有机碳量大于土壤有机碳分解量,使得有机质含量在不断增加。DNDC 模型模拟值与实测值比较(图 2) $r = 0.98$, $M = -0.24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,模型模拟值能够反映实际土壤有机质年际变化情况。DNDC 模型模拟和实测值($r = 0.978$, $M = -0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)表明处理 9(免₁N₃P₂ 秆₁)土壤有机质含量也在缓慢增加(图 2),和 Li 等的研究基本一致^[7]。这主要是因为免耕条件下 SOC 分解率低。从以上的验证中可以证明 DNDC 模型可以用来模拟和预测该地区土壤有机碳的变化。

2.2 不同施肥处理土壤有机碳的长期变化

大部分土壤有机质组分在土壤中转化需要几十

年甚至几百年,因此,有必要研究不同管理措施下土壤有机碳的长期变化。本研究利用模型模拟时间为 100 a,且假设未来 100 a 还保持目前的耕作管理水平,且当时气候是近 20 a 气候的重复,模型模拟结果表明(图 3):不施肥和单施氮肥或者磷肥的处理,土壤有机碳含量都呈现下降,其中,单施磷肥的处理土壤有机碳含量下降幅度大于单施氮肥的处理。与初始土壤有机碳含量相比,100 a 后不施肥处理(CK)土壤有机碳含量下降了 28%,单施低量磷肥(处理 4 P₁)下降了 23%,单施高量磷肥(处理 5 P₂)下降了 13%,而单施氮肥的 2 个处理土壤有机碳含量下降率都在 7%左右,差别不大。

氮肥与磷肥配合施用处理土壤有机碳含量均呈上升趋势,这主要是因为氮磷肥配合施用显著增加



(a) 翻耕并每年施用 $187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮肥、 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 磷肥再配合秸秆还田 $4500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的处理;
 (b) 免耕并每年施用 $187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮肥配合施用 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 磷肥的处理

图 2 翻免耕试验土壤有机质实测值与 DNDC 模型模拟值的比较

Fig. 2 The SOC values simulated with DNDC model and measured on the traditional plough and no tillage treatment-3 and treatment-9

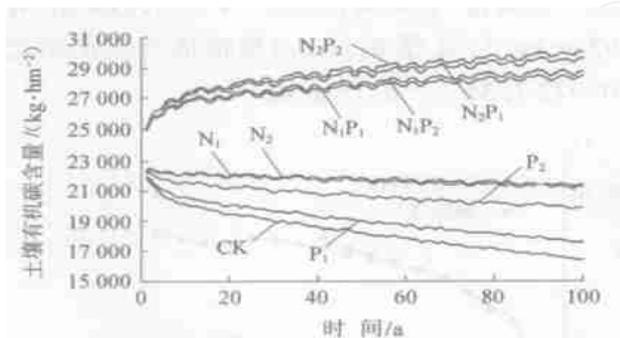


图 3 不同施肥处理下土壤(0~30 cm)有机碳含量的长期变化

Fig. 3 Long-term changes of soil organic carbon content (0 - 30 cm) in different fertilization treatments

了作物的生物量(包括经济产量和生物产量,试验对产量的影响见文献[5,6]),进而增加了归还土壤的作物残余物(根茬与残枝落叶等),使土壤中有有机碳的剩余量大于分解量,表现为 SOC 含量的增加。其中以大量氮肥磷肥配合施用的处理(处理 9 N_2P_2) 土壤有机碳含量增加幅度最大,与初始土壤有机碳含量相比增加了 31%; N_2P_1 处理增加了 29%, N_1P_1 和 N_1P_2 增加了 24%和 25%。从这可以看出高量氮肥配合施用磷肥的处理(N_2P_2 、 N_2P_1) 土壤有机碳含量增加率高于低量氮肥配合施用磷肥的处理,这也说明在当地低幅度(30%左右)增加土壤有机碳含量,要以施用氮肥为主,配合施用一定量的磷肥。

2.3 不同翻免耕处理土壤有机碳的长期变化

不同土壤耕作方式对土壤有机碳的影响较大,众多研究均表明土壤耕翻加速了土壤有机碳的损失。DNDC 模型模拟翻免耕各处理的长期变化由图 4 可见,模拟结果表明,除对照(翻 N_1P_1 秆 $_1$)和处理 5(翻 N_2P_3 秆 $_1$)、处理 6(翻 N_3P_1 秆 $_2$)土壤有机碳含

量呈现下降趋势外,其他各处理均呈现增加的趋势。处理 8(免 N_2P_1 秆 $_3$)和处理 3(翻 N_3P_3 秆 $_3$)土壤有机碳含量增加的幅度最大,与初始值相比,100 年后两处理分别增加了 62%和 56%,处理 4(翻 N_1P_2 秆 $_3$)与处理 7(免 N_1P_3 秆 $_2$)土壤有机碳含量比初始值增加了 23%。在不同处理的比较中可以看出,每年秸秆还田量在 $4500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的处理 8、处理 3 与处理 4 等 3 个处理土壤有机碳含量增加幅度都在其他处理之上,这表明持续秸秆还田是保持与 SOC 含量非常有效的措施。免耕有利于 SOC 含量的增加,3 个免耕处理的 SOC 增加率分别为 23%,62%和 17%,这主要是因为免耕措施下,对土壤结构破坏少,使土壤表层的水稳性团粒结构增多,碳素淋溶损失减少,表现为 SOC 的分解率降低,土壤表层 SOC 的富集。免耕再加上秸秆还田则可以更有效的提高 SOC 含量,且随着秸秆还田量的增加而增加。

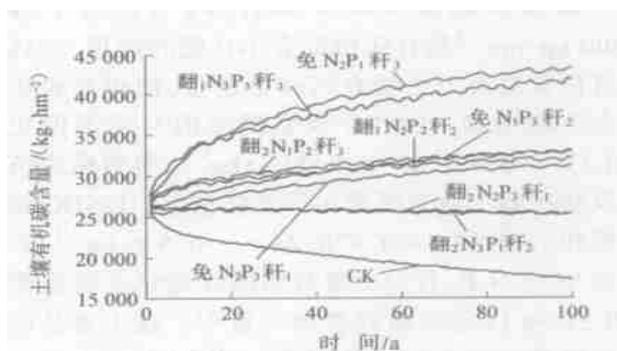


图 4 不同翻免耕处理下土壤(0~30 cm)有机碳含量的长期变化

Fig. 4 Long-term changes of soil organic carbon content (0 - 30 cm) in different plough and no tillage treatments

3 结论与讨论

1) 在经过实测值验证的基础上, 利用 DNDC 模型对氮磷化肥配施试验和翻免耕试验进行长期(100 a) 模拟。试验模拟结果表明, 不施肥和单施氮肥或者磷肥的处理, 土壤有机碳含量都呈下降趋势, 单施磷肥处理的土壤有机碳含量下降幅度大于单施氮肥的处理; 氮肥与磷肥配合施用土壤有机碳含量均呈上升趋势, 其中大量氮肥磷肥配合施用的(处理 9 N_2P_2) 土壤有机碳含量增加幅度最大, 与初始土壤有机碳含量相比增加了 31%。得出在当地低幅度(30%左右) 增加土壤有机碳含量的措施, 应采取以施用氮肥为主, 配合施用一定量的磷肥。

2) 对翻免耕试验模拟结果表明: 除对照(翻₁ N_1P_1 秆₁) 和处理 5(翻₂ N_2P_3 秆₁)、处理 6(翻₂ N_3P_1 秆₂) 土壤有机碳含量呈现下降趋势外, 其他各处理均呈现增加的趋势。处理 8(免 N_2P_1 秆₃) 和处理 3(翻₁ N_3P_3 秆₃) 土壤有机碳含量增加的幅度最大, 与初始值相比, 100 年后两处理分别增加了 62% 和 56%。模拟结果证实了长期实行秸秆还田、免耕措施或二者结合均是保持与提高 SOC 含量非常有效的措施。

3) 从 DNDC 模型模拟得出, 实行加大作物生物量还田或采取秸秆还田为基础的保护性耕作措施将有效的增加 SOC 含量, 提高土壤的可持续利用能力。而这些措施在技术上并不是非常困难的, 比如免耕是非常有效的提高农田土壤有机碳的方法^[10], 在我国是一项传统而又重要的农业生产与农田生态管理系统, 在我国一些地区现在还作为主要的耕作方式来实施^[11, 12], 而且实施免耕还有减排温室气体以及提高水分利用效率等其他效应^[13, 14]。秸秆还田是作物残留物管理方式中缓解 SOC 损失较好的方式^[15], 但在我国作物收获后焚烧秸秆是一种很普遍的现象, 这种管理方式不仅直接造成碳的释放, 还间接地加快 SOC 的损失; 因此现在主要让农民充分认识到这些增加土壤有机碳措施的重要性, 并持之以恒的实施。

4) 我国目前农业生态系统管理也开始实施退耕还林还草、休耕和轮耕、加大秸秆还田力度等有利于土壤肥力保持的耕作制度, 然而开展的范围较少, 时间还不是太长, 需从全球生态环境保护的利益和可持续发展的理论出发, 进一步加强对耕作方式改变的研究与推广, 促进土壤有机质的积累, 提高土壤对碳

的吸收固定。

感谢中国农业大学郝晋珉教授和邯郸农业学校的牛灵安老师提供试验数据。

参 考 文 献

- [1] 李长生. 土壤碳储量减少: 中国农业之隐患——中美农业生态系统碳循环对比研究[J]. 第四纪研究, 2000, 20(4): 345~350
- [2] 杨学明. 利用农业土壤固定有机碳——缓解全球变暖与提高土壤生产力[J]. 土壤与环境, 2000, 9(4): 311~315
- [3] 杨学明, 张晓平, 方华军, 等. 用 RothC 26.3 模型模拟玉米连作下长期施肥对黑土有机碳的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(11): 1318~1324
- [4] Smith P, Smith J U, Powlson D S, et al. A comparison of performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments[J]. Geoderma, 1997, 81: 153~225
- [5] 牛灵安, 郝晋珉. 曲周试区施肥与耕作对土壤微生物量及作物产量的影响[J]. 河北农业大学学报, 1994(增刊): 34~38
- [6] 牛灵安, 秦耀生. 曲周试区秸秆还田配合氮磷肥的效应研究[J]. 土壤肥料, 1998, 6: 32~35
- [7] Li C, Frolking S, Crocker GJ. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the DNDC model[J]. Geoderma, 1997, 81: 45~60
- [8] 邱建军, 唐华俊, 陈庆沐, 等. 区域农业生态系统碳氮平衡研究—以国家尺度为例[M]. 北京: 中国人口出版社, 2002. 298~316
- [9] 徐文彬, 洪业汤, 陈旭晖, 等. 区域农业土壤 N_2O 释放研究—以贵州省为例[J]. 中国科学(D 辑), 1999, 29(5): 450~456
- [10] 金峰, 杨浩, 赵其国. 土壤有机碳储量及其影响因素研究进展[J]. 土壤, 2000, 1: 11~17
- [11] 徐阳春, 沈其荣. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 89~95
- [12] 朱文珊, 贾成前. 秸秆覆盖减耕技术在麦茬田的应用效果及展望[J]. 作物杂志, 1997(4): 26~27
- [13] 王绍强, 刘纪远. 土壤碳蓄积量变化的影响因素研究现状[J]. 地球科学进展, 2002, 17(4): 528~534
- [14] 张海林, 高旺盛. 覆盖免耕夏玉米生长及水分利用的研究[J]. 作物杂志, 2000(4): 7~9
- [15] 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[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 220~229