

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

杨学明¹, 张晓平¹, 方华军¹, 朱平², 任军², 王立春², 梁爱珍¹

(¹ 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; ² 吉林省农业科学院, 公主岭 136000)

摘要: 用 RothC (Version 26.3) 模型模拟研究东北地区黑土长期定位施肥试验中玉米连作下土壤有机碳(SOC)含量的变化。从 24 个施肥处理中选取了无肥(对照)、氮肥、氮肥配施厩肥、氮磷钾肥配施、厩肥 5 个处理, 对耕层土壤 SOC 的模拟值与实际测定值进行了比较。模型预测值与实测值之间吻合较好, 说明 RothC 模型可以很好的用来模拟东北温带气候区现有耕作管理条件下黑土 SOC 的动态变化。结果表明, 在当前常规耕作秸秆不还田条件下, 整个试验期间不施肥, SOC 含量持续下降; 单施氮或施氮磷钾不能维持耕层(20 cm)SOC 含量; 厩肥配合施用化肥, 则会增加 SOC 含量。保持这种管理方式不变, SOC 将持续下降至新的平衡点。模拟结果表明, 如果实施秸秆还田, 到 2022 年时无肥、氮肥、氮磷钾肥、氮肥配施厩肥和氮磷钾配施厩肥等处理区的 SOC 较 2002 年将分别增加 26%、40%、45%、38% 和 46%。RothC 模型可用来评价不同管理方式下黑土 SOC 变化趋势, 秸秆还田将显著增加研究区黑土的 SOC 含量。

关键词: 玉米; 土壤有机碳; 黑土; 模型模拟; RothC-26.3

RothC-26.3 Model Simulating Long-term Effects of Fertilization on Changes of Soil Organic Carbon in Continuous Cultivation of Corn in Northeast China

YANG Xue-ming¹, ZHANG Xiao-ping¹, FANG Hua-jun¹, ZHU Ping², REN Jun², WANG Li-chun², LIANG Ai-zhen¹

(¹ Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012;

² Jilin Academy of Agricultural Sciences, Gongzhuling 136000)

Abstract: RothC model (Version 26.3) was used to estimate soil organic C (SOC) levels under continuous cultivation of corn in a long-term fertilization trail in the Songnen Plain, Northeast China. We compared the model output for the changes in SOC with those measured from a Black soil (Typic Halpudoll) at Gongzhuling, Jilin Province, from the control (no-fertilization) vs. fertilized with N or NPK with/without manure addition. The sound performance of model in simulating SOC changes suggests that RothC is feasible for Black soils in the temperate climatic region of Northeast China. The modeled and measured results indicated that no-fertilization treatment led to a continuous decline of SOC during the study period and N and NPK fertilization were inadequate to maintain the SOC level in the plow layer (upper 20 - cm) unless FYM was added, associating with the current conventional management with no aboveground crop residues returning into the soil. Soil organic carbon could follow the same path of decline if the same management practices maintained. Model results indicate that returning the above-ground crop residues into the soil from 2002 to 2022 increased SOC by 26% in the no-fertilization treatment, 40% in N treatment, 45% in the NPK treatment, and 38% and 46% in the N and NPK with FYM addition treatments, compared to the levels in the corresponding treatments in 2002. The simulation results suggest that the RothC model is a feasible tool to assess SOC trend under different management practices and

收稿日期: 2003-01-22

基金项目: 中国科学院国外杰出人才支持资助项目, 国家自然科学基金资助项目(40271108)和长春市科技攻关资助项目(02-111C03)

作者简介: 杨学明(1957-), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士, 主要从事土壤生物化学和管理的研究。Tel: 0431-5542234, 0431-5542238; Fax: 0431-5542298; E-mail: xuemingy@hotmail.com

returning the aboveground crop residues into the soil will lead to a remarkable increase in SOC in the region.

Key words: Corn; Soil organic carbon; Black soil; Model simulation; RothC-26.3

我国人口持续增长和农业土地资源有限的矛盾将在 21 世纪表现得更为突出,该矛盾能否缓解在很大程度上取决于土地资源能否持续利用。长期以来,农田土壤有机碳质量被认为是土壤生产力的重要指标之一。土地利用,包括土壤扰动和去除作物生物量,是导致 SOC 损失,进而引起土地退化的主要原因。SOC 的损失对大气温室气体 CO₂ 含量的增加也有着重要的贡献。因此,农业科技工作者致力于研究和采用更好的农业管理措施,以减少 SOC 和作物残体的损失,促进土壤固碳。这些措施包括保护耕作^[1,2],增加种植频率^[3,4],施用化肥^[5,6],施用有机肥料如厩肥^[7],作物轮作^[8]以及种植多年生豆科植物和牧草^[3,9]等。

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。一些陆地生态系统 SOC 周转的数学模型被成功地应用于长期定位试验的观测数据中^[10~13]。在这些模型中,RothC 模型^[14]以 Rothamsted 试验站长期定位试验数据为基础,模型简单,并且仅与土壤过程有关,已经成功地用于验证来自欧洲、美洲和澳大利亚的 18 个不同试验处理的 SOC 变化趋势^[15]。RothC-26.3 适用于排水良好的矿质土壤中。模型参数仅涉及常规气候参数和土壤数据,容易获取。因此,RothC 模型可方便地用来预测气候和管理措施引起的 SOC 变化。

东北松嫩平原黑土是我国主要的农业土壤之一。然而,由于连年的精耕细作,加之作物秸秆不能还田,肥沃的黑土生产力已遭受很大的损失^[16,17]。连年持续的耕种,使黑土土壤结构破坏,SOC 含量降低。与黑土的初始状态相比,耕层 SOC 含量通常不足原始 SOC 含量的一半^[16]。自 20 世纪 70 年代末以来,随着化肥用量的增加和品种的改良,玉米成为该区的主要种植作物,连作玉米也已成为农业生产的主要组成部分。但是,对过去 20 年玉米连作下黑土的 SOC 变化知之甚少。本研究目的是用 RothC-26.3 模型模拟长期定位试验条件下东北黑土 SOC 变化,评价该模型在东北黑土区应用的可行性,评价过去 20 年来 5 种不同施肥处理的试验小区中 SOC 的变化,以及在保持现有生产水平下,预测未来 20 年秸秆还田与否对试验区 SOC 变化趋势的影响。

1 材料与方 法

1.1 定位试验

长期施肥定位试验始于 1980 年,建立在吉林省农业科学院(公主岭)试验地(42°57' N, 148°57' E)的粘壤质黑土上。试验建立以前,试验区土壤经历了 50 年以上的耕翻农作。区内年降水量约 570 mm,其中 70%集中在 6、7、8 月份;四季分明,具有寒冷的冬季和温暖的夏季。最热月在 6、7、8 月(20~23°C),雨热同季。最低气温出现在 1 月(-15°C)。试验区被设计为连作玉米,无重复。每小区面积 400 m²。整个试验包括 24 个施肥处理,本研究选取其中 5 个处理(表 1)。厩肥为干猪粪、植物残体和表土的混合物,厩肥(以有机碳计)施用量为每年 1.3 t·ha⁻¹。施肥对玉米产量的影响见表 2。收获后所有的地上作物残体被移除,玉米根茬秋翻时被埋入土壤。用重铬酸钾氧化法测定土壤剖面表层 20 cm 的土壤有机碳含量。对照、氮磷钾和氮磷钾+厩肥处理的土壤有机质含量用来验证模型。

1.2 RothC-26.3 模型

RothC(Version 26.3)模型是英国洛桑试验站(Rothamsted)采用的土壤有机碳周转模型。模型要求在 Windows 系统下运行,不需要任何其它辅助软硬件支持。模型详细描述介绍请参考文献[14]。此模型仅与土壤过程有关,不含植物生长的子模型,不计算作物地上生物量归还到土壤中的有机碳数量。SOC 的周转与土壤性质、土壤温度、湿度和植物覆盖等密切相关。RothC-26.3 模型适用于排水良好的矿质土壤,不宜用于有机土壤或长期积水的土壤。RothC-26.3 模型可进行两种模式运行。如果地下来源的作物有机碳输入量已知,可运行“顺向”模式,计算这些输入的碳在特定的气候和特定的土壤类型下分解转化的数量,及其对土壤有机碳库产生的影响。作物地下有机碳来源于植物根系残体,根系分泌物,微生物量的周转等。但是,一般情况下很难准确知道这些有机碳的输入数量。因此,模型可通过运行“逆向”模式,对 SOC 含量处于相对平衡的土壤估算维持平衡所需的碳输入量。RothC-26.3 模型也可预测土壤的微生物生物量和来源于 20 世纪 60 年代核爆炸的¹⁴C 对 SOC 中放射性碳含量的影响,但这要求有核爆炸前的土壤样品。利用 RothC-26.3 模型可

表 1 施肥处理方式

Table 1 Fertilization treatment used in this study

处理 Treatment	处理描述 Description	N	P ₂ O ₅ (kg·ha ⁻¹)	K ₂ O	厩肥 Manure (t·ha ⁻¹)
1 CK	对照 No-fertilization	0	0.0	0.0	0
2 N	氮 N treatment	165	0.0	0.0	0
3 NPK	氮磷钾 NPK treatment	165	82.5	82.5	0
4 NM	氮 + 厩肥 N + manure	165	0.0	0.0	30
5 NPKM	氮磷钾 + 厩肥 NPK + manure	165	82.5	82.5	30

表 2 施肥方式对玉米平均产量(1980~2002)的影响

Table 2 Fertilization effects on the average corn yield (1980~2002)

年份 Years	对照 Control (CK)	氮 N(kg·ha ⁻¹)	氮磷钾 NPK(kg·ha ⁻¹)	氮 + 厩肥 NM(kg·ha ⁻¹)	氮磷钾 + 厩肥 NPKM(kg·ha ⁻¹)
1980	5 460	6 802	6 758	6 803	7 028
1981	4 493	6 840	7 050	7 575	8 168
1982	3 368	6 555	7 290	7 583	7 785
1983	5 040	8 985	9 983	9 233	9 338
1984	4 680	8 483	8 693	9 840	10 792
1985	4 958	7 800	8 430	7 943	8 408
1986	4 043	8 048	9 300	9 195	9 818
1987	3 908	7 583	9 075	8 663	9 300
1988	3 750	6 983	9 038	7 643	9 008
1989	3 645	7 268	9 540	8 378	7 860
1990	4 350	8 430	8 790	9 015	8 670
1991	3 525	5 235	6 435	7 620	6 788
1992	2 618	3 825	6 743	8 032	7 043
1993	2 483	5 678	8 318	7 575	8 745
1994	3 190	5 225	7 550	5 180	6 155
1995	2 898	4 795	6 999	6 150	7 654
1996	3 162	3 564	6 277	7 455	6 637
1997	2 405	6 360	8 595	9 337	10 582
1998	3 279	7 680	9 615	11 070	11 100
2000	2 756	3 071	4 927	6 127	6 254
2001	1 920	7 570	8 520	9 970	9 430

推断土壤 SOC 的过去,预测土壤 SOC 的未来。

1.3 模型输入参数

DPM/RPM 为易分解的植物残体和难分解植物残体的比率, RothC-26.3 模型预设农业作物有机残体的 DPM/RPM 值为 1.44, 本模拟研究采用此数值。供试土壤为粘壤土, 粘粒含量为 31.0%。玉米在 4 月末播种, 9 月末或 10 月初收割, 收割过程中移除所有地上部分生物量(玉米茎和穗)。秋收后, 在 11 月中旬前将玉米根茬通过秋翻埋入耕层土壤。土壤从 10 月到来年的 5 月裸露。整个试验期间, 无厩肥的氮磷钾处理土壤有机碳保持相对稳定(图 1)。因此, 利用此处理中的 SOC 含量, 运行“逆向”模式, 获得该处理有机碳可能输入量: 5 月为 0.057 t·ha⁻¹, 6 月为 0.137 t·ha⁻¹, 7 月为 0.560 t·ha⁻¹, 8 月为 1.108 t·ha⁻¹, 9 月为 0.298 t·ha⁻¹。RothC-26.3 模型需要确定试验初始的土壤惰性有机质库的数量来开始进行模拟, 笔者没有这一数值。本研究采用通过运行“逆向”模式得到数值 3.47 t·ha⁻¹ 代之。其

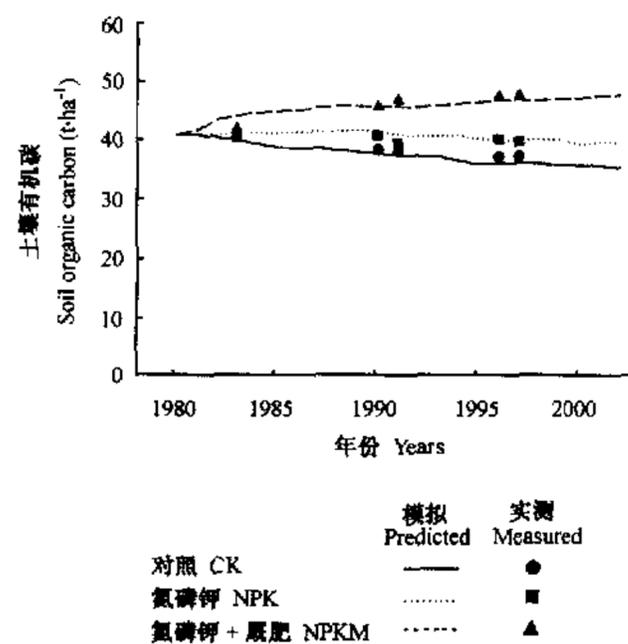


图 1 无肥(CK)、施用氮磷钾肥和氮磷钾 + 厩肥处理土壤有机 RothC-26.3 模型模拟结果与实测值的对比

Fig. 1 Comparisons of modeled values of soil organic carbon versus measured values from the CK, NPK, and NPK plus manure treatments

它处理的地下生物量的有机碳输入量是根据该处理的玉米籽粒产量与无厩肥的氮磷钾处理的玉米籽粒产量的相对比例调整得来(表 2)。参照不同的玉米产量计算不同处理的有机碳可能年输入量,对照处理的地下部分碳为 $2.16 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$,地上部分碳为 $2.28 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$;氮处理的地下部分碳为 $3.09 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$,地上部分碳为 $3.96 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$;氮磷钾处理的地下部分碳为 $3.26 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$,地上部分碳为 $4.67 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$;氮 + 厩肥处理的地下部分碳为 $3.28 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$,地上部分碳为 $4.76 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$;氮磷钾 + 厩肥处理的地下部分碳为 $3.30 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$,地上部分碳为 $4.87 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ 。不施肥(对照)处理与施氮磷钾的籽粒产量比为 0.49。因此,对照处理的有机碳输入量为施氮磷钾处理有机碳输入量的 0.49 倍。其它处理有机碳输入量由相同的方法计算得来。对于配施厩肥的处理,每年按 $1.3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ 的碳量于 11 月份通过秋翻施入土壤。

模拟土壤 SOC 变化分为 1980 年前,1980~2001 年和 2002~2022 年 3 个阶段。1980 年前的土壤有机碳含量假定为原始土壤有机碳的 $1/2^{[16]}$,是耕种后 SOC 持续下降的结果。用 RothC-26.3 模型模拟 1980~2001 年土壤有机碳含量,土壤有机碳输入量是根据实际籽粒产量计算得来的,并将模拟的结果与随机测定的数据作了比较。这期间地上部分植物残体不还田。2002 年以后的土壤有机碳模拟是在 2 个不同状态下进行的:(1)假设 2002 年后土壤耕作管理措施保持与 1980~2001 年期间相同,地上部分植物残体不还田;(2)土壤耕作管理措施相同,但秋

翻时地上作物残体秸秆还田。地上作物残体数量用玉米根和籽粒产量比为 1.45 来计算^[18]。

为了对比模型模拟效果,依据 Smith 等^[19]提出的方法对模拟效果做了评价。不过由于长期试验各处理没有重复和没有可靠的连续年际间的土壤和生物产量数据,使得一些统计指标无法进行。在此,笔者用 RMSE(root mean square error),EF(modeling efficiency),CD(coefficient of determination)和 $t(M)$ 等参数对模拟效果做了比较。为更详细地了解模型检验方法,请参考 Smith 等^[19]的研究。

2 结果与分析

2.1 模型校正

RothC-26.3 模型的执行情况是分别通过 1980~2001 年对照、氮磷钾、氮磷钾 + 厩肥处理中 SOC 的随机测定值比较来验证的(图 1,表 3)。不施肥和氮磷钾处理模拟产生的总误差小于对氮磷钾 + 厩肥处理模拟。由于数据特点使得无法测定数据的标准误差,故此也没有计算测定数据的 95% 的可信区间。氮磷钾 + 厩肥处理的 EF,说明模拟结果很好地反映了该处理土壤有机碳在过去 20 年间的变化趋势。在本研究涉及的处理中,只有氮磷钾 + 厩肥处理的 CD 值 > 1 ,说明在模拟有机碳的变化趋势上模拟结果产生的偏差小于测定结果的偏差。对照处理的高 $t(M)$ 值表明 RothC 模型低估了此处理的有机碳水平。由于缺少连续的实测数据,加上处理没有重复而很难对模拟结果的统计检验作出更详细的说明。

表 3 RothC-26.3 模型模拟玉米连作下黑土土壤有机碳的结果分析¹⁾

Table 3 Describing the performance of models in simulating soil organic carbon of monoculture corn in a black soil in Northeast China ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$)

	对照 Control		氮磷钾 NPK		氮磷钾 + 厩肥 NPKM	
	实测 Measured	模拟 Predicted	实测 Measured	模拟 Predicted	实测 Measured	模拟 Predicted
年份 Years						
1983	40.4	40.0	40.6	41.3	41.9	44.1
1990	38.6	37.9	41.1	41.8	45.9	46.1
1991	38.3	37.6	39.7	41.2	47.1	45.9
1996	37.6	36.6	40.6	40.4	47.8	47.2
1997	37.7	36.7	40.2	40.5	48.0	47.2
统计参数 Statistical performance						
RMSE		3.7		3.9		7.1
EF		0.4		-2.2		0.7
CD		0.5		0.3		3.8
M		0.8		-0.6		0.1
$t(M)$		26.2		-3.4		0.1
$t_{crit. 2.5\%}$				± 3.5		

¹⁾ 涉及的统计参数有 RMSE(root mean square error),EF(modeling efficiency),CD(coefficient of determination)和 $t(M)$ 等^[19]

Depicted above are the following statistics: root mean standard error (RMSE), modeling efficiency (EF), coefficient of determination (CD), mean difference (M), and $t(M)$ value for M with critical 2.5% levels shown, based on the methods described by Smith et al. (1997)

2.2 常规管理下(1980~2001年)SOC含量变化模拟

利用过去22年试验田玉米产量和当地平均气候数据运行 RothC-26.3 模型,揭示了长期单一玉米种植下施化肥和厩肥对 SOC 的影响。在无厩肥条件下,施氮磷钾的土壤 SOC 保持相对稳定(图 2,表4)。与1980年最初 SOC 含量相比,22年的空

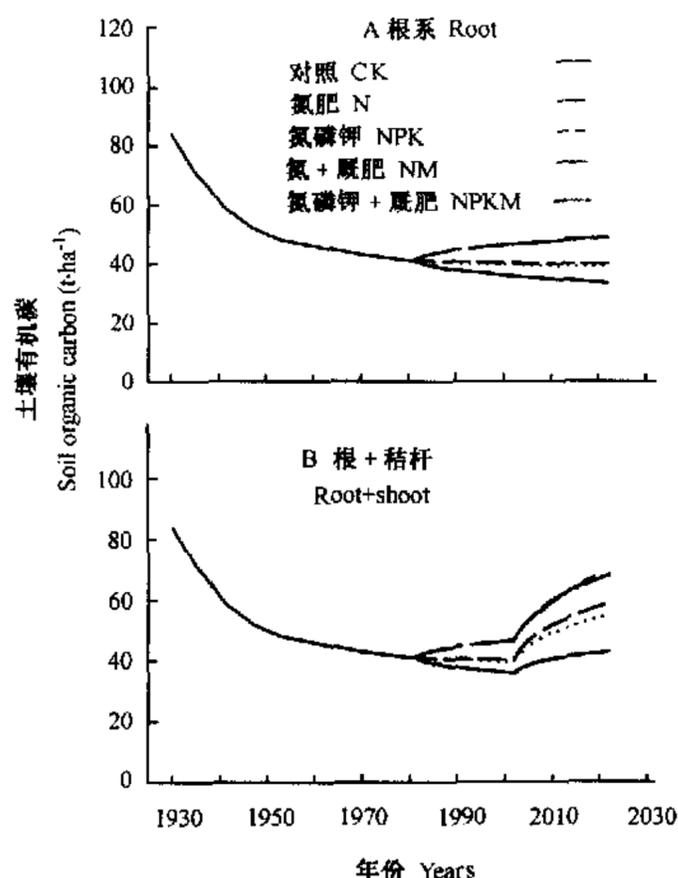


图 2 地上玉米秸秆归还土壤与否对土壤有机碳变化的影响

Fig.2 Returning aboveground corn residues to soil or not affects on changes of soil organic carbon

表 4 地上作物秸秆还田与否对未来 20 年(2002~2022 年)土壤有机碳含量(20 cm)的影响

Table 4 Impacts of returning aboveground corn residues to soil or not on soil organic carbon (20 cm)

	2002 年 2002 A. D.	2022 年 2022 A. D.	
		根系还田 Root	根系 + 茎还田 Root + shoot
对照 No-fertilization (CK)	35.8	33.3	42.1
施氮 N	39.4	38.6	53.9
施氮磷钾 NPK	40.0	39.6	57.6
施氮和厩肥 NM	46.0	48.3	66.6
施氮磷钾 + 厩肥 NPKM	46.0	48.4	67.9

3 讨论

氮磷钾处理中作物地下残体的土壤碳输入量是通过运行模型的“逆向”模式得来的。其它处理的地下碳输入量则是通过将氮磷钾处理的碳输入乘以给定处理的籽粒产量与氮磷钾处理的籽粒产量的比率计算得来。为此,假设玉米地下碳输入量同籽粒成正比关系。同时,也假设玉米地上部分生物量(不包

括籽粒)归还到土壤中的有机碳量也与籽粒产量成比例^[18],由此计算出 2002~2022 年玉米输入到土壤中的总有机碳量(地上和地下残体)。模拟长期作物生长对 SOC 的影响时,通常假定作物年生产量不是稳定不变,而是以一定比率随时间的延续而增加^[21]。因为 20 世纪 90 年代试验区玉米产量并没有呈现逐渐增加的趋势(数据未显示),所以本研究没有采用这个观点,而是利用 1980~2002 年期间各

2.3 不同管理方式下 SOC 的变化趋势(2002~2022 年)

地上玉米秸秆还田与否,对未来 20 年 SOC 变化的影响明显不同(表 4,图 2)。在假设未来 20 年玉米产量维持不变和保持目前耕作管理水平的前提下,本模拟在 2 种不同的玉米秸秆处理方式下进行:(1)玉米秸秆不还田(图 2A);(2)玉米秸秆还田(图 2B)。模拟结果表明,未来 20 年内地上作物残体管理方式的变化对 SOC 的影响差异很大。与 1980 年初始土壤有机碳含量相比,经过 20 年无秸秆还田的无肥处理和单施氮肥处理的 SOC 将分别下降 6% 和 2%。相反,即使秸秆不还田,在氮或氮磷钾处理配施厩肥中,相对 2002 年水平基础上 SOC 含量将增加 6%。秸秆还田明显增加 SOC 含量(图 2B,表 4)。玉米秸秆归还土壤,2022 年空白处理的 SOC 含量较 2002 年将增加 26%,较 1980 年初始含量增加 1%。相对各对应处理的 1980 年和 2002 年 SOC 含量,氮处理增加 40% 和 29%,氮磷钾处理增加 45% 和 38%,氮配施有机肥增加 38% 和 60%,氮磷钾配施有机肥则增加 46% 和 63%。

处理的平均玉米产量来模拟 2002 ~ 2022 年 SOC 的变化。但是,无疑模拟期间玉米籽粒产量的任何增加都可能增加 SOC 的含量,使得本模拟有可能低估 20 年后各处理的实际 SOC 水平。

RothC 模型中输入的植物碳分为两个组成部分:易分解的植物物质(DPM)和难分解的植物物质(RPM)。鉴于模型中 SOC 来源于作物的地下部分,模型预设 DPM/RPM 比为 1.44。2002 年以前玉米根茎及其分泌物是 SOC 的惟一碳源,模拟条件符合模型设计,结果应该合理。但是对 2002 年以后玉米茎和根同时归还土壤的处理,这样模拟的结果可能与实际要有误差。因为根系物质比茎物质分解更慢^[21,22],玉米根系对 SOC 的贡献比茎对 SOC 的贡献更大,由此模拟有可能过高估计 2002 ~ 2022 年期间的 SOC 增加量。

与中国有几千年耕作历史的其它耕作土壤相比,黑土开垦和种植的历史相对较短,大约为 100 ~ 200 年^[16,17]。一般来说,这期间该区黑土的管理措施经历了 3 个阶段:(1) 20 世纪 70 年代以前,作物生产仅仅依赖于土壤的原始肥力和有限的有机肥。(2) 70 年代到 90 年代期间,化肥使用量增加(特别是氮肥),有机肥使用量下降,同时开始利用杂交品种,作物秸秆和根茬不还田。(3) 90 年代中期以来,黑土区土地管理进入第 3 阶段:化肥施用进一步扩展,除氮肥外,磷、钾肥和微量元素肥料用量加大,同时开始提倡和实施玉米根茬还田。一般认为,因为精耕细作和较低的作物生产量,黑土在第一阶段损失了大量的 SOC,至少为原始 SOC 水平的 50%^[16,17],这与 Davidson 等^[23]的估计是一致的。因作物产量和地下生物量呈正相关^[18],70 年代到 90 年代期间,作物产量增加带来的作物根系分泌物和根系物质的增加使黑土 SOC 含量增加。区内大多数黑土的 SOC 含量应该说已经达到一个相对稳定的平衡阶段。但是,实际测定值和模拟的结果表明,如果化肥施用不足,黑土 SOC 含量还将持续下降。

施用厩肥对保持和提高黑土 SOC 水平至关重要。RothC-26.3 的模拟结果表明,在当前的管理方式下只施用化肥将导致黑土 SOC 含量持续下降。秸秆还田对保持和提高黑土 SOC 含量意义重大。在未来 20 年内,作物秸秆还田同时配施有机肥将恢复历史上 SOC 损失量的一半。即使不施用厩肥,在氮和氮磷钾处理的同时实施秸秆还田也将恢复黑土 SOC 历史损失量的 1/3。实行玉米秸秆还田也将结束无肥区 SOC 的持续损失状态。RothC-26.3 模拟结

果表明,实行所有作物生物量还田(籽粒除外)或采取秸秆还田为基础的保护性耕作措施将增加黑土 SOC 储量,提高东北黑土的可持续利用能力。

致谢:感谢洛桑试验站提供程序 RothC(<http://www.wiz.uni-kassel.de/model-db/mdb/rothc-26.3.html>),同时对孙宏德先生在建立和运行长期定位试验所做出的贡献,以及 Pete Smith 博士在模拟结果统计检验上的建议和审定表示由衷的感谢。

References

- [1] Reicosky D C, Kemper W D, Langdale G W, Douglas C L Jr, Rasmussen P E. Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production. *Journal of Soil Water Conservation*, 1995, 50: 253 - 261.
- [2] Yang X M, Wander M M. Tillage effects on soil organic carbon distribution and estimation of C storage in a silty loam soil in Illinois. *Soil Tillage Research*, 1999, 52: 1 - 9.
- [3] Bremer E, Janzen H H, Johnson A M. Sensitivity of total, light fraction and mineralizable organic matter to management practices in a Lethbridge soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 1994, 74: 131 - 138.
- [4] Campbell C A, McConkey R P, Zentner F B, Dyck F Selles, D Curtin. Carbon sequestration in brown Chernozem as affected by tillage and rotation. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995, 75: 449 - 458.
- [5] Gregorich E G, Ellert B H, Drury C F, Liang B C. Fertilization effects on soil organic matter turnover and corn residues C storage. *Soil Science Society America Journal*, 1996, 60: 472 - 476.
- [6] Nyborg M, Solberg E D, Malhi S S, Izaurralde R C. Fertilizer N, crop residue and tillage alter soil C and N content in a decade. Lal R, Kimble J M, Follett R F, Steward B A (eds) *Soil Management and Greenhouse Effect*. Lewis Publ BoCa Raton, FL. 1995: 93 - 99.
- [7] Sommerfeld T G, Chang C, Entz T. 1988. Long-term annual manure application increase soil organic matter and nitrogen, and decrease carbon to nitrogen ratio. *Soil Science Society America Journal*, 1995, 52: 1 668 - 1 672.
- [8] Yang X M, Kay B D. Rotation and tillage effects on soil organic carbon sequestration in a typic hapludalf in southern ontario. *Soil & Till Research*, 2001, 59: 107 - 114.
- [9] Campbell C A, Biederbeck V O, Zentner R P, Lafond G P. Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin black Chernozem. *Canadian Journal of Soil Science*, 1991, 71: 363 - 376.
- [10] Jenkinson D S, Hart P B S, Rayner J H, Parry L C. Modeling the turnover of organic matter in long-term experiments at Rothamsted. *INTECOL Bulletin*, 1987, 15: 1 - 8.
- [11] Parton W J, Steward J W B, Cole C V. Dynamics of C, N, P, and S in grassland soils: a model. *Biogeochemistry*, 1988, 5: 109 - 131.
- [12] Grant R F. Changes in soil organic matter under different tillage and rotation: mathematical modeling in ecosys. *Soil Science Society Amer-*

- ica Journal*, 1997, 61:1 159 - 1 174.
- [13] Paustian K, Elliott E T, Killian K. Modeling soil carbon in relation to management and climate change in some agroecosystems in Central North America. in Lal R, Kimble J M, Follett R F, Steward B A (eds.) Soil Processes and the Carbon Cycle. CRC Press, Boca Raton, F L. 1998:459 - 471.
- [14] Coleman K, Jenkinson D S. RothC-26.3; a Model for the Turnover of Carbon in Soil, Model Description and User's Guide. Lawes Agricultural Trust, Harpenden, UK, 1995:32.
- [15] Coleman K, Jenkinson D S, Crocker G J, Grace P R, Klfr J, Mürschens M, Poulton P R, Richter D D. Simulating trends in soil organic Carbon in long-term experiments using RothC-26.3. *Geoderma*, 1997, 81:29 - 44.
- [16] 吉林省土壤肥料工作站. 吉林土壤. 北京:中国农业出版社, 1998:647.
Jilin General Station of Soil and Fertilizer. *Soils of Jilin*. Beijing: China Agriculture Press, 1998:647. (in Chinese)
- [17] 黑龙江土壤普查办公室和黑龙江省土地管理局. 黑龙江土壤. 北京:中国农业出版社, 1992:864.
Heilongjiang Land Management Bureau and Soil Survey Office. *Soils of Heilongjiang*. Beijing: China Agriculture Press, 1992: 864. (in Chinese)
- [18] Buyanovsky G A, Wagner G H. Post-harvest residue input to cropland. *Plant & Soil*, 1986, 93:57 - 65.
- [19] Smith P, Smith J U, Powlson D S, McGill W B, Arah J R M, Cheretov O G, Coleman K, Franko U, Froking S, Jenkinson D S, Jensen L S, Kelly R H, Klein-Gunnewiek H, Komarov A, Li C, Molina J A E, Mueller T, Parton W J, Thornley J H M, Whitmore A P. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using seven long-term experimental datasets. *Geoderma*, 1997, 81:153 - 225.
- [20] Donigian A S, Patwardhan Jr A S, Chinnaswamy R V, Barnwell T O. Modeling soil Carbon and agricultural practices in the Central U. S.: an update of preliminary study results. In Lal, R, Kimble J M, Follett R F, Steward B A. (eds) *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press Inc. Boca Raton, F L. 1998: 499 - 518.
- [21] Balesdent J, Balabane M. Major Contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28:1 261 - 1 263.
- [22] Wander M M, Yang X M. Influence of tillage on the dynamics of loose-and occluded-particulate and humified organic matter fractions. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 1 151 - 1 160.
- [23] Davidson E A, Ackerman I L. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soil. *Biogeochemistry*, 1993, 20:161 - 193.

(责任编辑 卞海军)