

# 应用 DNDC 模型模拟关中地区农田长期施肥条件下土壤碳含量及作物产量

陈海心<sup>1</sup>, 孙本华<sup>2</sup>, 冯浩<sup>3,4</sup>, 赵英<sup>2</sup>, 张延<sup>5</sup>

(1.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3.中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100; 4.国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100; 5.西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**为探讨长期不同施肥条件下土壤有机碳和作物产量的变化规律及 DNDC 模型在关中地区的适用性, 利用在陕西杨凌设置的长期定位施肥试验数据, 选取不施肥(CK)、单施氮磷钾无机肥(NPK)、无机肥配施秸秆(SNPK)、无机肥配施低量有机肥(M1NPK)及无机肥配施高量有机肥(M2NPK)5个处理, 分析了20年来土壤有机碳(SOC)含量、碳循环以及农作物产量的变化趋势等基本特征。分析数据表明:CK使得土壤肥力持续下降, 显著地降低了SOC含量和作物产量;NPK处理虽可促进作物产量, 但对表层土壤肥力的增加不明显, 与CK处理无显著差异;而SNPK、M1NPK与M2NPK处理既增加了作物产量, 同时也显著提高了土壤肥力, 且以M2NPK的增产增肥效果最佳。在此基础上, 利用实测数据标定和验证了DNDC模型, 通过均方根误差(RMSE), 标准化的均方根误差(N-RMSE)以及符合度指数(d)对模型适用性分析, 模型预测精度较好, 可用于预测该地区作物产量和土壤有机碳动态。从模型输出20年来土壤碳含量的变化看, 施肥能提高作物地上部、地下部生物量以及土壤异氧呼吸作用, 即同时提高了外源碳携入量和内源碳消耗量, 但各施肥处理均在碳储量上表现为盈余状态。因此, 在关中地区, 为提高土壤肥力、碳储量以及作物产量, 可推广无机肥配施有机肥的措施。

**关键词:**DNDC模型;施肥;土壤有机碳;碳循环;作物产量

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)09-1782-09 doi:10.11654/jaes.2014.09.016

## Simulation of Soil Carbon Contents and Crop Yields in Long-term Fertilized Cropland in Guanzhong Area Using DNDC Model

CHEN Hai-xin<sup>1</sup>, SUN Ben-hua<sup>2</sup>, FENG Hao<sup>3,4</sup>, ZHAO Ying<sup>2</sup>, ZHANG Yan<sup>5</sup>

(1.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3.Institute of Water Saving Agriculture in Arid Regions of China, Yangling, 712100, China; 4.National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:**Land use changes may have great impacts on dryland agriculture in the Loess Plateau of China, one of the most fragile agro-ecosystems in the world. Here we investigated the variation of soil organic carbon (SOC) and crop yields in dryland under long-term different fertilization in Guanzhong plain area during 20 years using DNDC model. There were five treatments including no fertilization control (CK), inorganic fertilizers (NPK), NPK combined with straw (SNPK), NPK combined with low manure (M1NPK), and NPK combined with high manure (M2NPK). In the CK treatment, SOC and crop yields were significantly reduced. The NPK treatment promoted crop production, but had little effect on SOC, which was similar to that in CK. However, both SOC and crop yields were increased in the SNPK, M1NPK and M2NPK treatments, with the greatest effect observed in the M2NPK. These observed data were used to calibrate and verify DNDC model. The model showed good fitting to measured SOC and crop yields, and thus could be used to predict SOC and crop yields dynamics. The pre-

收稿日期:2014-01-23

基金项目:国家863计划项目(2013AA102904);国家自然科学基金项目(41001130);高等学校学科创新引智计划资助(B12007)

作者简介:陈海心(1991—),女,博士生,主要从事水土资源高效利用研究, E-mail:chenhaixin@nwsuaf.edu.cn

\*通信作者:冯浩 E-mail:nercwsj@vip.sina.com

diction by the model indicated that combination of inorganic fertilizers and manure could not only enhance crop aboveground and underground biomass and heterotrophic respiration, but also increase soil carbon storage. This result would shed light on fertilization practices in this region.

**Keywords:** DNDC model; fertilization; soil organic carbon; carbon cycling; crop yields

土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)作为土壤的重要组成部分,以及土壤质量和功能的核心<sup>[1]</sup>,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<sup>[2-3]</sup>,是影响土壤肥力和作物产量高低的决定性因子,而土壤碳的含量是由土壤碳输入和输出之间的平衡所决定的。施肥可以改善土壤理化性质,保持土壤肥力,如氮肥施用可以改善土壤有机物质,增加土壤中碳的存留时间<sup>[4-5]</sup>;施用有机肥还可以改善土壤团聚体结构,提高土壤微生物活性,增加土壤有机碳等<sup>[6-8]</sup>。因此,不同施肥措施下的土壤有机碳研究对于缓解全球气候变暖趋势和保证国家粮食安全具有双重的积极意义。我国已对农业土壤有机碳进行了长期研究,但目标是为了提高土壤肥力,对影响土壤有机碳储量的农业管理措施和自然因素的研究较少。因此,长期农业管理措施,如施肥如何影响土壤碳收支平衡的研究具有重要的意义。

传统研究土壤碳变化过程的方法,通常是依靠长期定位试验获得的数据分析,总结特定地块、特定管理措施下的SOC的变化<sup>[1]</sup>。目前,随着陆地生态系统模型的发展,CENTURY、DNDC、NCSOIL和RothC等模型均可成熟应用于长期定位试验观测数据的整合与预测中<sup>[9-10]</sup>,而在这些模型当中,基于过程的生物地球化学模型——DNDC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,在世界范围内被广泛应用<sup>[1]</sup>。

关中灌区是陕西省主要的棉粮油主产区,常年以传统耕作和施用化肥为主,收获作物后秸秆往往大量移出,导致表土暴露和土壤结构的破坏,加速了SOC的分解,使得耕地质量日趋退化,农业生产提升困难,传统的耕作管理模式难以维持农业的可持续发展,因此在保持土壤长期肥力的基础上实现进一步的稳产高产,成为本地区的生产难题。本研究首先分析了关中地区国家黄土土壤肥力与肥料效益监测基地20年来不同施肥处理下作物产量和土壤有机碳动态变化特征,进一步利用该数据,验证DNDC模型在关中地区应用的可行性,从而从模型模拟的角度评价该地区农业土壤培肥,土壤质量改善及粮食生产力提高潜力。

## 1 材料与方 法

### 1.1 DNDC 模型简介

DNDC模型<sup>[11-16]</sup>(Denitrification-Decomposition model,脱氮-分解作用模型)是美国新罕布什尔大学陆地海洋空间研究中心李长生教授等开发研制并推广起来的。在1995年英国洛桑“应用长期观测数据评价土壤有机质模型”国际高级学术会议上被评为优秀土壤有机质模型<sup>[1]</sup>,在2000年的亚太地区全球变化国际研讨会上,DNDC被指定为在亚太地区进行推广的首选生物地球化学模型<sup>[7]</sup>,是国际上最为成功的模拟生物地球化学循环的模型之一。DNDC模型由两个部分组成:第一部分包含土壤环境、植物生长、有机质分解三个子模型,其作用是根据输入的气象、土壤、植被、土地利用和农田耕作管理数据预测植物-土壤系统中诸环境因子的动态变化(土壤温度、土壤湿度、pH、氧化还原潜力Eh等);第二部分包含硝化反应、脱氮反应、发酵反应三个子模型,这部分的作用是由土壤环境因子来预测微生物参与上述三个化学反应的速率。6个子模型以日为时间步长,互相传递信息,以模拟真实世界中环境条件-植物生长-土壤化学变化间的相互作用。应用DNDC模型模拟任一点的生物地球化学过程时,只要根据当地种植耕作情况输入气象、土壤以及作物等数据,便可进行一年至多年的模拟。

### 1.2 田间试验设计

试验在“国家黄土土壤肥力与肥料效益监测基地”进行,试验地位于黄土高原南部的陕西省杨凌示范区渭河三级阶地(N 34°17'51", E 108°00'48",海拔534 m)。年平均气温13.0℃,年平均降水量550 mm,主要集中于6—9月。试验开始于1990年秋,实行冬小麦-夏玉米轮作。供试土壤为壤土(土垫旱耕人为土),土壤质地为粉砂粘壤土。试验初始时土壤(0~20 cm)基本性状为:有机碳7.44 g·kg<sup>-1</sup>,全氮0.83 g·kg<sup>-1</sup>,全磷0.61 g·kg<sup>-1</sup>,Olsen-P 9.57 mg·kg<sup>-1</sup>,全钾21.64 g·kg<sup>-1</sup>,有效钾200.0 mg·kg<sup>-1</sup>,pH 8.62,土壤容重1.35 t·m<sup>-3</sup>,孔隙度49.63%,田间持水量21.12%。

试验设置了9个施肥处理,本研究选择其中的5

个处理(表1)。全部处理化肥 N、P、K 用量相同,秸秆的氮、磷、钾量未计入,有机肥的磷、钾量未计入。SNPK 处理秸秆还田量为当季该小区的全部玉米秸秆。M1NPK 和 M2NPK 处理中来自有机肥的氮和化肥氮的比例为 7:3,按含 N 量折合牛粪施用。冬小麦年施纯 N 165.0 kg·hm<sup>-2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 132 kg·hm<sup>-2</sup>, K<sub>2</sub>O 82.5 kg·hm<sup>-2</sup>; 夏玉米年施纯 N 187.5 kg·hm<sup>-2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 56.25 kg·hm<sup>-2</sup>, K<sub>2</sub>O 93.75 kg·hm<sup>-2</sup>。氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾。所有肥料、秸秆、牛粪均在播前一次施入。小麦生育期内灌溉 2~3 次,玉米生育期 2~4 次,每次灌溉量为 90 mm 左右。小区面积 196 m<sup>2</sup>(14 m×14 m)。

### 1.3 基本参数的获取与验证

DNDC 模型自 1992 年问世以来,已在世界许多地区得到验证并开展了应用研究<sup>[10,18-20]</sup>,在我国也有验证和相关方面的应用研究<sup>[19,21-31]</sup>,结果显示 DNDC 模型适用于中国某些试验地的具体情况,并能应用于进一步的研究中。然而,目前还没有在关中地区的应用报道,因此有必要进一步验证 DNDC 模型的可靠性。本文按照表 2 模型所需输入项目要求,将从当地气象局获得的气象数据与国家黄土肥力与肥料效益监测基地长期定位施肥试验实际测定的土壤、耕作措施等数据输入模型,利用 DNDC 模拟输出的 SOC 含量和作物产量与试验实测值进行分析比较,来验证 DNDC 模型在本地区的拟合度。其中,各处理除施肥量、秸秆还田量等输入参数不同外,其他输入参数均相同。由于选用的试验地在灌溉次数及日期上记录不

明确,本研究首先根据降水年型的不同划分枯水年、平水年、丰水年,然后在模型中根据降雨年型设计不同次数的灌溉。本研究主要采用的统计参数有:均方根误差(RMSE,式1),标准化的均方根误差(N-RMSE,式2)<sup>[32-33]</sup>,符合度指数(*d*,式3)<sup>[34]</sup>进行分析,统计参数含义如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{N}} \quad (1)$$

$$N-RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{N}} \cdot \frac{100}{\bar{O}_i} \quad (2)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{O}_i|^2 + |O_i - \bar{O}_i|^2)} \quad (3)$$

式中:*S<sub>i</sub>*为模拟值;*O<sub>i</sub>*为实测值;*N*为实测次数; $\bar{O}_i$ 为实测值的平均值。

本研究中试验数据的处理及计算使用 Excel 2010 和 SPSS 17.0 软件,作图采用 Excel 2010。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥处理对作物产量的影响

20 年平均小麦、玉米产量在不同施肥处理下,仅有不施肥的对照处理与其他各施肥处理间表现出显著差异,说明施用肥料对作物增产效果显著。将 20 年按每 5 年分为 4 个年份段后显示(表 3),除 CK 外其他施肥处理均无显著差异,且存在 M2NPK>M1NPK>SNPK>NPK 的排序,说明在所有施肥措施中,无机肥配施有机肥具有最佳的增产效果。同时,这 4 种施肥处理在各年份段的变化趋势一致,如作物产量在

表 1 实验处理方案

Table 1 Plan of experimental treatments

处理	施肥品种及施肥量	
	冬小麦	夏玉米
CK	不施肥	不施肥
NPK	N+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +K <sub>2</sub> O(165+132+82.5)	N+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +K <sub>2</sub> O(187.5+56.25+93.75)
SNPK	秸秆+N+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +K <sub>2</sub> O(165+132+82.5), 当季玉米秸秆	N+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +K <sub>2</sub> O(187.5+56.25+93.75)
M1NPK	牛粪+N+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +K <sub>2</sub> O(165+132+82.5), 牛粪 <i>n</i> (以实测含量 N 折算)	N+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +K <sub>2</sub> O(187.5+56.25+93.75)
M2NPK	牛粪+N+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +K <sub>2</sub> O(165+132+82.5), 牛粪 1.5 <i>n</i> (以实测含量 N 折算)	N+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +K <sub>2</sub> O(187.5+56.25+93.75)

注:表中数据单位均为:kg·hm<sup>-2</sup>。

表 2 DNDC 模型所需输入项目

Table 2 Input parameters of DNDC model

因子	项目
气候	逐日最高气温、逐日最低气温、逐日降水量、逐日太阳辐射
土壤	容重、质地、粘粒含量、pH 以及初始 SOC 含量
耕作措施	作物最高收获产量、作物播种期及收获期、肥料用量(包括无机肥、有机肥)、施肥时间(包括种肥和追肥)、耕地措施、秸秆还田比例等

2001—2005年间均达到最高,主要是由于2003年及2004年均均为丰水年,降水量分别为847 mm和629 mm。在4个年份段,不同处理作物产量的变化幅度不大,其中CK处理最小,M2NPK处理次之,主要是由于在不施肥的条件下,土壤非常贫瘠,土壤肥力状况是作物生长的唯一限制因子,其他因素如气温、降水等的变化对其产量的影响较小;而M2NPK处理恰恰相反,作物在养分充足的情况下,获得了各处理间的最高产量,限制其生长的主要因子则取决于作物品种,受气温、降水等其他因素的影响也较小。

## 2.2 不同施肥处理对土壤有机碳的影响

从表4可知,20年来SOC的平均值,以CK处理最低,仅为 $7.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,小于试验开始前的初始值 $7.44 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,说明不施肥的对照处理土壤肥力持续下降,致使土壤有机碳处于极度耗竭状态。NPK处理次之,虽然其平均值大于试验初始值,但与CK处理并无显著差异,说明单施无机肥虽然能够保证作物的生产,有较好的增产效果,而其表层土壤肥力增加并不明显。余下的SNPK、M1NPK及M2NPK处理的SOC多年平均值均依次增加,且彼此间差异显著。其中,以M2NPK处理的多年平均值和标准误为最高,说明无机肥与有机肥配施显著提高了SOC含量,促进了土壤中微团聚体的形成。这对土壤有机碳的固定和储存具有重要作用<sup>[18-19]</sup>。

## 2.3 DNDC模型的验证

表5显示,各处理小麦产量的RMSE为118.96~664.68  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,N-RMSE为9.95%~11.99%, $d$ 为0.893 0~0.967 7;玉米产量的RMSE为180.53~662.09  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,N-RMSE为8.14%~9.84%, $d$ 为0.912 5~0.935 0;SOC含量的RMSE为0.44~1.12  $\text{gC} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,N-RMSE为5.47%~8.43%, $d$ 为0.976 1~0.986 2。总体而言,各处理SOC含量的N-RMSE均小于9%,小麦、玉米产量均小于12%,说明DNDC模型对作物产量以及土壤有机碳含量的模拟结果与实测值吻合较好(图1)。

## 2.4 不同施肥处理的碳循环模拟

农田土壤中有有机碳库的动态变化主要受到两个过程的驱动,即通过作物凋落物的分解和施用化肥获得C以及通过分解SOC获得的 $\text{C}^{10}$ 。对于绝大多数陆地生态系统而言,分解凋落物是系统中SOC的唯一来源。在作物的生长季之中及之后,作物的凋落物或残茬会通过自身的衰老过程或人为的收获、耕作等的措施融入土壤中。一旦土壤中的微生物接触到这些新鲜的凋落物,微生物就可以利用凋落物中的C作为其能量来源。在此过程中,凋落物中的C首先会被转化为微生物的生物量。微生物死亡之后,它们的残体则会加入土壤活性腐殖质碳库中,即转化为易于被分解的有机物质,而此后的分解过程将会使其进一步转化为难分解的腐殖质等。从新鲜腐殖质到难分解腐殖

表3 不同施肥处理下多年平均产量(小麦+玉米)的差异

Table 3 Changes of average yields of wheat and maize under different fertilization treatments

处理	产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$				
	1991—1995年	1996—2000年	2001—2005年	2006—2010年	平均值
CK	3114±390b	3465±161b	3003±299b	2888±71b	3118±130b
NPK	9941±175a	11 270±698a	13 074±1178a	11 935±118a	11 555±411a
SNPK	10 560±213a	12 079±753a	12 967±1183a	12 264±327a	11 967±390a
M1NPK	10 135±270a	12 134±708a	13 904±1607a	12 887±503a	12 265±529a
M2NPK	10 853±542a	12 758±624a	14 187±730a	12 859±339a	12 664±383a

注:数据格式为平均值±标准误,同列数据后不同小写字母表示处理间差异达5%显著水平。

表4 不同施肥处理下多年土壤有机碳含量的差异

Table 4 Changes of soil organic carbon contents under different fertilization treatments

处理	土壤有机碳含量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$				
	1991—1995年	1996—2000年	2001—2005年	2006—2010年	1991—2010年
CK	7.02±0.10c	7.04±0.29d	7.88±0.10d	7.62±0.18d	7.39±0.12d
NPK	7.36±0.15c	8.20±0.27cd	8.02±0.07d	8.62±0.04d	8.05±0.13d
SNPK	7.99±0.15bc	8.97±0.48c	10.46±0.44c	10.75±0.23c	9.55±0.30c
M1NPK	9.30±0.50ab	12.42±0.84b	13.20±0.78b	14.54±0.37b	12.37±0.53b
M2NPK	10.57±0.73a	14.48±1.03a	17.12±0.29a	17.35±0.46a	14.88±0.70a

注:数据格式为平均值±标准误,同列数据后不同小写字母表示处理间差异达5%显著水平。

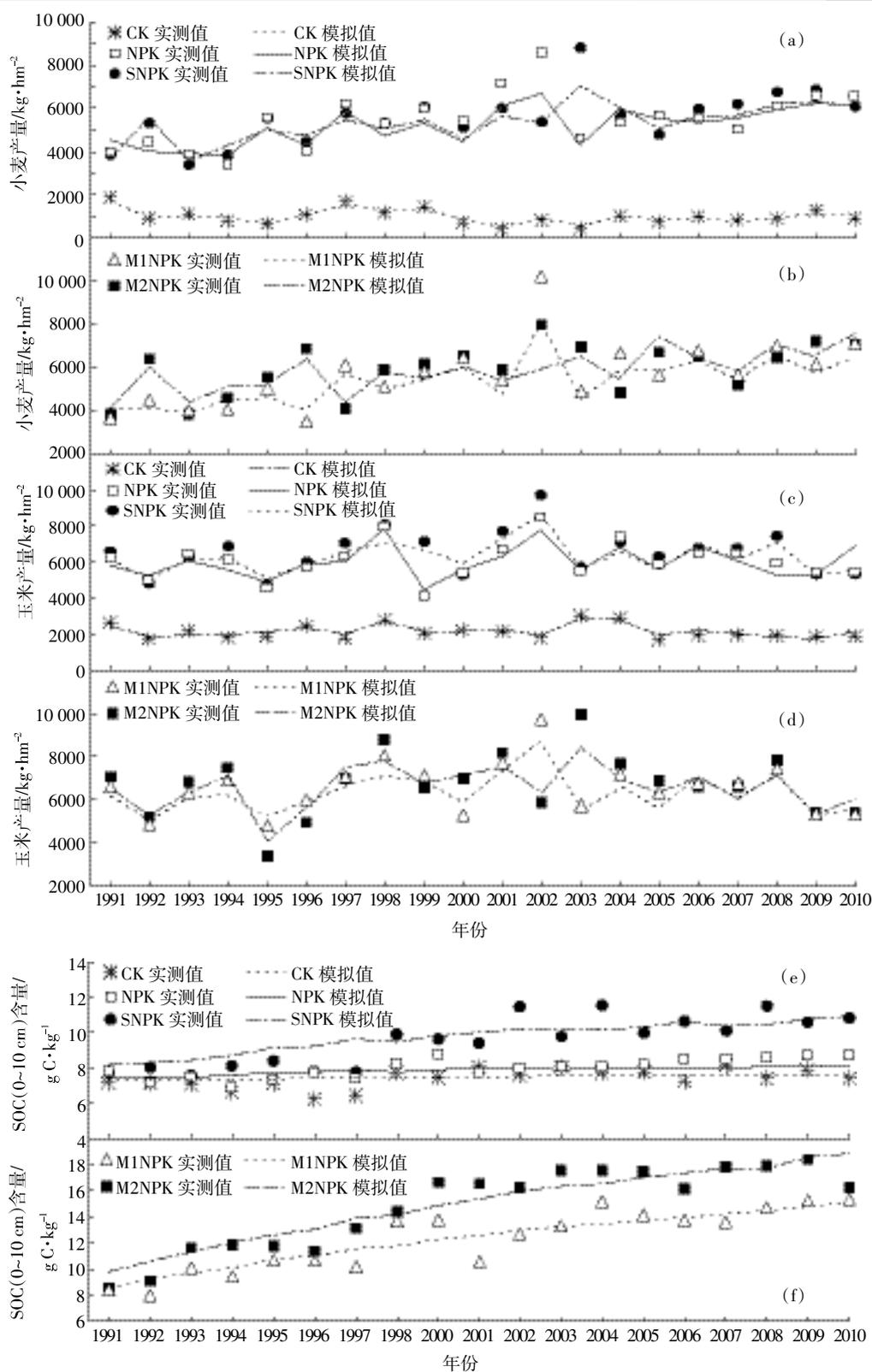


图1 不施肥(CK)、施用无机肥(NPK)、无机肥配合秸秆(SNPK)、无机肥配合低量有机肥(M1NPK)、无机肥配合高量有机肥(M2NPK)条件下冬小麦产量(a,b)、玉米产量(c,d)和土壤有机碳含量(e,f)实测值与模拟值的比较

Figure 1 Comparisons between observed and simulated values of winter-wheat yields(a,b), corn yields(c,d) and soil organic carbon contents(e,f) under no fertilization control(CK), inorganic fertilizer(NPK), inorganic fertilizer with straw(SNPK), inorganic fertilizer with low manure(M1NPK) and inorganic fertilizer with high manure(M2NPK) treatments

表5 DNDC模型模拟精度分析

Table 5 Accuracy of simulated results by DNDC model

处理	项目	RMSE	N-RMSE/%	d
对照 CK	小麦产量	118.96	11.99	0.967 7
	玉米产量	180.53	8.49	0.935 0
	SOC 含量	0.54	7.26	0.976 1
氮磷钾 NPK	小麦产量	649.83	11.87	0.898 9
	玉米产量	499.00	8.21	0.928 4
	SOC 含量	0.44	5.47	0.986 1
秸秆+氮磷钾 SNPK	小麦产量	544.27	9.95	0.924 1
	玉米产量	555.04	8.68	0.912 5
	SOC 含量	0.80	8.43	0.985 7
低量有机肥+氮磷钾 M1NPK	小麦产量	664.68	11.66	0.932 6
	玉米产量	534.24	8.14	0.932 0
	SOC 含量	1.02	8.31	0.985 7
高量有机肥+氮磷钾 M2NPK	小麦产量	653.40	11.01	0.893 0
	玉米产量	662.09	9.84	0.921 7
	SOC 含量	1.12	7.59	0.986 2

注:在 RMSE 中,小麦、玉米产量的单位为  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;土壤有机碳(SOC)含量的单位为  $\text{g C}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

质的这一过程中,部分 SOC 将会成为  $\text{CO}_2$  或可溶解的有机碳(Dissolved organic carbon,DOC),并通过排放、淋溶等过程损失掉。因此,土壤有机碳库的大小是由作物凋落物的分解和施用化肥的 C 输入过程以及分解 SOC 的 C 输出过程之间的平衡所决定的。

在 DNDC 模型中,C 输入源包括肥料、地上生物量(即秸秆)和地下生物量,C 输出项则是土壤微生物对有机质的分解即异氧呼吸(Heterotrophic respiration,RH)释放的  $\text{CO}_2$  量以及淋溶的碳向下层迁移导致的表层土壤碳损失。由于本研究的试验设计方案中,除 SNPK 处理外,其他处理在收获时将所有地上部残茬全部移除,所以除 SNPK 处理有当季玉米秸秆施入土壤外,其余各处理的作物残茬均未留存在土壤中。表 6 显示,各施肥处理可显著增加地上及地下生物量,然而除 M2NPK 处理有最好效应外,NPK、SNPK、M1NPK 处理间无显著差异。换言之,如不移除

作物秸秆,施用无机肥、作物秸秆以及有机肥均能提高作物残体的 C 输入量,提高土壤的“碳汇”能力,其中以无机肥配施高量有机肥效果最佳。

农田生态系统中土壤呼吸排放的  $\text{CO}_2$  主要来自土壤微生物对有机质的分解(即异氧呼吸)以及农田中作物的根系呼吸(即有氧呼吸,Aerobic respiration,RA)<sup>[35]</sup>,而在 DNDC 模型模拟过程中,土壤排放的  $\text{CO}_2$  量仅来自于异氧呼吸。从表 6 可以看出,较不施肥的对照处理,各施肥处理亦均显著增加土壤异氧呼吸,且 4 个处理间的差异显著(M2NPK>M1NPK>SNPK>NPK),说明虽然施用无机肥、作物秸秆以及有机肥均能促进土壤异氧呼吸,提高土壤的“碳源”能力,但其中无机肥配施有机肥效果最为显著。这一模拟结果与张福申等<sup>[36]</sup>的田间观测结果相符,长期施用有机肥能显著提高土壤中活性有机碳的含量,土壤微生物可得到更多的供其腐殖化作用的活跃底物,利于

表6 不同施肥处理的 C 输入量及 C 输出量( $\text{kg C}\cdot\text{hm}^{-2}$ )Table 6 Carbon inputs and outputs in different fertilization treatments( $\text{kg C}\cdot\text{hm}^{-2}$ )

处理	外源 N 添加量	外源 C 添加量	地上生物量	地下生物量	异氧呼吸量	淋溶 C 量	C 输入总量	C 输出总量	C 储量
CK	0	0	2 456.85c	330.67c	342.45e	21.87a	330.67e	364.32e	-33.65c
NPK	352.5	0	8 372.65b	1 209.41b	1 101.29d	20.83b	1 209.41d	1 122.12d	87.29bc
SNPK	382.81	1 822.02	8 407.89b	1 215.80b	2 733.04c	20.12b	3 037.82c	2 733.04c	284.66b
M1NPK	463.61	4200	8 426.50b	1 217.77b	5 074.55b	17.79c	5 417.77b	5 074.55b	325.43b
M2NPK	512.5	6300	9 378.74a	1 368.73a	6 967.96a	17.98c	7 668.73a	6 967.96a	682.79a

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 5%显著水平。

其繁育生长。

### 3 讨论

#### 3.1 不同施肥处理对作物产量及土壤有机碳的影响

综合各种施肥措施对产量和有机碳的总体效益来看,无机肥配施有机肥可最大程度地提高产量和有机碳。与本研究结果一致,很多研究者在不同土壤类型、气候条件和利用方式下,均得出有机肥或有机无机肥料混合施用能显著提高土壤有机碳含量<sup>[1,23-24]</sup>。但是,目前我国无机肥施用量过大,施用方式单一,对产量的增产效率逐渐下降,并且是我国农业面源污染的主要污染源之一<sup>[37]</sup>。因此,在实际的生产实践中,还是应该推广无机肥配施秸秆或有机肥的措施,一方面可以减少无机肥料的用量,减少肥料对农田的污染,另一方面也能在保证高产稳产的同时,稳步提高土壤有机碳含量。

#### 3.2 DNDC 模型的验证

本研究中,实测数据与模型模拟数据间的拟合程度整体较好,但也在部分年份实测值与模拟值间仍存在一定差异。同模拟值相比,实测值波动幅度更大。在作物产量方面,决定于降雨年型,模型可能高估或者低估,说明 DNDC 模型存在不确定性。在有机碳方面,由于有机碳在土壤中的变化是一个相对缓慢的过程,采样点分布不均、采样数较少、试验人为误差等原因导致的实测值有较大的年际波动(如 1997—2001 年的 M1NPK 处理),说明 DNDC 模型在这方面能较为客观地反映实际情况。此外,从模型的验证结果来看,各处理中 SOC 的模拟效果优于作物产量的模拟效果。这在一定程度上体现了 DNDC 模型的特点, DNDC 模型是基于农田生态系统碳、氮循环过程的生物地球化学机理模型,模拟作物产量并非该模型的强项。但从另一方面,有效模拟作物生长是土壤碳、氮循环过程模拟的基础,也是 DNDC 模型应用的前提,若不能正确模拟作物生长,涉及土壤碳氮输入、输出的很多过程都会受到影响。因此,即使 DNDC 模型模拟作物产量并非其优势,但也要保证一定的精确度才能确保其他模拟结果的可信度。

#### 3.3 不同施肥处理的碳循环模拟

应用 DNDC 模型输出结果计算出的土壤 C 储量与实测的 SOC 含量有一致的排序: M2NPK>M1NPK>SNPK>NPK>CK, 然而二者在显著性分析上略有不同,即模拟出的 C 储量在 SNPK 及 M1NPK 两处理间差异不显著,而在实测 SOC 中差异显著。这可能是由

模型模拟误差造成的,也可能是由于在模型模拟中认为有机肥较秸秆分解更为缓慢,因此在模拟前期 M1NPK 处理中从有机肥中分解出来的碳较少,使得计算出来的多年平均值与 SNPK 的无显著差异。

#### 3.4 在关中地区应用 DNDC 模型的进一步研究工作

Li 等<sup>[13]</sup>认为当气象、土壤质地及农田管理措施长期保持不变时, SOC 将达到稳定,即通过凋落物还田或施肥输入的 C 与通过土壤微生物分解作用输出的 C 达到平衡。而农田管理措施的改变,将会增加或减少 SOC 含量,并且新的平衡需要几十年甚至更长时间才能达到。从已进行的 20 年试验来看,各施肥处理的 SOC 的新平衡点并没有达到,何时能达到新平衡点需要更长时间的试验才能回答,而模型的优点在于可以模拟上述过程并预测新平衡点。由此可见,下一步应该基于本研究结果,进一步利用模型工作预测全球变化背景下未来若干年该地区现有施肥模式下土壤有机碳和作物产量动态变化,为区域农业可持续发展提供科学依据。

### 4 结论

20 年的不同施肥试验显示,在作物产量方面,不施肥使得作物产量持续降低,而施用肥料则可显著提高作物产量,并且无机肥配施高量有机肥有很好的增产效果;在土壤有机碳方面,不施肥的对照处理和单施无机肥的处理,均显著地降低了 SOC 含量,与无机肥配施的处理,表层土壤肥力增加不明显,而无机肥与秸秆、低量或高量有机肥配施的处理,均能显著地提高 SOC 含量,其中高量有机肥与无机肥配施的培肥效果最好。在此基础上,利用实测数据标定和验证了 DNDC 模型,通过均方根误差(RMSE)、标准化的均方根误差(N-RMSE)以及符合度指数( $d$ )对模型适用性的分析表明,模型预测精度较好,可用于预测关中地区作物产量和土壤有机碳动态。因此,利用模型模拟的碳循环过程显示,不施肥使得土壤碳库持续减小,施肥能增加地上、地下生物量以及土壤异氧呼吸作用,即同时提高了外源碳携入量和内源碳消耗量,但各施肥处理均在碳储量上表现为盈余状态,且无机肥配施高量有机肥提高效果最为显著。因此,在关中地区,为提高土壤肥力、碳储量以及作物产量,可推广无机肥配施有机肥的措施。

#### 参考文献:

[1] 王立刚, 邱建军, 马永良, 等. 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[J]. 中国农业大学学报, 2004, 9(6): 15-19.
- WANG Li-gang, QIU Jian-jun, MA Yong-liang, et al. Apply DNDC model to analysis long-term effect of soil organic carbon content under different fertilization and plough mode[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2004, 9(6): 15-19.
- [2] 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.
- LI Chang-sheng. Loss of soil carbon threatens Chinese agriculture: A comparison on agroecosystem carbon pool in China and the U. S. [J]. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(4): 345-350.
- [3] 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): 220-228.
- SU Yong-zhong, ZHAO Ha-lin. Advances in researches on soil organic carbon storages, affecting factors and its environmental effects[J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(3): 220-228.
- [4] Fog K. The effect of added nitrogen on the rate of decomposition of organic matter[J]. *Biological Reviews*, 1988, 63: 433-462.
- [5] Bryan D M, Holland E A, Seastedt T R, et al. Analysis of litter decomposition in an alpine tundra[J]. *Canadian Journal of Botany*, 1998, 76(7): 1295-1304.
- [6] Blake L, Mercik S, Koerschens M, et al. Phosphorus content in soil, uptake by plants and balance in three European long-term field experiments[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 56(3): 263-275.
- [7] Liu B, Gumpertz M L, Hu S, et al. Long-term effects of organic and synthetic soil fertility amendments on soil microbial communities and the development of southern blight[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(9): 2302-2316.
- [8] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 422-429.
- LI Hui-xin, YUAN Ying-hong, HUANG Qian-ru, et al. Effects of fertilization on soil organic carbon distribution in various aggregates of red paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 422-429.
- [9] 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.
- YANG Xue-ming, ZHANG Xiao-ping, FANG Hua-jun, et al. RothC-26.3 model simulating long-term effects of fertilization on changes of soil organic carbon in continuous cultivation of corn in Northeast China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(11): 1318-1324.
- [10] Smith P, Smith J U, Powlson D S, et al. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments[J]. *Geoderma*, 1997, 81(1-2): 153-225.
- [11] Li C, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(D9): 9759-9776.
- [12] Li C, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 2. Model applications[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(D9): 9777-9783.
- [13] Li C, Frolking S, Harriss R. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, 8(3): 237-254.
- [14] 李长生. 生物地球化学的概念与方法: DNDC 模型的发展[J]. 第四纪研究, 2001, 21(2): 89-99.
- LI Chang-sheng. Biogeochemical concepts and methodologies: Development of the DNDC model[J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(2): 89-99.
- [15] Zhang Y, Li C, Zhou X, et al. A simulation model linking crop growth and soil biogeochemistry for sustainable agriculture[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 151: 75-108.
- [16] Li C, Zhuang Y H, Frolking S, et al. Modeling soil organic carbon change in croplands of China[J]. *Ecological Applications*, 2003, 13(2): 327-336.
- [17] 邱建军, 秦小光. 农业生态系统碳氮循环模拟模型研究[J]. 世界农业, 2002, 281(9): 39-41.
- QIU Jian-jun, QIN Xiao-guang. Study on the situation and perspective of simulation model on carbon and nitrogen circulations in agro-ecosystem[J]. *World Agriculture*, 2002, 281(9): 39-41.
- [18] Li C, Frolking S, Croker G J, et al. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the DNDC model[J]. *Geoderma*, 1997, 81(1-2): 45-60.
- [19] Tonitto C, David M B, Drinkwater L E, et al. Application of the DNDC model to tile-drained Illinois agroecosystems: Model calibration, validation, and uncertainty analysis[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 78(1): 51-63.
- [20] Farahbakhshzad N, Dinnes D L, Li C, et al. Modeling biogeochemical impacts of alternative management practices for a row-crop field in Iowa[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 123(1-3): 30-48.
- [21] 徐炳成, 梁银丽. 黄土高原旱塬农田生态系统碳氮循环特征[J]. 生态农业研究, 2000, 8(2): 42-46.
- XU Bing-cheng, LIANG Yin-li. Carbon and nitrogen cycling characteristics of dry farmland ecosystem on Loess Plateau[J]. *Eco-Agriculture Research*, 2000, 8(2): 42-46.
- [22] 巴特尔·巴克, 彭镇华, 张旭东, 等. 生物地球化学循环模型 DNDC 及其应用[J]. 土壤通报, 2007, 38(6): 1208-1212.
- BATUR Bake, PENG Zhen-hua, ZHANG Xu-dong, et al. Biogeochemical model DNDC and its application[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(6): 1208-1212.
- [23] 陈晨, 梁银丽, 吴瑞俊, 等. 黄土丘陵沟壑区坡地土壤有机碳变化及碳循环初步研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(4): 668-676.
- CHEN Chen, LIANG Yin-li, WU Rui-jun, et al. A preliminary study on the change of soil organic carbon and carbon cycling of the slope land in the loess hilly-gully areas[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(4): 668-676.
- [24] 陈长青, 胡清宇, 孙波, 等. 长期施肥下石灰性潮土有机碳变化的 DNDC 模型预测[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1410-1417.
- CHEN Chang-qing, HU Qing-yu, SUN Bo, et al. Simulating trends in soil organic carbon of in calcareous fluvo-aquic soil under long-term fertilization using the DNDC model[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6): 1410-1417.
- [25] 马玉芳, 蔡立群, 张仁陟. 黄土高原丘陵沟壑区农业生态系统碳循

- 环模拟研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(12):2875-2880.
- MA Yu-fang, CAI Li-qun, ZHANG Ren-zhi. Simulation of soil carbon cycle in agro-ecosystem of hilly-gully areason the Loess Plateau[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(12):2875-2880.
- [26] 徐胜祥, 史学正, 赵永存, 等. 不同耕作措施下江苏省稻田土壤固碳潜力的模拟研究[J]. 土壤, 2012, 44(2):253-259.
- XU Sheng-xiang, SHI Xue-zheng, ZHAO Yong-cun, et al. Simulation of carbon sequestration potential from paddy fields in Jiangsu Province under different tillage practices[J]. *Soils*, 2012, 44(2):253-259.
- [27] 张明园, 魏燕华, 孔凡磊, 等. 耕作方式对华北农田土壤有机碳储量及温室气体排放的影响 [J]. 农业工程学报, 2012, 28 (6):203-209.
- ZHANG Ming-yuan, WEI Yan-hua, KONG Fan-lei, et al. Effects of tillage practices on soil carbon storage and greenhouse gasemission of farmland in North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(6):203-209.
- [28] 陈杰华, 慈恩, 谢德体, 等. 不同耕作制度下紫色水稻土有机碳变化的 DNDC 模型预测[J]. 农机化研究, 2013, 35(1):38-42.
- CHEN Jie-hua, CI En, XIE De-ti, et al. Simulating trends in soil organic carbon of in purple paddy soil under different tillage system using the DNDC model [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2013, 35(1):38-42.
- [29] Zhang F, Li C, Wang Z, et al. Modeling impacts of management alternatives on soil carbon storage of farmland in Northwest China[J]. *Biogeosciences*, 2006, 3:451-466.
- [30] Tang H J, Eric V R, Qiu J J. Simulation of soil organic carbon storage and changes in agricultural cropland in China and its impact on food security[C] // Li C S. Quantifying Soil Organic Carbon Sequestration Potential with Modeling Approach. Beijing:China Meteorological Press, 2007:1-14.
- [31] Wang L, Qiu J, Tang H, et al. Modelling soil organic carbon dynamics in the major agricultural regions of China[J]. *Geoderma*, 2008, 147(1-2):47-55.
- [32] Jamieson P D, Porter J T, Wilson D R. A test of the computer simulation model AC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand[J]. *Field Crop Research*, 1991, 27(4):337-350.
- [33] Loague K, Green R E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application[J]. *Contam Hydrol*, 1991, 7(1-2):51-73.
- [34] Willmott C J, Ackleson S G, Davis R E, et al. Statistics for the evaluation and comparison of models[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90(C5):8995-9005.
- [35] 韩士杰, 董云社, 蔡祖聪, 等. 中国陆地生态系统碳循环的生物地球化学过程[M]. 北京:科学出版社, 2008:258-320.
- HAN Shi-jie, DONG Yun-she, CAI Zu-cong, et al. Chinese terrestrial ecosystem carbon cycle and biogeochemical processes[M]. Beijing: Science Press, 2008:258-320.
- [36] 张付申. 长期施肥条件下壤土和黄绵土有机质氧化稳定性的研究 [J]. 土壤肥料, 1996(6):32-34.
- ZHANG Fu-shen. Long-term application of fertilizers effects on oxidated stability of organic matter in Lou and Huangmian soil [J]. *Soil and Tillage Research*, 1996(6):32-34.
- [37] Zhang W L, W u S X, Dai H J, et al. Estimation of wide spread pollution situation in China's agriculture and control countermeasures:I. Estimation of wide spread pollution situation in China's agriculture at the early 21 century[J]. *Chinese Agricultural Science*, 2004, 37(7):1008-1017.