

森林土壤有机碳模型评述与应用

黄志霖¹, 田耀武^{1,2}, 曾立雄¹, 肖文发^{1*}

(1. 中国林业科学研究院 森林生态环境与保护研究所, 国家林业局 森林生态环境重点实验室, 北京 100091;
2. 河南科技大学 林学院, 河南 洛阳 471003)

摘要:土壤有机碳(SOC)库是陆地生物圈中最大的碳库, 约占陆地总碳储量 2/3, 而森林土壤碳占全球土壤碳储量 73%, 森林 SOC 储量及其变化直接影响到了全球的碳平衡。森林土壤碳储量及收支计量多采用模型方法, 基于研究文献, 对现有主要土壤有机质模型的类型、应用对象及其模拟精度等进行简介, 重点分析和比较现在常用模型的应用范围、特征及适用对象, 并对模型的模拟面积、模型性能、时空尺度及模拟结果等特征进行评估, 以 CENTURY 模型阐述模型模拟机理、计算法则、影响因素、土壤、气候植被等输入参数的不确定性。

关键词:土壤有机碳; 模型; 应用; 评价; 森林

中图分类号:S718.516 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2012)05-0050-07

Assessment and Application Analysis on Forest Soil Organic Carbon Models

HUANG Zhi-lin¹, TIAN Yao-wu^{1,2}, ZENG Li-xiong¹, XIAO Wen-fa^{1*}

(1. State Forestry Administration Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. College of Forestry, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China)

Abstract: Forestry soil organic carbon (SOC) is an important component of the global carbon cycle, which effects the global carbon balance. Presently, the changes in SOC stock can arise because of the climatic changes or changes in the land use and land management. Here we introduced various kinds of estimating methods on forest SOC, analyzed characters, excellences and disadvantages of each method, enumerated the principal features of the most popular existing soil organic matter (SOM) models dealing with C and N turnover. At least 250 models dealing with soil carbon and nutrient turnover existed. Among these models, we considered in detail the mechanistic compartment-based models. Based on their internal structure, models describing SOM dynamics could be divided into (1) process-oriented and (multi)-compartment models, (2) organism-oriented (food-web) models, (3) cohort models describing decomposition as a continuum, and (4) a combination of model types (1) and (2). The new features, areas supported capabilities, spatial and temporal scale, uncertainty and limitations of main SOC models were introduced. According to the mechanism of CENTURY, principles and methods of some influence factors including the parameters of soil, plant, and climate were advanced. With the CENTURY model uncertainty and influence factor of precision, conceptual basis and scientific detail were analyzed.

Key words: soil organic carbon (SOC); model; application; assessment; forest

全球土壤碳库(1 395~2 200 Gt)是陆地植被碳 库(500~600 Gt)的 2~3 倍, 是全球大气碳库(750

收稿日期:2011-05-05 修回日期:2012-03-27
基金项目:国家林业局林业公益性行业科研专项(201104008)。
作者简介:黄志霖,男,博士,主要研究方向:森林生态学。
* 通讯作者:肖文发,男,研究员,主要研究方向:森林生态学。E-mail: xiaowenf@caf.ac.cn

Gt)的 2 倍多^[1]。森林是陆地生态系统中最大的有机碳库,森林土壤碳库(占全球土壤碳贮量 73%)又是全球土壤碳库中最主要的部分,也是森林生态系统中最大的碳库,在陆地生态系统碳循环中起着重要的作用,其碳库的变化是大气碳库和全球气候变化的主要原因^[3]。土壤碳库微小的变化都会对大气 CO₂ 浓度及全球变化产生巨大影响。土壤碳库的变化主要表现在土壤有机碳(SOC)储量的变化上,土壤有机碳储量是进入土壤有机物质(生物残体等)的输入与损失(以土壤微生物分解作用为主)之间的平衡^[2]。但目前陆地碳循环研究,森林土壤碳循环研究是最不充分的部分,不确定性因素较多,研究结论不一致^[4-5]。其中,森林土壤碳储量计量及其动态模拟是全球有机碳循环研究的热点问题^[7-8]之一。

1 土壤碳计量

土壤碳是研究陆地生态系统碳循环的重要组成部分。土壤有机质受各种因素影响并涉及多个土壤生物化学等生态过程,其变化表现为连续、缓慢、长期的过程,较为理想的途径是对其缓慢变化过程进行长期野外试验及监测,但影响因素较多、试验站点数量有限,难以对于各生物群区、影响土壤有机质变化的条件进行试验,多数所得观测资料在时间、空间尺度多是离散的。依赖现有可用的试验站点观测资料,对试验站点之外的地区做预测,必需用模型加以综合归结成反映土壤有机质变化的因素数量关系的数学公式、逻辑准则和具体算法。因此,模型方法通过已知数据建立数学模型来推算,成为解决实际问题提供精确的数据或可靠的指导。进一步的,土地使用者及决策者在短期内需要了解及评估耕作、气候变化等对农业或环境影响,土壤有机碳库静态结果难以满足反映其动态变化需求,生态系统或其以上尺度的土壤碳循环研究,经济有效的工具只有土壤有机质模型。

土壤碳计量常用方法主要有土壤漫反射光谱(Diffuse reflectance spectroscopy, DRS)计量法、土壤类型计量法、湿法消解法或滴定法、生命带计量法和模型计量法。土壤碳计量方法的差异可能导致对同一区域(生态系统)土壤碳计量结果差异性比较大,估算结果的不确定性来源于土壤碳计量方法甚至大于土壤碳分布本身^[8-9]。需要大量连续观测的数据对数学模型进行参数化和初始化,但目前相对缺乏这些数据,且模型有一些假设条件,使模型计量不确定性增大^[10]。

2 土壤碳模型

土壤碳模型能够根据大量的实测数据和气候变化模拟数据,预测和反推土壤碳蓄积量的大小及变化,给出不同情境下的土壤碳蓄积量动态变化趋势,探讨土壤有机碳蓄积和固定潜力,分析气候变化对土壤碳蓄积的不同综合影响。

森林 SOC 模型主要利用假设(经验)和已有数据模拟土壤碳含量和动态变化,尤其是在无法取得充分必要数据情况下,模型方法已成为定量研究土壤有机质积累分解的重要手段,已推出 250 多个土壤生物化学过程模型(随机、经验和机理模型),有关土壤碳循环方面的模型或基于实测数据或基于遥感数据。经验模型通常建立土壤碳循环特征变量与环境因子变量之间的相关关系,只在一定范围内应用。由于经验模型中考虑的参数较少,更多的过程、机理被忽视,使得模型结果产生较大的不确定性。土壤有机碳库模型的发展已经从经验模型转向机理模型,综合考虑动力学特点,并且集成碳循环的各个过程与气候模型。S. Manzoni 和 A. Porporato^[9]对这些模型进行归类与评述,土壤 SOM 模型主要有 3 类:面向过程多分室模型(process-oriented and multi-compartment models)、面向生物的(食物网)模型(organism-oriented and food-web models)、分解序列模型(cohort models describing decomposition as a continuum)等。

2.1 面向过程的多分室模型

该类模型中应用较广的有 RothC、CANDY、CENTURY、DAISY、NCISOIL 和 SOILN 模型(表 1)等。该类模型主要特征:SOM 按一定标准划分为若干组分,并假设每组分具有相同理化性质,或具有相似化学降解性。主要考虑 SOM 在土壤剖面层次间的迁移和转化^[11]。但各模型的 SOM 分组复杂程度并不相同,有的模型认为 SOM 为连续统一体,有的模型则把 SOM 区分为若干层次分室。部分过程模型与 GIS 耦合,对特定区域或生态系统进行更为精确的模拟,如 CANDY、CENTURY、RothC 模型等。模型分库理论具有相对独立性,但不同模型 SOM 划分标准不相同,难以在同一条件下进行对比,限制了模型的精确测试^[9]。

2.2 生物(食物网)模型

SOM 按生物类型和代谢序列被划分为不同库(Pool),土壤动物和微生物驱动 SOM 流动和转化,多认为 SOM 分解速率与 SOM 量及分布深度呈相关关系,土壤生物区群落丰富度与分解速度相关关

系未得到认同^[29]。模型有机质分解率计算法则一般是由实验试验确定,并简单地直接应用于模型模拟。模型校正主要是对土壤微生物团聚体的数量化,但模型参数较难确定。与过程模型相比,生物量

模型研究过程更为复杂。应用生物量模型进行 SOM 研究,Moore 等、Kuijper 等、Zelenev 等、Cherif 和 Loreau^[9]等,得出了较为理想的结果。

表 1 常用 SOM 模型的主要特征

Table 1 Main characteristics of the five most popular SOM models

模型	分类	特征	适用对象	应用
CENTURY 模型 ^[12]	过程模型、3 个 SOM 库(活性有机质、慢分解有机质、惰性有机质)	1、模拟期较长,10~100 a 2、模拟时间步长为月 3、模拟植物生长、N、P、S 动态 4、3 个分库:活性、慢性、惰性 5、土壤质地控制碳的周转	草原系统、农作物系统、森林系统、森林草原系统	W. J. Parton ^[13] 等;E. C. M. Fernandes ^[14] 等;B. J. Bolker ^[15] 等;Peng ^[16] 等;M. U. F. Kirschbaum ^[17] 等;高崇升 ^[18] 等
RothC (Rothamsted model) ^[19]	过程、5 个 SOM 库(易分解的植物残体、难分解植物残体、微生物量、物理稳定性有机质、化学稳定性有机质)	1、土壤氮和碳并不相互关联 2、碳周转与土壤类型、温度、湿度和植物覆盖相关 3、模拟时间步长为月	除湿地以外全天候全尺度的土壤有机质模型	P. Smith ^[20] 等;M. Easter ^[21] 等;M. L. Kaonga ^[22] 等
CANDY (Carbon and Nitrogen Dynamics)模型 ^[23]	过程、3 个库(活性有机质、慢分解有机质、惰性有机质)	1、4 个子模型:土壤温度、水文、作物和有机质转换 2、日尺度 3、模拟土壤 N 动态、温度和湿度	温凉气候条件下农田生态系统	U. Franko ^[23] 等;P. Smith ^[20] 等;高鲁鹏 ^[24] 等
NCSOIL 模型 Molina 等 ^[25]	过程、3 个 SOM 库(微生物量、腐殖质、稳定有机质)	1、通过土壤微生物和有机质成分来模拟 C 和 N 通量 2、4 个有机组分:植被残留、微生物生物量、腐殖质、稳定有机物	任何尺度和气候带的自然植被生态系统和温带农田生态系统	P. Smith ^[20] 等;A. Hadas ^[26] 等
DAISY 模型 ^[27]	过程、3 个 SOM 库(死的本地土壤有机物质、土壤微生物量、添加有机物质)	1、模拟作物生产力、土壤水分和氮动态 2、具有水文、土壤温度、土壤氮和作物等 4 子模型 3、相应凋落物量的分解率恒定 4、基于理化性质的垂直土壤剖面分层	温带农田生态系统土壤碳循环	L. S. Jensen ^[28] 等;P. Smith ^[20] 等

2.3 分解序列模型(cohort models)

SOM 划分为更细繁的碳、氮周转过程,SOM 周转是土壤微生物生理机能驱动力。Furniss 等把 SOM 按年限、起源、颗粒度进行分组,每组又被细化为化学性质更为相似、分解作用更为接近的若干小组。Gignoux 等使用年限统计法的方法,把 SOM 进行分组,每隔一个确定的时间尺度,SOM 就划分为一个新组,当 SOM 量相对于 SOM 总量可以忽略时,分组结束。与过程模型相比,cohort 模型认为 SOM 分解是一个纯粹的物理或生物化学过程^[9]。

所有土壤有机质模型均以环境变量、气候变量和土壤属性数据为影响因子建立数学计算法则,以推算不同气候带及不同植被类型下 SOM 动态及 SOC 储量,均可利用现有的植被及土壤属性数据,推算到相似的土壤和生态区域,可有效地解决静态估算中不确定性因素的影响,也解决了估算中尺度转换的问题^[10]。

土壤有机碳模型中,以面向过程的多分室模型

得以较好发展,目前影响较大的是 RothC 模型和 CENTURY 模型,分别是由英国土壤学家 Jenkinson 等、美国生态学家 Parton 等建立的土壤有机碳周转模型。CENTURY、RothC 等过程模型已得到充分地应用和验证。

CENTURY 模型起始用于草地生态系统,升级改进后广泛应用于草地、森林、稀树草原、农业等生态系统,模拟土壤-植被系统间 C、N、P 和 S 的长期动态。应用于森林,模型组成包括森林子模型、土壤有机质子模型和水分子模型。模型输入土壤的植物残体被分为代谢碳库(Metabolic pool)与结构碳库(Structural pool),结构库又进一步划分为木质素和纤维素组分。基于土壤有机质周转及分解特征,分室模型将土壤总有机碳(TOC)分成了 3 个碳库:活性库(Active pool)、慢性库(Slow pool)、惰性库(Passive pool)等。涵盖土壤碳氮的活性部分、难分解的有机物质和土壤固定的微生物产物以及惰性库中有机质极难分解,周转时间分异,从 5 a、数十年到长达百年。

RothC 模型所需参数简单易得,且成功模拟了世界许多地区不同处理 SOC 的变化,该模型将有机碳库分为易分解植物残体(DPM)、难分解植物残体(RPM)、微生物生物量(BIO)、腐殖化有机质(HUM)和惰性有机质(IOM)。

3 土壤碳模型研发与模拟精度

S. Manzoni 和 A. Porporato^[9] 对 250 多个土壤碳相关模型进行了分类比较,当前模型多数是对早期原始版本的升级、更新和改造重组。

FullCAM 模型^[30] 是多个模型的综合,如全天候全尺度土壤有机质周转模型 RothC、凋落物分解模型 GENDEC、林木生长模型 3PG、经验 C 追踪模型 CAMFor 等,FullCAM 可以对森林生态系统全碳周转进行模拟。其中 RothC 模型是 D. S. Jenkinson 和 J. H. Rayner^[19] 研发的 Rothamsted 模型的改进和升级。

模型 TOUGH2,通过升级、改进为 TOUGH-REACT、TOUGHREACT-N,模型的模拟能力和范围增强,可以研究不同施肥和灌溉条件下生物化学土壤氮循环^[31]。

SWIM 模型是 MATSALU 和 SWAT 模型的综合版,SWIM 模型起始模拟尺度为 $10^2 \sim 10^4 \text{ km}^2$ 流域,模拟对象为土壤氮周转,现在已外延河岸带地下水动态和过程的模拟^[33]。

同系列模型 MOMOS-2、MOMOS-3、……MOMOS-6 是 MOMOS-C 模型和 MOMOSN 模型的综合升级版。

TRIPLEX 模型^[34] 是 3PG、TREEDYN3.0、CENTURY4.0 等 3 个模型的综合,主要模拟林木生长和 C、N 动态。

GEFSOC^[21] 模型是 CENTURY、RothC 和 IPCC 等 3 个模型的综合,可以研究区域和国家尺度上土地利用变化对土壤 C 储量和交换率的响应。

各类模型模拟精度的评估,也受到学者们的关注。如, P. De Willigen^[35] 评估了 14 个模型对 SOM 矿化和植物吸收的模拟能力,这些模型对植物生长等地面过程的模拟精度较高,而对土壤水分和 N 含量等地下输移过程的模拟精度较低,较为复杂的过程多库模型并不能提供更为精确的模拟结果,其模拟精度并不一定都是最高; P. Smith^[20] 等在温带地区评估了 9 个多库模型(CANDY、NCSOIL、RothC、DAISY、CENTURY、Verberne model、ITE、DNDC、SOMM 等),所有模型模拟偏差并不显著,提供了较为一致的结果。但 ITE 和 SOMM 等草地生态系统模型用来模拟农耕地时候误差显著。

A. Rodrigo^[36] 等对比了 9 个模型(NCSOIL、SOILN、DAISY、Kersebaum's model、MATHILD、TRITSIM、NLEAP、SUNDIAL、CANTIS 等)土壤湿度和温度变化对土壤 C 和 N 模拟的影响。在最大田间持水量条件下,土壤碳分解和氮矿化率最高,土壤含水量下降分解率随之下降,各模型对低湿度条件的模拟结果更接近实际,在水分饱和或高出田间持水量条件下,模拟偏差较大。

高鲁鹏^[24] 等以 CENTURY 和 RothC 模型为例,对 SOM 系列模型进行了综合评述。M. Pan-su^[37] 等使用了田间 ^{14}C 和 ^{15}N 标注方法,评定了 MOMOS-2、MOMOS-3、……MOMOS-6 等 5 个同系模型的预测能力。这些模型原理和计算法则相同, SOM 分库数目从 3 个到 5 个,复杂性不相同。同系模型中,相对简单的前期模型并没有明显地降低模拟精度,后期模型 SOM 数目的增多只是提高了模型模拟的时间周期。

目前常用 SOM 模型,尤其是面向过程的多分室模型,各分室的组成成分及含量无法直接测量,通过 SOM 总量模拟与观测值比较评估模型精度,均具有一定的不确定性,不一定是 SOM 分解积累的真实动态模拟。其次,在土壤有机质库的划分方面,缺少试验证明方法和实质性的标准,尤其对于惰性土壤有机质库控制因子有限了解,尚未严格定义那些具有一致动态行为的有机化合物。

4 模型应用

模型在应用之前的必要环节,结合长期定位试验数据对模型进行检验。张凡^[38] 等(2006)应用农业生物地球化学模型(DNDC)和农业地理信息系统数据库,实例探讨耕作管理对土壤碳储量的影响,并由此评价生物地球化学模型在气候变化、土壤性质及农业耕作管理措施对土壤碳含量影响方面的预测能力。J. A. Molina^[25] 等结合遥感和碳循环过程的 CASA 模型及 Van't Hoff 土壤呼吸模型,估算土壤基础呼吸的空间分布(8 km 分辨率),并结合实测土壤有机碳估算土壤有机碳的空间分布。刘瑞刚^[39] 等应用 LPJ-GUESS 植被动态模型,模拟未来 100 a 以辽东栎为优势种的落叶阔叶林、以白桦为主的阔叶林和油松为优势种的针阔混交林的碳变化,定量分析生态系统净初级生产力、土壤异养呼吸、净生态系统碳交换和碳生物量对未来气候情景以及相应大气 CO_2 浓度变化情景的响应特征。

CENTURY 模型广泛地应用于农田、草地和森林生态系统。W. J. Parton^[13] 等在俄勒冈州的小麦—休闲—秸秆还田的轮作长期实验田,应用

CENTURY 模型模拟其土壤有机碳演变, P. Smith^[20]等利用修订后的模型对农田和牧场生态系统进行模拟, 模拟结果与实测值相近。国内学者引用该模型主要用于牧场、森林和农田土壤有机碳相关研究。如肖向明^[40]等(1996)、李凌浩^[41]等利用 CENTURY 模型对内蒙古锡林河流域典型草原初级生产力和有机质动态、土壤碳素循环进行模拟, 结果表明实测值与模拟值均显著吻合; 运用 CENTURY 模型模拟马尾松林在不同管理措施下演替各阶段的土壤有机质、N 含量以及生产力^[42]; 兴安岭落叶松林土壤有机碳含量^[43]、南亚热带鹤山主要人工林生态系统碳氮的演变^[44]; 利用 CENTURY 模型对厚层黑土有机碳的动态预测、薄层黑土有机碳变化模拟, 拟合效果较好; 模型模拟中国东北黑土区不同农业经营模式下黑土农田土壤有机碳的演变^[18]。CENTURY 模型不同生态系统有较好的模拟效果, 并且农田和草地生态系统的效果优于森林生态系统。

CENTURY 模型许多参数需要通过计算其他因子而得, 一些重要的历史数据难以获取或缺失情况下, 无法估计一些不确定的影响, 模型模拟结果不够理想, 因此, 注意模型应用的适用性。A. Gisj-man^[46]等应用 CENTURY 模型模拟稀疏草原生态系统中土壤碳、氮、磷不如模拟哥伦比亚农田系统的效果, 建议热带地区应用模型时应加以改进, 模型在热带高度风化土壤应用有一定局限性。K. Paus-tin^[47]等则发现在模拟休闲地土壤有机质变化时, CENTURY 模型的模拟出现了有机碳降低过快的现象。R. H. Kelly^[48]等指出对于模拟有枯枝落叶层的森林土壤有机碳的变化, Century 模型存在结构性问题。该模型用于美国东南部农田生态系统时效果也不是很理想。

5 结论

用模型推算土壤有机质碳的周转, 基于许多假设条件, 这使得模拟与真实情况之间的差距较大, 且这种假设的正确与否有待进一步研究。为准确描述土壤有机质的动态变化, 模型在改进中考虑参数的具体针对性, 从而限制了模型的广泛应用。因此, 发展更接近于事实, 更简单易行的方法和模型来研究土壤有机碳库成为必要。

土壤有机质模型已从经验模型发展到机理模型, 从简单的指数模型发展到过程多库的计算机模型, 模型更注重生态系统有机质积累、分解过程中的动态变化和变化机理。不同类型模型在模拟对象、范围等适宜条件下都能够达到一定的精度。但由于

气候、土壤、管理措施的差异, 所有研发的模型都存在一定的局限性, 没有一种模型能广泛适合于多尺度、多气候带、多生态系统和多土壤类型。随着计算机技术的进步, GIS 与模型的结合有着很好的应用前景^[8], SOM 模型模拟精度将逐步提高, 研究尺度从区域尺度向全球尺度发展, 不仅可以用于揭示土壤有机质动态变化过程, 更可以应用于研究全球碳循环。

参考文献:

[1] 梁启鹏, 余新晓, 庞卓, 等. 不同林分土壤有机碳密度研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 889-893.
LIANG Q P, YU X X, PANG Z, *et al.* Study on soil organic carbon density of different forest types[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(4): 889-893.

[2] POST W M, IZAURRALDE R C, MANN L K, *et al.* Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil [J]. Climatic Change, 2001, 51(1): 73-99.

[3] WATSON R T. Land use, land use change, and forestry: a special report of the IPCC[M]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2000.

[4] HOUGHTON R A, HOBBIE J E, MELILLO J M, *et al.* Changes in carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: a net release of CO₂ to the atmosphere[J]. Ecological Monographs, 1983, 53: 235-262.

[5] DOTWILER R P. Land use change and the global carbon cycle; the role of tropical soils[J]. Biogeochemistry, 1986, 2: 67-93.

[6] HOUGHTON R A, SKOLE K L, LEFKOWITZ D S. Changes in the landscape of Latin America between 1850 and 1985 (I) Net release of CO₂ to the atmosphere[J]. Forest Ecology and Management, 1991, 38: 173-199.

[7] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 733-740.
LIU G H, FU B J, FANG J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance [J]. Acta Ecological Sinica, 2000, 20(5): 733-740. (in Chinese)

[8] 周国模, 刘恩斌, 余光辉. 森林土壤碳库研究方法进展[J]. 浙江林学院学报, 2006, 23(2): 207-216.
ZHOU G M, LIU E B, SHE G H. Summary of estimated methods on forest soil s carbon pool [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2006, 23(2): 207-216. (in Chinese)

[9] MANZONI S, PORPORATO A. Soil carbon and nitrogen mineralization: theory and models across scales[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41: 1355-1379.

[10] 田娜, 王义祥, 翁伯琦. 土壤碳储量估算研究进展[J]. 亚热带农业研究, 2010, 6(3): 193-198.
TIAN N, WANG Y X, WENG B Q. Advances in estimating soil carbon storage [J]. Subtropical Agriculture Research, 2010, 6(3): 193-198. (in Chinese)

[11] SMITH P, ANDR  N O, BRUSSAARD L, *et al.* Oil biota and global change at the ecosystem level: describing soil biota in mathematical models[J]. Global Change Biology, 1998, 4:

- 773-784.
- [12] 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 Sci. Soc. Am. J., 1987, 51: 1173-1179.
- [13] PARTON W J, RASMUSSEN P E. Long-term effects of crop management in wheat fallow: II. CENTURY model simulations[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1994, 58: 530-536.
- [14] FERNANDES E C M, MOTAVALLI P P, CASTILLA C, *et al.* Management control of soil organic matter dynamics in tropical land-use systems[J]. Geoderma, 1997, 79, 49-67.
- [15] BOLKER B J, PACALA S W, PARTON W J. Linear analysis of soil decomposition: insights from the century model[J]. Ecological Applications, 1998, 8: 425-439.
- [16] PENG C, APPS M J, PRICE D T, *et al.* Simulating carbon dynamics along the boreal forest transect case study (BFTCS) in central Canada model testing[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1998, 12: 381-402.
- [17] KIRSCHBAUM M U F, PAUL K I. Modelling C and N dynamics in forest soils with a modified version of the CENTURY model[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34: 341-354.
- [18] 高崇升, 杨国亭, 王建国, 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.
- GAO C S, YANG G T, WANG J G, *et al.* The changing trend of organic carbon in black soil under different farming systems: a prediction by using century model [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(6): 911-915. (in Chinese)
- [19] 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.
- [20] SMITH P, SMITH J U, POWLSON D S. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments[J]. Geoderma, 1997, 81: 153-225.
- [21] EASTER M, PAUSTIAN K, KILLIAN K, *et al.* The GEF-SOC soil carbon modelling system: a tool for conducting regional-scale soil carbon inventories and assessing the impacts of land use change on soil carbon[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2007, 122: 13-25.
- [22] KAONGA M L, COLEMAN K. Modelling soil organic carbon turnover in improved fallows in eastern Zambia using the RothC-26.3 model[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 256: 1160-1166.
- [23] FRANKO U, CROCKER G J, GRACE P R, *et al.* Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the CANDY model[J]. Geoderma, 1997, 81: 109-120.
- [24] 高鲁鹏, 梁文举, 姜勇, 等. 土壤有机质模型的比较分析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1804-1808.
- GAO L P, LIANG W J, JIANG Y, *et al.* Comparison of soil organic matter models[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(10): 1804-1808. (in Chinese)
- [25] MOLINA J A E, CLAPP C E, SHAFFER M J, *et al.* A model of nitrogen and carbon transformations in soil: description, calibration and behavior[J]. Soil Science Society of America Journal, 1983, 47: 85-91.
- [26] HADAS A, KAUTSKY L, GOEK M, *et al.* Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2004, 36: 255-266.
- [27] HANSEN S, JENSEN H E, NIELSEN N E, *et al.* Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the Danish simulation model DAISY[J]. Fert Research, 1991, 27: 245-259.
- [28] JENSEN L S, MUELLER T, NIELSEN N E, *et al.* Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the soil-plant-atmosphere model DAISY[J]. Geoderma, 1997, 81: 5-28.
- [29] POST J, KRYSANOVA V, SUCKOW F, *et al.* Integrated eco-hydrological modelling of soil organic matter dynamics for the assessment of environmental change impacts in meso-to macro-scale river basins [J]. Ecological Modelling, 2007, 206: 93-109.
- [30] RICHARDS G P. The FullCAM carbon accounting model: development, calibration and implementation for the national carbon accounting system[M]. Canberra: Australia, 2001.
- [31] MAGGI F, GU C, RILEY W J, *et al.* A mechanistic treatment of the dominant soil nitrogen cycling processes: model development, testing, and application[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113: 1-13.
- [32] FINDELING A, GARNIER P, COPPENS F, *et al.* Modelling water, carbon and nitrogen dynamics in soil covered with decomposing mulch[J]. European Journal of Soil Science, 2007, 58: 196-206.
- [33] WATTENBACH M, HATTERMANN F, WENG R, *et al.* A simplified approach to implement forest ecohydrological properties in regional hydrological modelling[J]. Ecological Modelling, 2005, 187: 40-59.
- [34] PENG C, LIU J, DANG Q, *et al.* TRIPLEX: a generic hybrid model for predicting forest growth and carbon and nitrogen dynamics [J]. Ecological Modelling, 2002, 153: 109-130.
- [35] DE WILLIGEN P. Nitrogen turnover in the soil-crop system; comparison of fourteen simulation models[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1991, 27: 141-149.
- [36] RODRIGO A, RECOUS S, NEEL C, *et al.* Modelling temperature and moisture effects on C-N transformations in soils: comparison of nine models[J]. Ecological Modelling, 1997, 102: 325-339.
- [37] PANSU M, BOTTLNER P, SARMIENTO L, *et al.* Comparison of five soil organic matter decomposition models using data from a ^{14}C and ^{15}N labeling field experiment[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2004, 18: 40-54.
- [38] 张凡, 李长生, 王政. 耕作措施对陕西耕作土壤碳储量的影响模拟[J]. 第四纪研究, 2006, 26(6): 1021-1028.
- ZHANG F, LI C S, WANG Z. Modeling the impacts of management alternatives on soil carbon storage of farmland in Shaanxi province [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(6): 1021-1028. (in Chinese)

[39] 刘瑞刚,李娜,苏宏新,等. 北京山区 3 种暖温带森林生态系统未来碳平衡的模拟与分析[J]. 植物生态学报, 2009, 33(3): 516-534.

LIU R G, LI N, SU H X, *et al.* Simulation and analysis on future carbon balance of three deciduous forests in Beijing mountain area, warm temperate zone of China [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2009, 33(3): 516-534. (in Chinese)

[40] 肖向明,王义凤,陈佐忠. 内蒙古锡林河流域草原初级生产力和土壤有机质的动态及其对气候变化的反映[J]. 植物学报, 1996, 38(1): 45-52.

XIAO X M, WANG Y F, CHEN Z Z. Dynamics of primary productivity and soil organic matter of typical steppe in the Xilin river basin of inner Mongolia and their response to climate change[J]. Acta Botanica Sinica, 1996, 38(1): 45-52. (in Chinese)

[41] 李凌浩,刘先华,陈佐忠. 内蒙古锡林河流域羊草草原生态系统碳素循环研究[J]. 植物学报,1998, 40(10): 955-961.

LI L H, LIU X H, CHEN Z Z. Study on the carbon cycle of leymus chinensis steppe in the Xilin river basin[J]. Acta Botanica Sinica, 1998, 40(10): 955-961. (in Chinese)

[42] 黄忠良. 运用 Century 模型模拟管理对鼎湖山森林生产力的影响[J]. 植物生态学报,2000, 24(2): 175-179.

HUANG Z L. Application of a century model to management effects in the productivity of forests in Dinghushan[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2000, 24(2): 175-179. (in Chinese)

[43] 蒋延玲,周广胜. 兴安落叶松林碳平衡及管理活动影响研究[J]. 应用生态学报,2001, 12(4): 481- 484.

JIANG Y L, ZHOU G S. Carbon equilibrium in *Larix gmelinii* forest and impact of global change on it [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4): 481-484. (in Chinese)

[44] 申卫军,彭少麟,邬建国,等. 南亚热带鹤山主要人工林生态系统 C、N 累积及分配格局的模拟研究[J]. 植物生态学报, 2003, 27(5): 690-69.

SHEN W J, PENG S L, WU J G, *et al.* Simulation studies on carbon and nitrogen accumulation and its allocation pattern in forest ecosystems of Heshan in low subtropical China[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2003, 27(5): 690-69. (in Chinese)

[45] 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[J]. 应用生态学报,2004, 15(5): 36-40.

GAO L P, LIANG W J, JIANG Y, *et al.* Dynamics of organic C in black soil of Northeast China, simulated by CENTURY model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(5): 36- 40. (in Chinese)

[46] GISJMAN A, AOBERSON J, TIESELLE H, *et al.* Limited applicability of the CENTURY model to highly weathered tropical soils[J]. Agronomy Journal, 1996(88): 894-903.

[47] PAUSTIAN K, ANDREN O, JANZEN H, *et al.* Agricultural soils as a C sink to offset CO₂ emissions[J]. Soil Use and Management, 1997, 13: 230-244.

[48] KELLY R H, PATON W J, CROCKER G J, *et al.* Simulating trends in soil organic carbon in Long-term experiments using the CENTURY model[J]. Geoderma, 1997,81: 75-90.

(上接第 37 页)

[25] 何东进,洪滔,胡海清,等. 武夷山风景名胜区不同森林景观物种多样性特征研究[J]. 中国生态农业学报,2007,15(2):9-13.

HE D J, HONG T, HU H Q, *et al.* Species diversity in different forest landscapes in the Wuyishan scenery district[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(2): 9-13. (in Chinese)

[26] 奇凯,张春雨,侯继华,等. 赤峰市沙地油松林草本植物多样性及种间关联动态[J]. 生态学报,2010,30(18):5106-5112.

QI K, ZHANG C Y, HOU J H, *et al.* Dynamics of species diversity and interspecific associations of herbaceous plants in a *Pinus tabulaeformis* forest on a sandy site in Chifeng, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(18): 5106-5112. (in Chinese)

[27] 郝占庆,陶大立,赵士洞. 长白山北坡阔叶红松林及其次生白桦林高等植物物种多样性比较[J]. 应用生态学报,1994,5(1):16-23.

HAO Z Q,TAO D L,ZHAO S D. Diversity of higher plants in broad - leaved korean pine and secondary birch forests on northern slope or Changbai mountain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,1994,5(1):16-23. (in Chinese)

[28] 谢晋阳,陈灵芝. 暖温带落叶阔叶林的物种多样性特征[J]. 生态学报,1994,14(4):337-344.

XIE J Y, CHEN L Z. Species diversity characteristics of deciduous forests in the warm temperate zone of north China [J]. Acta Ecologica Sinica, 1994, 14(4): 377-344. (in Chinese)

[29] 黄建辉,陈灵芝. 北京东灵山地区森林植被的物种多样性分析[J]. 植物学报,1994,36(增刊):178-186.

[30] 谢正生,古炎坤,陈北光,等. 南岭国家级自然保护区森林群落物种多样性分析[J]. 华南农业大学学报,1998,19(3):61-66.

XIE Z S, GU Y K, CHEN B G, *et al.* Species diversity of the natural forest communities in Nanling National Nature Reserve,Guangdong[J]. Journal of South China Agricultural University,1998,19(3):61-66. (in Chinese)

[31] 樊后保. 福建三明格氏栲群落的结构特征[J]. 福建林学院学报,1996,16(1):14-19.

FAN H B. Structure features of *Castanopsis kawakamii* community in Sanming, Fujian[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 1996,16(1):14-19. (in Chinese)

[32] 贺金生,陈伟烈,李凌浩. 中国中亚热带东部常绿阔叶林主要类型的群落多样性特征[J]. 植物生态学报,1998,22(4):303-311.

HE J S, CHEN W L, LI L H. Community diversity of the main types of the evergreen broad leaved forest in the eastern part of the middle subtropical China[J]. Acta Phytocologica Sinica,1998,22(4):303-311. (in Chinese)