岳丹丹, 张军辉, 孙国栋, 等. 2019. LPJ-WHyMe模型对1997～2010年中国东北地区潜在植被分布和碳循环的模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 24(6): 678−692. YUE Dandan, ZHANG Junhui, SUN Guodong, et al. 2019. Simulation of Potential Vegetation Distribution and Carbon Cycle in Northeast China from 1997 to 2010 by LPJ-WHyMe Model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(6): 678−692. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19033

LPJ-WHyMe模型对1997～2010年中国东北地区潜在植被分布和碳循环的模拟研究

岳丹丹[1,2]　张军辉[1]　孙国栋[3,2]　韩士杰[1]

1 中国科学院沈阳应用生态研究所森林生态与管理重点实验室，沈阳 110016
2 中国科学院大学，北京 100049
3 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室，北京 100029

摘　要　利用一套高分辨率的气候驱动场和全球动态植被模型LPJ-WHyMe(Lund-Potsdam-Jena-Wetland Hydrology and Methane)，模拟了中国东北地区潜在植被分布，并对中国东北地区1997～2010年平均净初级生产力（Net Primary Production, NPP）、净生态系统生产力（Net Ecosystem Production, NEP）、燃烧面积、火灾碳排放、土壤温度和土壤湿度进行了估算。LPJ-WHyMe的特点在于能够描述冻融的物理过程以及土壤中多层的湿度和温度。数值结果表明，在LPJ-WHyMe模型提供的植被功能类型（Plant Function Type, PFT）划分的条件下，中国东北地区主要分布了5种植被功能类型，即温带夏绿阔叶林带、北方常绿针叶林带、北方夏绿针叶林带、北方夏绿阔叶林带和温带草本植物。在研究时间段内，中国东北地区NPP的年平均值为376 g(C) m^{-2}，变化范围在324.15～424.86 g(C) m^{-2}之间。火灾机制的引入使得LPJ-WHyMe模型对NEP的模拟能力进一步提高，即NEP年平均值为42.36 g(C) m^{-2}，表明中国东北地区陆地生态系统总体表现为“碳汇”。中国东北地区年平均燃烧面积分数为0.84%，火灾碳排放量为42.41 g(C) m^{-2}，整体上模型高估了燃烧面积值和火灾碳排放量，模型对东北地区火灾的模拟仍然存在一定的局限性。中国东北地区土壤温度与气温呈正相关关系，且各层土壤温度与气温的相关性随着深度的增加而减弱。中国东北地区土壤湿度与降水呈正相关关系，土壤湿度与气温呈反相关关系。上述结果表明LPJ-WHyMe模型模拟中国东北地区潜在植被分布和碳循环是有效的。

关键词　LPJ-WHyMe模型　植被功能类型　净初级生产力　净生态系统生产力　火灾　土壤温度　土壤湿度
文章编号　1006-9585(2019)06-0678-15　　**中图分类号**　Q149　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19033

Simulation of Potential Vegetation Distribution and Carbon Cycle in Northeast China from 1997 to 2010 by LPJ-WHyMe Model

YUE Dandan[1,2], ZHANG Junhui[1], SUN Guodong[3,2], and HAN Shijie[1]

1 *Key Laboratory of Forest Ecology and Management*, *Institute of Applied Ecology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shenyang* 110016
2 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049
3 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029

收稿日期　2019-03-13；**网络预出版日期**　2019-09-07
作者简介　岳丹丹，女，1991年出生，博士研究生，主要从事全球变化与森林碳收支。E-mail: 526628976@qq.com
通讯作者　韩士杰，E-mail: hansj@iae.ac.cn
资助项目　国家重点研发计划项目2016YFA0600804，国家自然科学基金41675104、41575153
Funded by　National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0600804), National Natural Science Foundation of China (NSFC, Grants 41675104 and 41575153)

Abstract The potential vegetation distribution, the net primary production (NPP), net ecosystem production (NEP), burned area, carbon emissions from fires, soil temperature, and soil moisture in Northeast China from 1997 to 2010 was simulated by using a high-resolution climate-driven field and global dynamic vegetation model, i.e., Lund−Potsdam−Jena Wetland Hydrology and Methane (LPJ-WHyMe) model. The LPJ-WHyMe model is characterized by the capability to describe the physical processes of freezing and thawing, as well as the humidity and temperature of multiple layers in the soil. The five main plant functional types in Northeast China are temperate broad-leaved summergreen tree, boreal needle-leaved evergreen tree, boreal needle-leaved summergreen tree, boreal broad-leaved summergreen tree, and C3 perennial grass. During the period under study in Northeast China, the average value of NPP is 376 g(C) m^{-2}, ranging from 324.15 g(C) m^{-2} to 424.86 g(C) m^{-2}. The introduction of the mechanism of fire further improves the simulation capability of the LPJ-WHyMe model for NEP. The average value of NEP is 42.36 g(C) m^{-2}. The annual average burned area is 0.84% and the carbon emission from fire is 42.41 g(C) m^{-2} in Northeast China. Overall, the model overestimated the burned area and carbon emission from fire. Moreover, the model still has some limitations in the simulation of fire in Northeast China. A positive correlation between soil and air temperatures is observed in Northeast China, and the correlation in each layer decreases with the increase in depth. A positive correlation between soil moisture and precipitation and a negative correlation between soil moisture and air temperature are observed in Northeast China. These results show that the LPJ-WHyMe model is effective in simulating the potential vegetation distribution and carbon cycle in Northeast China.

Keywords LPJ-WHyMe model, Plant function type, Net primary productivity, Net ecosystem productivity, Fire, Soil temperature, Soil moisture

1 引言

全球变化是当前最受人们关注的科学问题之一，陆地生态系统碳循环研究是全球变化科学的一个重要组成部分（赵俊芳等，2009），陆地生态系统中碳的变化是影响大气CO_2浓度和气候变化的重要因素之一，因此陆地生态系统碳循环在全球碳循环和全球气候变化中扮演了关键的角色。碳循环研究开始于20世纪70年代，并在80年代得到迅速发展，90年代以来，由于全球气候变化对陆地生态系统碳循环的研究进入高潮发展阶段，研究的内容也更加全面具体（王苗苗，2016）。对于陆地生态系统碳循环已有大量的研究(Houghton and Hackler, 2003; 陈晨等, 2016)，但是由于陆地生态系统碳循环机制的复杂性等因素，对其的研究仍然存在不确定性（Cao et al.，2003），因此继续探讨陆地生态系统碳循环及其变化是非常有意义的。

主要的植被类型表现了植物界对主要气候类型的反映，每个气候类型都有一套相应的植被类型。在进行全球变化与陆地生态系统关系的研究中，气候—植被关系的确定具有十分重要的意义（李飞等，2008）。潜在植被指的是在当前气候条件下，当植被与气候条件完全达到平衡时所应发育的自然植被。潜在植被作为一种与所处立地达到平衡的演替终态，反映的是无人类干扰的情况下，立地所能发育形成的最稳定成熟的一种顶极植被类型，是一个地区现状植被的发展趋势。潜在植被的研究能够真实反映气候条件对植被形态变化的影响，是全球变化与陆地生态系统研究的关键（翁恩生和周广胜，2005；李飞等，2008）。

中国东北地区位于温带和寒温带，其大部分地区处在季节性或多年冻土区，是有机物积累大于分解的非对称区域。气候和植被覆盖变化导致生态系统光合作用碳吸收在北半球40°N以北地区具有更强的CO_2季节性差异（韩士杰等，2016）。中国东北地区是中国森林资源最为丰富的地区，森林面积居全国首位（王苗苗，2016）。东北森林碳储量为1.0～1.5 Pg(C)，占全国碳储量的24%～31%（Fang et al.，2001）。东北林区是全球变化最为敏感的区域之一，具有碳储量密度高，滞留时间长的特点，是研究全球碳源汇的重要区域（王斌，2015）。东北地区也是全球气候变化最为敏感的地区，东北地区的碳循环将对其陆地生态系统的演化、区域气候及碳源汇总量等都有较大的影响（董云社等，2000；韩士杰和王庆贵，2016）。而且东北地区受火灾影响严重，中国很多森林火灾都发生在这一地区(Niu and Zhai, 2012)。中国东北地区是我国植被恢复等重大生态工程的示范区，该地区的

植物群落演替在减缓温室气体排放中具有重要作用（韩士杰等，2016）；中国东北地区是全球变化和人类活动影响下碳循环响应高度不确定性的敏感和关键地区，是前瞻性开展陆地生态系统碳循环作用基础理论研究的天然实验室。因此，更加凸显开展东北地区潜在植被分布和碳循环研究的重要性。

在过去的几十年中，越来越多的学者逐渐意识到我国东北地区潜在植被分布和碳循环研究的重要性，开始利用遥感手段和模型方法对我国东北林区进行了大量的研究工作（张峰和周广胜，2008；郭丽娟，2013；毛学刚等，2017）。赵传燕等（2007）用遥感技术手段对黄土高原祖厉河流域潜在植被进行了研究。孙艳玲等（2007）应用LPJ动态植被模型对中国植被变化进行了模拟研究。杨金艳和王传宽（2005）利用6个典型森林生态系统的18块样地研究了东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量；张璐等（2015）对东北三省碳源汇时空动态遥感进行了研究，结果表明2000～2010年我国东三省大部分地区为碳汇地区；薛梅等（2018）利用BEPS （Boreal Ecosystem Productivity Simulator）生态过程模型模拟了我国东北地区2003～2012年间植被净初级生产力（Net primary productivity，NPP），并对其植被NPP的时空变化特征及影响因素进行了分析。于颖（2013）利用生物物理化学过程InTEC（Integrated Terrestrial Ecosystem Carbon Cycle）模型对1901～2009年东北森林植被NPP和净生态系统生产力（Net Ecosystem Production，NEP）进行模拟，并对NEP的时空格局和东北森林碳源汇的分布进行了分析。在这些研究中，由于不同模型的物理过程有所差异，并且一些模型的扰动机制仍然存在改进的空间，比如，土地利用、火灾、森林变化等机制。因此进一步利用模型考察东北地区陆地生态系统潜在植被分布和碳循环的变化是非常必要的。

研究区的大部分森林和草地处在季节性或多年冻土区，多年冻土可能导致更干燥的条件并且降低碳的积累速率(Robinson and Moore, 2000)，因而多年冻土是高纬度地区碳循环的重要组成部分（Wania et al.， 2009b）。而LPJ-WHyMe（Lund-Potsdam-Jena-Wetland Hydrology and Methane）模型是基于国际广泛采用的LPJ模型基础上提出的，它考虑了气候变化和火干扰下冻土的变化特征（土壤温度、活动层深度和水位）、碳循环以及植被氮含量，通过数值求解热扩散获得详细的土壤冻融过程。为此，本文采用全球动态植被模型LPJ-WHyMe，且采用了更高的空间分辨率（5 km×5 km），在区域尺度上模拟了东北地区生态系统潜在植被分布和碳循环的时空分布特征，旨在为合理估算全球变化背景下东北地区生态系统潜在植被分布和碳循环及未来动态提供科学依据。

2 研究地区与研究方法

2.1 研究区概况

本研究中，东北地区（38°43'N～53°34'N，115°37'E～135°05'E）主要包括黑龙江、吉林、辽宁以及内蒙古地区东北部。研究地区位于中国东北部，北起黑龙江主航道中心线（53°34'N），南抵辽东半岛南端（38°43'N），跨纬度14°51'，西起内蒙古新巴尔虎右旗以西与蒙古人民共和国交界处（115°37'E），东至黑龙江省抚远以东、乌苏里江汇入黑龙江处的耶字碑东角（135°05'E），跨经度19°28'。研究区东与朝鲜为邻，西与蒙古国接壤，北部为俄罗斯；与日本和韩国隔海相望；南濒渤海与中国华北地区连接，具有极为重要的战略地位。东北地区总面积为136×10^4 km^2，约占全国总面积的13%，属大陆性季风型气候。拥有全国最大的林区：小兴安岭、大兴安岭和长白山林区，以天然林为主（张军辉等，2006；于颖，2013）。研究区位于温带和寒温带，其大部分森林和草地处在季节性或多年冻土区，是有机物积累大于分解的非对称地区。气候和植被覆盖变化导致生态系统光合作用碳吸收在北半球38°N以北地区具有更强的CO_2季节性差异（韩士杰等，2016）。

2.2 资料介绍

LPJ-WHyMe模型是由月平均温度、降水、云量、湿度及土壤质地和CO_2浓度资料驱动的。本文采用的月平均温度和降水资料（http://globalchange.bnu.edu.cn/research/forcing[2018-08-08]）由中山大学陆地—大气相互作用研究小组（land-Atmosphere Interaction Research Group at Sun Yat-sen University）戴永久教授提供(Huang et al.，2014)，其空间分辨率为5 km×5 km；月平均云量和湿度数据由来自气候研究中心(Climatic Research Unit, CRU; Mitchell and Jones, 2005)的0.5°（纬度）×0.5°（经度）数据插值（距离反比插值法）

成 5 km×5 km 的数据；土壤质地数据由联合国粮食及农业组织（FAO；Zobler，1986）提供的 0.5°（纬度）×0.5°（经度）数据插值（距离反比插值法）成 5 km×5 km 的数据；CO_2 浓度数据由冰芯和大气的观测资料获得（Kicklighter et al.，1999）。这套驱动资料不仅空间分辨率高（5 km×5 km），而且具有较长的时间跨度（1958～2010 年）。

LPJ-WHyMe 模型在模拟前，假设没有植被（全为裸土）和生物量，因此需要对 LPJ-WHyMe 模型积分 1000 年，直到植被覆盖和土壤碳池达到平衡态。在这个阶段中 LPJ-WHyMe 模型需要具有年际变化的气候资料场，本文中循环使用 1958～1975 年的气候资料驱动 LPJ-WHyMe 模型达到平衡态。计算得到的平衡态作为初始值，积分 53 年（1958～2010 年）。本文只分析了从 1997～2010 年的计算结果。

文中的 NPP、火灾燃烧面积及火灾碳排放的观测数据来源于全球火灾排放数据库，4.1 版（Global Fire Emission Database，version 4.1，GFEDv4；https://daac. ornl. gov/cgi−bin/dsviewer. pl?ds_id=1293[2018−06−14]），其空间分辨率为 0.25°（纬度）×0.25°（经度），时间跨度为 1997～2015 年（https://daac. ornl. gov/VEGETATION/ guides/fire_emissions_v4. html[2018-06-14]）。GFEDv4 是观测数据和基于卫星估计数据的混合，它的火灾产品代表了 2018 年以来从遥感数据中获取燃烧面积和火灾排放的最全面的数据，它适用于模型校准以及评估当前全球火灾模型的模拟能力。

将空间分辨率为 5 km×5 km 的模型输出结果插值（距离反比插值法）成与观测数据空间分辨率一致的 0.25°（纬度）×0.25°（经度），以便比较分析（见表 1）。

2.3 模型介绍

LPJ-WHyMe （Lund-Potsdam-Jena-Wetland Hydrology and Methane; Wania, 2007; Wania et al., 2009a, 2009b, 2010）模型是由 LPJ （Lund-Potsdam-Jena Dynamic Global Vegetation Model; Sitch et al., 2003）模型进一步发展得到的。LPJ 是一种基于过程的模型，模拟植物生理学、碳分配、分解和水文通量，模型中植被分布是基于生物气候指标，碳量贮存在叶、边材、心材、根以及地面凋落物池、两个土壤碳池和地下凋落物池，此模型能够研究光合作用以及 10 种植被功能类型（Plant Functional Types, PFTs）之间的竞争。这 10 种植被功能类型分别是：热带常绿阔叶林带、热带雨林阔叶林带、温带常绿针叶林带、温带常绿阔叶林带、温带夏绿阔叶林带、北方常绿针叶林带、北方夏绿针叶林带、北方夏绿阔叶林带、温带草本和赤道草本。LPJ-WHyMe 模型是在 LPJ 模型的基础上将多年冻土和泥炭地引入到模型中得到的，它考虑了气候变化和火干扰下冻土的变化特征（土壤温度、活动层深度和水位）、碳循环以及植被氮含量，通过数值求解热扩散获得详细的土壤冻融过程。LPJ-WHyMe 模型能够研究 12 种植被功能类型，在 LPJ 模型的基础上多了耐洪水草本和泥炭藓两种植被类型。

表 1 数据介绍及处理方法

Table 1 Introduction and processing method of data

	数据类型	数据来源	时间跨度	分辨率	数据处理
驱动数据	月平均温度和降水	中山大学陆地—大气相互作用研究小组的戴永久教授	1958～2010 年	5 km×5 km	循环使用 1958～1975 年的气候资料驱动 LPJ-WHyMe 模型达到平衡态。计算得到的平衡态作为初始值，积分 53 年（1958～2010 年）
	月平均云量和湿度	Climatic Research Unit	1958～2010 年	5 km×5 km	
	土壤质地	联合国粮食及农业组织（FAO）	1958～2010 年	5 km×5 km	
	CO_2 浓度	由冰芯和大气的观测资料获得	1958～2010 年	5 km×5 km	
模型输出数据	NPP、火灾燃烧面积、火灾碳排放	LPJ-WHyMe	1958～2010 年	5 km×5 km	将模型输出结果插值（距离反比插值法）成与观测数据空间分辨率一致的 0.25°（纬度）×0.25°（经度），并选取 1997～2010 年的结果与观测数据进行对比
观测数据	NPP、火灾燃烧面积、火灾碳排放	Global Fire Emission Database, version 4.1	1997～2015 年	0.25°（纬度）×0. 25°（经度）	

3 研究结果

3.1 潜在植被分布

应用LPJ-WHyMe模型模拟的中国东北地区主要分布了5种植被功能类型（图1），它们分别是温带夏绿阔叶林带（TeBS）、北方常绿针叶林带（BoNE）、北方夏绿针叶林带（BoNS）、北方夏绿阔叶林带（BoBS）和温带草本植物（C3 grass）。温带夏绿阔叶林带主要分布在研究区域的南部，北方常绿针叶林带和北方夏绿针叶林带主要分布在研究区域的北部，温带草本植物主要分布在内蒙古北部地区，其余大部分地区为北方夏绿阔叶林带。这与观测基本一致(Ni et al., 2000)，其空间分布也类似。

3.2 碳通量

3.2.1 *净初级生产力*

NPP是地表碳循环的重要组成部分，是指绿色植被在单位时间、单位面积上所积累的有机物数量(Liu et al., 1999)，是总初级生产中获得的碳与植物呼吸所释放的碳之间的平衡。NPP直接反映了植物在自然环境条件下的生产能力，是判断生态系统碳源汇和调节生态过程的重要因子，在全球或地区碳循环中具有重要地位（Field et al., 1998；孙国栋，2009）。

由LPJ-WHyMe模型模拟的中国东北地区年平均（1997～2010年）NPP的空间分布如图2所示，

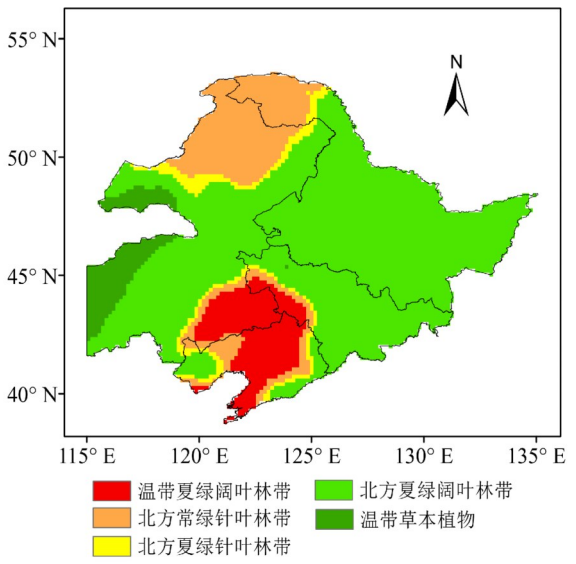

图1 中国东北地区潜在植被功能类型分布

Fig. 1 Potential distribution of plant function types in Northeast China

观测值和模拟值的空间相关系数为0.40（p<0.01）。数值结果表明，观测和LPJ-WHyMe模型都表现出东北地区净初级生产力由北至南，由西至东依次增加的空间变化特征，这与东北地区降水的空间变化特征是类似的（梁妙玲和谢正辉，2006）。但相比较观测结果，LPJ-WHyMe模型高估了东北地区的中部及西部的NPP值，略低估了大兴安岭地区的NPP值。图3是中国东北地区NPP的年际变化，观测结果与LPJ-WHyMe的模拟结果在1997～2010年总体的变化趋势较一致，皆呈微弱上升趋势，其中观测的NPP平均值为370 g(C) m^{-2}，LPJ-WHyMe模拟的NPP平均值为376 g(C) m^{-2}。但观测和模拟的NPP逐年变化的差异较大，只有在1999年、2003年、2005年、2006年及2008年吻合较好，其他年份则相差较大，部分年份甚至呈相反的变化趋势。

本文比较了不同模型模拟中国东北地区NPP的差异（表2），LPJ-WHyMe模型模拟的NPP在其他数值模拟结果范围之内。不同模型采用不同的NPP计算方法，因此会导致所得NPP数值有一定的差异。不仅如此，模型中有关变量的计算方法也有所不同，如叶、根的质量等，这些差异也会对NPP估算的结果产生影响。

3.2.2 *净生态系统生产力*

NEP为陆地生态系统碳的净吸收或净排放，它表征生态系统的固碳能力，直接定性定量的描述森林生态系统的碳源汇性质和大小（常顺利等，2005）。

火灾是研究碳循环过程中一个非常重要的因素，在不考虑火灾干扰的模型中，用如下公式估算NEP：

$$NEP = NPP - R_h, \quad (1)$$

其中R_h为异养呼吸。LPJ-WHyMe模型的一个重

表2 不同模型模拟中国东北地区NPP的比较

Table 2 Comparison of simulated net primary production (NPP) in Northeast China among different models

数据来源	NPP平均值/ g(C) m^{-2}	参考文献
CASA模型	304	程春晓等(2014)
LPJ-WHyMe模型	376	本研究
InTEC模型	378	李明泽等(2015)
BEPS模型	385	王斌(2015)
EOS /MODIS卫星遥感资料	400	国志兴等(2008)
CEVSA模型	439	李洁等(2014)

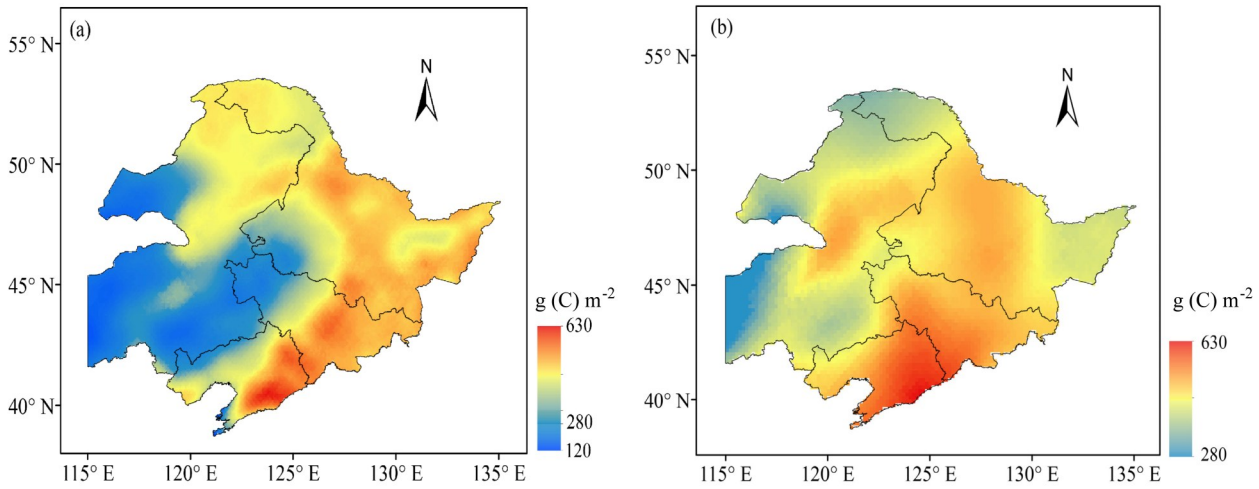

图2 中国东北地区1997～2010年平均NPP分布：（a）GFEDv4数据；（b）LPJ-WHyMe模式

Fig. 2 Spatial distributions of mean NPP from 1997 to 2010 in Northeast China: (a) GFEDv4 data; (b) LPJ-WHyMe model

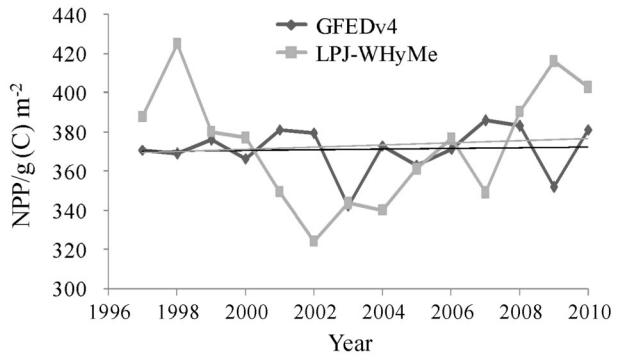

图3 中国东北地区1997～2010年NPP的年际变化

Fig. 3 Interannual variation of NPP from 1997 to 2010 in Northeast China

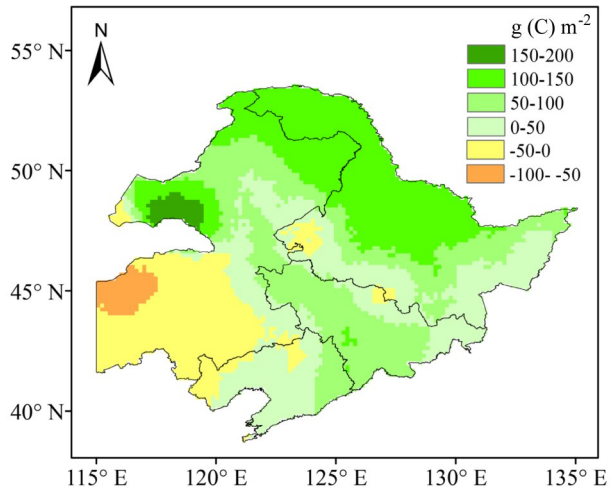

图4 中国东北地区1997～2010年平均NEP的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of mean net ecosystem production (NEP) from 1997 to 2010 in Northeast China

要特征是将火灾机制引入到模型中，并且将由火灾所导致的碳通量变化（F_c）引入到NEP的估算中，即

$$NEP = NPP - R_h - F_c. \quad (2)$$

从上述公式可知，若NEP为正，说明研究区生态系统从大气中吸收了CO_2，生态系统为碳汇。若NEP为负，则说明研究区的CO_2释放到大气中，生态系统则为碳源。

由LPJ-WHyMe模型模拟的中国东北地区年平均（1997～2010年） NEP的空间分布如图4所示。数值结果表明，东北地区大部分为碳汇，内蒙古东部部分地区为碳源。碳汇值较高的地区分布在呼伦贝尔草原[150～200 g(C) m^{-2}]及大、小兴安岭地区[100～150 g(C) m^{-2}]，图5为1997～2010年中国东北地区NEP的年际变化，由图5可知1997～2010

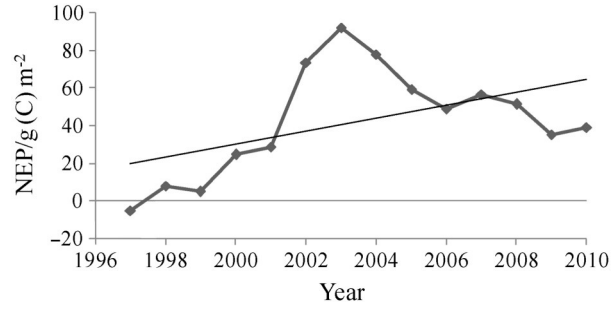

图5 中国东北地区1997～2010年NEP的年际变化

Fig. 5 Interannual variation of NEP from 1997 to 2010 in Northeast China

年中国东北地区陆地生态系统总体表现为碳汇，1997～2003年呈波动上升趋势，2004～2010呈波动下降趋势，年平均NEP值为42.36 g(C) m^{-2}，

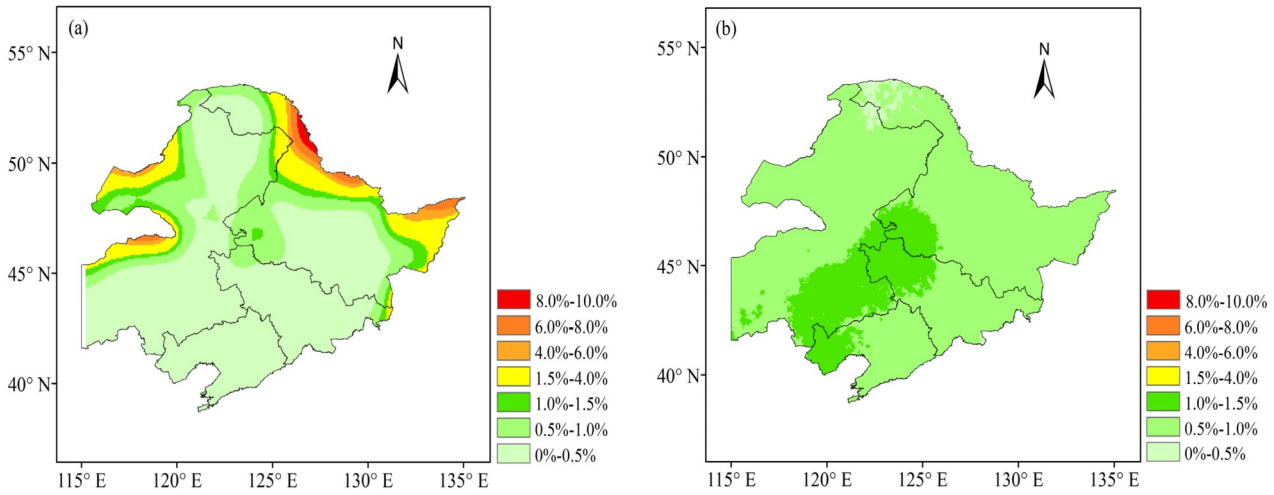

图6 中国东北地区1997～2010年平均燃烧面积百分比空间分布：（a）GFEDv4数据；（b）LPJ-WHyMe模式

Fig. 6 Spatial distributions of average burned area ratios from 1997 to 2010 in Northeast China: (a) GFEDv4 data; (b) LPJ-WHyMe model

2003年NEP值最大，达到91.91 g(C) m^{-2}；1997年NEP值最小，仅为－5.50 g(C) m^{-2}，该结果与BEPS模型（王苗苗，2016）的研究结果类似。

估算NEP的不确定性远远大于估算NPP的不确定性，原因在于土地利用、森林演替和火干扰等因素对NEP估算的影响。LPJ-WHyMe模型通过考虑了火灾对碳循环的影响，降低了对东北地区生态系统碳源汇估算的不确定性。

3.3 火干扰

火灾是全球范围内主要的干扰因素之一，影响生物地球化学循环，在大气化学和全球碳循环中发挥重要作用。全球每年通过生物质燃烧将大约3.9×10^8 t碳释放到大气中(Andreae, 1991)，相当于年度人为化石可燃物排放量的70%以上。火灾是研究碳循环过程中一个非常重要的因素，LPJ-WHyMe模型一个重要的特征就是将火灾机制引入到模型中。

火灾机制是LPJ-WHyMe模型中重要的扰动机制之一。它是在生态系统及其碳通量确立之前的一个重要步骤。火灾的发生主要依赖于可燃物载量（可燃烧的干物质的量）和凋落物含水量。火灾是通过其发生时间的长度和不同植被功能类型的耐火性两个方面来确定的。

3.3.1 燃烧面积

由LPJ-WHyMe模型模拟的中国东北地区年平均（1997～2010年）燃烧面积的空间分布如图6所示。数值结果表明，除较小部分区域外，燃烧面积

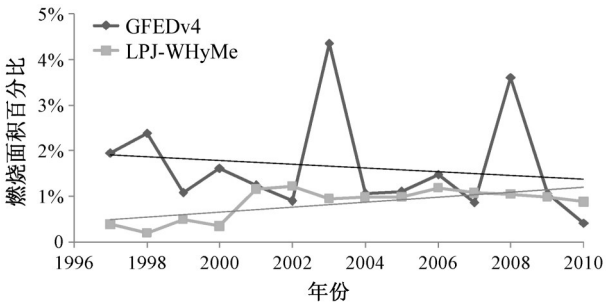

图7 中国东北地区1997～2010年燃烧面积观测值和模拟值的年际变化

Fig. 7 Inter-annual variations of observed and simulated burned area from 1997 to 2010 in Northeast China

模拟值都大于观测值，即整体上模型高估了燃烧面积值。研究区大部分的燃烧面积观测值在0～0.5%之间，西北部内蒙古部分地区和东北部黑龙江部分地区的燃烧面积值较大（4%～10%），大值分布在很小的区域。LPJ-WHyMe的燃烧面积模拟值全部都在0～1.5%之间，研究区大部分的燃烧面积模拟值在0.5%～1%之间，大值主要分布在研究区的中部。图7为1997～2010年平均燃烧面积观测和模拟的时间序列，年平均燃烧面积观测值为1.65%，模拟结果为0.84%，由于观测在很小的区域上具有极高的燃烧面积值，因而导致燃烧面积观测值的区域平均结果较高。在有极高燃烧面积的年份，模拟与观测相差较大，说明模型对极端火灾的年份模拟效果不好。

3.3.2　火灾碳排放

由 LPJ-WHyMe 模型模拟的中国东北地区年平均（1997～2010 年）火灾碳排放的空间分布如图 8 所示。数值结果表明，除较小部分区域外，火灾碳排放模拟值都大于观测值，即整体上模型高估了火灾碳排放量。研究区大部分的火灾碳排放观测值在 0～5 g(C) m^{-2}之间，东北部黑龙江部分地区火灾碳排放的值较大[60～120 g(C) m^{-2}]，大值区分布在很小的区域。LPJ-WHyMe 模型的模拟结果为北部高西部低，研究区大部分的火灾碳排放模拟值在 40～50 g(C) m^{-2}之间。图 9 为 1997～2010 年平均火灾碳排放观测和模拟的时间序列，火灾碳排放观测值总体呈减少趋势，年平均值为 14.37 g(C) m^{-2}，模拟结果总体呈增加趋势，年平均值为42.41 g(C) m^{-2}，模型高估了火灾碳排放量。

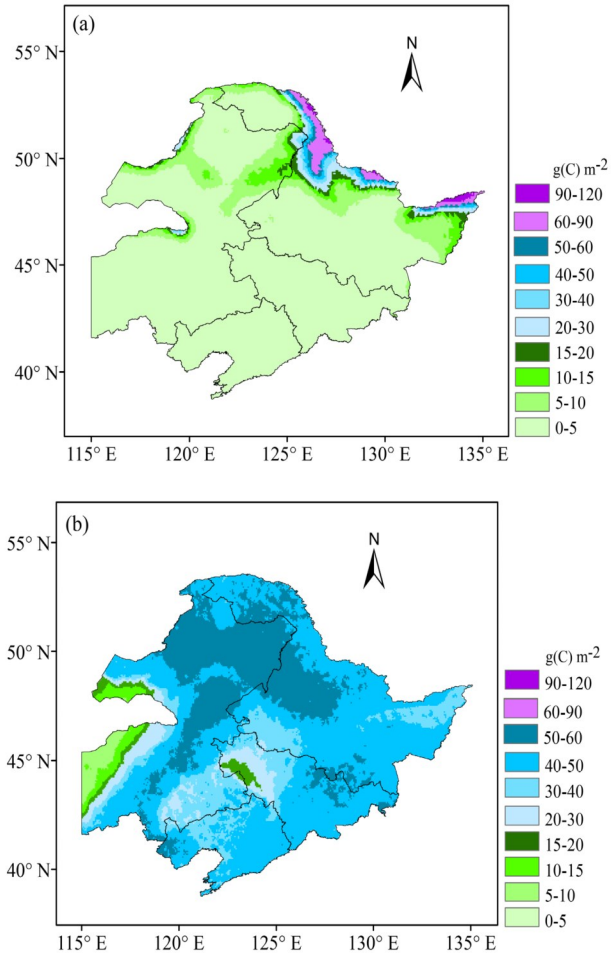

图 8　中国东北地区 1997～2010 年平均火灾碳排放空间分布：（a）GFEDv4 数据；（b）LPJ-WHyMe 模式

Fig. 8 Spatial distributions of mean carbon emissions by fires from 1997 to 2010 in Northeast China: (a) GFEDv4 data; (b) LPJ-WHyMe model

通过将燃烧面积和火灾碳排放的模拟结果与观测进行对比，可知 LPJ-WHyMe 模型虽引入火灾机制，但对中国东北地区的模拟效果并不理想，模型本身存在一定的局限性；对于严重的火灾年份（极高的燃烧面积），模型模拟的效果较差。因此还需对模型火模块进行优化，从而使模型更适于中国东北地区。

3.4　土壤温度和湿度

土壤作为陆地下垫面的重要组成部分，对陆面与大气间的动量、热量及多种物质（水汽、CO_2等）的交换有极为重要的影响。而土壤温度和土壤湿度作为表征土壤热力和水分状况的重要参量，是陆面影响大气的 2 个主要因子，它们可通过影响地表能量和水分收支的变化来影响气候变化。与此同时，气候变化也在通过陆-气相互作用对土壤温度和土壤湿度的变化产生深刻的影响（王晓婷等，2009）。

3.4.1　土壤温度

土壤温度是土壤主要的物理性质之一，除了影响种子的萌发、幼苗和根系的生长发育以外，还对植物运输水分、吸收养分和土壤中有效养分的变化等有重要影响（Hansen et al., 2006）。因此，研究土壤温度的时空分布规律及其与其他气象因子之间的关系就显得尤为重要，也为土壤温度对气候变化的响应及其长期预测提供科学依据（刘洋，2015）。

由 LPJ-WHyMe 模型模拟的中国东北地区 100 cm 深度平均土壤温度（各层土壤温度空间分布特征基本一致）的空间分布如图 10a，其分布规律为由南至北逐渐降低，温度范围在－4.83～11.15 ℃之间。经与图 10b 的气温空间分布相比，土壤温度与气温的空间分布规律一致，温度范围也相差不

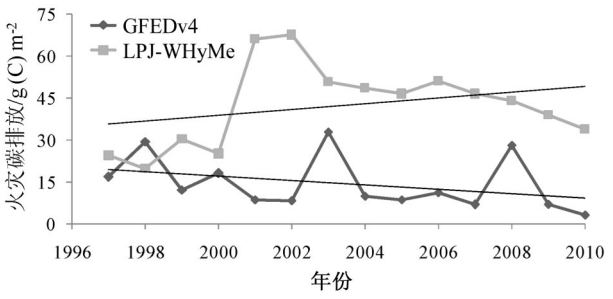

图 9　中国东北地区 1997～2010 年火灾碳排放观测值和模拟值的年际变化

Fig. 9　Interannual variations of observed and simulated carbon emissions by fires from 1997 to 2010 in Northeast China

多，只是气温的低值（−5.26 ℃）略低于 100 cm 深的土壤温度值（−4.83 ℃）。

图 11 为不同深度土壤温度的月平均值变化规律，结果表明：随着土壤深度的增加，月平均土壤温度变化越趋于平缓，该结果与王会（2017）的研究结果一致。0～100 cm 深度土壤层各月温度变化存在着一定的滞后现象，且随土壤深度的逐渐加深，各层月平均土壤温度逐渐减小。100～200 cm 深度土壤层各月温度变化并不明显，随着热量不断的向下传递，上下层土壤的温差不断减小，几乎变成等温层的状态。以上结果表明土壤热量在传递的过程中会有一定的热量损失，这与很多研究学者的研究结果相一致（吕红玉等，2012；Li et al.，2015）。

表 3 为各层月平均土壤温度与月平均气温的相关系数。结果表明：土壤温度与气温呈正相关关系，且各层土壤温度与气温的相关性随着深度的增加而减弱，这也进一步验证了土壤热量在传递的过程中存在损耗。

图 12 为各层月平均土壤温度与月平均气温的变化规律。结果表明：气温和 0～25 cm 浅层土壤温度在 1～7 月呈上升趋势，7～12 月呈下降趋势，并在 9 月趋于一点。50 cm 土壤温度则在 1～8 月呈

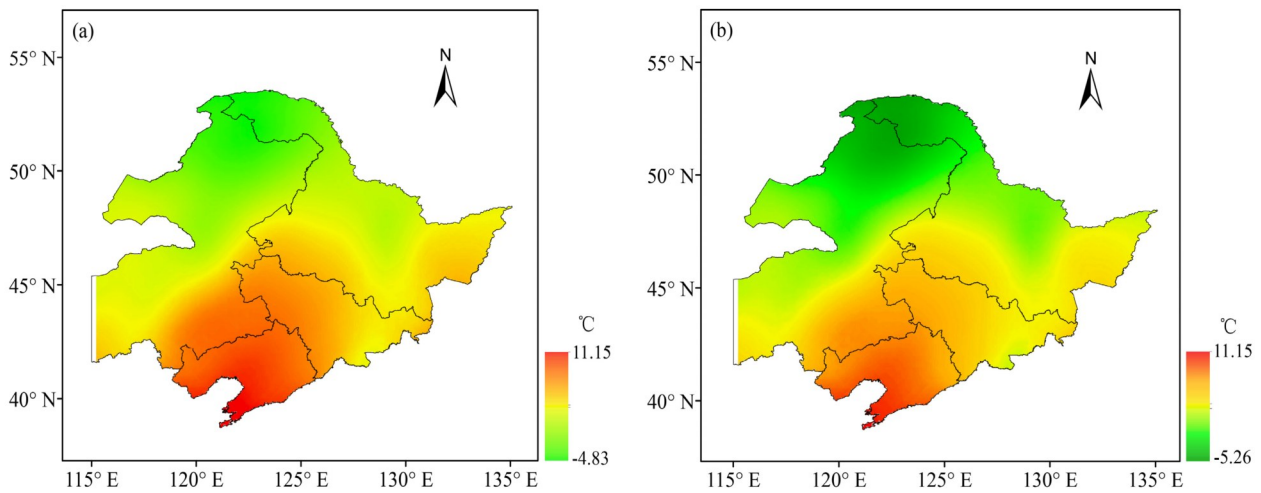

图 10　中国东北地区 1997～2010 年（a）100 cm 深度土壤温度和（b）2 m 气温的空间分布

Fig. 10　Spatial distributions of (a) soil temperature at 100 cm depth and (b) air temperature at 2 m from 1997 to 2010 in Northeast China

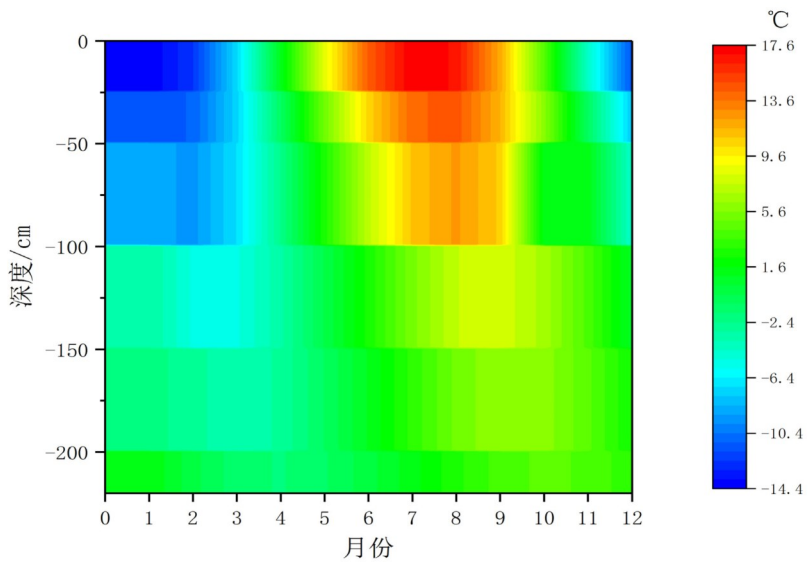

图 11　中国东北地区 1997～2010 年不同深度土壤温度的多年月平均值

Fig. 11　Multi-year monthly average of soil temperature at different depths from 1997 to 2010 in Northeast China

表 3　中国东北地区 1997 ~ 2010 年间月平均气温与各层月平均土壤温度的相关系数

Table 3　Correlation coefficient between monthly mean air temperature and monthly mean soil temperature in each layer from 1997 to 2010 in Northeast China

土层深度	土壤温度与 2 m 气温的相关系数
地表	0.99**
10 cm	0.98**
25cm	0.95**
50 cm	0.90**
100 cm	0.62*
150 cm	0.42
200 cm	0.05

**表示通过 99% 的置信度检验，*表示通过 95% 的置信度检验。

上升趋势，8～12 月呈下降趋势。而 100～200 cm 深层土壤温度则变化比较平缓。气温和 0～25 cm 浅层土壤温度在 7 月达到最大值，依次为：19.91 ℃、17.52 ℃、16.19 ℃、14.66 ℃。50 cm 土壤温度则 8 月最大，为 12.42 ℃。100～150 cm 土壤温度在 9 月达到最大值，依次为 8.08 ℃、6.20 ℃。200 cm 土壤温度则 10 月最大为 4.45 ℃。此外，在 4～10 月，气温高于各层土壤温度，且各层土壤由浅至深温度逐渐降低，而在 11 月至次年 3 月，各层土壤温度均高于气温，且各层土壤由浅至深温度逐渐升高。分析原因，可能是由于 4 月以后地表所接受的太阳辐射逐渐增加，地表不断的升温，由于存在向下的温度梯度，使得热量逐渐向下传递，而 10 月以后地表所接受的太阳辐射逐渐减少，地表不断的冷却降温，热量的传导方向由原来的向下传导变为向上传导，从而实现了土壤温度梯度的逆转（刘洋，2015）。

3.4.2　土壤湿度

土壤湿度（即土壤含水量）对植物生长发育、土壤生产力起着十分重要的作用，进一步也会通过与植被、大气之间的传输改变能量收支平衡，对气候和生态系统有着重要的影响。

由 LPJ-WHyMe 模型模拟的中国东北地区 50 cm 深度（150 cm 与 50 cm 土壤湿度空间分布特征基本一致）土壤湿度平均值的空间分布如图 13a，其分布规律为由东至西逐渐降低，高值区主要分布在东南部地区，该结果与其他数值模拟及观测结果类似（李明星等，2011；赖欣等，2014)。经与图 13b 的降水空间分布相比，土壤湿度与降水的空间分布规律类似，也是由东至西逐渐降低，高值区分布在东南部地区。

图 14 为不同深度土壤湿度的月平均值变化规律，结果表明：3～8 月，浅层土壤湿度高于深层，9 月至次年 2 月，浅层土壤湿度低于深层，且深层土壤湿度月变化较浅层存在着一定的滞后现象。这可能与土壤湿度和降水的时滞相关性有关，张晓影（2009）研究表明：不同深度的土壤湿度和降水呈正相关关系；表层同期相关性最大（可通过 99% 的置信度检验），中层对降水响应存在滞后性。

为方便比较土壤湿度与降水及气温的关系，将降水、气温及土壤湿度的值进行 z-score 标准化处理，即先将各变量距平化处理，再除以该变量的标准差。图 15 为各层土壤湿度和降水的年际变化规律，结果表明：东北地区在 1997～2010 年间土壤湿度呈下降趋势，降水呈较弱的下降趋势，土壤湿度与降水具有正相关关系，50 cm 深度土

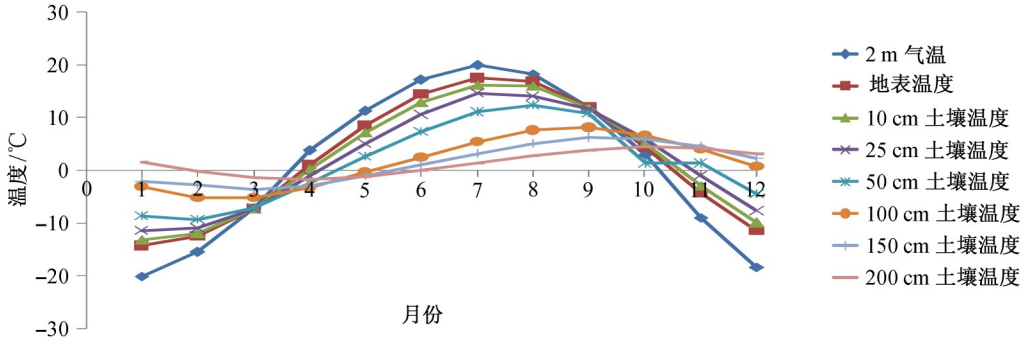

图 12　中国东北地区 1997～2010 年土壤温度与气温的多年月平均值

Fig. 12　Multi-year monthly averages of soil temperature and air temperature from 1997 to 2010 in Northeast China

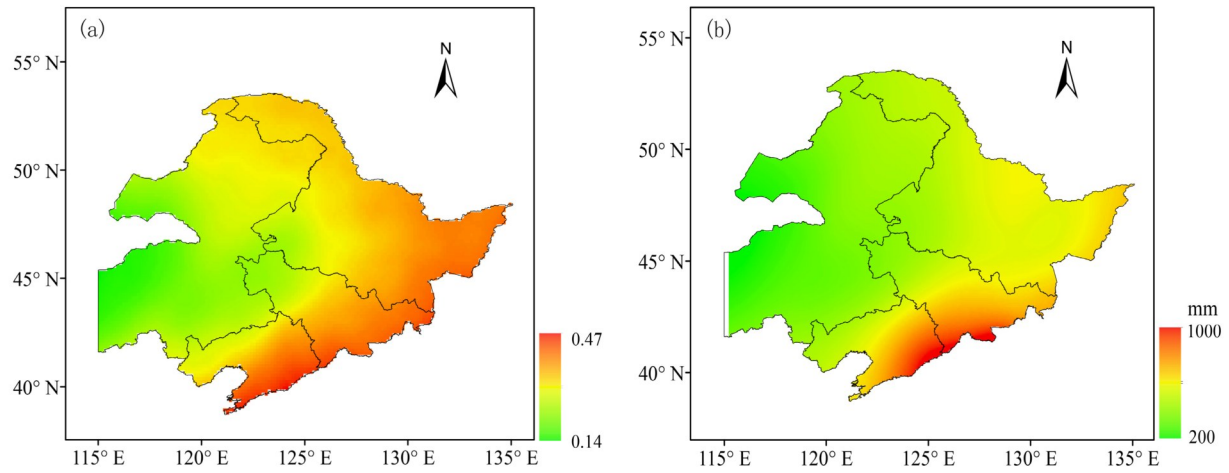

图13 中国东北地区1997～2010年（a）50 cm深度土壤湿度和（b）降水的空间分布

Fig. 13 Spatial distributions of (a) soil moisture at 50 cm depth and (b) precipitation from 1997 to 2010 in Northeast China

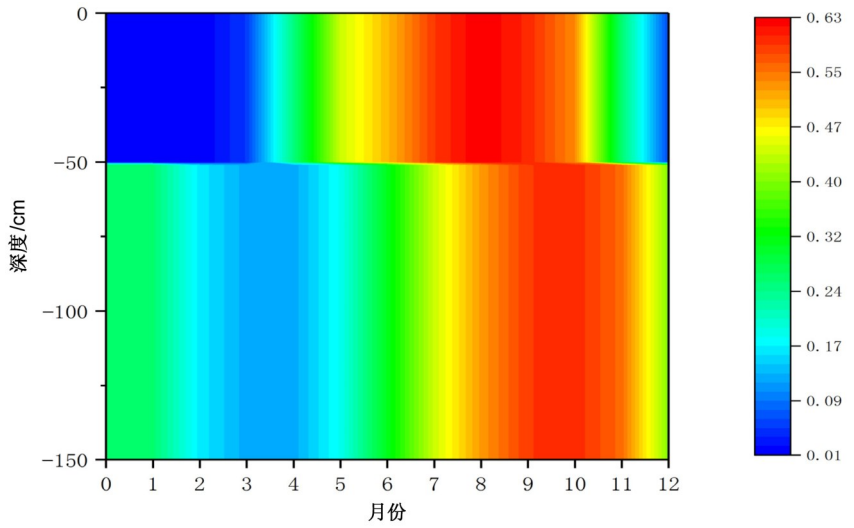

图14 中国东北地区1997～2010年不同深度土壤湿度的多年月平均值

Fig. 14 Multi-year monthly average of soil moisture at different depths from 1997 to 2010 in Northeast China

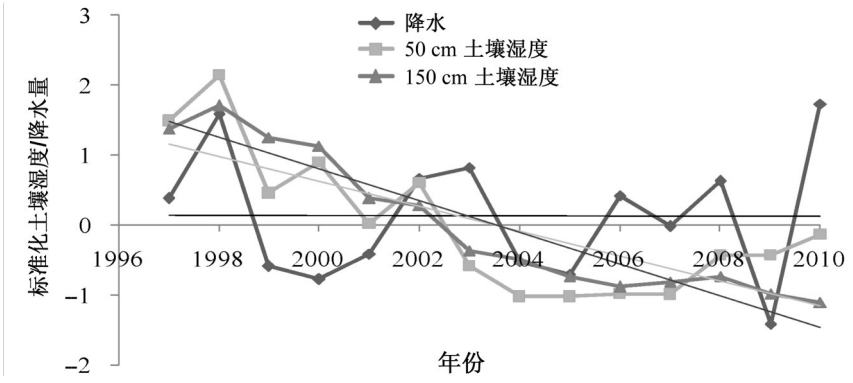

图15 中国东北地区1997～2010年土壤湿度和降水量的年际变化

Fig. 15 Interannual variations of soil moisture and precipitation from 1997 to 2010 in Northeast China

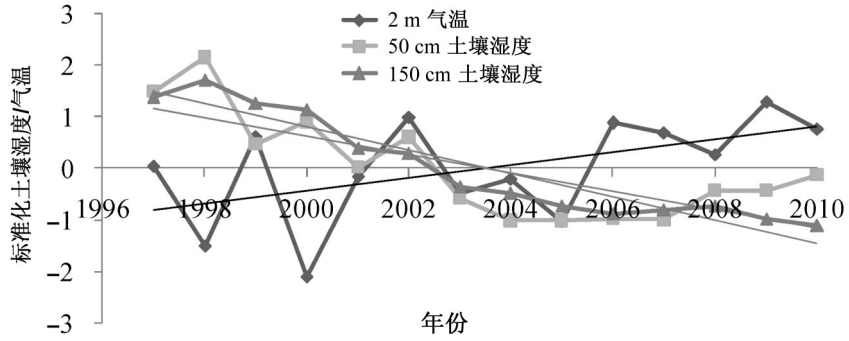

图 16　中国东北地区 1997～2010 年土壤湿度和气温的年际变化

Fig. 16　Interannual variations of soil moisture and temperature from 1997 to 2010 in Northeast China

壤湿度与降水相关系数为 0.39，150 cm 深度土壤湿度与降水相关系数为 0.18。图 16 为各层土壤湿度和气温的年际变化规律，结果表明：土壤湿度与气温具有负相关关系，50 cm 深度土壤湿度与气温相关系数为－0.38，150 cm 深度土壤湿度与气温相关系数为－0.50。1997～2010 年土壤湿度呈减小趋势，与李明星等（2011）的研究结果类似。且较浅层相比，深层土壤湿度变化趋势更加平缓。

因此，无论从空间还是时间变化上看，东北地区的土壤湿度与气温和降水都存在相关性，降水与土壤湿度之间呈正相关关系，而气温与土壤湿度呈反相关关系，与丁旭等（2016）的研究结果类似。

4　结论和讨论

本文基于全球动态植被模型 LPJ-WHyMe，利用空间分辨率为 5 km×5 km 的月平均降水、温度和云量等气象资料，模拟了中国东北地区 2000 年潜在植被分布，并对中国东北地区 1997～2010 年平均 NPP、NEP、燃烧面积和火灾碳排放以及土壤温度和土壤湿度的时空分布进行了估算，主要结论如下：

（1）在 LPJ-WHyMe 模型提供的植被功能类型划分的条件下，中国东北地区主要分布了 5 种植被功能类型，分别是温带夏绿阔叶林、北方常绿针叶林、北方夏绿针叶林、北方夏绿阔叶林和温带草本，模拟结果与观测基本一致。

（2）中国东北地区 NPP 的平均值为 376 g(C) m^{-2}，经对比该结果在其他数值模拟结果和观测结果范围之内。LPJ 模型中一个重要改进是引入了火灾机制，考虑到火灾对碳循环的影响，研究了中国东北地区 NEP 的年际变化。NEP 在 1997～2010 年呈先上升后下降的变化趋势，变化范围在－5.50～91.91 g(C) m^{-2} 之间，年平均 NEP 值为 42.36 g(C) m^{-2}，且 1997～2010 年中国东北地区陆地生态系统总体表现为碳汇。

（3）中国东北地区年平均燃烧面积分数为 0.84%，火灾碳排放量为 42.41 g(C) m^{-2}。整体上模型高估了燃烧面积值和火灾碳排放量，模拟效果并不理想，模型本身存在一定的局限性；对于严重的火灾年份（极高的燃烧面积），模型模拟的效果较差。

（4）中国东北地区土壤温度的空间分布规律与气温一致，都是由南至北逐渐降低。土壤温度与气温呈正相关关系，且各层土壤温度与气温的相关性随着深度的增加而减弱。中国东北地区土壤湿度的空间分布规律与降水类似，都是由东至西逐渐降低，高值区分布在东南部地区。土壤湿度与气温和降水都存在相关性，土壤湿度和降水呈正相关关系，与气温呈反相关关系。

LPJ-WHyMe 模型对中国东北地区估算的结果和其他模型估算的结果基本相似，说明此模型在中国东北地区是适用的，但不同模型间的结果依然存在差异和不确定性。LPJ-WHyMe 模型中虽然引入了火灾机制，但目前模型的火模块在我国东北地区的模拟能力还有待提高，需进一步优化。此外，LPJ-WHyMe 模型目前没有考虑到氮循环过程。基于以上因素，LPJ-WHyMe 模型在中国东北地区的应用研究仍需继续加强。

参考文献（References）

Andreae M O. 1991. Biomass burning: Its history, use, and distribution and its impact on environmental quality and global climate [R]. Global biomass burning: Atmospheric, climatic, and biospheric implications, Williamsburg, Va. 3–21pp.

Cao M K, Tao B, Li K R, et al. 2003. Interannual variation in terrestrial ecosystem carbon fluxes in China from 1981 to 1998 [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 45(5): 552–560.

常顺利, 杨洪晓, 葛剑平. 2005. 净生态系统生产力研究进展与问题 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 41(5): 517–521. Chang Shunli, Yang Hongxiao, Ge Jianping. 2005. Advance and questions in net ecosystem production [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science) (in Chinese), 41(5): 517–521. doi: 10.3321/j.issn:0476-0301.2005.05.021

陈晨, 沃文伟, 范文义. 2016. 森林生态系统碳循环模型参数优化 [J]. 东北林业大学学报, 44(5): 15–19. Chen Chen, Wo Wenwei, Fan Wenyi. 2016. Optimization of ecosystem carbon cycle model parameters [J]. Journal of Northeast Forestry University (in Chinese), 44(5): 15–19. doi:10.3969/j.issn.1000-5382.2016.05.004

程春晓, 徐宗学, 王志慧, 等. 2014. 2001～2010年东北三省植被净初级生产力模拟与时空变化分析 [J]. 资源科学, 36(11): 2401–2412. Cheng Chunxiao, Xu Zongxue, Wang Zhihui, et al. 2014. Temporal–spatial change simulation and analysis of net primary productivity in northeast China from 2001 to 2010 [J]. Resources Science (in Chinese), 36(11): 2401–2412.

丁旭, 赖欣, 范广洲. 2016. 中国不同气候区土壤湿度特征及其气候响应 [J]. 高原山地气象研究, 36(4): 28–35. Ding Xu, Lai Xin, Fan Guangzhou. 2016. Soil moisture characteristics and climate response of different climatic regional in China [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 36(4): 28–35. doi: 10.3969/j.issn.1674-2184•2016.04.005

董云社, 章申, 齐玉春, 等. 2000. 内蒙古典型草地 CO_2, N_2O, CH_4 通量的同时观测及其日变化 [J]. 科学通报, 45(3): 318–322. Dong Yunshe, Zhang Shen, Qi Yuchun, et al. 2000. Simultaneous observation and diurnal variation of CO_2, N_2O and CH_4 flux in typical grassland of Inner Mongolia [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 45(3): 318–322. doi: 10.3321/j. issn: 0023-074X. 2000. 03.018

Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. Science, 292 (5525): 2320–2322. doi:10.1126/science.1058629

Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. 1998. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components [J]. Science, 281(5374): 237–240. doi: 10.1126/science. 281.5374.237

郭丽娟. 2013. 东北东部森林碳循环过程的集水区尺度模拟 [D]. 东北林业大学, 94. Guo Lijuan. 2013. Catchment scale simulation of forest carbon cycle process in the eastern part of Northeast China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Northeast Forestry University, 94.

国志兴, 王宗明, 张柏, 等. 2008. 2000年～2006年东北地区植被NPP的时空特征及影响因素分析 [J]. 资源科学, 30(8): 1226–1235. Guo Zhixing, Wang Zongming, Zhang Bai, et al. 2008. Analysis of temporal–spatial characteristics and factors influencing vegetation NPP in Northeast China from 2000 to 2006 [J]. Resource Science (in Chinese), 30(8): 1226–1235.

韩士杰, 王庆贵. 2016. 北方森林生态系统对全球气候变化的响应研究进展 [J]. 北京林业大学学报, 38(4): 1–20. Han Shijie, Wang Qinggui. 2016. Response of boreal forest ecosystem to global climate change: A review [J]. Journal of Beijing Forestry University (in Chinese), 38(4): 1–20.

韩士杰, 袁志友, 方运霆, 等. 2016. 中国北方森林和草地生态系统碳氮耦合循环与碳源汇效应研究 [J]. 北京林业大学学报, 38(12): 128–130. Han Shijie, Yuan Zhiyou, Fang Yunting, et al. 2016. Coupling of carbon and nitrogen, source and sink of carbon in forest and grassland ecosystems of Northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University (in Chinese), 38(12): 128–130.

Hansen J, Sato M, Ruedy R, et al. 2006. Global temperature change [J]. PNAS, 103(39): 14288–14293. doi:10.1073/pnas.0606291103

Houghton R A, Hackler J L. 2003. Sources and sinks of carbon from land-use change in China [J]. Global Biogeochemical Cycles, 17 (2): . doi:10.1029/2002gb001970

Huang C, Zheng A, Tait Y, et al. 2014. On using smoothing spline and residual correction to fuse rain gauge observations and remote sensing data [J]. Journal of Hydrology, 508: 410–417.

Kicklighter D W, Bruno M, Donges S, et al. 1999. A first-order analysis of the potential role of CO_2 fertilization to affect the global carbon budget: A comparison of four terrestrial biosphere models [J]. Tellus (Ser. B), 51(2): 343–366.

赖欣, 文军, 岑思弦, 等. 2014. CLM4.0模式对中国区域土壤湿度的数值模拟及评估研究 [J]. 大气科学, 38(3): 499–512. Lai Xin, Wen Jun, Cen Sixian, et al. 2014. Numerical simulation and evaluation study of soil moisture over China by using CLM4.0 model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (3): 499–512. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13194

李飞, 赵军, 赵传燕, 等. 2008. 中国潜在植被空间分布格局 [J]. 生态学报, 28(11): 5347–5355. Li Fei, Zhao Jun, Zhao Chuanyan, et al. 2008. The potential vegetation spatial distributions and patterns in China [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 28(11): 5347–5355. doi:10.3321/j.issn:1000-0933.2008.11.017

李洁, 张远东, 顾峰雪, 等. 2014. 中国东北地区近50年净生态系统生产力的时空动态 [J]. 生态学报, 34(6): 1490–1502. Li Jie, Zhang Yuandong, Gu Fengxue, et al. 2014. Temporospatial variations in net ecosystem productivity in Northeast China since 1961 [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 34(6): 1490–1502. doi: 10.5846/stxb201305291221

李明星, 马柱国, 牛国跃. 2011. 中国区域土壤湿度变化的时空特征模拟研究 [J]. 科学通报, 56(16): 1288–1300. Li Mingxing, Ma Zhuguo, Niu Guoyue. 2011. Simulation of temporal and spatial characteristics of soil moisture change in China [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 56(16): 1288–1300. doi: 10.1007/s11434-011-4493-0

李明泽, 王斌, 范文义, 等. 2015. 东北林区净初级生产力及大兴安岭地区林火干扰影响的模拟研究 [J]. 植物生态学报, 39(4): 322−332. Li Mingze, Wang Bin, Fan Wenyi, et al. 2015. Simulation of forest net primary production and the effects of fire disturbance in Northeast China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology (in Chinese), 39(4): 322−332. doi:10.17521/cjpe.2015.0031

Li Qingxiang, Yang Su, Xu Wenhui, et al. 2015. China experiencing the recent warming hiatus [J]. Geophysical Research Letters, 42(3): 889−898. doi:10.1002/2014gl062773

梁妙玲, 谢正辉. 2006. 我国气候对植被分布和净初级生产力影响的数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 11(5): 582−592. Liang Miaoling, Xie Zhenghui. 2006. Simulations of climate effects on vegetation distribution and net primary production in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11(5): 582−592. doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2006.05.003

Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. 1999. Net primary productivity distribution in the BOREAS region from a process model using satellite and surface data [J]. Journal of Geophysical Research, 104 (D22): 27735−27754. doi:10.1029/1999jd900768

刘洋. 2015. 东北地区地温对气候变化响应的研究 [D]. 东北林业大学, 34. Liu Yang. 2015. Observed changes of shallow soil temperatures associated with climate factors in Northeast China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Northeast Forestry University, 34.

吕红玉, 张林媛, 张宏茹, 等. 2012. 1981～2010年三江平原40～320cm深地温变化特征 [J]. 冰川冻土, 34(6): 1346−1352. Lü Hongyu, Zhang Linyuan, Zhang Hongru, et al. 2012. Variations of ground temperature at the depths of 40～320 cm in Sanjiang Plain, Northeast China during 1981−2010 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 34(6): 1346−1352.

毛学刚, 焦裕欣, 张颖. 2017. 基于BEPS模型的东北三省森林生态系统NPP模拟 [J]. 森林工程, 33(1): 22−27. Mao Xuegang, Jiao Yuxin, Zhang Ying. 2017. NPP simulation of forest ecosystem in three provinces of Northeast China based on BEPS model [J]. Forest Engineering (in Chinese), 33(1): 22−27.

Mitchell T D, Jones P D. 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids [J]. Int. J. Climatol, 25(6): 693−712.

Ni J, Sykes M T, Prentice I C, et al. 2000. Modelling the vegetation of China using the process-based equilibrium terrestrial biosphere model BIOME3 [J]. Global Ecology and Biogeography, 9: 463479. doi:10.1046/j.1365-2699.2000.00206.x

Niu Ruoyun, Zhai Panmao. 2012. Study on forest fire danger over Northern China during the recent 50 years [J]. Climate Changes, 111 (3−4): 723−736. doi:10.1007/s10584-011-0198-2

Robinson S D, Moore T R. 2000. The influence of permafrost and fire upon carbon accumulation in high boreal peatlands, northwest territories, Canada [J]. Arct. Antarct. Alp. Res., 32(2): 155. doi:10.2307/1552447

Sitch S, Smith B, Prentice I C, et al. 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model [J]. Global Change Biology, 9(2): 161−185.

孙国栋. 2009. LPJ模型对1981～1998年中国区域潜在植被分布和碳通量的模拟 [J]. 气候与环境研究, 14(4): 341−351. Sun Guodong. 2009. Simulation of potential vegetation distribution and estimation of carbon flux in China from 1981 to 1998 with LPJ dynamic global vegetation model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14(4): 341−351.

孙艳玲, 延晓冬, 谢德体, 等. 2007. 应用动态植被模型LPJ模拟中国植被变化研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 29(11): 86−92. Sun Yanling, Yan Xiaodong, Xie Deti, et al. 2007. Application of LPJ model in simulating vegetation distribution of China [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition) (in Chinese), 29 (11): 86−92.

王斌. 2015. 东北地区NPP和NBP的定量模拟研究 [D]. 东北林业大学, 41pp. Wang Bin. 2015. Quantitative simulation of NPP and NBP in Northeast China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Northeast Forestry University, 41pp.

王会. 2017. 中国地温水平空间分异与变化趋势研究 [D]. 东北林业大学, 35pp. Wang Hui. 2017. Spatial differentiation and change trend of geothermal level in China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Northeast Forestry University, 35pp.

王苗苗. 2016. 东北地区生态系统碳通量模拟及林火影响分析 [D]. 福州大学, 91pp. Wang Miaomiao. 2016. Simulation of ecosystem carbon flux and impact of forest fire in Northeast China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Fuzhou University, 91pp.

王晓婷, 郭维栋, 钟中, 等. 2009. 中国东部土壤温度、湿度变化的长期趋势及其与气候背景的联系 [J]. 地球科学进展, 24(2): 181−191. Wang Xiaoting, Guo Weidong, Zhong Zhong, et al. 2009. Long term trends of soil moisture and temperature change in East China in relationship with climate background [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 24(2): 181−191.

Wania R. 2007. Modeling northern peatland land surface processes, vegetation dynamics and methane emission [D]. Ph. D. dissertation, University of Bristol, 130pp.

Wania R, Ross I, Prentice I. 2009a. Integrating peatlands and permafrost into a dynamic global vegetation model: I. Evaluation and sensitivity of physical land surface processes [J]. Global Biogeochemical Cycles, 23: 3014−3033.

Wania R, Ross I, Prentice I. 2009b. Integrating peatlands and permafrost into a dynamic global vegetation model: II. Evaluation and sensitivity of vegetation and carbon cycle processes [J]. Global Biogeochemical Cycles, 23: 3015−3034.

Wania R, Ross I, Prentice I. 2010. Implementation and evaluation of a new methane model within a dynamic global vegetation model: LPJ-WHyMe v1.3.1 [J]. Geoscientific Model Development, 3(2): 565−584.

翁恩生, 周广胜. 2005. 用于全球变化研究的中国植物功能型划分 [J]. 植物生态学报, 29(1): 81−97. Weng Ensheng, Zhou Guangsheng. 2005. Defining plant functional types in China for global change studies [J]. Journal of Plant Ecology (in Chinese), 29(1): 81−97.

薛梅, 陈芸芝, 闫敏, 等. 2018. 中国东北地区植被NPP模拟与时空变

化分析 [J]. 福州大学学报(自然科学版), 46(6): 821−830. Xue Mei, Chen Yunzhi, Yan Min, et al. 2018. Simulation and spatio-temporal variation analysis of net primary productivity in Northeast China [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition) (in Chinese), 46(6): 821−830.

杨金艳, 王传宽. 2005. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量 [J]. 生态学报, 25(11): 83−90. Yang Jinyan, Wang Chuankuan. 2005. Soil carbon storage and flux of temperate forest ecosystems in northeastern China [J]. Journal of Ecology (in Chinese), 25(11): 83−90.

于颖. 2013. 基于InTEC模型东北森林碳源汇时空分布研究 [D]. 东北林业大学, 92pp. Yu Ying. 2013. Temporal and spatial distribution of carbon source sink in Northeast China forest based on InTEC model [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Northeast Forestry University, 92pp.

张峰, 周广胜. 2008. 中国东北样带植被净初级生产力时空动态遥感模拟 [J]. 植物生态学报, 32(4): 798−809. Zhang Feng, Zhou Guangsheng. 2008. Spatial−temporal variations in net primary productivity along Northeast China Transect from 1982 to 1999 [J]. Journal of Plant Ecology (in Chinese), 32(4): 798−809.

张军辉, 于贵瑞, 韩士杰, 等. 2006. 长白山阔叶红松林CO_2通量季节和年际变化特征及控制机制 [J]. 中国科学, 36(S1): 60−69. Zhang Junhui, Yu Guirui, Han Shijie, et al. 2006. Seasonal and interannual variability and control mechanism of CO_2 flux in broadleaved pine forest in Changbai Mountain [J]. Science China (Ser. D) (in Chinese), 36(S1): 60−69.

张璐, 王静, 施润和. 2015. 2000~2010年东北三省碳源汇时空动态遥感研究 [J]. 华东师范大学学报(自然科学版), (4): 164−173. Zhang Lu, Wang Jing, Shi Runhe. 2015. Temporal−spatial variations of carbon sink/source in Northeast China from 2000 to 2010 [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science) (in Chinese), (4): 164−173.

张晓影. 2009. 中国区域土壤湿度特征分析及评估 [D]. 中国地质大学(北京), 77pp. Zhang Xiaoying. 2009. Analysis and assessment of soil moisture characteristics in China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), China University of Geosciences, 77pp.

赵传燕, 冯兆东, 南忠仁, 等. 2007. 黄土高原祖厉河流域潜在植被分布模拟研究 [J]. 地理学报, 62(1): 52−61. Zhao Chuanyan, Feng Zhaodong, Nan Zhongren, et al. 2007. Modelling of potential vegetation in Zulihe River watershed of the west−central Loess Plateau [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 62(1): 52−61. doi: 10.3321/j.issn:0375-5444.2007.01.006

赵俊芳, 延晓冬, 贾根锁. 2009. 1981~2002年中国东北地区森林生态系统碳储量的模拟 [J]. 应用生态学报, 20(2): 241−249. Zhao Junfang, Yan Xiaodong, Jia Gensuo. 2009. Simulation of carbon stocks of forest ecosystems in Northeast China from 1981 to 2002 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology (in Chinese), 20(2): 241−249.

Zobler L. 1986. A world soil file for global climate modeling [R]. NASA Technical Memorandum, Washington, D. C., 32pp.