

周文艳,罗勇,史学丽,等,2019. 陆面过程模式 BCC_AVIM 中地表覆盖数据现状[J]. 气象,45(10):1476-1482. Zhou W Y,Luo Y,Shi X L,et al,2019. Status of land cover datasets for the BCC_AVIM land surface model[J]. Meteor Mon,45(10):1476-1482 (in Chinese).

陆面过程模式 BCC_AVIM 中地表覆盖数据现状*

周文艳¹ 罗 勇² 史学丽¹ 李伟平¹ 张艳武¹

¹ 国家气候中心,北京 100081

² 清华大学地球系统科学系,全球变化研究院,北京 100084

提 要: 地表覆盖是陆面和气候模式中的一个重要基础数据。以陆面过程模式 BCC_AVIM 为例,介绍模式中的地表覆盖数据变量、数据分辨率、不同类型数据的来源,重点比较分类方法差异巨大且类型众多的植被覆盖。综述比较了国际和国内常用的几套全球地表覆盖数据的来源、分类系统和分类方法以及空间分辨率,根据陆面过程模式的地表覆盖数据需求,确定不同全球土地覆盖数据在模式中的应用方法,讨论分析了全球地表覆盖产品在模式应用中存在的差距,提出不同遥感数据产品之间一致性较差的可能解决方案,探讨遥感数据产品在模式中应用的可能方式,以期更好地发挥全球地表覆盖数据产品的作用。

关键词: 全球土地覆盖数据,陆面模式,基础数据,差距

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.10.014

Status of Land Cover Datasets for the BCC_AVIM Land Surface Model

ZHOU Wenyan¹ LUO Yong² SHI Xueli¹ LI Weiping¹ ZHANG Yanwu¹

¹ National Climate Centre, Beijing 100081

² Center for Earth System Science/Institute for Global Change Studies of Tsinghua University, Beijing 100084

Abstract: The land cover (LC) data is an important basic input in land surface and climate models. The LC datasets are introduced in this paper by taking the BCC_AVIM model as an example, including the data resolution, sources of different land types, and especially the vegetation cover with different types and classification methods are comparatively analyzed. The available international and domestic global LC datasets about the sources, classification strategy methods, and spatial resolutions are briefly overviewed. The applications of the various LC datasets into the land surface model are briefly discussed. There are some gaps between LC datasets and model use. Then, the possible solution to the poor consistency among different LC remote sensing datasets and possible application methods of the LC datasets in numerical models are addressed so as to make better use of the global LC datasets.

Key words: global land cover data, land surface model, base data, gap

* 国家重点研究计划(2016YFA0602602、2017YFA0604304)、公益性行业(气象)科研专项(20150601)、国家重点研究计划和国家自然科学基金面上基金项目(41075057)共同资助

2018 年 10 月 22 日收稿; 2019 年 7 月 15 日收修定稿

第一作者:周文艳,主要从事陆面模式发展及遥感数据应用研究. Email:zhouwy@cma.gov.cn

通信作者:罗勇,主要从事气候系统模式研制. Email:Yongluo@mail.tsinghua.edu.cn

引 言

陆面过程是陆地和大气之间能量、水分和碳通量的交换过程,陆地表面不同下垫面状况改变可对气候产生影响(Dickinson, 1983; Dickinson et al, 1993; Hahmann and Dickinson, 2001; Ji and Hu, 1989; 孙菽芬, 2002; 董敏, 2001; 黄洪峰, 1997; 张果等, 2016; 张强等, 2017)。陆面过程模式是通过模拟的方法,建立陆面动量、能量及水分输运等物理过程和生化机理过程的参数化模型(孙菽芬, 2005; Dai and Zeng, 1997; Dai et al, 2003; 2013; 周文艳等, 2008; 2010; Sellers et al, 1986; 师春香等, 2018)。陆面过程模式由物理生态生化等过程和陆面基础数据集构成,还包括陆面初始状态变量和模拟评估等。陆面基础数据集的建设同物理建模一样重要,其中,基础数据中地表覆盖数据的精确性在很大程度上决定了模式的模拟性能,地表覆盖数据的改变并会通过相关参数(吴龙刚等, 2014; 梁晓和戴永久, 2008; Peters-Lidard et al, 1998; 茅宇豪等, 2006)影响陆面过程中复杂的生物地球物理和化学过程等,并利用耦合过程影响大气、气候系统。为了更好体现模式对于地表特征描述的合理性,促进陆面过程模式以及气候模式模拟性能的提高,地表覆盖数据也面临更高的要求。

随着卫星数据和遥感技术的飞速发展,全球多套地表覆盖数据被建立和不断完善。如何根据陆面过程模式对地表覆盖数据的需求,研制满足模式需要的地表覆盖数据,怎样将数据应用与模式模拟需求科学地结合等研究工作具有重要的科学意义。为了更好地利用全球地表覆盖数据,有必要了解陆面过程模式中需要的地表覆盖数据的详细信息,本文以北京气候中心气候模式(BCC_CSM)中陆面过程模式 BCC_AVIM 为例(Wu et al, 2013),对数值模式中的地表覆盖数据分类,对不同分辨率的陆面地表覆盖数据及相关数据来源进行介绍;本文也详细梳理分析了目前全球地表覆盖数据的发展概况,其在陆面模式中的具体应用方法等,以期更好地发挥全球地表覆盖数据产品的作用,促进陆面过程模式的发展。

1 陆面过程模式 BCC_AVIM 中地表覆盖数据介绍

地表覆盖信息作为陆面过程模式的基本输入场引入模式中,并通过相关的参数与陆面过程方案来影响陆面、大气和气候系统。在陆面过程模式整个积分运行过程中,表征地表覆盖基础特征信息的地表覆盖数据固定不变,即使在具有动态植被功能描述的陆面过程模式中,其动态变化也仅仅是自然植被中的灌木、草地和森林等特定类型覆盖比例随季节会有变化,而模式次网格上的植被种类固定不变(史学丽等, 2015; 2016)。以 BCC_AVIM 陆面过程模式为例,详细介绍陆面过程模式中建立的地表覆盖数据。

1.1 陆面过程模式 BCC_AVIM 简介

国家气候中心研制开发的 BCC_AVIM(Wu et al, 2013),是在美国 NCAR CLM3(Oleson et al, 2004)和 AVIM2(Ji, 1995; Ji et al, 2008)基础上发展而来。该模式是描述陆地表面、土壤内部以及陆-气界面的物质、能量和通量等交换过程的陆面分量模式,能够模拟植被、土壤、大气之间的热量和水分交换的生物物理过程,以及植被生长的生态生理过程与土壤碳分解等生物化学过程。

1.2 陆面过程模式 BCC_AVIM 中地表覆盖分类及数据信息

BCC_AVIM 的模式框架和物理方案主要来自 CLM3.0(Oleson et al, 2004)陆面过程模式,其中地表覆盖分类方法源自 CLM3.0,目前地表覆盖数据的构成来源主要来自 CLM 相继版本自带的原始数据。陆面过程模式考虑不同植被类型间的生态差异,不同土壤类型间的水文和热力差异,采用次网格方式描述复杂的地表覆盖状况,即允许在一个网格点内存在多种地面覆盖类型,用次网格结构表示陆面过程模式中的空间非均匀性。模式中地表覆盖采用给定的分类方法,除不同植被外,非植被覆盖类型包括湿地、湖泊、冰川和城市等不同下垫面类型,其中植被部分根据不同的植被功能类型(PFT)进一步细分,一般仅选取网格点中 4 种最大覆盖比例的 PFT 类型。

地表覆盖数据主要包括植被类型比例、湿地比

例、湖泊比例、冰川比例、城市比例等。BCC_AVIM 陆面模式里采用的原始数据都是网格点数据,湿地、湖泊和植被类型比例的空间分辨率都是 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,冰川的空间分辨率都是 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。陆面过程模式的地表覆盖数据生成是根据陆面过程模式的需要,将这些不同分辨率的原始数据统一处理成模式的分辨率。由于原始数据分辨率各不相同,制作运行陆面过程模式需要的地表覆盖数据时,需要对不同分辨率的原始数据变量采用相应的插值方法,将各个变量的分辨率统一到气候模式的分辨率。湿地湖泊等和植被无关的变量,都是采用常用插值方法将数据插值到模式分辨率。植被类数据处理比较特殊,植被类型的覆盖比例数据是将植被类型比例进行排序,模式网格内植被类型取植被类型所占比例最多的几种植被,缺测部分用附近网格的植被类型补缺。湿地湖泊的分辨率比较低,当数据插值到较高分辨率时,生成的高分辨率数据对于湿地湖泊占比描述的精确性会受到影响。冰川的原始数据分辨率较高,插值后产生的高分辨率地表覆盖数据较精细精确。陆面模式使用的原始数据其分辨率不断提高,各变量分辨率从 0.5° 进一步提到 0.05° 。高分辨率地表覆盖数据被插值到分辨率接近或者分辨率较低时,更新的地表覆盖数据集能更精细准确地表征下垫面信息,这有助于改善气候模式的模拟性能。目前根据高分辨气候模式的需要,BCC_AVIM 陆面模式已经建立了空间分辨率 T382(格点: 1152×576 ,近 45 km)的高分辨率地表覆盖数据集。更高分辨率的地表覆盖数据是否更精确地描述下垫面信息,还需要利用地表覆盖数据进行数值试验来验证不断发展的地表覆盖数据的可靠性,比如通过数值试验表明,更新的湿地湖泊数据并不比原有版本的数据准确。

地表覆盖数据中湖泊和湿地的百分比资料源自 Cogley(1991)的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 永久淡水湖泊和湿地沼泽资料。冰盖资料来自 IGBP 资料和信息系统全球 1 km 陆面覆盖资料集(Loveland et al, 2000)。在使用时,对于数据来源及数据精确度需要更深入的研究和探讨。由于受限于资料的获取,而且多数数据信息只能来源于文献的介绍,我们对于模式使用的地表覆盖数据的了解并不深入。

理想的精度评估需要以严格抽样理论为基础,但是野外检验数据的获取受经费预算等因素的限制,对模式使用的原始数据的精度评估工作是缺乏

的。虽然这些数据已经在气候模式中实际应用,但随着全球地表覆盖数据的不断发布,对模式使用的数据进行细致系统的检验和精度评价将是长期和重要的研究工作。

在 BCC_AVIM 模式里植被采用基于植被功能类型的分类方式,除了对林地、灌木、草地进行形态、特性等方面的划分外,还根据不同纬度气候带等进一步细分。有植被覆盖的表面包括 4~16 种可能的植被和裸土,在沙漠地区仍然考虑有稀疏植被存在。根据形态、特性等,将植被划分为常绿或落叶针叶林、常绿或落叶阔叶林、灌木、草地和作物。根据不同纬度气候带,将植物类型分为北极、北方、温带和赤道、常绿和落叶灌木等(史学丽等, 2016)。这些植物类型的叶和茎光学特性不同,决定着不同的太阳辐射反射、透射和吸收参数。在陆面过程模式里每一个陆面网格点给定每一种植被逐月的叶面积和茎面积指数,叶面积指数的初值是叶面积和茎面积指数的加权平均,在 BCC_AVIM 模式中,由于加入了动态植被模块,叶面积指数是根据植被生长过程计算得到的,不需要根据给定的逐月数据插值得到。

在目前 BCC_AVIM 模式中城市下垫面占网格的覆盖百分比设为 0%,为将来的城市参数化做准备。

2 陆面地表覆盖数据产品信息

由于土地覆盖数据的重要意义(Turner et al, 1993; Turner and Meyer, 1994; 史培军等, 2000),世界各国和许多国际组织相继运用不同的图像处理技术和数据,利用不同年份的卫星遥感数据及不同分类体系和方法,建立多套全球地表覆盖数据产品。目前国际上已经建立几个流行的 1 km 分辨率的全球土地覆盖数据集,包括(1)美国地质调查局 1992 年为国际圈-生物圈计划建立的 DISCover 全球土地覆盖数据集(Loveland et al, 2000);(2)美国马里兰大学建立的 UMD 全球土地覆盖数据集(Hansen et al, 2000);(3)美国波士顿大学 2000 年利用 MODIS 数据生成的 MODIS 数据集(Friedl et al, 2002);(4)欧盟联合研究中心空间应用研究所发布的 GLC2000 数据(Fritz et al, 2003);(5)欧盟的 GlobCover 数据(Bontemps et al, 2010)。

DISCover 数据集、UMD 数据集和 MODIS 数据集都是利用 IGBP 的分类系统,GLC2000 采用的

是联合国粮农组织的地表覆盖 22 类的分类方案,各数据采用不同的分类体系,不同数据产品间的一致性就比较差。在陆面过程模式里植被分类系统采用 IGBP 或者 USGS 分类系统,上述的全球土地覆盖数据集在使用时,如果植被分类系统与模式分类系统不一致,要进行植被种类的科学转化,使全球土地数据集中的植被种类和模式的植被种类一致,而湖泊湿地比例等数据只需要进行数据的对接。前 4 套全球地表覆盖数据的分辨率均为 1 km,都是利用 1 km 的卫星资料和计算机自动图像分类方法生成,只是数据产生的年代不同。高分辨率的气候模式分辨率接近 45 km 左右,因此全球地表覆盖数据的分辨率完全可以满足模式分辨率的需要。在实际运用中,需要对插值完成的数据进行数据检验。一些研究对这些数据产品进行精度评价,这些产品的自我评价分类精度为 66.9%~78.3%,由于这些精度评价结果是基于少数样点数据得到的,并不能代表全球范围的精度评价,尤其在地表覆盖类型差别比较大的区域,不同产品之间的一致性比较差,因此不确定性还比较大(Gong et al, 2013; Yu et al, 2013)。全球土地覆盖数据公布之后,针对数据的空间分布和精度评价等方面有不少研究工作(冉有华等, 2009),比如利用中国 1:10 万土地利用数据评价了上述 4 种全球土地覆盖数据在中国区域的分类数据精度,发现 GLC 和 MODIS 数据整体精度较高,IGBP 的整体分类精度相对较低,3 种数据在局部都存在明显分类错误,UMD 的分类精度最低。4 种数据反映的局部特征在细节上有差异,一些分类数据之间都存在不同程度的混发现象。对于数据精度的定量评价工作,不仅是促进土地覆盖制图质量提高的前提,而且有助于完善陆面过程模式及其他应用。宁佳等(2012)比较了 MODIS 和 GlobCover 2 套全球土地覆盖数据集,指出虽然数据来源、分类系统和分类方法不同,这些产品在空间分布和数量上一致性较差,但是仍可以满足较低要求的土地覆盖分析需求。

另外欧盟的 GlobCover 数据采用联合国粮农组织的 22 类分类方案,将数据分辨率提高到了 300 m,发布了 GlobCover2005 和 GlobCover2009 数据集。总的来说全球土地覆盖数据直接运用的比较多,但是数据的精细化评估工作还是缺乏的。

中国在近几十年也进行过地表覆盖数据产品的研制,也相继发布了多套高分辨率地表覆盖数据。

CG-LTDR 卫星气候数据集是中国科学院地理科学与资源研究所和国家卫星气象等单位合作制定的产品(史学丽等, 2015),土地覆盖数据的时间跨度为 1990—2012 年,数据分辨率有 0 m, 250 m, 300 m, 1 km 等,包括湿地、湖泊、冰川、叶面积、地表反照率等不同变量。CG-LTDR 数据在中国地区,除了土地覆盖分辨率为 500 m,其他产品空间分辨率达到 1 km,克服了一般卫星气候数据集存在的时空连续性协调性差等缺点,具有空间分辨率高、时间序列长、数据一致性高等特点,可以应用到全球和中国气候变化领域(张强等, 2017)。GlobeLand30 是全球 30 m 地表覆盖数据,它是 2014 年制定的高分辨率基础数据,由中国国家基础地理信息中心牵头多家单位参与。30 m 分辨率数据能较好反映人类活动所形成的主要地表覆盖格局(Chen et al, 2014; 2015)。数据在研制中使用了大量的辅助数据和参考资料,包括耕地、森林、草地、冰川和永久积雪、苔原、裸地、灌木地等 10 种地表覆盖类型,分类系统主要参考了 GLC2000 和 GlobCover2009 全球地表覆盖数据。FROM-GLC 由清华大学地球系统科学研究中心研制,是首套 30 m 分辨率的全球地表覆盖制图产品,包括森林、灌木、草地、农田、裸地、水体和冰雪等地表覆盖类型,数据对森林没有进行分类细化,没有体现出不同区域气候带森林植被的分类不同。FROM-GLC 作为高分辨率观测和监测全球地表覆盖数据(Gong et al, 2013),对于提高水分类精度有明显优势。中国土地覆盖数据的现状类似全球土地覆盖数据,根据不同来源数据制作了高分辨率土地覆盖数据,每套数据的分类系统也有差别,分辨率越来越高,可以满足气候模式的需要,可是植被类数据仍然需要复杂的处理方法进行数据对接,数据的精度评估工作相对也是缺乏的。

中国高分辨率土地覆盖数据发布之后,能够在气候模式中得到应用。史学丽等(2015)将 CG-LTDR 土地覆盖数据应用到国家气候中心的数值模式里,表明 CG-LTDR 数据的地表类型在中国区域分布特征描述是合理的,在冰川比例、湿地的面积以及湖泊比例等数据上与 BCC_AVIM 基础数据有差别。数值试验表明,模拟结果的差别主要位于地表覆盖数据不同的区域。CG-LTDR 和 BCC-AVIM 模式植被数据的不同使得模拟的影响比较广泛。在气候模式中使用 GlobeLand30 数据(史学丽等, 2016),同样冰川和水体分布比例的差别会影响模拟

结果, GlobeLand30 和 BCC-AVIM 数据的地表覆盖分类的差别主要是由于 GlobeLand30 对灌木和森林等植被分类比较少, 更新植被数据的气候效应比较明显。FROM-GLC 对林地、灌木、草地、作物和裸土的基本分布特征都有合理的描述, FROM-GLC 与模式数据的差别总体小于 GlobeLand30 和 CG-LTDR, 但差别的空间分布不相同。尽管 3 种新的高分辨率数据产品都能合理反映基本的地表覆盖特征, 但不同地表覆盖数据之间的差异明显, 这与不同遥感数据所用的反演方法、源数据、覆盖分类方法和植被分类定义等方面的差别有关。

总体来说陆面地表覆盖数据产品的信息来源有如下几个趋势和特点: (1) 来源多数是流行的几套全球卫星资料, 来源相对比较集中, 资料分辨率越来越高; (2) 不同遥感数据产品之间有差别, 主要体现在植被上, 植被分类和同一时段的反演结果都有明显差异; (3) 随着高分辨率遥感数据的日益丰富, 需要更重视地表覆盖数据的精度评价, 为地表覆盖数据的实际应用提供更好的资料支撑作用。

3 全球地表覆盖资料在陆面过程模式 BCC_AVIM 中的具体应用

全球地表覆盖资料可以用来更新陆面过程模式地表覆盖数据, 并通过数值模拟分析不同地表覆盖类型的数据, 比如湿地、湖泊和冰川, 植被类型等对气候模拟结果的影响。不同的地表覆盖资料在陆面过程模式 BCC_AVIM 中具体应用如下:

(1) 上述全球土地覆盖资料集中的冰川积雪、湿地、湖泊等非植被类型需要将资料插值到模式分辨率上, 然后将资料数据直接与模式中的类型对接更新, 没有资料的区域沿用原模式中的数据进行补缺。

(2) 植被部分处理过程比较复杂。植被部分处理主要是要求地表覆盖数据中的植被类型和陆面过程模式中的植被类型必须一致。全球土地覆盖数据在 BCC_AVIM 模式应用时需要对各遥感数据进行分类细化处理(Lawrence and Chase, 2007), 以符合陆面过程模式的需求, 比如森林细分为阔叶常绿林、针叶常绿林、阔叶落叶林、针叶落叶林, 把灌木细分为常绿灌木和落叶灌木两类; 然后对全球进行热带、温带和寒带区域的划分(Osborn and Jones, 2014), 并划分出极区与非极区; 最后, 将新遥感数据中的矮

草区区分为 C3 和 C4 草(Still et al, 2003)。对于新遥感数据中的其他下垫面类型, 将根据辅助材料进行对应的类型转换。

(3) 新的遥感数据产品空间分辨率都远高于 BCC_CSM 气候模式, 需要将高分辨率的遥感数据插值到气候模式分辨率, 得到模式分辨率网格点内较为准确的各类地表覆盖类型数据, 及其在网格内的各下垫面类型百分比数据。需要注意的是, 网格点中不同植被类型在网格内的百分比之和等于 100%, 所以插值得到的植被类型的百分比需要修正, 使所有 PFT 类型占整个网格点的百分比总和等于 100%。

在高分辨率地表覆盖数据产品的实际应用工作中, 可以发现全球地表分类体系与气候模式需求有一定差异, 产品分类精度及一致性不能满足应用需求, 使得遥感数据产品研制与气候模式需求之间存在明显差异, 近些年来已有许多工作试图将两者联系起来, 以尽可能地将高分辨率的数据产品用于模式中。

4 结论与讨论

全球地表覆盖数据产品在陆面过程模式中的应用存在一定的差距, 主要有三点: (1) 二者出发点不同, 高分辨率遥感数据产品要求提供准确的地表覆盖类型及比例信息, 而陆面过程模式中的地表覆盖信息作为一个基础的输入场, 通常只需要给定不同分辨率网格点上的地表覆盖类型及其在网格内的占比信息; (2) 分辨率差异, 目前全球遥感数据的分辨率可达 30 m, 而数值模式的分辨率现在也就是几十千米, 因此在陆面过程模式的网格点内, 通常是根据不同类型所占的比例来确定其在网格点上的影响, 而不会严格要求得到在网格尺度上不同覆盖类型精确的空间分布状况。但是将现有的全球地表覆盖数据尺度插值到模式格点分辨率时, 得到不同地表覆盖类型面积比例可能会有误差, 这会影响地表覆盖数据对全球气候和气候变化效应研究结果。(3) 分类类别的差异, 目前高分辨率的遥感数据中地表覆盖的分类类别数目一般都比陆面过程模式中的分类数目少, 要实现新数据的应用, 采用的方法是参考陆面过程模式中的分类方法, 通过借助其他辅助数据来扩展融合遥感数据产品的覆盖分类, 这种做法在一定程度上会影响遥感数据的准确度和应用效率。

从以上描述可以了解到,陆面过程模式的功能越来越多,高分辨率的遥感数据产品包含的地面要素信息也越来越丰富,因此未来两者之间的联系也将日益密切。为了更高效地利用全球遥感数据产品,未来的遥感数据产品最好在一致性上要加强,可以利用同一套源数据,在相同的地表覆盖分类下制作地表覆盖类型及其相关的参数,确保提供给模式中应用的地表信息一致,从而有利于提高模式效果。在未来多个陆面变量数据都可用的情况下,可以考虑以遥感数据所定的分类方式为主导,相应增减不同模式中的类别,以检验其对各类模式的影响。

参考文献

- 董敏,2001. 国家气候中心大气环流模式——基本原理和使用说明[M]. 北京:气象出版社:99-132. Dong M, 2001. Fundamental Principle and Operating Instruction of NCC AGCM[M]. Beijing:China Meteorological Press:99-132(in Chinese).
- 黄洪峰,1997. 土壤·植物·大气相互作用原理及模拟研究[M]. 北京:气象出版社:1-43. Huang H F,1997. The Interaction of Soil and Vegetation and Atmosphere and Simulation Study[M]. Beijing:Meteorological Press:1-43(in Chinese).
- 梁晓,戴永久,2008. 通用陆面模式对土壤质地和亮度的敏感性分析[J]. 气候与环境研究,13(5):585-597. Liang X,Dai Y J,2008. A sensitivity study of the common land model on soil texture and soil brightness[J]. Clim Environ Res, 13(5):585-597(in Chinese).
- 茅宇豪,刘树华,李婧,2006. 不同下垫面空气动力学参数的研究[J]. 气象学报,64(3):325-334. Mao Y H,Liu S H,Li J,2006. Study of aerodynamic parameters for different underlying surfaces[J]. Acta Meteor Sin,64(3):325-334(in Chinese).
- 宁佳,张树文,蔡红艳,等,2012. MODIS 和 GLOBCOVER 全球土地覆盖数据集对比分析——以黑龙江流域为例[J]. 地球信息科学学报,14(2):240-249. Ning J,Zhang S W,Cai H Y, et al,2012. A comparative analysis of the MODIS land cover data sets and GLOBCOVER land cover data sets in Heilongjiang Basin[J]. J Geo-Inf Sci,14(2):240-249(in Chinese).
- 冉有华,李新,卢玲,2009. 四种常用的全球 1km 土地覆盖数据中国区域的精度评价[J]. 冰川冻土,31(3):490-500. Ran Y H,Li X,Lu L,2009. Accuracy evaluation of the four remote sensing based land cover products over China[J]. J Glaciol Geocryol,31(3):490-500(in Chinese).
- 师春香,张帅,孙帅,等,2018. 改进的 CLDAS 降水驱动对中国区域积雪模拟的影响评估[J]. 气象,44(8):985-997. Shi C X,Zhang S,Sun S, et al,2018. Effect of improved precipitation CLDAS on snow simulation in China[J]. Meteor Mon, 44(8):985-997(in Chinese).
- 史培军,宫鹏,李晓兵,等,2000. 土地利用/覆盖变化研究的方法与实践[M]. 北京:科学出版社:115. Shi P J,Gong P,Li X B, et al,2000. Method and Practice on Land Use/Cover Change[M]. Beijing:Science Press:115(in Chinese).
- 史学丽,聂肃平,居为民,等,2016. GlobeLand30 地表数据对北京气候中心气候模式的影响[J]. 中国科学:地球科学,46(9):1197-1208. Shi X L,Nie S P,Ju W M, et al,2016. Climate effects of the GlobeLand30 land cover dataset on the Beijing Climate Center climate model simulations[J]. Sci China Earth Sci,59(9):1754-1764(in Chinese).
- 史学丽,张芳,周文艳,等,2015. CG-LTDR 地表覆盖数据对 BCC_AVIM 1.0 陆面温度模拟的影响研究[J]. 地球信息科学学报,17(11):1294-1303. Shi X L,Zhang F,Zhou W Y, et al,2015. Impacts of CG-LTDR land cover dataset updates on the ground temperature simulation with BCC_AVIM 1.0[J]. J Geo Inf Sci, 17(11):1294-1303(in Chinese).
- 孙淑芬,2002. 陆面过程研究的进展[J]. 新疆气象,25(6):1-6. Sun S F,2002. Advance in land surface process study[J]. Bimon Xinjiang Meteor,25(6):1-6(in Chinese).
- 孙淑芬,2005. 陆面过程的物理、生化机理和参数化模型[M]. 北京:气象出版社:307. Sun S F,2005. Parameterization Study of Physical and Biochemical Mechanism in Land Surface Process[M]. Beijing:China Meteorological Press:307(in Chinese).
- 吴龙刚,王爱慧,盛炎平,2014. 土壤质地对中国区域陆面过程模拟的影响[J]. 气候与环境研究,19(5):559-571. Wu L G,Wang A H,Sheng Y P. 2014. Impact of soil texture on the simulation of land surface processes in China[J]. Clim Environ Res, 19(5):559-571(in Chinese).
- 张果,薛海乐,徐晶,等,2016. 东亚区域陆面过程方案 Noah 和 Noah-MP 的比较评估[J]. 气象,42(9):1058-1068. Zhang G,Xue H L,Xu J, et al,2016. The WRF performance comparison based on Noah and Noah MP land surface processes on East Asia[J]. Meteor Mon,42(9):1058-1068(in Chinese).
- 张强,王蓉,岳平,等,2017. 复杂条件陆-气相互作用研究领域有关科学问题探讨[J]. 气象学报,75(1):39-56. Zhang Q,Wang R,Yue P, et al,2017. Several scientific issues about the land-atmosphere interaction under complicated conditions[J]. Acta Meteor Sin, 75(1):39-56(in Chinese).
- 周文艳,郭品文,罗勇,等,2008. 陆面模拟中植被辐射传输参数化方案研究[J]. 气象学报,66(3):359-370. Zhou W Y,Guo P W,Luo Y, et al,2008. A study on the radiative transfer parameterization scheme within canopy in land surface process model[J]. Acta Meteor Sin,66(3):359-370(in Chinese).
- 周文艳,罗勇,李云梅,2010. 陆面过程中冠层四流辐射传输模式的模拟性能检验[J]. 气象学报,68(1):12-18. Zhou W Y,Luo Y,Li Y M,2010. Validation of the radiative transfer parameterization scheme in land surface process model[J]. Acta Meteor Sin, 68(1):12-18(in Chinese).
- Bontemps S,Defourny P,van Bogaert E, et al,2010. Globcover 2009 products description and validation report[R]. European Space Agency:53.
- Chen J,Ban Y F,Li S N,2014. China:open access to earth land-cover map[J]. Nature,514(7523):434.
- Chen J,Chen J,Liao A P, et al,2015. Global land cover mapping at

- 30 m resolution; a POK-based operational approach[J]. ISPRS J Photogramm Remote Sens, 103:7-27.
- Cogley J G, 1991. GGHYDRO—global hydrographic data release 2.0 [R]. Trent Climate Note 91-1, Peterborough, Ontario: Trent University: 12.
- Dai Y J, Wei S G, Duan Q Y, et al, 2013. Development of a China dataset of soil hydraulic parameters using pedotransfer functions for land surface modeling[J]. J Hydrometeorol, 14(3): 869-887.
- Dai Y J, Zeng Q C, 1997. A land surface model (IAP94) for climate studies part I: formulation and validation in off-line experiments [J]. Adv Atmos Sci, 14(4): 433-460.
- Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E, et al, 2003. The common land model[J]. Bull Amer Meteor Soc, 84(8): 1013-1023.
- Dickinson R E, 1983. Land surface processes and climate-surface albedos and energy balance[J]. Adv Geophys, 25: 305-353.
- Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J, 1993. Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model[R]. NCAR Technical Note NCAR/TN-387 + STR, Boulder, CO: National Center for Atmospheric Research: 72.
- Friedl M A, Mciver D K, Hodges J C F, et al, 2002. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results[J]. Remote Sens Environ, 83(1/2): 287-302.
- Fritz S, Bartholome E, Belward A, et al, 2003. Harmonisation, mosaicing and production of the global land cover 2000 database (beta version) [R]. Brussels: European Commission Joint Research Center: 41.
- Gong P, Wang J, Yu L, et al, 2013. Finer resolution observation and monitoring of global land cover: first mapping results with Landsat TM and ETM+ data[J]. Int J Remote Sens, 34(7): 2607-2654.
- Hahmann A N, Dickinson R E, 2001. A fine-mesh land approach for general circulation models and its impact on regional climate[J]. J Climate, 14(7): 1634-1646.
- Hansen M C, Defries R S, Townshend J R G, et al, 2000. Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach[J]. Int J Remote Sens, 21(6-7): 1331-1364.
- Ji J J, 1995. A climate-vegetation interaction model: simulating physical and biological processes at the surface[J]. J Biogeogr, 22(2/3): 445-451.
- Ji J J, Hu Y C, 1989. A simple land surface process model for use in climate study[J]. Acta Meteor Sin, 3(3): 342-351.
- Ji J J, Huang M, Li K R, 2008. Prediction of carbon exchanges between China terrestrial ecosystem and atmosphere in 21st century[J]. Sci China Ser D Earth Sci, 51(6): 885-898.
- Lawrence P J, Chase T N, 2007. Representing a new MODIS consistent land surface in the Community Land Model (CLM 3.0) [J]. J Geophys Res, 112(G1): G01023.
- Loveland T R, Reed B C, Brown J F, et al, 2000. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data[J]. Int J Remote Sens, 21(6-7): 1303-1330.
- Oleson K W, Dai Y J, Bonan G, et al, 2004. Technical description of the Community Land Model (CLM) [R]. NCAR/TN-461 + STR, Boulder, CO: National Center for Atmospheric Research: 164.
- Osborn T J, Jones P D, 2014. The CRUTEM4 land-surface air temperature data set: construction, previous versions and dissemination via Google Earth[J]. Earth Syst Sci Data, 6(1): 61-68.
- Peters-Lidard C D, Blackburn E, Liang X, et al, 1998. The effect of soil thermal conductivity parameterization on surface energy fluxes and temperatures[J]. J Atmos Sci, 55(7): 1209-1224.
- Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al, 1986. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models[J]. J Atmos Sci, 43(6): 505-531.
- Still C J, Berry J A, Collatz G J, et al, 2003. Global distribution of C3 and C4 vegetation: carbon cycle implications[J]. Glob Biogeochem Cycles, 17(1): 1006.
- Turner II B L, Meyer W B, 1994. Global land-use and land-cover change: an overview[M]//Meyer W B, Turner II B L. Changes in Land Use and Land Cover: A Global Perspective. Cambridge: Cambridge University Press: 3-10.
- Turner II B L, Ross R H, Skole D L, 1993. Relating land use and global land cover change[R]. IGBP Report No. 24/IHDP report No. 5, Stockholm: IGBP: 65.
- Wu T W, Li W P, Ji J J, et al, 2013. Global carbon budgets simulated by the Beijing climate center climate system model for the last century[J]. J Geophys Res, 118(10): 4326-4347.
- Yu L, Wang J, Gong P, 2013. Improving 30 m global land-cover map FROM-GLC with time series MODIS and auxiliary data sets: a segmentation-based approach[J]. Int J Remote Sens, 34(16): 5851-5867.