



陈磊,王金洲,郝小雨,等. DayCent 模型模拟黑土长期施肥下土壤碳氮变化[J]. 黑龙江农业科学, 2021(10): 23-31.

DayCent 模型模拟黑土长期施肥下土壤碳氮变化

陈磊^{1,2}, 王金洲³, 郝小雨¹, 马星竹¹, 魏丹⁴, 周磊⁵, 刘荣乐⁶, 汪洪²

(1. 黑龙江省农业科学院 土壤肥料与环境资源研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086; 2. 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室/农业部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081; 3. 北京大学, 北京 100871; 4. 北京农林科学院 植物营养与资源研究所, 北京 100097; 5. 黑龙江省科学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 6. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要:为促进黑土耕地可持续发展,本研究利用黑龙江省 38 年长期定位施肥试验的作物产量、土壤有机碳含量和全氮含量等数据,对 DayCent 模型进行校验和验证,同时,利用试验数据逆向模拟的方法,获取模型最佳的修正系数,分析导致模型模拟偏差的原因,揭示黑土区施肥制度对土壤碳氮动态变化的影响以及土壤碳氮转化的规律。结果表明:DayCent 模型验证土壤有机碳时不施肥(CK)、氮肥(N)、二倍量氮肥(N2)、氮磷钾配施(NPK)、有机肥(M)、有机肥+氮肥配施(MN)和有机肥+氮磷钾配施(MNPK)处理的均方根差为 7.2%~9.8%,验证全氮时的均方根差为 7.1%~10.2%,且模拟评价的相对误差和模拟效率均在很好和较好范围内,说明模型参数组合对以有机肥归还为主的施肥条件下有机碳、全氮动态模拟较好;而验证二倍量有机肥(M2和 M2N2)处理的土壤有机碳、全氮的均方根差分别为 13.2%、12.5%和 10.6%、10.4%,模型模拟的效果较好,DayCent 模型能够基本反映土壤有机碳和全氮的变化。利用 38 年长期定位试验实测数据逆向分析可知,该试验点有机肥投入下的有机碳周转速率是单施化肥的 1.7 倍。利用 DayCent 模型模拟东北黑土区大量有机肥投入时的土壤碳动态变化时,需综合考虑土壤碳氮平衡、激发效应及淋洗迁移等问题,可能会在不同程度上高估高量有机肥投入下土壤有机碳动态。

关键词:DayCent 模型;黑土长期定位施肥;土壤碳氮变化

世界范围内农业的持续扩张极大地影响了自然生态系统,特别是温室效应和全球变暖被认为是人类生存的关键挑战^[1]。在农业生产中,为了增加粮食产量和维持土壤质量人们会采取各种土壤管理措施,但这些措施可能对土壤碳和氮循环产生不利影响。例如,耕作引起土壤有机碳分解增强进而增加了温室气体通量^[2-3],农业活动是温室气体 N₂O 和 CH₄ 的主要排放源^[4]。采用土壤保护措施和优化养分管理有助于减少农田温室气体、恢复或储存农田中额外的有机碳。提升农田土壤固碳能力被认为是减缓全球变暖的关键措施^[2,5],但这一方法中仍然存在重要的全球和区域不确定性^[3,6-7]。

东北黑土区属于世界四大片连续分布的黑土区之一,约占全球黑土总面积的五分之一,因黑土

腐殖质层厚,有机质含量高,物理性质良好,适宜农业耕作,是我国重要的商品粮基地。近几十年来,由于高强度开发、掠夺式经营及不合理的农业管理措施等影响,已造成东北黑土中有机质和养分含量不断降低^[8]。康日峰等^[9]依托 17 个国家级黑土耕地质量长期监测点研究指出,黑土区耕层(0~20 cm)土壤有机质水平维持在 18.0~41.2 g·kg⁻¹,与开垦前有机质水平(150.57 g·kg⁻¹)和开垦 100 年后有机质水平(50.23 g·kg⁻¹)相比^[10],均大幅降低。土壤有机质含量的巨大变化直接影响土壤物理结构、阳离子交换量和碳氮循环,使作物稳产高产更多依赖于化学物质的投入,造成生产成本剧增^[11-12]。随着黑龙江省商品粮基地的建设,保护黑土地资源、维持或提升黑土地土壤有机质含量已成为不可回避的问题,了解黑土区有机碳、全氮变化规律对黑土地耕地保护与培育至关重要。因此,建立一个能够准确模拟和预测东北黑土区耕层土壤有机碳和全氮变化的模型具有重要意义。通过模型模拟的方法,能够客观阐述农田土壤有机碳和全氮演变特征和动态变化,揭示气候、土质、作物和人为管理措施等因素

收稿日期:2021-04-08

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0504200);黑龙江省博士后面上资助项目(LBH-Z20093)。

第一作者:陈磊(1986—),男,博士,助理研究员,从事土壤有机碳及根际生物学研究。E-mail:chengz5251@163.com。

通信作者:汪洪(1970—),男,博士,研究员,从事土壤植物中、微量营养元素研究。E-mail:wanghong01@caas.cn。

对土壤有机碳和全氮动态变化的影响。目前,国内外广泛应用的生态系统模型有 RothC^[13]、DNDC^[14]、Century^[15]、DAISY^[16]、APSIM^[17]、NCSOIL^[18]等几十个模型,这些模型均可用于土壤有机碳和全氮的模拟与预测,从数日、数月、数年甚至世纪均可模拟,但模型具有较大的地域性和适用性。其中美国世纪模型(Century 模型)是最具影响力和广泛应用的模型之一,相对于其他土壤有机碳模型,Century 模型结构更加复杂,含有子模块更加多,能够模拟农田、草原或森林等各种尺度生态系统下有机碳动态,是最全面的生态系统模型^[19-21]。已在美国、欧洲、俄罗斯、巴西等地区不同农业管理措施下的农田系统做了广泛验证^[20,22-24],土壤有机碳动态变化模拟效果良好。依托我国东北、华北和南方等地区的长期肥料定位试验,Century 模型模拟土壤有机碳动态也取得了较好的效果^[25-29]。Century 模型系列包括 DayCent、ForCent 和 PhotoCent 等模型,其中 DayCent 模型能够在日的时间尺度上模拟土壤有机碳和全氮,改进了原模型中温度、水分和植物生长等模块,细化了土壤模块^[30-31]。目前,无论是在自然生态系统,还是人为管理生态系统中,DayCent 模型模拟的植物净初级生产力、有机碳、N₂O 排放和 NO₃-N 淋失等的模拟值与实测值均有良好的一致性^[30-34]。De Gryze 等^[33]研究美国加利福尼亚州农田耕层土壤有机碳的变化指出,DayCent 模型输出的模拟值能够解释实测有机碳值变异的 69%~87%。DayCent 模型在我国也有广泛应用,王金洲^[35]研究 5 个北方典型长期旱地定位试验指出,在秸秆还田条件下,DayCent 模型能够很好地模拟和预测有机碳和全氮变化。在华北地区 3 个长期试验点^[36]和东北旱田 6 个长期试验点^[37]上验证 DayCent 模型的适用性,也证实模型能够很好地模拟我国北方旱田有机碳动态,可以用于研究不同农业管理措施下土壤有机碳变化和固碳潜力。

本研究针对东北黑土区土壤有机质和养分含量发生的变化,依托国家级黑土耕地质量 38 年长期监测点的作物产量、土壤养分以及相关生产状况的历史数据,对 DayCent 模型进行参数化和验证,评价其适用性,同时,借助已验证的 DayCent 模型推算不同施肥条件下包括激发效应在内的特征因子对土壤有机碳、全氮周转的影响,从而全面分析黑土区施肥以及作物等因素与土壤碳氮库的

互作关系和机制,以期为合理调控黑土区土壤肥力、提升耕地质量提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 黑土长期肥料定位试验概况

长期定位试验区始建于 1979 年,现位于哈尔滨市道外区民主镇国家现代农业科技示范展示基地(45°50'N,126°51'E)。该区域地势平坦,海拔 151 m,属松花江二级阶地,成土母质为洪积黄土状粘土,黑土层厚度为 50 cm。气候属中温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨,年均气温 3.5℃,昼夜温差较大,年均无霜期 135 d,年均降雨量 533 mm。1979 年定位试验种植小麦,采用小麦-大豆-玉米轮作制,每年一季,设置 24 个施肥处理,每个处理 3 次重复,试验小区面积 4 m×9 m=36 m²,各小区用砖和水泥隔开,随机排列,无灌溉设施。2010 年 12 月,由于试验区原址被纳入城市规划区域,所属单位被迫采用冬季冻土条件下原状土搬迁方式将试验区全部搬迁至现今位置。搬迁深度为 1.1 m。初始耕层(0~20 cm)土壤有机碳含量 15.5 g·kg⁻¹,全氮含量 1.47 g·kg⁻¹,全磷含量 1.07 g·kg⁻¹,全钾含量 25.16 g·kg⁻¹,有效氮含量 151 mg·kg⁻¹,速效磷含量 5.1 mg·kg⁻¹,速效钾含量 200 mg·kg⁻¹,pH7.2。

1.2 试验设计

本试验于 2018 年在黑龙江省农业科学院土壤肥料研究所进行,选择长期定位试验中不施肥(CK)、常量氮(N)、二倍量氮(N2)、常量氮磷钾(NPK)、常量有机肥+常量氮磷钾(MNPK)、常量有机肥(M)、二倍量有机肥(M2)、常量有机肥+常量氮(MN)和二倍量有机肥+二倍量氮(M2N2)共 9 个处理的数据用于本研究中的模型校验。其中,二倍量肥料水平相关处理为 1986 年秋季在原试验区域采用非裂区形式增设。所施用化肥为尿素(N 46%)、重过磷酸钙(P₂O₅ 46%)、磷酸二铵(N 18%、P₂O₅ 46%)和硫酸钾(K₂O 50%),化肥均为秋收后施用。有机肥为发酵后纯马粪,每次施用前测定养分和含水率,常量施用水平按纯氮量 75 kg·hm⁻²,每轮作周期玉米季收获后秋施。常量氮磷钾肥料水平,在轮作周期的小麦季和玉米季为 N 150 kg·hm⁻²、P₂O₅ 75 kg·hm⁻²和 K₂O 75 kg·hm⁻²,大豆季为 N 75 kg·hm⁻²、P₂O₅ 150 kg·hm⁻²和 K₂O 75 kg·hm⁻²。

本研究中施用马粪 N、 P_2O_5 和 K_2O 含量为多年平均值, 分别为 0.58%、0.65% 和 0.90%。耕层(0~20 cm)土壤样品于秋收后 S 型 5 点取样。

1.3 DayCent 模型及模拟运行

1.3.1 DayCent 模型简介 1987 年, 美国科罗拉多州立大学的 Parton 教授等人建立了 DayCent 模型, 利用瑞典和美国等地区的长期草原定位试验对其验证并取得较好结果^[15,34]。目前, 该模型已广泛地应用于各种尺度农田、草原或森林等生态系统中植物生产力、有机碳、全氮以及 CH_4 、 N_2 、 N_2O 气体排放和 NO_3-N 淋失等动态变化的研究^[30-35]。该模型主要包括植物生长、管理措施、土壤、水分和温度等多个子模块, 其中植物生长子模块可模拟农田、草原和森林等生态系统中植物生长力的变化。土壤子模块主要模拟土壤有机质的转化, 依据有机质库不同的分解速率将有机质的模拟分为活性、慢性和惰性有机质库, 有机质转化受土壤质地、温度、水分、管理措施等多因子的共同调控。

1.3.2 DayCent 模型模拟运行 模型运行需要输入该长期肥料定位试验点的基础信息、作物信息、农业管理信息和气象信息等, 建立 site.100、soil.in、crop.100、harv.100、fert.100、omad.100、cult.100、irri.100、fix.100 等输入文件(表 1), 最后运行 *.sch 文件调用参数, 实现模型运行。

表 1 DayCent 模型运行需输入文件参数

输入文件	描述
site.100	站点基础信息和气象数据, 如经纬度、温度、降雨量、土壤基础理化性状等
soil.in	土壤数据, 如砂粉粘比例、容重和土层深度等
crop.100	作物信息, 如根系在土壤中生长深度、年生产力、各组织部分的 C/N、NPP 在各组织中的分配比例和木质素含量等
harv.100	作物地上部收获比例
fert.100	化肥施用水平
omad.100	有机肥马粪中碳氮含量和其他元素含量
irri.100	灌溉强度
fix.100	有机质分解修正系数

为使 DayCent 模型初始化可以反映寒地黑土区农业种植历史, 将试验地模拟情景设置为 3 个时间阶段: (1) 初始化阶段, 模型运行 3 000 a, 试验地为天然草地状态, 使土壤有机碳含量达到稳定平衡状态; (2) 自 1861 年开垦初期至 1979 年

试验前阶段, 为农田土壤无额外养分投入至低量有机养分投入状态, 农作物收获从土壤中带走大量养分元素, 使土壤有机碳含量快速下降; (3) 1980 年开始试验至今, 定位施用不同化肥和有机肥水平的小麦-大豆-玉米轮作试验。

利用定位试验的作物产量、土壤有机碳和全氮含量等历史实测值与模拟值进行校验, 若模拟值与实测值吻合, 显示模型各参数可用; 若模拟值与实测值偏差较大, 需引入该点位因子的修正系数, 修正土壤有机质库的分解速率。同时利用逆向模拟的方法, 获取最佳的修正系数, 全面分析导致模型模拟偏差的可能原因。

1.4 DayCent 模型模拟评价

本文评价 DayCent 模型模拟土壤有机碳、全氮结果的可靠性与准确性有多种指标。首先, 通过作散点图的方式将模型模拟值与实测值做回归相关分析, 评价参数为决定系数 (R^2)。其次, 采用均方根差 (Root Mean Square Error, RMSE)、相对误差 (Relative Error, RE) 和模拟效率 (Modeling Efficiency, EF) 3 种评价参数^[20]。在理论上当 RMSE 和 RE 值越接近于 0, EF 值越接近于 1 时, 表明模拟值与实测值有非常好的一致性, 模型模拟的效果最好。当 RMSE 值 $< 10\%$ 、RE 值为 $-5\% \sim 5\%$ 或 EF 值 ≥ 0.5 时, 表明模拟值与实测值吻合的很好, 模型模拟的效果很好; 当 RMSE 值为 $10\% \sim 20\%$ 、RE 值为 $5\% \sim 10\%$ 或 EF 值为 $-0.5 \sim 0.5$ 时, 表明模拟值与实测值具有较好的一致性, 模型模拟的效果较好; 当 RMSE 值 $> 20\%$ 、RE 值 $> 10\%$ 或 EF 值 < -0.5 时, 表明模拟值与田间实测值偏差较大, 模型模拟的效果较差^[20]。

$$RMSE = \frac{100}{O} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n}$$

$$RE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) / O_i$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

式中: P_i 为模拟值, O_i 为实测值, \bar{O} 为实测值的平均值, n 为实测值和模拟值数据对的个数。

1.5 数据分析

利用 WPS 2016 软件对试验数据进行处理和作图, 采用 SPSS 19 软件对数据进行方差分

析(ANOVA),不同处理之间数据多重比较采用 Duncan 新复极差法检验($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 模型校验结果

2.1.1 模拟作物地上生物量碳氮 由图 1 可知, DayCent 模型能够完全模拟该试验点田间生态系统中小麦、大豆和玉米生产力变化,即模型输出的地上部生物量碳、氮模拟值与实测值结果及变化

趋势基本一致。在散点图中作物地上部生物量碳氮模拟值和实测值回归方程的决定系数 R^2 分别为 0.988 8 和 0.876 6,且斜率与 1:1 线非常接近,拟合方程均达到极显著水平($P<0.001$),表明所用的模型参数组合能很好地模拟作物地上部生物量碳、氮变化动态,说明模型模拟输出的土壤有机碳和全氮值不会因作物子模块的模拟误差而与田间实际偏离较大。

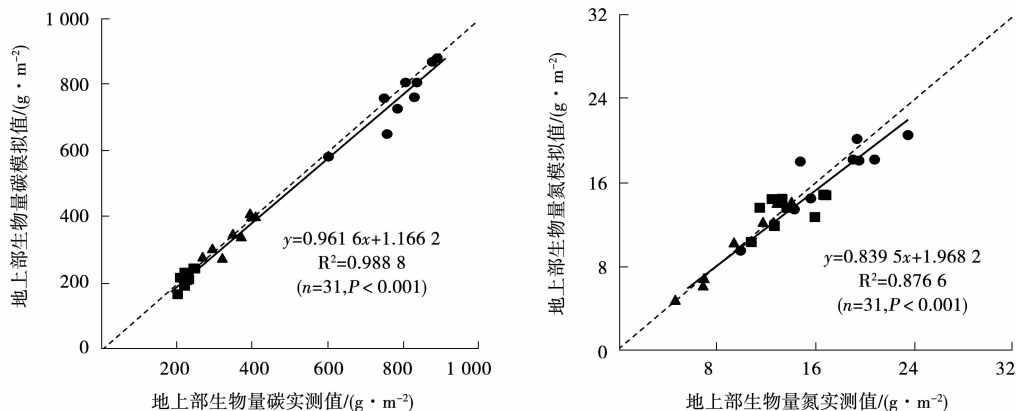


图 1 各处理模拟作物地上生物量碳、氮平均值和实测平均值的校验散点图

2.1.2 模拟土壤碳氮 9 个施肥处理的土壤有机碳模拟平均值与实测平均值呈线性相关(图 2),达到极显著水平($P<0.001$),决定系数 $R^2=0.923 0$ 与 1:1 线接近,说明模型输出的有机碳模拟值与实测值吻合性很好。从土壤全氮模拟平均

值和实测平均值的校验散点图(图 2)可知,两者具有极显著的相关性($P<0.001$),决定系数 $R^2=0.955 2$ 趋近于 1,但与 1:1 线存在偏差,说明 DayCent 模型输出的土壤全氮模拟值与实测值存在一定偏差。

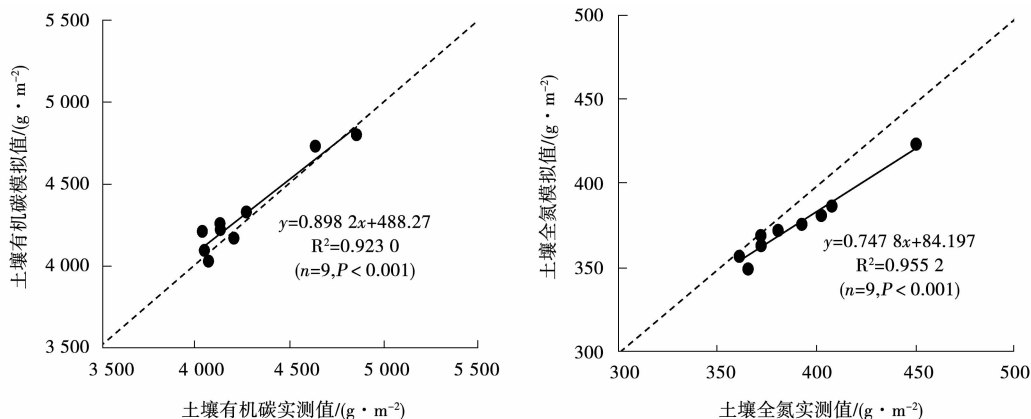


图 2 各处理模拟土壤有机碳、全氮平均值和实测平均值的校验散点图

2.2 模型模拟值与实测值的一致性评价

2.2.1 模拟土壤有机碳 表 2 对各处理下土壤有机碳实测值与模拟值进行了数理统计分析,除 M2 和 M2N2 处理的 RMSE 值 $>10\%$ 之外,其他施肥处理的 RMSE 值在 $7.2\%\sim9.8\%$,且 RE 值($-4.9\%\sim0.4\%$)和 EF 值($-0.38\sim0.04$)均

处于模型模拟评价参数效果很好和较好范围内,显示模型输出的有机碳模拟值与实测值吻合很好,能真实反映长期施肥处理(CK、N、N2、NPK、M、MN 和 MNPK)下的田间有机碳动态和趋势。二倍有机肥处理(M2 和 M2N2) RMSE 值(13.2% 和 12.5%)和 EF 值(-0.17 和 0)均在

模型模拟评价参数较好范围内,RE 值在 $-5\% \sim 5\%$ 属于模拟很好范围内,模拟值与实测值具有较好的一致性(图 3),说明 DayCent 模型适用于模拟该试验点土壤有机碳动态。

2.2.2 模拟土壤全氮 从 DayCent 模型全氮模拟值与实测值的散点图和评价效果可以看到(图 4 和表 3),模型能够较好地模拟不同施肥处理的土壤全氮动态,CK、N、N2、NPK、M 和 MN 处理的 RMSE 值($<10\%$)、RE 值($-5\% \sim 5\%$)和 EF 值($-0.5 \sim 0.5$)均在模型模拟评价参数效果很好和较好范围内,说明模拟值与实测值一致性较好。但 MNPK、M2 和 M2N2 处理的 RMSE 值均 $>10\%$,且 EF 值 <-0.5 ,说明模拟值与实测值吻合度较差,进一步分析显示,从试验开始的 20 年内模型输出的模拟值均低于实测值,总体上模型

能够捕捉到该试验点的全氮动态。

表 2 各施肥处理下模型模拟有机碳与实测值的一致性效果评价

处理	RMSE/%	RE/%	EF
CK	7.2	0.4	0.01
N	7.5	-1.8	-0.09
N2	8.1	-4.9	-0.24
NPK	9.8	-3.0	-0.05
MNPK	7.3	0.2	0.04
M	9.4	-3.8	-0.24
M2	13.2	-3.3	-0.17
MN	8.2	-1.9	-0.38
M2N2	12.5	-0.1	0

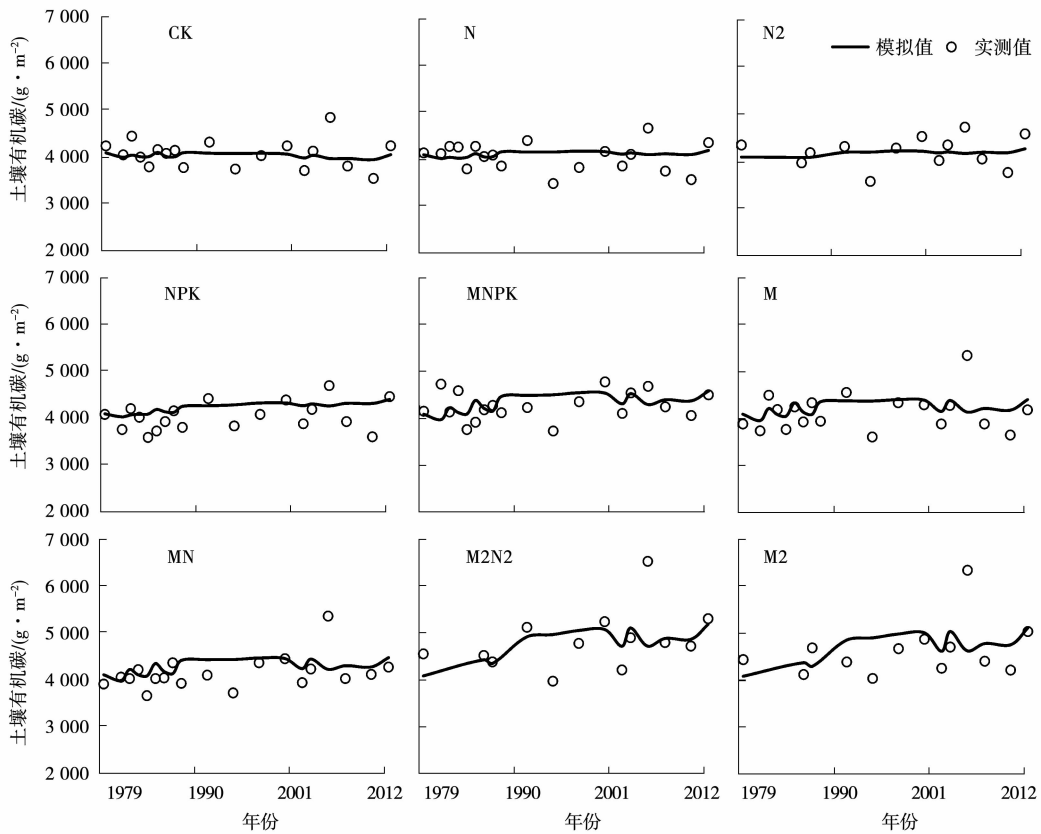


图 3 各处理土壤有机碳模拟值和实测值的散点图

在 DayCent 模型默认参数调节范围内,模型能够准确地模拟 CK、N、N2 和 NPK 处理的有机碳和全氮动态,模拟结果均可达到很好和较好水平。模型模拟 M、MN、MNPK、M2 和 M2N2 处理的 SOC 变化时,模型模拟的有机碳值高于实测值。RMSE 值越小模型模拟的准确性也将越高,

利用逆向模拟的方法,使 RMSE 值达到最小,推算出有机肥处理(M、MN、MNPK、M2 和 M2N2)的 fix 子模块中最佳修正系数,即有机碳周转速率为乘以修正系数 1.7,但 M2 和 M2N2 处理的模拟值与实测值之间仍存在偏差,可能受到高量有机肥处理影响有机碳周转速率要更高些。

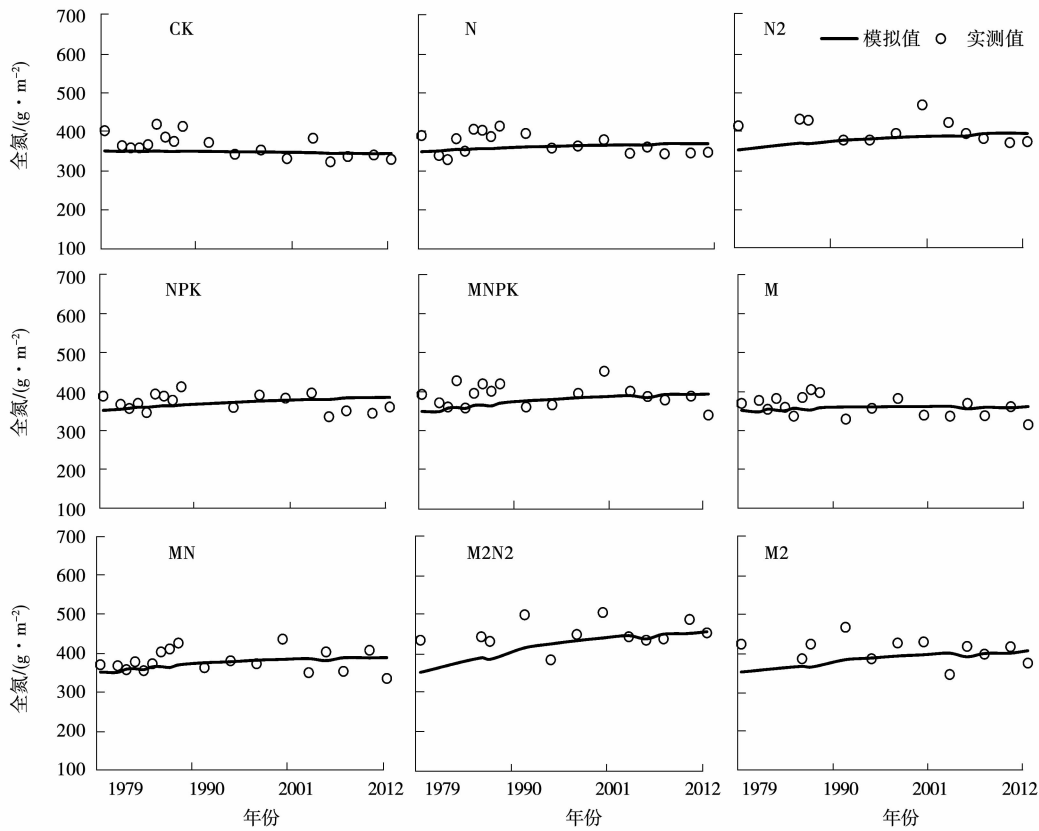


图 4 各处理土壤全氮模拟值和实测值的散点图

表 3 各施肥处理下模型模拟全氮值与实测值的一致性效果评价

处理	RMSE/%	RE/%	EF
CK	8.5	3.9	-0.22
N	7.8	1.9	-0.30
N2	7.1	0.4	-0.57
NPK	7.5	0.7	-0.25
MNPK	10.2	4.8	-1.05
M	8.1	1.7	-0.27
M2	10.6	4.5	-1.05
MN	9.1	3.8	-0.67
M2N2	10.4	5.6	-1.13

3 讨论

DayCent 模型是在假设土壤有机碳分解过程线性拟合符合一级动力学方程的前提下运行的,即模型模拟输出的有机碳含量与年均碳投入量呈线性正相关关系^[35,37-38]。在模型默认参数范围内,CK、N、N2 和 NPK 处理的土壤有机碳模拟值和实测值吻合性很好,模拟效果评价也均达到很好或较好的水平。但施用有机肥处理(M、MN、MNPK、M2 和 M2N2)中,按照该默认参数模拟的有机碳含量和增加速率均明显高于实际土壤碳动态情况。这与 Heitkamp 等^[39]在德国南部和 Jiang 等^[40]在中国南方用 RothC 模型研究长期定

位试验结果一致,土壤有机碳的增加速率或增加量并未随有机肥投入而直线上升。利用实测数据逆向模拟使 RMSE 值达到最小,推算出所有添加有机肥的处理,有机碳周转速率为乘以修正系数 1.7,即有机肥处理的有机碳周转速率是非有机肥处理的 1.7 倍。鉴于 DayCent 模型未考虑外源碳投入引起激发效应对土壤有机碳分解的贡献,模型可能存在一定程度上高估大量有机肥投入下有机碳动态。因此,本文认为外源氮素投入不足以及土壤氮含量较低引起的激发效应是造成模拟有机碳被高估的一个重要原因。大量研究证明,添加外源碳(如糖类、有机肥和秸秆等)普遍会促进土壤原有有机碳的矿化,产生正激发效应^[41-42]。该试验点研究显示,年均氮输入量 M 处理 49.5 kg·hm⁻²、MN 处理 175.5 kg·hm⁻²、MNPK 处理 177.5 kg·hm⁻²、M2 处理 82.8 kg·hm⁻²,而作物的地上部吸氮量达到 M 处理 111.4 kg·hm⁻²、MN 处理 144.9 kg·hm⁻²、MNPK 处理 162.1 kg·hm⁻²、M2 处理 125.5 kg·hm⁻²,综合考虑氮肥在土壤中氨挥发、硝酸盐淋失和反硝化作用等损失,从表观上看土壤氮素平衡处于亏缺状态,且 38 年不同施肥处理的土壤全氮变化速率与年均氮盈余量呈线性关系,因此,说明长期氮素投入不足造成该试验点土壤氮含量较低。在土壤氮素含量较低背景下,依

据微生物生态化学计量学假说^[43],当外源输入大量碳素时,土壤微生物活性和数量迅速增加,从而提升微生物对外源活性有机物分解^[41],因微生物活性和数量的激增也会导致对氮素需求的增加,导致微生物需进一步分解土壤原有有机质以获取更多氮素营养来维持它们的生长和繁殖^[41-44],将导致土壤原有有机质更强的正激发效应。土壤激发效应与碳投入量呈正相关线性关系^[42,45-46],从各处理土壤有机碳模拟值和实测值的散点图可以看到,M2 和 M2N2 处理的模拟有机碳值普遍高于实测值,且 RMSE 值均大于 10%,造成这样结果的原因可能是随着二倍有机肥处理的碳投入量增加而激发效应更强,fix 子模块的修正系数要高于 1.7。而 M2N2 处理年均氮输入量($333.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)显著高于 M2 处理($125.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),造成 M2N2 处理的模拟效果评价参数均优于 M2 处理。因此,在土壤氮素含量较低情况下,大量有机肥投入引起的正激发效应是 DayCent 模型参数调整以及修正时要重点考虑的指标。

随着对该试验点数据的深入分析,笔者认为耕层有机碳因淋溶和冻融迁移也是造成模拟有机碳被高估的另一个重要原因。可溶性有机碳是土壤中活性较高、移动性较好的组分,是微生物的重要能量来源,与土壤有机碳含量紧密相关,McK-night 等^[47]研究指出,有机碳含量随可溶性碳含量增加而增加^[47]。当有机肥投入到土壤中,在分解过程中会产生大量可溶性有机碳,因可溶性有机碳的淋溶和迁移^[48],可显著增加土壤亚表层(20~40 cm)土壤有机碳含量,这一结果已被大量肥料长期定位试验证明^[49-51]。Kindler 等^[52]通过研究农田、草地和森林等生态系统中土壤可溶性碳的动态变化指出,各生态系统中可溶性碳年均淋溶量均在 $35 \sim 53 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,强烈影响深层有机碳累积,同时指出有机碳和无机碳淋溶到深层土壤对农田生态系统碳平衡起重要作用^[52]。东北黑土区处于季节性冻土区,在早春和晚秋季节存在强烈的冻融作用。冻融作用可通过低温使土壤微生物死亡、团聚体破碎而增加土壤可溶性有机碳的释放^[50],随着冻融循环次数越多,可溶性有机碳含量也越多^[52-53]。前期骆坤^[49]研究发现,与不施肥处理相比,化肥(NP 和 NPK)处理对土壤耕层(0~20 cm)和亚表层(20~40 cm)可溶性碳含量影响不明显,有机肥(M、MN、MNPk、M2 和 M2N2)处理显著增加耕层(0~20 cm)和亚表层(20~40 cm)土壤可溶性碳含量,耕层可溶性碳含量在 $40.35 \sim 103.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,亚表层(20~40 cm)土壤有机碳储量占土层(0~40 cm)有机碳储量的 $39.5\% \sim 48.4\%$ ^[49]。

本研究发现,与试验点初始值有机碳($15.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

含量和全氮($1.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)含量相比,M 和 M2 处理有机碳含量(16.12 和 $16.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)增加,而全氮含量(1.41 和 $1.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)降低,表现出土壤碳氮动态非耦合的现象,与 DayCent 模型模拟全氮值与实测值有偏差的结果一致。这与国内其他长期定位试验研究结果不同,在南方红壤、西北黄土和东北海伦黑土长期有机肥和有机无机配施处理有机碳和全氮表现出很好的耦合关系^[51,54-56]。本文认为,投入马粪的高 C/N 比值导致更多的有机碳被分解和氮投入量较低可能是造成该试验点碳氮动态非耦合的主要原因。在该试验点 M 和 M2 处理年均氮输入量仅为 $49.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $82.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,远低于其他施肥处理($148.7 \sim 324.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),且投入的马粪 C/N 比值为 $35.2:1$,随着马粪施入土壤后微生物活性增强,分解土壤原有有机质以获取更多氮素,土壤矿质氮含量降低,产生更强的正激发效应,使土壤有机氮含量增加^[57-58],随着土壤腐殖化程度的提高 C/N 比值呈现下降趋势,最终使 M 和 M2 处理的 C/N 比值维持在 11.4,均高于其他处理的 C/N 比值。丛日环^[58]通过对比分析祁阳、昌平、郑州和杨凌等 4 个肥料长期定位试验发现,祁阳红壤定位试验中土壤碳氮变化非耦合现象的发生与土壤有机质分解有关,本文参照丛日环^[58]的研究计算方法,得到施肥处理的有机碳年均分解量($0.94 \sim 1.63 \text{ mg} \cdot \text{hm}^{-2}$),各处理之间差异不明显,但 M 和 M2 处理的有机氮年均分解量(0.05 和 $0.07 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)远低于其他施肥处理($0.16 \sim 0.32 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),据此推算,该试验点 M 和 M2 处理土壤有更多的有机碳被分解。

4 结论

DayCent 模型能够较好地模拟黑龙江省黑土不同施肥下地上生物量碳氮和有机肥归还为主条件下有机碳、全氮动态,利用逆向历史数据分析显示,有机肥处理下土壤有机碳周转速率是化肥处理的 1.7 倍。对于大量有机肥施用,DayCent 模型需考虑养分平衡、激发效应及淋洗迁移问题,可能一定程度上高估土壤有机碳动态。

参考文献:

- [1] PCC. Carbon and other biogeochemical cycles[R]. STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013:467-544.
- [2] LAL R. Sequestering carbon in soils of agroecosystems[J]. Food Policy, 2011, 36: S33-S39.
- [3] STOCKMANN U, ADAMS M A, CRAWFORD J W, et al. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2013, 164: 80-99.

- [4] SMITH P, MARTINO D, CAI Z, et al. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2007, 118: 6-28.
- [5] CORSI S T, FRIEDRICH A, KASSAM M, et al. Soil organic carbon accumulation and greenhouse gas emission reductions from conservation agriculture: A literature review[R]. Rome: FAO, 2012.
- [6] MEURER K H E, FRANKO U, STANGE C F, et al. Direct nitrous oxide (N₂O) fluxes from soils under different land use in Brazil: A critical review[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11: 023001.
- [7] POWLSON D S, STIRLING C M, JAT M L, et al. Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4: 678-683.
- [8] MAILLARD É, ANGERS D A. Animal manure application and soil organic carbon stocks: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20: 666-679.
- [9] 康日峰, 任意, 吴会军, 等. 26 年来东北黑土区土壤养分演变特征[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(11): 2113-2125.
- [10] 汪景宽, 王铁宇, 张旭东, 等. 黑土土壤质量演变初探 I-不同开垦年限黑土主要质量指标演变规律[J]. *沈阳农业大学学报*, 2002, 33(1): 43-47.
- [11] 郭胜利, 党廷辉, 郝明德. 施肥对半干旱区小麦产量、NO₃-N 累积和水分平衡的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(4): 754-760.
- [12] STEWART C E, PAUSTIAN K, CONANT R T, et al. Soil carbon saturation: Implications for measurable carbon pool dynamics in long-term incubations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(2): 357-366.
- [13] JENKINSON D S, RAYNER J H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments[J]. *Soil Science*, 1977, 123: 298-305.
- [14] LI C S, FROLKING S, FROLKING T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: Model structure and sensitivity[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(D9): 9759-9776.
- [15] PARTON W J, SCHIME D S, COLE C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51: 1173-1179.
- [16] HARSEN S, JENSEN H E, NIELSEN N E, et al. Simulation of nitrogen dynamic and biomass production in winter wheat using the Danish simulation model DAISY[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1991, 27: 245-259.
- [17] MCCOWN R L, HAMMER G L, HARGREAVES J N G, et al. APSIM: A novel software system for model development model testing and simulation in agricultural systems research[J]. *Agricultural Systems*, 1996, 50: 255-271.
- [18] MOLINA J A E, CLAPP C E, SHAFER M J, et al. NC-SOIL, a model of nitrogen and carbon transformations in soil: Description, calibration and behavior[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, 47: 85-91.
- [19] 龙军, 毛艳玲, 张黎明, 等. 农田土壤有机碳演变模型的研究进展[J]. *中国农业通报*, 2012, 28(5): 232-239.
- [20] 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.
- [21] CHENG K, OGLE S M, PARTON W J, et al. Predicting methanogenesis from rice paddies using the DayCent ecosystem model[J]. *Ecological Modelling*, 2013, 261-262: 19-31.
- [22] MIKHAILOVA E A, BRYANT R B, DEGLORIA S D, et al. Modelling soil organic matter dynamics after conversion of native grassland to long-term continuous fallow using the Century model [J]. *Ecological Modelling*, 2000, 132(3): 247-257.
- [23] ÁLVARO-FUENTES J, LÓPEZ M V, ARRÚE J L, et al. Tillage and cropping effects on soil organic carbon in Mediterranean semiarid groecosystems testing the CENTURY model [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 134(3-4): 211-217.
- [24] BORTOLON E S O, MIELNICZUK J, TORNQUIST C G, et al. Validation of the CENTURY model to estimate the impact of agriculture on soil organic carbon in southern Brazil[J]. *Geoderma*, 2011, 167: 156-166.
- [25] 高鲁鹏, 梁文举, 姜勇, 等. 利用 Century 模型研究东北黑土有机碳的动态变化 I. 自然状态下上壤有机碳的积累[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(5): 772-776.
- [26] 高崇升, 杨国亭, 张兴义, 等. 利用 Century 模型模拟不同农业经营模式下黑土农田土壤有机碳的演变[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(6): 911-915.
- [27] 邓祥征, 姜群鸥, 林英志, 等. 中国农田土壤有机碳贮量变化预测[J]. *地理研究*, 2010(1): 93-101.
- [28] 李悦, 郭李萍, 谢立勇, 等. 不同农作管理措施对东北地区农田土壤有机碳未来变化的模拟研究[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(3): 501-513.
- [29] CONG R H, WANG X J, XU M G, et al. Evaluation of the CENTURY model using long-term fertilization trials under corn-wheat cropping systems in the typical croplands of China[J]. *PLoS One*, 2014, 9(4): e95142.
- [30] PARTON W J, HARTMAN M, OJIMA D, et al. DayCent and its land surface submodel: Description and testing[J]. *Global and Planetary Change*, 1998, 19(1-4): 35-48.
- [31] DEL GROSSO S J, MOSIER A R, PARTON W J, et al. DayCent model analysis of past and contemporary soil N₂O and net greenhouse gas flux for major crops in the USA[J]. *Soil Tillage Research*, 2005, 83: 9-24.
- [32] STEHFEST E, HEISTERMANN M, PRIESS J A, et al. Simulation of global crop production with the ecosystem model DayCent [J]. *Ecological Modelling*, 2009, 209: 203-219.
- [33] DE GRUYZE S, WOLF A, KAFFLCA S R, et al. Simulating greenhouse gas budgets of four California cropping systems under conventional and alternative management[J]. *Ecological Applications*, 2010, 20: 1805-1819.
- [34] PARTON W J, STEWART J W B, COLE C V. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: A model[J]. *Biogeochemistry*, 1988, 5: 109-131.
- [35] 王金洲. 秸秆还田的土壤有机碳周转特征[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [36] 张璇, 谢立勇, 郭李萍, 等. DayCent 模型模拟不同农作管理措施下华北地区土壤有机碳的变化[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(2): 539-548.
- [37] 张茂鑫. 东北旱田不同农作情景下土壤有机碳变化及固碳潜力的模拟研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [38] ZHANG W, WANG X, XU M, et al. Soil organic carbon dynamics under long-term fertilizations in arable land of northern China[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(2): 409-425.
- [39] HEITKAMP F, WENDLAND M, OFFENBERGER K, et al. Implications of input estimation, residue quality and carbon saturation on the predictive power of the Rothamsted Carbon Model[J]. *Geoderma*, 2012, 170: 168-175.
- [40] JIANG G, SHIRATO Y, XU M, et al. Testing the modified Rothamsted Carbon Model for paddy soils against the results from long-term experiments in southern China[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, 59(1): 16-26.

- [41] KUZYAKOV Y, FRIEDEL J K, STAHR K. Review of mechanisms and quantification of priming effects[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(11-12): 1485-1498.
- [42] BLAGODATSKAYA E, KUZYAKOV Y. Mechanisms of real and apparent priming effects and their dependence on soil microbial biomass and community structure: Critical review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, 45(2): 115-131.
- [43] CHEN R R, SENBAYRAM M, BLAGODATSKY S, et al. Soil C and N availability determine the priming effect: Microbial N mining and stoichiometric decomposition theories[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(7): 2356-2367.
- [44] BURNS R G, DEFOREST J L, MARXSEN J, et al. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58: 216-234.
- [45] CHOWDHURY S, FARRELL M, BOLAN N. Priming of soil organic carbon by malic acid addition is differentially affected by nutrient availability[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 77: 158-169.
- [46] TIAN Q X, YANG X L, WANG X G, et al. Microbial community mediated response of organic carbon mineralization to labile carbon and nitrogen addition in topsoil and subsoil[J]. *Biogeochemistry*, 2016, 128(1-2): 125-139.
- [47] MC KNIGHT D, THRUMAN E M, WERSHAW R L. Biogeochemistry of aquatic humic substances in Thoreau's Bog, Concord, Massachusetts[J]. *Ecology*, 1985, 66(4): 1339-1352.
- [48] 倪进治, 徐建民, 谢正苗. 土壤水溶性有机碳的研究进展[J]. *生态环境*, 2003, 12(1): 71-75.
- [49] 骆坤. 黑土碳氮及其组分对长期施肥的响应[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- [50] 李文军, 彭保发, 杨奇勇. 长期施肥对洞庭湖双季稻区水稻土有机碳、氮积累及其活性的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(3): 488-500.
- [51] ZHANG J J, DOU S, SONG X Y. Effect of long-term combined nitrogen and phosphorus fertilizer application on ¹³C CPMAS NMR spectra of humin in a typical hapludoll of northeast China[J]. *European Journal of Soil Science*, 2009, 60: 966-973.
- [52] KINDLER R, SIEMENS J, KAISER K, et al. Dissolved carbon leaching from soil is a crucial component of the net ecosystem carbon balance[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 1167-1185.
- [53] 周旺明, 王金达, 刘景双, 等. 冻融对湿地土壤可溶性碳、氮和氮矿化的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(3): 1-6.
- [54] 肖伟伟, 范晓晖, 杨林章, 等. 长期施肥对黄土旱塬黑垆土有机氮和有机碳的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007(2): 672-675.
- [55] 乔云发, 韩晓增, 赵兰坡. 长期定位施肥对黑土碳氮储量的影响[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2011, 27(4): 480-484.
- [56] LI S Q, LI S X. Priming effect of ammonium nitrogen fertilizer on soil nitrogen under waterlogged condition[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(4): 361-367.
- [57] PAUL E A. *Soil Microbiology, ecology and biochemistry*[M]. Amsterdam: Academic Press, 2007.
- [58] 丛日环. 小麦-玉米轮作体系长期施肥下农田土壤碳氮相互作用关系研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.

Using DayCent Model to Simulate Black Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Dynamics Under Long-Term Different Fertilization

CHEN Lei^{1,2}, WANG Jin-zhou³, HAO Xiao-yu¹, MA Xing-zhu¹, WEI Dan⁴, ZHOU Lei⁵, LIU Rong-le⁶, WANG Hong²

(1. Institute of Soil and Fertilizer and Environment Resources, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences / National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land / Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 3. Peking University, Beijing 100871, China; 4. Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forest, Beijing 100097, China; 5. Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150001, China; 6. Agro-Environmental Protection Institute of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China;)

Abstract: In order to promote the sustainable development of cultivated land in black soil, the data of crop yield, soil organic carbon and total nitrogen were collected from the 38 years long-term fertilizer experiments in Heilongjiang Province. The effects of long-term fertilization on black soil organic carbon and total nitrogen content were verified and stimulated using the DayCent model, at the same time, the model optimization of correction factor was obtained by using the method of reverse simulation of test data, which analyzed the possible reasons for the deviation of the model simulation to reveal the influence of fertilization system on the dynamic change of soil carbon and nitrogen and the law of soil carbon and nitrogen transformation. The results showed that the root mean square error of SOC in CK, N, N₂, NPK, M, MN and MNPK treatments were in range of 7.2%-9.8%, those of TN were in range of 7.1%-10.2%, which suggested that the simulated values were consistent with the observed values; but the root mean square error of SOC and TN in M₂ and M₂N₂ treatment were in range of 13.2%, 12.5% and 10.6%, 10.4%, the evaluation parameters of the model simulation were in a good range, the DayCent model could basically reflect the changes of SOC and TN. The inverse modelling showed that SOC turnover rate of these (M, MN and MNPK) treatments was 1.7 times that of these (N, N₂ and NPK) treatments. When applying a large amount of organic fertilizer in northeast China, soil nutrient balance, priming effects, the leaching and transferring issues of SOC should be considered in the DayCent model, which may overestimate SOC content to a certain extent.

Keywords: DayCent model; long-term fertilization in black soil; soil organic carbon and total nitrogen dynamics