第 28 卷 第 2 期
Vol. 28, No. 2

草 业 学 报
ACTA PRATACULTURAE SINICA

179－189
2019 年 2 月

DOI: 10.11686/cyxb2018126 http://cyxb.magtech.com.cn

王旭洋，李玉强，连杰，等. CENTURY 模型在不同生态系统的土壤有机碳动态预测研究进展. 草业学报，2019，28(2)：179－189.

Wang X Y, Li Y Q, Lian J, *et al*. Progress in application of the CENTURY model for prediction of soil carbon levels in different ecosystems. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(2): 179－189.

CENTURY 模型在不同生态系统的土壤有机碳动态预测研究进展

王旭洋[1,2]，李玉强[1*]，连杰[1]，罗永清[1]，牛亚毅[1,2]，龚相文[1,2]

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院，甘肃 兰州 730000；2. 中国科学院大学，北京 100049)

摘要：CENTURY 模型是国际上著名的生物地球化学模型之一。本研究系统介绍了 CENTURY 模型的运行机理及过程，分析和总结该模型在草地、农田、森林生态系统中土壤有机碳(SOC)的研究成果，并归纳了影响其模拟精度的主要因素。结果表明，土壤质地和土壤养分是影响 CENTURY 模型在草地生态系统应用的关键因素，且该模型在荒漠草原生态系统的适应性较高；不同农业管理模式是影响 SOC 模拟精度的因素之一，间作农业模式下模拟 SOC 的精度较高；CENTURY 模拟森林生态系统的枯枝落叶层的有机质时存在结构缺陷，这导致 CENTURY 模型在草地和农田系统的模拟效果优于森林生态系统。由于 CENTURY 模型最初是基于草地生态系统而开发，其模型参数在不同地域的草地生态系统的普适性较高；过多的人为干预增加了 CENTURY 模型在农田生态系统模拟的不确定性，从而会出现模拟结果不稳定的现象；通过调查掌握详细的农田历史管理制度和方式，准确控制模拟进程，可以有效提高模拟精度；森林生态系统的模拟结果可以服务于管理措施的制定，CENTURY 模型结合 GIS 可以实现单点模拟向区域模拟的转变。

关键词：CENTURY 模型；土壤有机碳；生态系统

*Progress in application of the CENTURY model for prediction of soil carbon levels in different ecosystems

WANG Xu-yang[1,2], LI Yu-qiang[1*], LIAN Jie[1], LUO Yong-qing[1], NIU Ya-yi[1,2], GONG Xiang-wen[1,2]

1. *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *China*; 2. *University of Chinese Academy of Science, Beijing* 100049, *China*

Abstract: The CENTURY model, designed to predict soil C, N, P, and S dynamics in a range of ecosystems, is one of the most famous biogeochemical models in the world. The research reported here systematically examines the operating mechanisms and processes of the CENTURY model, and research data on results of soil organic carbon were analyzed and collated for grassland, farmland and forest ecosystems using this model. It was found that soil texture and soil nutrient levels are key factors influencing the application of the CENTURY model in grassland ecosystems, and that the model has high predictive accuracy in desert grassland. Agricultural management is one of the factors most strongly affecting soil organic carbon (SOC) simulation accuracy. The SOC simulation accuracy was higher in intercrop systems than in monocrop scenarios. CENTURY had structural defects in simulating soil organic matter in the litter layer of forest ecosystems; hence the CENTURY model

* 收稿日期：2018-03-07；改回日期：2018-06-25

基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFA0604803)，中国科学院百人计划项目(Y551821)和国家自然科学基金项目(31640012，31560161和 31260089)资助。

作者简介：王旭洋(1990-)，男，甘肃天水人，在读博士。E-mail: xuyangwang221@126.com

*通信作者 Corresponding author. E-mail: liyq@lzb.ac.cn

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

performs better in the simulation of grassland and farmland systems than when simulating forest ecosystems. Since the CENTURY model was originally developed for work on grassland ecosystems, its model parameters are more universally applicable to grassland ecosystems in different regions. Excessive human intervention would increase the uncertainty factor in CENTURY modeling of agro-ecosystems, potentially resulting in instable simulation results. The simulation accuracy could be substantially improved through collecting data on and accurately accounting for historical farm system and management methodologies practiced, when performing the simulation. The simulation results for forest ecosystems can be used for the formulation of management measures. In addition, scaling up from single-point simulation to the regional level could be achieved by the integration of CENTURY model results into a GIS approach.

Key words: CENTURY model; soil organic carbon; ecosystem

土壤碳库是陆地生态系统最大及最活跃的碳库[1]，全球陆地生态系统土壤有机碳储量约为 1550 Gt，约占陆地总碳储量(2500 Gt)的 60%[2]。土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)库的容量如此之大，使得其较小幅度的变化都会对全球碳循环产生巨大的影响[3-4]。土地利用方式的改变会引起土壤碳储量发生变化[5]，自然生态系统退化和农田开垦均会使 SOC 储量下降[6-9]，如自然生态系统开垦为农田会导致温带地区 SOC 减少 60%，热带地区 SOC 减少 75%以上[2]。通过植树种草，实施保护性耕作，及其他有效遏制土壤退化的措施可以显著提高 SOC 截存量[10-14]，因此在人类经营管理和环境变化驱动力下评价生态系统的碳收支，并预测未来 SOC 储量的变化趋势显得尤为重要。目前的研究方法主要包括野外定位试验和模型预测两种类型，其中野外定位试验对 SOC 动态演变的监测时空范围十分有限，另外基于有限的试验站点，试验数据在时间和空间上难以连续，观测研究并不能反映 SOC 长时间序列上的变化特征，进而无法对其进行有效分析、形成规律性的认识[15]。模型可以基于详实的参数资料模拟过去长时间序列的 SOC 动态变化并预测其未来变化趋势，在全球气候变化背景下，面对碳循环过程及各碳库之间的碳通量和反馈机制的复杂性来定量预测陆地生态系统 SOC 的时空演替，因此，运用模型进行相关研究是切实可行的方法[16]。CENTURY 模型是表征土壤有机质(soil organic matter, SOM)动态应用比较广泛的模型之一，多年有关 CENTURY 的研究充分证明该模型的实践性和预测结果的合理性[17-24]，但目前关于 CENTURY 模型的运行机理、存在问题及相关研究的分析总结相对较少，从而影响研究人员对该模型的认知。因此，通过系统介绍 CENTURY 模型及相关研究进展，旨在为不同研究者使用该模型时提供参考。

1 CENTURY 模型

1.1 CENTURY 模型概述

CENTURY 模型最早是由美国科罗拉多州立大学的 Parton 等[25]建立，是包含植物－土壤营养循环的综合模型。起初主要用于模拟草地生态系统的植物生产力，土壤有机质动态变化，营养循环及土壤水分通量等，改进之后广泛应用于农田、森林生态系统及亚热带稀树草原的土壤有机质长期变化及植物的生长[26-27]。该模型通过碳、氮、磷、硫的循环来实现生态系统相关性能的模拟[28-31]，着眼于气候变化及人类干扰对各生态系统中生产力、碳和氮等物质循环以及水循环的影响，主要由土壤碳循环、水分及土壤温度、氮磷硫循环以及植物生产力几个子模型组成，其中植物生产力子模型又包括草原/作物、森林及热带稀树大草原 3 种形式。

CENTURY 模型对生态系统物质循环的模拟是通过其内部土壤水分和温度子模型、植物生产力子模型及 SOM 子模型的耦合来实现的。如图 1 所示，土壤水分和温度子模型可以实现水分在生态系统中的平衡分配并模拟出土壤有效持水量和温度，该水热条件影响有机质分解率并结合 SOM 子模型计算不同 SOM 库中 N、P、S 矿化及分配率。SOM 子模型将计算结果输入植物生产力子模型，此时植物的生长状况由土壤养分(N、P、S)含量及水热条件来决定。植物生长季结束后，植物残体根据不同水热条件的影响被分配到不同的 SOM 库，主要包括活性库(active SOM)、缓慢库(slow SOM)和惰性库(passive SOM)，然后再次进入有机质子模型计算阶段，此时 CENTURY 模型完成一个生长季的物质循环计算并进入下一轮生长季的计算过程。在这 3 大子模型耦合过程中，还考虑了灌溉、放牧、火烧、施肥、耕作、收获、空气 CO_2 浓度变化等因素。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

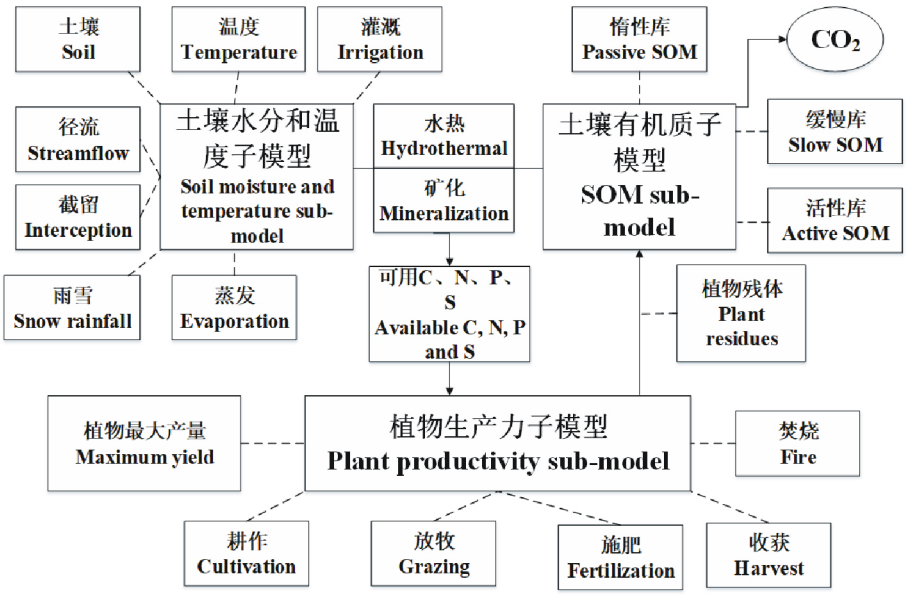

图 1　土壤水分和温度子模型、植物生产力子模型及 SOM 子模型耦合示意图[32]

Fig. 1　Soil moisture and temperature sub-model, plant productivity sub-model and SOM sub-model coupling diagram

1.2　CENTURY 子模型描述

1.2.1　土壤水分和温度子模型　土壤水分和温度子模型以年为周期在模拟开始之前，首先计算出不同土层(1～4 各层厚度为 15 cm，5 层以下厚度为 30 cm)之前年份的水分结余，同时在灌溉和降水条件下，需除去水分流失部分(地表径流、植被冠层截留和裸土蒸发)，将剩余水分输入表层土壤(0～15 cm)。然后 CENTURY 模型根据各土层田间持水量计算对应土层的土壤饱和水势，达到土壤饱和水势后，剩余水分将渗入下一层土壤中，以此类推，当最底层土壤达到饱和水势后，剩余水分将汇入地下水，在整个水分渗透过程中伴随着矿物质营养的转移。

1.2.2　植物生产力子模型　模型首先根据水热条件参数估算植物每月的潜在生物量并计算营养物质(N、P、S)需求量，然后将该需求量与土壤可用营养物质含量进行比较，若需求量小于土壤可用营养物质含量，植物生长将达到潜在生物量，反之植物生长会受到营养物质胁迫导致生物量减小。在植物生长模拟过程中，通过对根部碳含量的动态分配，植物体被分为地上和地下两部分，同时，植物死亡残体将选择性的被分配至各物质等级库[32]。

1.2.3　SOM 子模型机理描述　植物残体分解后向土壤释放的养分是植物维持自身生长所需养分的主要来源之一[33]，植物残体中的木质素难以被微生物降解[34]，如图 2 所示，进入土壤的植物凋落物按照其木质素含量采用多分室建模，理论划分为结构库(STRUCT.)和代谢库(METAB.)，结构库主要包括植物残体中木质素含量较高的植物组织(如枝条，死亡主根)，其包含了全部的植物木质素；代谢库主要包括易于分解的植物残体(如叶片，毛细根等)。最终植物残体在结构库与代谢库之间的分配是由 N 含量与木质素的比值决定的，输入结构库的植物残体比例随着木质素与 N 含量的比值增大而增大[23]。SOM 根据不同的潜在分解速率将其分为活性库、缓慢库、惰性库[26]，其中，活性库主要由活的微生物及它的代谢产物组成，周转时间从数月到数年不等，土壤质地影响了活性 SOM 的周转速率(沙土较快)及活性 SOM 向缓慢 SOM 转化的稳定速率(粘土较高)；缓慢 SOM 包括不易分解的土壤有机物质(来自结构库)和土壤固定的微生物产物(来自活性库以及表层微生物库)，周转时间受气候条件的影响而有所差异，为 20～50 年；惰性 SOM 是土壤中极难分解的部分，周转时间为 400～2000 年。微生物呼吸作用产生的 CO_2 被认为可以调节 SOM 和植物残体的分解速率，活性库的有机质分解产物以 CO_2 的形式散失，随着土壤砂粒含量增高而变大。分解产物根据其最大分解速率的大小进入表层微生物库或 3 大有机质库之一。土壤水分和土壤温度的倍增作用降低了潜在的分解速率，同时潜在分解速率可能由于耕作的影响而增大。植物体中的木质素未经过土壤表层微生物库和活性库，而是直接输入缓慢库中。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

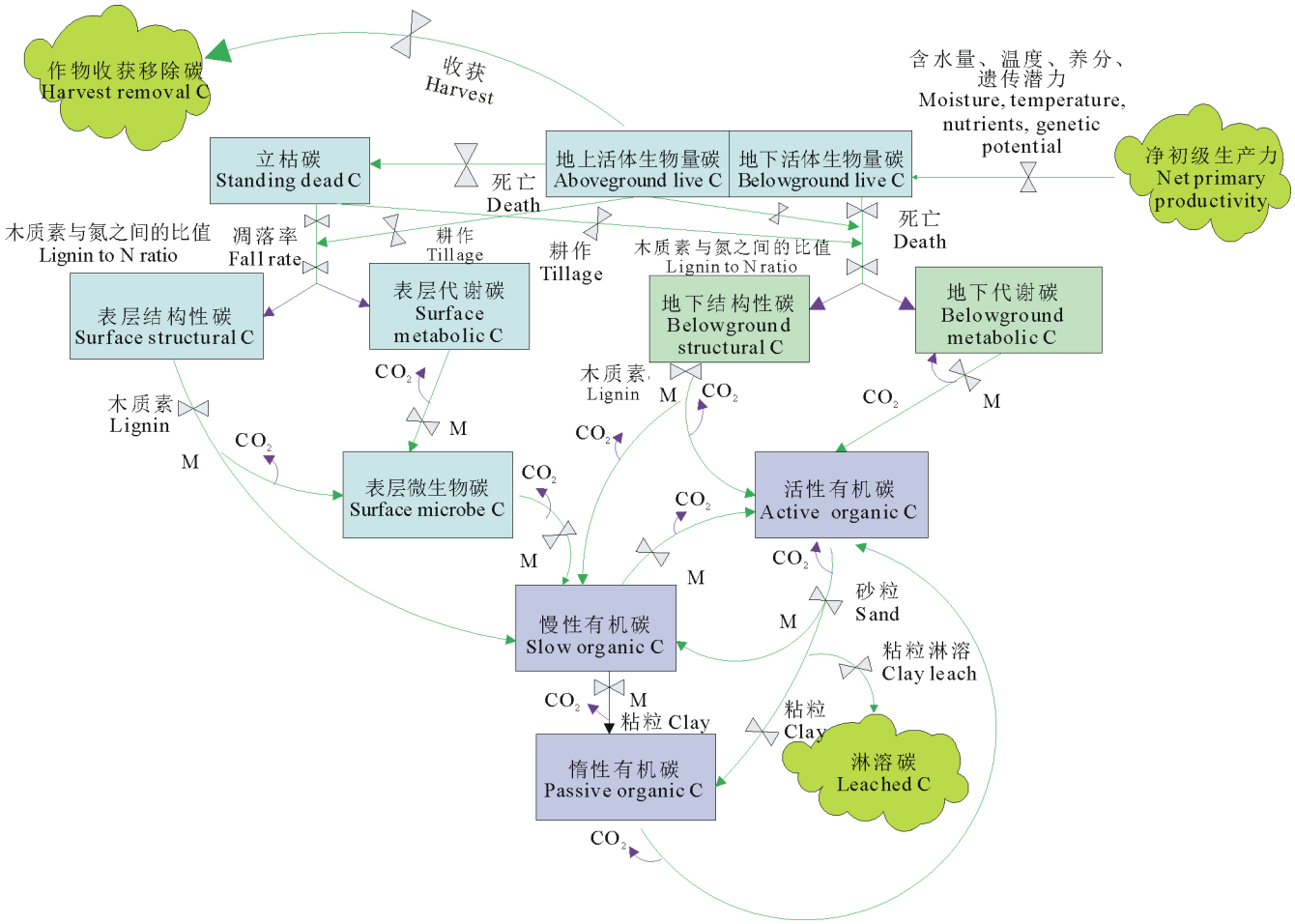

图 2 SOM 循环流程图[35]

Fig. 2 SOM cycle flow chart

1.3 CENTURY 模型运行

CENTURY 模型以月或年为时间步长，可在基于 Access 数据库的窗口模式和 DOS 提示符下运行。最常用的 DOS 版本包括 3 个独立的可执行程序：file100、event100 和 list100，file100 可调用或者修改 12 个输入文件的参数，输入文件分别为站点信息(site. 100)、气象数据(. wth)、植被参数(crop. 100)、耕作(cult. 100)、施肥(fert. 100)、火烧(fire. 100)、放牧(graz. 100)、收获(harv. 100)、灌溉(irri. 100)和有机质添加(omad. 100)，主要输入参数包括月最高、最低气温(℃)、月降水量(cm)、土壤质地(砂粒、粉粒、黏粒含量)、土壤含水量、土壤萎蔫系数、pH、作物最高和最适生长温度(℃)等[25,27]；event100 确定模拟事件的起止时间，并安排事件发生的先后顺序生成相应的管理文件(. sch)，模型运行成功之后生成二进制(. bin)文件，最后用 list100 将二进制的输出结果转化为可读的十六进制文件。

2 CENTURY 模型在不同生态系统中 SOC 动态预测的应用

2.1 CENTURY 模型在草地生态系统中的应用

模型研发者在模型应用之初基于俄罗斯 Kursk 地区的草甸草原开展了校准和验证试验，起初由于 Parton 等[36]忽视了植物物种随着时间的推移而发生的变化，导致生物量预测结果较差($R^2=0.45$)。为了解决这一问题，Gilmanov 等[37]通过修改 7 个关键参数来提高模型预测的准确性，模型改进之后植物生物量预测能力得到提高($R^2=0.67$)。这也是 CENTURY 模型发展至今仍存在的“Fix. 100”文件的由来，在 CENTURY 4.0 版本之后，这些参数均被并入 Site 文件中。此外，该模型的模拟精度会受 SOC 测定方法的影响，Mikhailova 等[38]在 Kursk 以天然草地的 SOC 实测值作为连续 50 年休耕地的 SOC 初始值，模拟草地转换为农田之后 SOC 的动态

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

变化过程，结果发现干式燃烧法测定的 SOC 比重铬酸钾氧化法的测定值更加接近模拟值，模拟草地转换为农田时土壤容重需要同步进行更改才能提高模拟精度。由此可见，20 世纪 80～90 年代，外国学者在草地试验点开展的模拟研究主要是为了完善和验证模型，这也为 CENTURY 模型的应用推广建立了夯实的基础。模型改进之后草地生态系统 SOC 的模拟精度得到了较大改善，Parton 等[26]在北美大草原模拟了不同气温对 SOM 的影响，发现模型能够准确预测土壤碳、氮含量，但对于质地较细的土壤碳、氮含量预测会偏高 10%～15%。Bandaranayake 等[39]模拟天然草地转变为高尔夫平草坪之后，起初表现为碳源，之后呈碳汇，并预测 30 年后土壤表层(0～20 cm)有机碳截存量为 23～32 mg C·hm^{-2}，模型对样点位置和土壤质地影响较为敏感。CENTURY 模型对于特殊的土壤和植物残体模拟效果并不理想，Foereid 等[40]在苏格兰模拟长时间序列上 4 种不同放牧方式的草地土壤碳、氮含量存在明显差异，根据 12 年的土壤碳、氮连续观测数据与模拟值相差较大，归结原因应该是当地土壤中含有大量未分解的有机质，以及分解缓慢的凋落物。Gijsman 等[41]在哥伦比亚农田系统和疏林草地生态系统运用 CENTURY 模型模拟 SOM 时，发现模型的 SOM 理论不适用于当地的植物残体分解，模型对高度风化的低磷土壤的适用性较低，模型参数化时可能需要使用与原始版本不同的磷组份含量，可见，除受 SOC 测定方法的影响外，土壤质地和土壤养分亦是影响 CENTURY 模型在草地生态系统应用的关键因素。

CENTURY 模型是基于点尺度模拟的生物地球化学模型，单点模拟形式显然难以满足较大区域尺度的研究需求[42-45]。我国关于 CENTURY 在草地生态系统的应用起步较晚，此时经过完善后的模型理论和技术的应用相对更加成熟，国内学者结合多种方法取得了不错的模拟效果。研究者通常依据《地理信息元数据》的标准来定义 CENTURY 模型参数的元数据，对模型参数进行栅格化处理，把 CENTURY 模型与 ArcGIS 耦合，这是区域尺度模拟的新思路[42]。郭灵辉等[43]运用了这种模型空间化的方法，通过编译程序逐个格点调用 CENTURY 模型主程序对内蒙古草地 1981－2010 年的植被净初级生产力(net primary productivity，NPP)进行模拟并分析其对气候变化的响应机制，发现降水是 1981－2010 年草地 NPP 下降的主要因素，在此研究基础上，2011－2050 年内蒙古草地 NPP 的模拟结果表明未来气温是影响草地生产力的主导因素，这与之前(1981－2010 年)研究结果不同，主要原因是 3 种草原 NPP 对降水敏感程度依次为：典型草原＞荒漠草原＞草甸草原，荒漠草原 NPP 受温度影响最大，而不同时间段内草原面积也会发生变化[44]。李秋月[45]将 CENTURY 模型空间化之后模拟 1961－2010 年土壤表层(0～20 cm)SOC 动态变化，模拟值与观测值的线性回归决定系数 R^2 达到 0.89，可见经过本地化后的 CENTURY 模型可以用于内蒙古地区草地生态系统的模拟研究和空间化，模拟结果具有一定的稳定性。基于内蒙古草地生态系统观测站点对 CENTURY 模型适应性进行评价的研究颇多，陈辰等[46]用内蒙古 4 种主要草地类型(草甸草原、典型草原、荒漠草原及草原化荒漠)试验站点的生物量观测数据，对 CENTURY 模型进行校准和验证，结果表明 CENTURY 模型在荒漠草原的适应性最高($R^2=0.65$)。张存厚等[47]在四子王旗生态气象观测站的研究结果表明 CENTURY 模型能够成功模拟荒漠草原的季节动态和年际变化，生长季内每月地上生物量模拟值与观测值之间具有较好的相关性($R^2=0.66$)。莫志鸿等[48]以 50 年(1961－2010 年)的气象资料数据作为 CENTURY 模型的输入参数，模拟了 4 种主要的草原生态系统(温性草原、温性草甸草原、温性荒漠、高寒草甸)的地上净初级生产力(above net primary productivity，ANPP)，不同草原生态系统 ANPP 模拟值与实测值的线性回归系数依次为：温性荒漠 (0.44)＞温性草甸草原 (0.41)＞高寒草甸 (0.39)＞温性草原 (0.32)。肖向明等[49]利用 CENTURY 模型模拟了锡林河流域大针茅(*Stipa grandis*)草原和羊草(*Leymus chinensis*)草原 10 年(1980－1989 年)的 SOC 变化特征，在羊草样地 0～20 cm 土层，SOC 密度模拟值 (4691～4758 g·m^{-2}) 比观测值 (5405～5683 g·m^{-2}) 低 13%～18%。CENTURY 模型在内蒙古草地生态系统基于点尺度和区域尺度的适应性较高，可以模拟多种草原类型 NPP 和 SOC 的动态变化过程。针对青藏高原地区高寒草甸土壤模拟研究不足的情况，李东[50]在海北研究站验证了 CO_2 通量观测数据与模拟值的相关性显著($R^2=0.89$，$P<0.01$)，在这基础上分析了 1960－2005 年气候波动对高寒草甸 SOC 动态变化的影响，并模拟了 45 年后不同放牧强度的 SOC 含量变化特征。综上，CENTURY 模型在不同草地生态系统的模拟精度差异较大，在荒漠草原生态系统的适应性较高。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.2 CENTURY 模型在农田生态系统中的应用

CENTURY 模型在农田生态系统进行模拟的初始地面景观多数为天然草地，以天然草地所在位置的土壤属性数据作为站点信息的输入值，用现有的气象累年月均值驱动模型运行千年达到有机质平衡状态，以天然草地平衡状态下的 SOC 作为农田模拟的 SOC 初始值，模拟单作、间作、休耕等不同农业管理模式下 SOC 变化特征，Parton 等[25]用 CENTURY 模型模拟了小麦(*Triticum aestivum*)连作农业管理模式下，土壤碳、氮含量的模拟值与实测值相差不到 5%，另外 1931－1986 年的实测和模拟数据均表明采用秋收之后火烧麦茬不利于土壤有机碳的积累；土壤有机碳变化与地上碳输入存在线性关系，当地上碳输入量为 200 g C·m^{-2}·yr^{-1}时，土壤有机碳含量可以保持稳定。Oelbermann 等[51]模拟了间作(玉米和大豆)和单作(玉米或大豆)农业管理模式下 SOC 动态特征，模拟值与实测值之间的 R^2 大小依次为：1∶2 谷类和豆类间作(0.97)＞2∶3 谷类和豆类间作(0.89)＞大豆(*Glycine max*)单作 (0.69)＞玉米(*Zea mays*)单作(0.68)，CENTURY 模型在间作农业模式下模拟 SOC 的精度更高。Leite 等[52]模拟了淋溶土在不同耕作模式下 SOC 的变化特征，结果发现只有在免耕条件下 SOC 储量有恢复的趋势，而且不同碳库的模拟值与实测值之间的回归系数各异，在总碳库、活性库、缓慢库和惰性库的回归系数依次为 0.91，0.64，0.48 和 0.90，该模型可以较好地模拟淋溶土的总碳库和惰性库的 SOC 变化。Musinguzi 等[53]基于两个研究站 Kenya(1976－1996 年的玉米和大豆间作农业)，Kiboga-Uganda(1980－2010 年玉米)的 SOC 数据验证 CENTURY 模型的精确性(R^2 均大于 0.90)，并成功预测了单作玉米持续耕作不施肥时 2010－2060 年 SOC 每年减少 849 kg C·hm^{-2}·yr^{-1}。Gupta 等[54]在喜马拉雅山中部选取了 6 个典型的农业生态系统站点，2011 年的 SOC 实测数据与模拟值之间的相关系数为 0.95，在此基础上预测 2011－2099 年间不同气候模式下各站点 SOC 储量的变化特征存在明显差异。Tornquist 等[23]用 CENTURY 模型模拟巴西南部农田 1993－2050 年 SOC 的动态变化，1990 年前植被覆盖的原始景观为亚热带森林和天然草地，土壤质地较细的林地 SOC 模拟值与实测值相吻合，而原始景观为草地的 SOC 模拟精度不够，在 1993－2050 年间亚热带森林开垦为农田之后 SOC 储量下降了 44%～50%，天然草地变为农田之后 SOC 储量下降了 20%～27%。

国内关于 CENTURY 模型最初的应用区域集中在我国东北地区，土壤类型主要为黑土。东北地区是我国重要的产量基地，国内学者在东北地区农田系统用 CENTURY 模型开展了大量研究，高鲁鹏等[55]模拟了自然状态下黑土 0～20 cm 的 SOC 密度经过 5000 年的累积最后稳定在 7.9～11.7 kg·m^{-2}之间，SOM 缓慢库和惰性库是影响 SOC 积累过程的决定性因素，这与 Oelbermann 等[51]的研究结果一致。方华军等[56]在典型黑土漫岗坡耕地利用 CENTURY 模拟侵蚀区开垦后 SOC 以及各组分随时间的变化，结果表明土壤侵蚀明显降低惰性有机碳含量，其贡献率随侵蚀速率的增加而增大，另外，在不考虑泥沙富集作用时 SOC 的模拟值与实测值的 R^2 为 0.83，在调整泥沙侵蚀参数之后模拟值与实测值的 R^2 增加为 0.91，在考虑泥沙富集作用后 CENTURY 模型模拟值与实测值更加接近。高崇升等[57]对 4 种农业经营模式下黑土农田的 SOC 变化进行了比较与预测，CENTURY 模型预测结果表明 2006－2105 年移耕农业模式下 SOC 下降最快(0.063 g·kg^{-1}·yr^{-1})，有机和无机农业结合模式使 SOC 下降趋势得到控制，基本处于平衡状态，有机和无机农业结合模式 SOC 模拟精度最高。不同农业管理模式是影响 SOC 模拟精度的主要因素，间作农业模式下模拟 SOC 的精度较高。此外，为提高 SOC 模拟精度，在土壤侵蚀区应用 CENTURY 模型时需考虑泥沙富集作用。

随着 CENTURY 模型在我国应用和发展不断成熟，部分学者用 CENTURY 模型结合 GIS 和其他模型在不同地区开展了研究，模拟的尺度由局地至省域，甚至全国的农田生态系统。Wang 等[58]用 1∶500 万土壤数据库与 CENTURY 模型耦合的方法估算了安徽省干旱农田 SOC 密度从 18.77 mg C·hm^{-2}(1980 年)增加到 23.99 mg C·hm^{-2}(2008 年)，年平均碳截存速率为 0.18 mg C·hm^{-2}·yr^{-1}。邓祥征等[59]用 CGELUC 模型模拟的农业生产与农田管理数据作为 CENTURY 模型的输入参数，结合土地动态模拟系统(DLS)模拟的 2012 与 2020 年全国栅格尺度的耕地分布数据，分析得出 1988－2000 年我国大部分农田 SOC 储量呈增加趋势，总增加量为 3.3×10^8 t，2000－2012 年我国农田 SOC 储量共减少 1.5×10^9 t，2012－2020 年减少趋势变缓。许文强等[60]将 CENTURY 模型应用于干旱区典型的三工河流域下部的人工绿洲，SOC 模拟值与实测值的拟合关系较好($R^2=0.87$)，满足模拟精度要求，荒漠灌木林地被开垦为人工绿洲后的 50 年，土壤有机总碳呈先增后减的趋势，土壤有

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

机碳高于原始状态的值，总体呈“碳汇”趋势。

整体来看，CENTURY 模型在农田生态系统的模拟取得了较好的效果，可以为农业生产实践提供建设性的建议。但也存在个别地区模拟精度不够的问题，究其原因主要是由于过多的人为干预（耕作、施肥、灌溉等）增加了农田生态系统情景模拟过程的不可控性，如果不能掌握详细的农田历史管理制度和方式，就不能准确控制模拟进程，农田生态系统的模拟结果无疑会产生较大偏差。

2.3　CENTURY 模型在森林生态系统中的应用

森林生态系统包括以木本植物为主的全部有机体和周围的非生物部分[61]，复杂的生态结构制约了很多模型在森林生态系统的应用，而 CENTURY 模型根据碳和营养元素含量将树木细化为叶、细根、细枝、木材、粗根，且为幼林和成熟林提供了不同的碳分配机制，这也同样适用于落叶林和常绿林。CENTURY 模型在森林生态系统应用相对较晚，Cep 等[19]用 CENTURY 模型在巴西亚马逊地区的模拟结果表明微生物生物量碳与实测值的模拟精度（$r=0.78$）高于土壤总碳的模拟精度（$r=0.66$）。热带雨林转化为草原初期土壤碳储量呈下降趋势，此后缓慢上升并超过热带雨林土壤初始碳储量[62]。为了使模型输出结果与已有的研究结果相匹配，Muf 等[29]对 CENTURY 有机质模型进行了必要的修改，模拟了森林凋落物的分解及土壤氮矿化过程，并阐明了初始木质素和氮含量对凋落物分解的影响，模型也能成功模拟天然、灌溉、施肥 3 种不同管理模式下森林土壤净氮矿化作用。Kelly 等[63]研究指出利用 CENTURY 模拟森林生态系统的枯枝落叶层的 SOM 时存在结构缺陷，这导致 CENTURY 模型在森林生态系统的模拟效果不及农田和草地生态系统的模拟效果。

CENTURY 模型在国内的应用大多旨在探寻合理的森林管理措施，不同学者先后在大兴安岭运用 CENTURY 模型展开研究，方东明等[64]以大兴安岭地区的兴安落叶松（*Larix gmelinii*）森林生态系统为研究对象，基于 4 个火烧强度（轻微、低、中和高强度），模拟不同火烧强度对土壤碳收支的影响，结果表明，SOC 密度的模拟值（8203.78 $g \cdot m^{-2}$）与实测值（8244.23 $g \cdot m^{-2}$）较为接近，火烧后土壤碳库呈先升后降再逐渐恢复的变化趋势，而林分生物碳库则先降后升，较低强度的火烧对落叶森林的更新起到正向的促进作用，对林分碳汇功能影响不大，而高强度的火烧会对林分和土壤碳库造成巨大损失，也不利于森林恢复。林永标等[65]利用 CENTURY 模型模拟了 3 种人工林生态系统 1985－2100 年的 C、N 累积动态及其分配格局变化，发现该模型可以成功模拟森林生态系统对环境因子变化的响应。蒋延玲等[66]通过比较生物量和土壤碳的模拟值与实测值证明，CENTURY 模型能够准确地模拟兴安落叶松森林生态系统碳循环过程，温度是大兴安岭地区森林生长的主要限制因子。黄忠良[62]根据广东省针对马尾松林的 4 种管理措施，运用 CENTURY 模型对 130 年各阶段的 SOM、N 含量以及生产力进行了模拟预测，结果表明不同的管理措施对马尾松（*Pinus massoniana*）森林生产力的影响很大，过多地去生物量使得生产力下降更加明显，说明砍伐林下层植物对森林生产力的可持续发展不利。

3　存在问题及展望

总体而言，CENTURY 模型在草地和农田生态系统的模拟效果要优于森林生态系统，但也存在个别试验点模拟精度不够的问题。就研究区域而言，CENTURY 模型在我国草地、农田、森林生态系统的应用分别集中在内蒙古地区、东北黑土区、大兴安岭，单一的模拟区域限制了 CENTURY 模型在国内的应用和发展，今后的研究可以考虑将该模型拓展到更大的典型研究区域。

在草地生态系统，SOC 的模拟精度会受测定方法、土壤质地和土壤养分的影响。CENTURY 模型是基于点尺度的模型，模拟的实现是建立在模拟区域范围内的物种具有“均一性”这一假设成立的基础上，而自然界很少有单一物种组成的生态系统，这就限制了 CENTURY 模型在区域尺度上的应用；模型运行时需要用户手动控制每个点位的模拟进程，这种模式显然不能满足较大区域尺度的研究需求，GIS 具有强大的空间分析及二次开发功能的技术优势，可运用 GIS 技术将模型输入参数栅格化，在每个格点调用 CENTURY 模型运行程序，可见，CENTURY 模型结合 GIS 技术可以实现单点模拟向区域模拟的转变。

在农田生态系统中，不同农业管理模式是影响 SOC 模拟精度的主要因素，运用模型模拟土地利用情景过程需要输入大量的参数，相关研究大多采用试验站长期观测数据，但有限的观测数据会影响模拟结果的精确性，尤

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

其在空间异质性较大的研究区域。为提高 SOC 模拟精度，需要通过走访调查，查阅资料数据，确定长时间序列上的土地利用历史和施肥、耕作、收获等人为管理方式，且在土壤侵蚀区应用 CENTURY 模型时需考虑泥沙富集作用。

运用 CENTURY 模型预测草地和农田生态系统 SOM 动态，植被生产力变化特征引入了情景预测分析，通过土地利用模型、气候预测模型与 CENTURY 模型的耦合进行了更加合理地预测，在森林生态系统的模拟预测可以借鉴这一方法，从而为制定合理适宜的森林管理方式提供理论依据和数据支持。

参考文献 References:

[1] Janzen H H. Carbon cycling in earth systems－A soil science perspective. Agriculture Ecosystems and Environment, 2004, 104(3): 399－417.

[2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science, 2004, 304(5677): 1623－1627.

[3] Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, *et al*. The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system. Science, 2000, 290(5490): 291.

[4] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO_2 emissions from soil in response to global warming. Nature, 1991, 351(6324): 304－306.

[5] Watson R T, Noble I R, Bolin B, *et al*. Land use, land-use change and forestry: A special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.

[6] Lal R. Deforestation and land－use effects on soil degradation and rehabilitation in western Nigeria. II. Soil chemical properties. Land Degradation and Development, 1996, 7(2): 87－98.

[7] Ashagrie Y, Zech W, Guggenberger G, *et al*. Soil aggregation, and total and particulate organic matter following conversion of native forests to continuous cultivation in Ethiopia. Soil and Tillage Research, 2007, 94(1): 101－108.

[8] Berhongaray G, Alvarez R, Paepe J D, *et al*. Land use effects on soil carbon in the Argentine Pampas. Geoderma, 2013, 192(1): 97－110.

[9] Twongyirwe R, Sheil D, Majaliwa J G M, *et al*. Variability of soil organic carbon stocks under different land uses: A study in an afro-montane landscape in southwestern Uganda. Geoderma, 2013, 193/194(2): 282－289.

[10] Lal R. Potential of desertification control to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. Climatic Change, 2001, 51(1): 35－72.

[11] Degryze S, Six J, Paustian K, *et al*. Soil organic carbon pool changes following land-use conversions. Global Change Biology, 2010, 10(7): 1120－1132.

[12] Cantarello E, Newton A C, Hill R A. Potential effects of future land-use change on regional carbon stocks in the UK. Environmental Science and Policy, 2011, 14(1): 40－52.

[13] Li Y Q, Brandle J, Awada T, *et al*. Accumulation of carbon and nitrogen in the plant－soil system after afforestation of active sand dunes in China's Horqin Sandy Land. Agriculture Ecosystems and Environment, 2013, 177: 75－84.

[14] Zhang C, Liu G B, Xue S, *et al*. Soil organic carbon and total nitrogen storage as affected by land use; in a small watershed of the Loess Plateau, China. European Journal of Soil Biology, 2013, 54(1): 16－24.

[15] Yu S S, Dou S, Yang J M. Application of CENTURY model in the research of soil organic carbon. Soil and Crop, 2014, (1): 10－14.
于沙沙，窦森，杨靖民. CENTURY 模型在土壤有机碳研究中的应用. 土壤与作物，2014，(1)：10－14.

[16] Steffen W L, Walker B H, Ingram J S, *et al*. Global change and terrestrial ecosystems: The operational plan. IGBP report no 21. Stockholm: International Geosphere-Biosphere Programme, 1992.

[17] Batjes N H, Sombroek W G. Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils. Global Change Biology, 2010, 3(2): 161－173.

[18] Bhattacharyya T, Pal D K, Williams S, *et al*. Evaluating the Century C model using two long-term fertilizer trials representing humid and semi-arid sites from India. Agriculture Ecosystems and Environment, 2010, 139(1): 264－272.

[19] Cep C, Paustian K M, Victoria R L, *et al*. Modeling changes in soil organic matter in Amazon forest to pasture conversion with the Century model. Global Change Biology, 2004, 10(5): 815－832.

[20] Cerri C E P, Easter M, Paustian K, *et al*. Simulating SOC changes in 11 land use change chronosequences from the Brazilian Amazon with RothC and Century models. Agriculture Ecosystems and Environment, 2007, 122(1): 46－57.

[21] Cerri C E P, Easter M, Paustian K, *et al*. Predicted soil organic carbon stocks and changes in the Brazilian Amazon between 2000 and 2030. Agriculture Ecosystems and Environment, 2007, 122(1): 58－72.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[22] Tornquist C G, Gassman P W, Mielniczuk J, *et al*. Spatially explicit simulations of soil C dynamics in Southern Brazil: Integrating century and GIS with i_Century. Geoderma, 2009, 150(3): 404-414.

[23] Tornquist C G, Mielniczuk J, Cerri C E P. Modeling soil organic carbon dynamics in Oxisols of Ibirubá (Brazil) with the Century model. Soil and Tillage Research, 2009, 105(1): 33-43.

[24] Xu W, Chen X, Luo G, *et al*. Using the CENTURY model to assess the impact of land reclamation and management practices in oasis agriculture on the dynamics of soil organic carbon in the arid region of North-western China. Ecological Complexity, 2011, 8(1): 30-37.

[25] Parton W J, Rasmussen P E. Long-term effects of crop management in wheat-fallow: II. CENTURY model simulations. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(2): 530-536.

[26] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, *et al*. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51(5): 1173-1179.

[27] Parton W J, Stewart J W B, Cole C V. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: A model. Biogeochemistry, 1988, 5(1): 109-131.

[28] Chilcott C R, Dalal R C, Parton W J, *et al*. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. IX*. Simulation of soil carbon and nitrogen pools using CENTURY model. Soil Research, 2007, 45(3): 206-217.

[29] Muf K, Paul K I. Modelling C and N dynamics in forest soils with a modified version of the CENTURY model. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(3): 341-354.

[30] Paustian K, Elliott E T, Peterson G A, *et al*. Modelling climate, CO_2 and management impacts on soil carbon in semi-arid agroecosystems. Plant and Soil, 1995, 187(2): 351-365.

[31] Romanya J, Cortina J, Falloon P, *et al*. Modelling changes in soil organic matter after planting fast-growing *Pinus radiata* on Mediterranean agricultural soils. European Journal of Soil Science, 2010, 51(4): 627-641.

[32] Zhao W L. Response of phenology, productivity and soil carbon stocks to climate change in northern Chinese steppes. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
赵文龙. 中国北方草原物候、生产力和土壤碳储量对气候变化的响应. 兰州: 兰州大学, 2012.

[33] Pan M F, Jiang M, Zhou Z W. Latest research advances in biodegradation of lignin. Materials Review, 2011, (Supple 2): 372-377.
潘明凤, 姜曼, 周祚万. 木质素生物降解的最新研究进展. 材料导报, 2011, (**增刊** 2): 372-377.

[34] Liu X, Huang Q H, Jiang H L, *et al*. The decomposition processes of aquatic plant residue and the change of microbial community structure in a shallow lake sediment. Ecology and Environment Sciences, 2016, 25(3): 489-495.
刘新, 黄庆慧, 江和龙, 等. 浅水湖泊沉积物中水生植物残体降解过程及微生物群落变化. 生态环境学报, 2016, 25(3): 489-495.

[35] Alister K M, Laura A H, Cole C V, *et al*. CENTURY soil organic matter model environment technical documentation agroecosystem version 4.0. GPSR technical report No. 4, United States Department of Agriculture, Agricultrual Research Service, Great Plains Systems Research Unit. URL: http://www.nrel.colostate.edu/projects/century/, 1993.

[36] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, *et al*. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 785-809.

[37] Gilmanov T G, Parton W J, Ojima D S. Testing the 'CENTURY' ecosystem level model on data sets from eight grassland sites in the former USSR representing a wide climatic/soil gradient. Ecological Modelling, 1997, 96(1/2/3): 191-210.

[38] Mikhailova E A, Bryant R B, Degloria S D, *et al*. Modeling soil organic matter dynamics after conversion of native grassland to long-term continuous fallow using the CENTURY model. Ecological Modelling, 2000, 132(3): 247-257.

[39] Bandaranayake W, Qian Y L, Parton W J, *et al*. Estimation of soil organic carbon changes in turfgrass systems using the CENTURY model. Agronomy Journal, 2003, 95(3): 537-548.

[40] Foereid B, Barthram G T, Marriott C A. The CENTURY model failed to simulate soil organic matter development in an acidic grassland. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, 78(2): 143-153.

[41] Gijsman A J, Oberson A, Tiessen H, *et al*. Limited applicability of the CENTURY model to highly weathered tropical soils. Agronomy Journal, 1996, 88(6): 894-903.

[42] Jiang X H, Zhang C H, Wang C. Study on coupling of Century model and ArcGIS in grassland net primar productivity simulation. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2016, (6): 96-100.
姜新华, 张存厚, 王琛. 草原植被净初级生产力模拟中 CENTURY **模型与** ArcGIS **的耦合研究. 内蒙古农业大学学报(自然科学版)**, 2016, (6): 96-100.

[43] Guo L H, Hao C Y, Wu S H, *et al*. Projected changes in vegetation net primary productivity of grassland in Inner Mongolia,

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

China during 2011－2050. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 803－814.
郭灵辉，郝成元，吴绍洪，等. 21 世纪上半叶内蒙古草地植被净初级生产力变化趋势. 应用生态学报, 2016, 27(3): 803－814.

[44] Guo L H, Hao C Y, Wu S H, *et al*. Analysis of changes in net primary productivity and its susceptibility to climate change of Inner Mongolian grasslands using the CENTURY model. Geographical Research, 2016, 35(2): 271－284.
郭灵辉，郝成元，吴绍洪，等. 内蒙古草地 NPP 变化特征及其对气候变化敏感性的 CENTURY 模拟研究. 地理研究, 2016, 35(2): 271－284.

[45] Li Q Y. Impacts of climate change and grazing on grassland in Inner Mongolia and adaptation strategies. Beijing: China Agricultural University, 2015.
李秋月. 气候变化及放牧对内蒙古草地的影响与适应对策. 北京：中国农业大学, 2015.

[46] Chen C, Wang J, Pan X B, *et al*. Validation and adaptability evaluation of grass ecosystem model CENTURY in Inner Mongolia. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(6): 1011－1019.
陈辰，王靖，潘学标，等. CENTURY 模型在内蒙古草地生态系统的适用性评价. 草地学报, 2012, 20(6): 1011－1019.

[47] Zhang C H, Wang M J, Zhao X H, *et al*. Simulation of ANPP in response to climate change in China's desert steppe based on CENTURY model. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(10): 2849－2857.
张存厚，王明玖，赵杏花，等. 基于 CENTURY 模型的荒漠草原 ANPP 对气候变化响应的模拟. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2849－2857.

[48] Mo Z H, Li Y E, Gao Q Z. Simulation on productivity of main grassland ecosystems responding to climate change. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(4): 545－554.
莫志鸿，李玉娥，高清竹. 主要草原生态系统生产力对气候变化响应的模拟. 中国农业气象, 2012, 33(4): 545－554.

[49] Xiao X M, Wang Y F. Dynamic of primary productivity and soil organic matter of typical steppe in the Xilin River basin of Inner Mongolia and their response of climate change. Chinese Journal of Plant Ecology, 1996, (1): 45－52.
肖向明，王义凤. 内蒙古锡林河流域典型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. 植物生态学报, 1996, (1): 45－52.

[50] Li D. Modelling dynamics of soil organic carbon in alpine meadow by using CENTURY model. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
李东. 基于 CENTURY 模型的高寒草甸土壤有机碳动态模拟研究. 南京：南京农业大学, 2011.

[51] Oelbermann M, Echarte L, Marroquin L, *et al*. Estimating soil carbon dynamics in intercrop and sole crop agroecosystems using the Century model. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2017, 180(2): 241－251.

[52] Leite L F C, Mendonca E D S, Neves J C L. Simulating trends in soil organic carbon of an Acrisol under no-tillage and disc-plow systems using the Century model. Geoderma, 2004, 120(3): 283－295.

[53] Musinguzi P, Ebanyat P, Tenywa J S, *et al*. Using DSSAT-CENTURY model to simulate soil organic carbon dynamics under a low-input maize cropping system. Journal of Agricultural Science, 2014, 6(5): 120.

[54] Gupta S, Kumar S. Simulating climate change impact on soil carbon sequestration in agro-ecosystem of mid-Himalayan landscape using CENTURY model. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(11): 394.

[55] Gao L P, Liang W J, Jiang Y, *et al*. Dynamics of organic C in black soil of Northeast China, simulated by CENTURY model I. Accumulation of soil organic carbon under natural conditions. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(5): 772－776.
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. 自然状态下土壤有机碳的积累. 应用生态学报, 2004, 15(5): 772－776.

[56] Fang H J, Yang X M, Zhang X P, *et al*. Simulation on dynamics of soil organic carbon under the effect of tillage and water erosion. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(5): 730－735.
方华军，杨学明，张晓平，等. 耕作及水蚀影响下坡耕地土壤有机碳动态模拟. 土壤学报, 2006, 43(5): 730－735.

[57] 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. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(6): 911－915.
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. 生态学杂志, 2008, 27(6): 911－915.

[58] Wang S H, Shi X Z, Zhao Y C, *et al*. Regional simulation of soil organic carbon dynamics for dry farmland in east China by coupling a 1∶500000 soil database with the Century model. Pedosphere, 2011, 21(3): 277－287.

[59] Deng X Z, Jiang Q O, Lin Y Z, *et al*. Simulation of the changes of soil organic carbon stock of cropland in China. Geographical Research, 2010, 29(1): 93－101.
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. 地理研究, 2010, 29(1): 93－101.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[60] Xu W Q, Chen X, Luo G P, *et al*. The impact of land reclamation and management practices on the dynamics of soil organic carbon in the arid region of North-western China as simulated by CENTURY model. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(14): 3707－3716.
许文强，陈曦，罗格平，等. 基于 CENTURY **模型研究干旱区人工绿洲开发与管理模式变化对土壤碳动态的影响. 生态学报**, 2010, 30(14): 3707－3716.

[61] Mu T M. Forest ecosystems. Inner Mongolia Forestry, 1983, (11): 22－23.
穆天民. 森林生态系统. 内蒙古林业, 1983, (11): 22－23.

[62] Huang Z L. Application of a CENTURY model to management effects in the productivity of forests in Dinghushan. Acta Phytoecologica Sinica, 2000, 24(2): 175－179.
黄忠良. 运用 CENTURY **模型模拟管理对鼎湖山森林生产力的影响. 植物生态学报**, 2000, 24(2): 175－179.

[63] Kelly R, Parton W, Crocker G, *et al*. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the Century model. Geoderma, 1997, 81(1/2): 45－60.

[64] Fang D M, Zhou G S, Jiang Y L, *et al*. Impact of fire on carbon dynamics of *Larix gmelinii* forest in Daxing'an Mountains of Northeast China: A simulation with CENTURY model. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(9): 2411－2421.
方东明，周广胜，蒋延玲，等. 基于 CENTURY **模型模拟火烧对大兴安岭兴安落叶松林碳动态的影响. 应用生态学报**, 2012, 23(9): 2411－2421.

[65] Lin Y B, Shen W J, Peng S L, *et al*. Simulation studies on carbon and nitrogen accumulation and its allocation pattern in forest ecosystems of Heshan in low subtropical China. Acta Phytoecologica Sinica, 2003, 27(5): 690－699.
林永标，申卫军，彭少麟，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. 植物生态学报**, 2003, 27(5): 690－699.

[66] Jiang Y L, Zhou G S. Carbon equilibrium in *Larix gmelinii* forest and impact of global change on it. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4): 481－484.
蒋延玲，周广胜. 兴安落叶松林碳平衡和全球变化影响研究. 应用生态学报, 2001, 12(4): 481－484.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net