

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdcqk.2019.0062

尹剑, 欧照凡. 基于地表能量平衡的大尺度流域蒸散发遥感估算研究[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(3): 79-88. YIN J, OU Z F. Remote sensing estimation of evapotranspiration in large-scale basin based on surface energy balance[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 79-88. (in Chinese)

基于地表能量平衡的大尺度流域蒸散发遥感估算研究

尹 剑¹, 欧照凡²

(1. 贵州财经大学 西部现代化研究中心, 贵阳 550025; 2. 东北农业大学 水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 蒸散发是地表能量平衡的关键环节, 准确估计流域蒸散发对水资源管理、作物估产、以及环境保护等具有重要意义。研究结合中国中高纬度区域气候特征、土地利用类型以及植被动态特征, 改进了基于地表能量平衡系统 (surface energy balance system, SEBS) 的蒸散发估算模型。以松花江流域为例, 进行大尺度流域的多年蒸散发反演。通过多年流域水量平衡、流域内生态观测实验以及全球通量观测网络评价数据验证模型估算精度, 同时借助陆面过程模型和 NASA 的 MOD16 蒸散发产品进行交叉验证, 评估模型模拟精度。结果表明, 改进的 SEBS 模型在全国范围内精度并不统一, 但在松花江、辽河流域估算精度较高, 因此基于地表能量平衡的蒸散发估算模型是一种估算我国中高纬度区域蒸散发的可行方法。松花江流域时空变化研究发现, 流域多年蒸散发总值变化不大, 但存在空间上的变异性。

关键词: 蒸散发; 遥感; 松花江; 能量平衡; 大尺度流域

中图分类号: TV213.9 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Remote sensing estimation of evapotranspiration in large-scale basin based on surface energy balance

YIN Jian¹, OU Zhaofan²

(1. Research Center for China Western Modernization, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China; 2. Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Evapotranspiration (ET) is the key link between land surface energy balance and water movement. Accurate estimation of ET on basin scale is of great significance to climate change studies, water resources management, crop yield estimation and environmental protection. Combining the climate characteristics, land use types and vegetation dynamics in the middle and high latitudes of China, an ET estimation model was proposed based on surface energy balance system (SEBS). The model was then applied to the Songhua River basin to estimate ET. The estimation accuracy of the model was validated by the water balance and ecological observations in the basin, and MTE data of global flux observation network. The simulation accuracy of the model was also evaluated by cross-validation of a land surface process model and NASA MOD16 ET. The results show that the improved SEBS model has a high accuracy in estimating the ET in Songhua River and Liaohe River basins in China, but the accuracy is not uniform in the whole country; The model is a reasonable method for estimating the ET in the middle and high latitudes of China; The spatial and temporal changes of the Songhua River basin show that the total ET in the basin has been relatively stable in recent years, but with a spatial variation.

Key words: evapotranspiration; remote sensing; Songhua River; surface energy balance; large-scale basin

收稿日期: 2018-11-07 修回日期: 2019-03-06 网络出版时间: 2019-03-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190321.1359.007.html>

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(E20180006); 国家自然科学基金(41401042); 教育部人文社会科学研究项目(19YJCZH228)

作者简介: 尹 剑(1984—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 副教授, 博士, 主要从事水资源科学方面研究。E-mail: yinjianbnu@163.com

蒸散发 (evapotranspiration, ET) 是陆-气作用的关键环节^[1], 流域 ET 的准确估算对径流预报、水资源管理、生态保护具有重要的作用^[2]。大尺度陆面 ET 通常借助陆面过程模型或者遥感反演获得^[3]。陆面过程模型空间分辨率一般较低且结构复杂、参数众多, 需要大量地面观测数据支持^[4]; 而遥感模型主要借助卫星遥感获得的电磁波辐射来估算 ET , 时空分辨率取决于卫星传感器的回访周期和像元大小, 可依据研究尺度选择数据, 操作更灵活^[5]。基于地表垂直方向能量平衡方程的遥感模型是目前常用的 ET 遥感方法。根据是否将植被和土壤蒸的散发分开考虑分为一层模型和二层模型^[6]。其中, 一层模型将下垫面水热交换界面作为统一体, 计算相对简便, 适合于湿润半湿润气候地区; 二层模型机理较为完善, 更适合干旱且植被稀疏地区, 但是受多角度遥感数据和组分温度分解困难的限制, 计算相对复杂^[7]。由荷兰瓦赫宁根大学 SEO-WaterCliEnt 研究组开发的地表能量平衡系统 (surface energy balance system, SEBS)^[8], 是当前应用较为广泛的 ET 遥感模型。该模型在大尺度区域、特别是中高纬度地区的 ET 估算研究中取得了较好的效果^[9-11]。近年来, 国内学者不断对该模型进行本地化改进, 提高了 SEBS 在我国范围内的适应性^[3]。如占车生等^[12] 结合全国土地利用构建了动态植被方案, 提出了考虑地形特征的辐射算法, 改进了 SEBS 模型。Ma 等^[13] 优化了 SEBS 中空气动力学粗糙度、热传输粗糙度和土壤热通量的参数化方案, 提高了 SEBS 对感热通量和潜热通量的估算精度。Huang 等^[10] 的研究提高了 SEBS 在中国西部地区

的适用性。

松花江流域是我国东北地区面积最大的流域, 也是重要的粮食基地。受气候和农田耗水的影响, 流域近年来气候变化显著, 水旱等各类自然灾害频发, 威胁着区域水资源安全 and 国家粮食安全^[14]。现有的松花江流域的蒸散发研究多是针对蒸散发产品的评估^[15], 或者是估算潜在蒸散发^[16], 亦或是针对流域内的某个局地研究^[17], 缺乏实际蒸散发遥感模型的论证以及流域蒸散发时空规律的分析。本研究通过修正参数和改进算法实现 SEBS 模型本地化, 基于大尺度卫星遥感数据、气象数据、土壤数据和土地覆盖数据, 估算松花江流域蒸散发, 并借助多年水量平衡法、长白山生态观测实验、MOD16 产品和通用陆面过程模型 (common land model, CLM) 的蒸散发结果, 验证模拟精度, 实现模型的精度评估以及流域蒸散发分布规律研究。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

松花江流域 ($41^{\circ}42' \sim 51^{\circ}38' N$, $119^{\circ}52' \sim 132^{\circ}31' E$) 面积 55.68 万 km^2 , 是我国少有的中高纬度流域 (图 1)。流域位于中国东北地区的北部, 冬季寒冷漫长, 夏季炎热多雨, 春季干燥多风, 秋季短暂。流域年内温差较大, 多年平均温度约为 $3.5^{\circ}C$, 多年平均年降雨约 563 mm, 东南部山区降水可达 700~900 mm, 流域西部地区仅 400 mm。其中, 第二松花江、嫩江流域、松花江干流区的多年平均降雨量分别为 668.39、565.47 和 454.96 mm。松花江流域是我国重要的粮食生产基地^[14]。近年来, 流域内

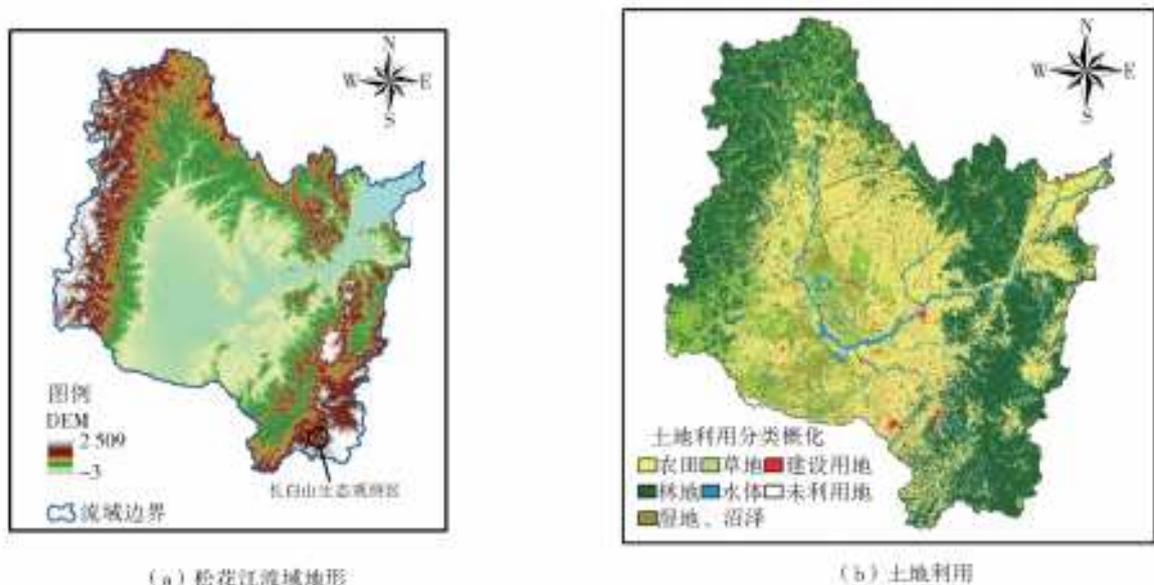


图 1 松花江流域地形 (a) 及土地利用 (b) 图

Fig. 1 Topography (a) and the land use (b) in the Songhua River basin

进行了大量农业开垦和种植结构调整,使得生态需水和作物耗水发生了很大改变。流域水资源超负荷利用严重,制约了区域的农业生产,并产生一系列水问题。

1.2 大尺度遥感蒸散发模型

本研究 SEBS 实现大尺度蒸散发估算。SEBS 由荷兰瓦赫宁根大学 SEO-WaterCliEnt (Satellite Earth Observation Research into Water, Climate and Environment) 研究组开发,是当前应用较为广泛的蒸散发遥感模型。本文对 SEBS 模型进行了参数本地化和温度估算模式的改进,用于松花江流域蒸散发的估算。

1.2.1 SEBS 模型

SEBS 模型包括以下主要组成部分:(1)基于光谱反射率和辐射率进行地表参数反演,计算出如反照率、发射率、温度、植被覆盖度等。(2)热交换粗糙度方程^[18]。(3)基于大气相似理论计算摩擦速度、显热通量和奥布霍夫稳定长度^[19]。(4)基于 SEBI (Surface Energy Balance Index) 模型的方法计算蒸发比^[8]。SEBS 模型需要三组输入数据:第一组包括地表温度、地表反照率、植被覆盖率、叶面积指数、粗糙度等;第二组为参考高度的气象数据包括气温、气压、风速、湿度;第三组包括土地利用和土地覆盖分类^[20]。

1.2.2 模型改进

根据中国的区域特点,对原有的 SEBS 模型进行了改进,开发了一个新的逐日净辐射模拟子模块,并对一些地表物理参数的反演进行了调整。改进包括:(1)建立动量粗糙度长度和零平面位移表。(2)构造新的地表温度参数化。(3)设计新的参考高度气象场输入接口。

SEBS 所采用的动量粗糙度模型适用于植被茂密且分布均匀的下垫面。为了最大限度地减少因各种植被参数引起的蒸散发反演的不确定性,研究结合松花江流域植被特征,参考野外试验数据库,借鉴全球陆面数据同化系统(Global land data assimilation system, GLDAS)的土地利用类型对应的植被参数(<http://www.ral.ucar.edu/research/land/technology/lsm/noahlsn-v3.2/VEGPARM.TBL>),建立了月均粗糙度长度动态位移表。同时,模型将中国的土地覆盖分类系统(<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=264>)纳入 SEBS 模型,并增加了基于不同土地覆盖度的月植被动态指数参数,使得模型能够基于植被指数直接调用参数库中的粗糙

度、零平面位移和植被高度等参数。

对不同土地覆被类型的气温、地表温度与植被覆盖度关系的研究表明,参考高度(2 m)处的气温与地表温度、植被覆盖度、地表平均热惯量等要素密切相关。参考占车生等^[12]对全国各流域温度的计算修正方法,针对不同植被覆盖率建立近地表气温—地表温度经验关系模型。

$$T_a = 28.5 + 0.1T_s - (f_c + a)\xi \quad (1)$$

式中: T_a 为近地表气温($^{\circ}\text{C}$); T_s 为地表温度($^{\circ}\text{C}$); f_c 为植被覆盖度; a 为随地表温度变化的系数; ξ 为不同土地覆盖类型的平均热惯量,反映了地表热惯量的大小。该方法可以体现非均匀地表热惯量的大小,可以直接利用遥感数据获取大气温度,减小了 SEBS 模型气温项输入的不确定性。

1.3 数据

1.3.1 输入数据

输入数据主要包括卫星遥感数据和地面观测数据。考虑大尺度流域空间跨度较大,选择 NOAA 卫星的 AVHRR 遥感数据作为基础数据。NDVI、太阳天顶角以及相应的辅助数据,如经度、纬度和海拔高度等从 NOAA 卫星的活动档案中提取。

地面观测数据主要包括气象、水文、土地覆盖和土壤数据。这些数据建立在一个统一的坐标系统和统一的时空分辨率下。逐日气象数据,包括最高温度、最低温度、相对湿度、大气压、10 m 高度的风速、风向、24 h 降水量、日照时数等,由流域内国家基准气象站获取。

研究区土地覆盖和土地利用变化(LUCC)数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心(RES-DC),该土地利用为每 5 年更新一次,本研究采用了 2000、2005 和 2010 年的数据。LUCC 数据采用三级分类系统:第一级包括 6 类:耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用土地;第二级基于土地资源的自然属性分为 25 类;第三级基于地貌特征、土地资源管理类型和覆盖度再分为 8 类。这些分类最终还参照 SEBS 的土地分类办法进一步划分。

AVHRR 产品已通过图像融合、辐射纠正和大气校正处理。利用反距离权重方法对气象数据进行空间插值获得流域日平均气温、湿度、气压和风速。LUCC 数据重新分类和重新采样转化为 5 km 网格数据。所有的数据统一在一个 5 km 分辨率和阿尔伯斯投影下。

1.3.2 验证数据

波文比能量平衡、涡动相关系统和大孔径闪烁

仪是广泛用的蒸散发验证技术。然而,三种方法的缺点在于只能监测一定小范围内的 ET,而且对气象条件和地表覆被特征要求较高,主要在像元尺度进行验证。大尺度流域蒸散发的估算涉及气象条件、植被类型、土壤结构,相对复杂,因此采用上述局地验证方法具有一定的偶然性,可靠性相对较低^[20]。本研究采用以下 3 种方法来进行综合验证:在典型流域结合长期气象水文观测进行水量平衡验证;基于全球陆面通量观测耦合数据集 MTE 进行验证;结合其他陆面模型以及综合观测实验进行交叉验证。

MTE 数据是一套全球陆面蒸散发估算数据集^[21]。它利用一套机器学习算法(模型树集合/MTE)将全球通量观测网络(FLUXNET)^[22]的逐点 ET 观测数据与来自遥感和地面气象数据的地理空间信息进行整合得到。MTE 方法已被广泛应用于涡动相关仪数据的空间尺度扩展研究中,同时也被用于全球地表水热及碳通量的时空变化规律及陆面过程的研究中。与站点观测数据、多年水量平衡结果、以及多个陆面模型集成结果的对比得出,MTE 是较为可靠的大尺度蒸散发验证数据^[21]。

本研究同时结合 MOD16 蒸散发产品进行交互验证。MODIS 遥感数据的 MOD16/MYD16 产品是 Penman-Monteith 模型典型应用。该方法将地表分为土壤、湿润和干燥冠层,基于 Penman-Monteith 方程生成了 2000 年以来空间分辨率为 1 km 的逐月、年以及 8 d 合成的蒸散发数据。近年来,基于 Mu 等^[23]的研究,对 MODIS 蒸散发产品的计算方法进行了完善,提高了数据质量。

2 模型验证分析

2.1 基于水量平衡的验证

选取了松花江流域以及其他 5 个具有代表性的流域(黄河流域、长江流域、珠江流域、海河流域和辽河流域)进行验证。常规的流域水平衡的验证原理是:在多年平均水平下,流域尺度上的降水量几乎等于径流和蒸散发量之和。因此,根据各流域多年径流和降水的观测资料,得出年平均蒸散发量。本研究考虑到水储量的变化对水量平衡的影响,参考严家宝等^[24]的 2002—2015 年中国陆地水储量变化及其时空分布规律研究结果,在水量平衡公式中加入水储量变化值,得到了 2002—2015 年基于水量平衡的验证结果(图 2)。

这里的实测 ET 值是根据 5 个代表性流域的降水、径流和水储量变化量计算的,可以间接地代表

ET 的多年平均水平(2002—2015 年)。可以看出,黄河、长江和海河流域的模拟 ET 值较明显的高于实测值。黄河近 10 a 来年平均 ET 的模拟与实测误差最大,相对误差约为 35.5%。由于 SEBS 模型本质上还是单层模型对于干旱区的模拟精度相对较低,而黄河流域地区跨度大、干湿空间差异大,因而影响了该流域蒸散发的反演的精度。辽河流域和松花江流域误差最小,约为 1.8%和 3.3%。其他 3 个流域的误差较小,长江流域 10.5%,珠江流域 11.1%,海河流域 8.3%。基于水量平衡的验证发现,松花江流域和辽河流域的反演精度最高。检验结果可以间接表明模型更适合中高纬度流域,具有较为可靠的反演结果。

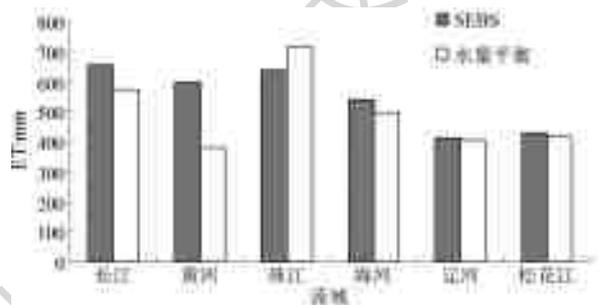


图 2 典型流域年均 ET 的遥感估算与基于水量平衡的计算比较

Fig. 2 Comparisons of annual ET between SEBS estimated results and water balance calculation in the typical River basins in China

2.2 生态观测实验对比验证

本文同时结合松花江流域内的长白山站点的综合生态观测实验进行验证。长白山脉试验区(128° 6' E, 42° 24' N)位置见图 1(a),该试验基于野外数据采集和 BEPS(boreal ecosystems primary simulator)生态模型模拟^[25],其中包括 4 个步骤:(1)通过野外综合实验对常规气象数据、LAI 和净初级生产力(NPP)数据的观测获取。(2)利用 BEPS 模型对同期 NPP 和 ET 进行高空间分辨率模拟。(3)利用 LAI 和 NPP 等野外观测资料验证 BEPS 模型。(4)基于 TM 和 MODIS 两套数据进行 BEPS 模型模拟。本研究中 SEBS 模拟的长白山观测区的 2004 年 ET 为 473.2 mm,接近同期 BEPS 基于 Landsat 数据模拟的 ET(450.2 mm),略低于 BEPS 基于 MODIS 数据模拟的 ET(515.4 mm)(表 1)。因此,在长白山地区的 SEBS 的模拟结果是合理的。

2.3 与 MOD16、MTE 的对比验证

研究基于 MTE 数据集(2000—2012 年),结合 MODIS 遥感数据的 MOD16 产品,对比验证流域尺度的 SEBS 结果。

表 1 不同下垫面条件下 2004 年长白山生态观测试验区的蒸散发结果

Tab.1 BEPS ET from MODIS and TM data over different land covers in 2004

| 地表覆被 | ET/mm | |
|-------|---------|------------|
| | BEPS-TM | BEPS-MODIS |
| 针阔混交林 | 519 | 475 |
| 苔原 | 226 | 230 |
| 针叶林 | 345 | 346 |
| 桦树林 | 468 | 532 |
| 农田 | 446 | 440 |
| 总计 | 450.2 | 515.4 |

在验证之前需要先对 MOD16 数据进行预处理。利用 NASA 提供的 MRT (MODIS Reprojection Tool) 工具,通过设置重采样和投影转换方法、投影参数等操作,将分级数据格式 (HDF, hierarchical data format) 的 MOD16 产品转换为 GeoTiff 格式。由于 MOD16 产品覆盖范围为有植被区域,不包括水体、城镇、永久冰雪、永久湿地等,利用 ArcGIS 中栅格处理器功能去除 MOD16 数据中的无效值。基于研究区矢量边界图,利用 ArcGIS 对经过投影转换的 MOD16 数据进行批量裁剪,进而得到有效区域的 ET。在对比验证时,只研究 MOD16 有效区域部分的 ET。

松花江流域平均陆面 ET 的对比见图 3 和 4,图中比较了基于改进 SEBS 的蒸散发月过程、MOD16 蒸散发月过程以及 MTE 月过程。与 MOD16 产品相比,SEBS 输出的 ET 月过程与 MTE 数据轨迹更加贴合。SEBS 模型反映出松花江较长冬季时蒸散发很弱,即冬季月份 ET 的连续低值情况。MOD16 产品在冬季与 MTE 和 SEBS 的偏差较大,主要表现在 MOD16 产品在入冬月和初春月较 SEBS 值偏高。造成这一现象的原因可能由于 MOD16 主要基于 Penman-Monteith 方程分别估算土壤蒸发和植被蒸腾,在计算植被蒸腾时,使用了一张基于不同生物群落叶片气孔开闭时的临界温度和水汽压差的查找表来确定蒸腾规模。松花江流域地处东北高寒地区,在同纬度下气候较特殊;同时研究区分布有较大面积的盐碱地,具体植被的蒸腾的物理过程与其他区域有所差别,气候和下垫面覆被会导致地表蒸散发的特殊性,从而估算结果。同时,MOD16 的输入气象数据为 GMAO 计划的再分析数据,分辨率为 $1.00^{\circ} \times 1.25^{\circ}$,通过降尺度插值在 1 km 网格上。这种处理方式在研究全球尺度问题时是可以接受的,但在研究区域尺度时可能会产生较大误差,特别是对于地形变化和气候梯度较大的地区。此外,该气象数据主要基于美国的地球观测系统 EOS,精度在

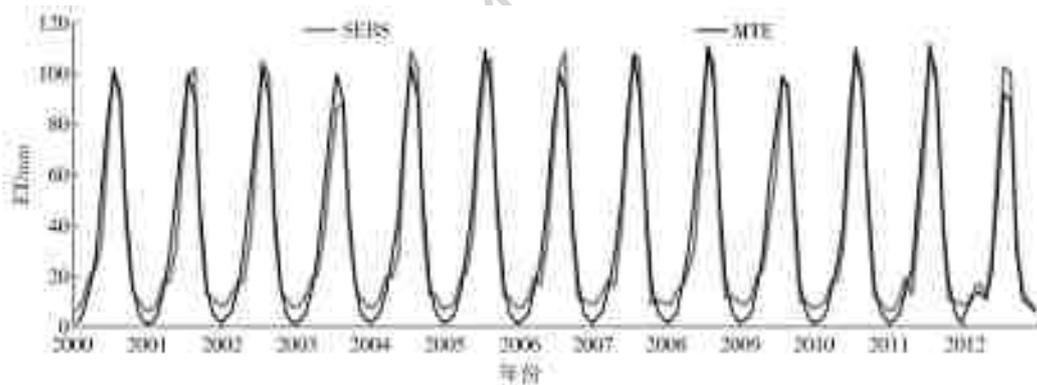


图 3 SEBS 和 MTE 的 ET 月过程线比较

Fig. 3 Monthly ET estimations from SEBS and MTE

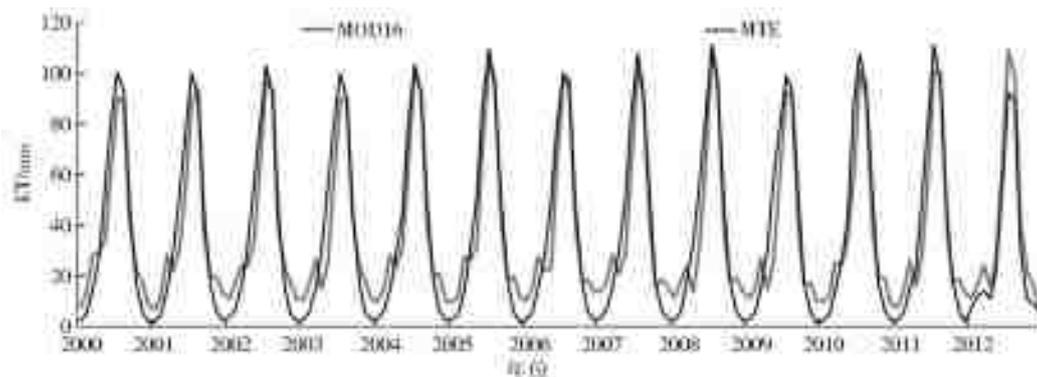


图 4 MOD16 和 MTE 的 ET 月过程线比较

Fig. 4 Monthly ET estimations from MOD16 and MTE

我国范围内可能不及自主气象观测网络准确。MOD16 的土地利用数据基于 MOD12Q1, 该分类方法与我国具体区域有所差别且有待验证。此外, MOD16 产品在计算时基于静态的土地利用, 相比而言本研究改进的 SEBS 模型根据土地利用和 LAI 不断调整参数, 体现了区域地表的动态过程。

图 5 和 6 反映了 SEBS 的月 ET 结果和 MOD16 的月 ET 产品与 MTE 在流域尺度上的线性相关关系。对比得出, 从月尺度来看, SEBS 略好于 MOD16 的结果。SEBS 与 MTE 的线性拟合度为 0.942, 而 MOD16 与 MTE 的线性拟合度只有 0.803; 前者决定系数达到了 0.942, 后者决定系数为 0.900; 在线性拟合角度和相关性上, 改进的 SEBS 都比 MOD16 产品的 ET 精度有所提高。因此, 改进的 SEBS 模型获得的月蒸散发数据较 MOD16 更接近全球通量观测网络数据, 结果更可靠。

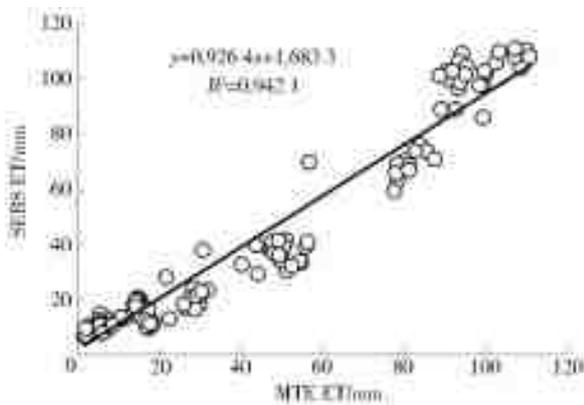


图 5 SEBS 和 MTE 的多年(2000—2012 年)月 ET 线性关系
Fig. 5 The linear relationship of the monthly ETs between SEBS and MTE (2000—2012)

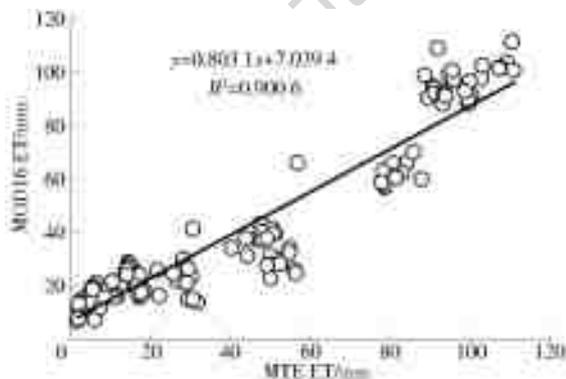


图 6 MOD16 和 MTE 的多年(2000—2012 年)月 ET 线性关系
Fig. 6 The linear relationship of the monthly ETs between MOD16 and MTE (2000-2012)

2.4 与 CLM4.0 的交互验证

通用陆面过程模式(common land model, CLM)系列模型是由美国国家大气科学中心(NCAR)研发,

被全球广泛应用的陆面过程模式。CLM 耦合了气候、植被、生态、水文等大量的陆气过程, 与其他陆面模型相比, 有着物理过程完善、模拟效果好、便于移植和耦合等优点。目前较为成熟的 CLM3.5、CLM4、CLM4.5 模式强化了融雪、冻土过程的刻画。研究也表明 CLM 在模拟有积雪覆被条件下的冻土过程效果要优于 SHAW 和 Noah^[26]。经计算, CLM4.0 和改进的 SEBS 输出的多年 ET 平均相对误差(2000—2015 年)为 8.6%; 均方根误差为 126.6 mm/a; 相关系数为 0.878。图 7 显示了改进的 SEBS 和 CLM4.0 在 2000—2015 年 1、4、7 和 10 月的平均月 ET 空间分布。

整体上看, SEBS 和 CLM 的 ET 结果显示相同的季节波动趋势。在同月份, 两种方法的 ET 整体空间分布比较一致, 但是在个别区域和结果阈值上有一定的差别。相对于 CLM4.0, SEBS 的空间分辨率更高, ET 取值范围更大, 即 SEBS 模型可以有效的获取区域蒸散发的极值点, 这与 SEBS 模型获取干湿点的计算机理相吻合。CLM 模型较粗的空间网格概化了极值点。在 4 个代表月中, 1、4、7 月 SEBS 的输出结果的区间均大于 CLM 模型, 两种方法的 10 月 ET 区间大致相等。

总体来说松花江流域 1 月的 ET 值最小, 7 月最大。1 月和 10 月, 上游高海拔地区 ET 较小, 而松嫩平原和流域出口处 ET 较大, 在 4 月和 7 月呈现相反的空间分布特征。1 月是松花江最寒冷的月份, 整个河流都处于冰封状态, 流域蒸散发能力差, 最大日均 ET 不足 1 mm。进入 4 月, 松花江流域积雪开始融化, 此时上下游呈现较大的差异, 且空间分布与 1 月相反。由于春灌发生在 4 月底和 5 月初, 对 4 月的平原区 ET 影响不大, 而上游林地草木复苏, 冰雪消融, 河流开江, 因此该区域 ET 增大。7 月整个流域的 ET 都较高, 上游林地仍然保持相对较高的 ET 值; 松嫩平原和三江平原的农田 ET 显著提高, 主要原因是受到农田灌溉的影响, 使得该区域 ET 出现一年中最大值。10 月流域开始进入冬季, ET 呈现随纬度降低的分布情况, 嫩江上游大兴安岭地区以及流域西部靠近内蒙高原地区的 ET 已接近零。

3 流域蒸散发空间分布

经计算, 流域 2000—2015 年平均 ET 约为 430 mm, 区间最低处约为 200 mm, 峰值区约为 700 mm (图 8(a))。松花江全流域多年 ET 总值略有上升, 但不明显。以栅格为单位, 计算多年 ET 变化的趋势,

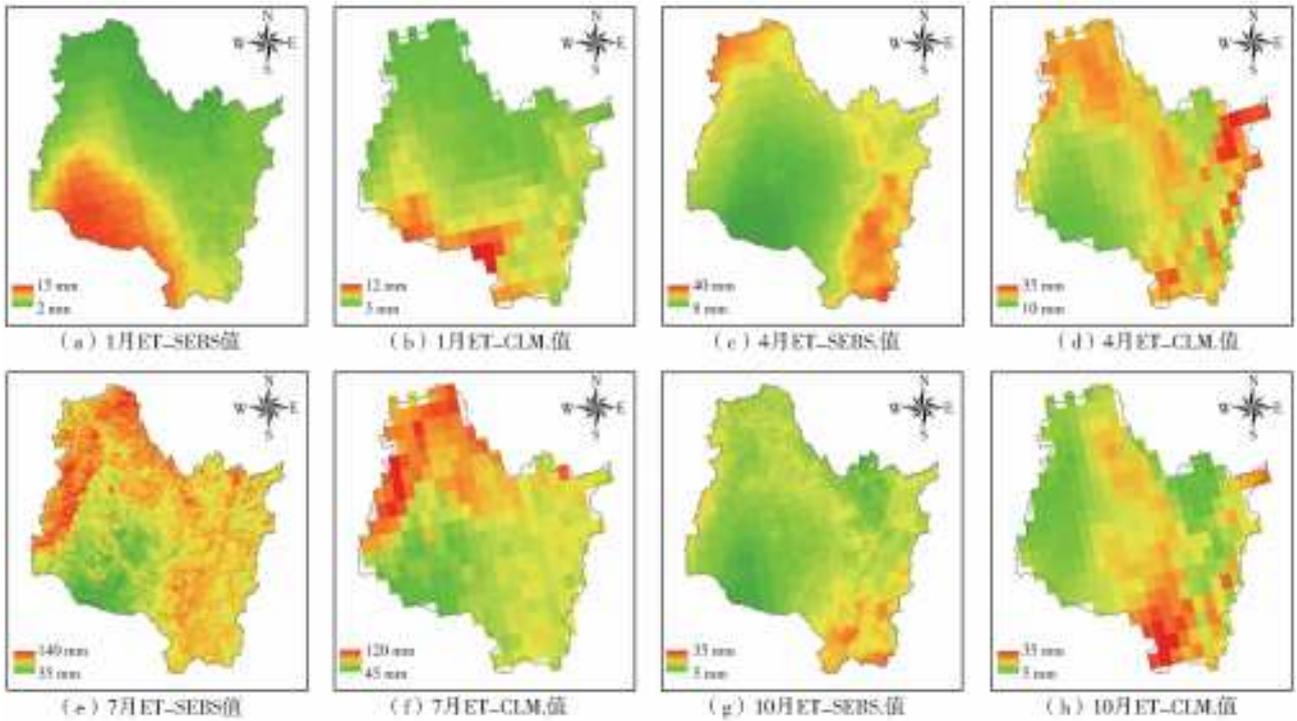


图7 典型月月均蒸散发空间分布对比

Fig.7 Monthly ET simulated by SEBS

得到蒸散发变化率的空间分布(图8(b))。可以看出,年ET的空间分布发生了一些变化。结合土地利用情况发现,2000年以来平原地区的年ET呈上升趋势,山区、林地以及城市区呈现相对较弱的减少

的趋势。2000年以来,松花江流域进行了大规模的农业种植结构调整,旱地改水田规模不断扩大,导致区域农业水资源消耗增加,这是平原地区蒸散发增大的重要诱因。

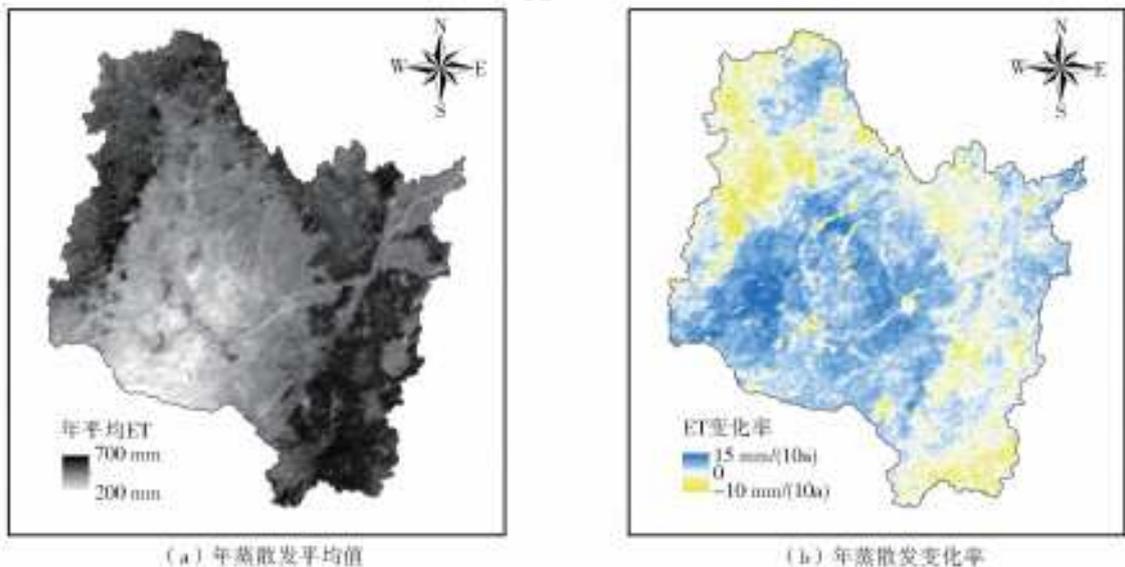


图8 松花江流域年蒸散发平均值及变化率(2000—2015年)

Fig.8 The annual mean evapotranspiration and its trend magnitude in the Songhua River basin (2000-2015)

各类土地利用占流域面积比分别为农田占37.5%、森林占40.0%、草地占11.0%,建设用地占2.5%,沼泽占6.4%,其余为水体和未利用地。根据SEBS估算结果,各土地类型的年ET由大到小依次为林地>草地>农田>湿地、沼泽>建设用地(图9)。农田、草地和湿地、沼泽的数值十分接近。

在栅格尺度选取标准差分析法^[27]对松花江流域多年ET的稳定性进行评估,并分为三个波动级别(图10)。松花江流域年ET以中等波动程度为主,稳定性与土地利用和地形有一定的相关性,平原农田地区的波动程度大于山区林地。整个流域内,ET为中度波动的占流域面积的59.6%,主要地类

为低海拔平原农田。波动程度较高的区域占流域面积的 6.2%，主要为沼泽湿地、草地和未利用地。这一区域受气候变化影响大，当降雨较少时农田灌溉调度用水会间接影响这一区域的水资源量，因此蒸散发相对不稳定。波动较低的部分占流域面积的 34.2%，主要是山区林地。由于近年来国家限制了东北地区林业采伐，导致森林面积相对稳定，而且森林涵养水源能力较强又处于流域上游高海拔山地，因此蒸散发波动相对不大。

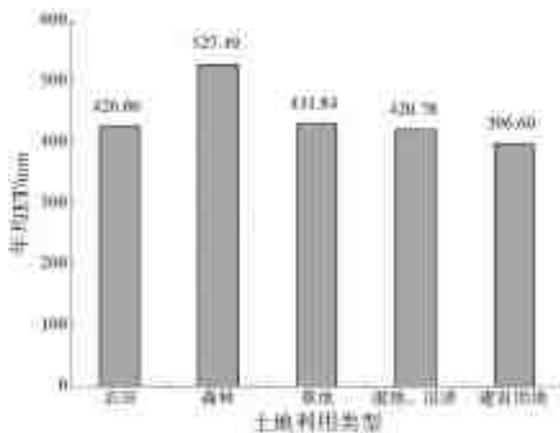


图 9 松花江流域不同土地利用类型的年平均蒸散发
Fig. 9 Annual mean ET over different types of land use in the Songhua River basin

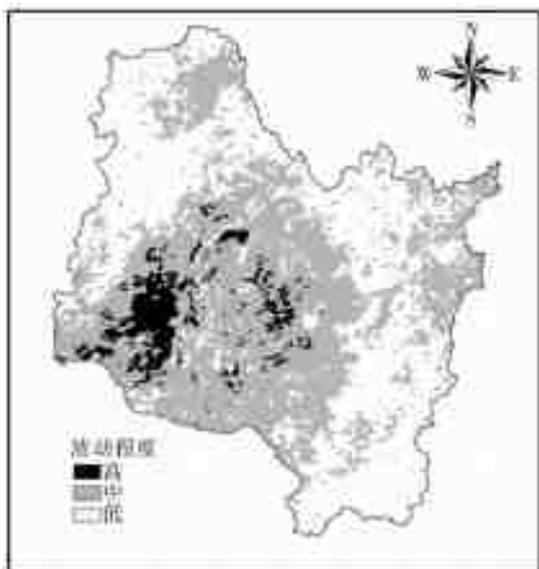


图 10 松花江流域 2000—2015 年蒸散发波动程度
Fig. 10 Fluctuations of evapotranspiration in the Songhua River basin during 2000 to 2015

4 结论与讨论

研究基于地表能量平衡系统，结合中国区域土地利用和植被特征对该大尺度陆面蒸散发模型进行本地化改进，构建了适合中国中高纬度区域的大尺度蒸散发模型，并结合 CLM4.0 陆面过程模型、MOD16 蒸散发产品、生态观测实验、多年水量平衡

和 MTE 全球通量观测集成数据进行验证。最终证明改进的 SEBS 模型在松花江流域可获得较高的估算精度，流域整体上的蒸散发总值变化不是很明显，但是在空间上呈现平原农田增加，山区林地减少的趋势。在模型有效模拟的基础上，结合流域水土结构变化和农业种植结构分析蒸散发的响应机制将是今后研究的重要任务。

研究改进了 SEBS 模型，但在数据采集、建模参数化、模型物理机制改进等方面仍存在一些需要解决的问题，如：一些子模型仍然需要改进，包括植被指数模型、植被覆盖模型和总的净辐射模型；基于蒸发比法的时间扩展模式等还需要进一步的改进。与基于水量平衡的年蒸散发比较发现：改进后的 SEBS 模型在松花江、辽河、珠江流域模拟效果较好，而在黄河流域模拟效果较差，即湿润、半湿润地区比半干旱地区模拟效果更好。原因在于模型中一层蒸散发结构的局限性，使得模型在干旱、植被稀疏区域的模拟效果较差。因此，在干旱半干旱地区分开考虑蒸发和蒸腾是值得尝试的，有必要开发二层蒸散发遥感估算模式。在与 MOD16 的比较中发现，SEBS 在冬季输出值小于 MOD16，这可能与研究区特殊的气候、纬度或土地类型有关，如高寒气候、较高的纬度、分布较多的盐碱地有关，未来将结合区域特征和模型结构作进一步分析。

总体上说，本研究改进的大尺度流域蒸散发遥感模型是有效的，特别是针对中高纬度地区。但也有些缺点：如大尺度流域下垫面非常复杂，物理、生物、水文过程等多种因素的相互作用应综合考虑。针对这一问题陆面过程模式有其固有的优势，遥感模型可以与陆面过程模式互为补充。为了更好的验证模型精度，需要扩大区域内地表通量监测的规模。目前许多地表通量监测实验还是基于一些独立的研究，并没有像气象观测一样形成范式，因此构建统一的时空监测标准和共享平台也同样重要。

参考文献 (References):

- [1] 李天生, 夏军, 匡洋, 等. 不同潜在蒸散发估算方法在汉江流域中上游地区的适用性研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 1-10. (LI T S, XIA J, KUANG Y, et al. The applicability of various potential evapotranspiration estimation methods in the middle and upper reaches of Hanjiang River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 1-10. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2017.06.001.
- [2] 王松, 田巍, 刘小莽, 等. 不同蒸散发产品在汉江流域的

- 比较研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 1-9. (WANG S, TIAN W, LIU X M, et al. Comparison of various evapotranspiration productions in the Hanjiang River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 1-9. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdk. 2018. 0061.
- [3] WANG K, DICKINSON E. A review of global terrestrial evapotranspiration; observation, modeling, climatology, and climatic variability[J]. Reviews of Geophysics, 2012, 50(2). DOI: 10.1029/2011RG000373.
- [4] 田静, 苏红波, 孙晓敏, 等. GDAS 数据和 NOAA 陆面模式在中国应用的精度检验[J]. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1422-1430. (TIAN J, SU H B, SUN X M, et al. Accuracy test for the application of GDAS data and NOAA land surface model to China[J]. Progress in Geography, 2011, 30(11): 1422-1430. (in Chinese))
- [5] BARKER J B, HEEREN D M, NEALE C M U, et al. Evaluation of variable rate irrigation using a remote-sensing-based model[J]. Agricultural Water Management, 2018, 203: 63-74. DOI: 10.1016/j.agwat. 2018. 02. 022.
- [6] MAES B U W, STEPPE K. Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture; a review. [J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(13): 4671-4712. DOI: 10.1093/jxb/ers165.
- [7] 尹剑, 欧照凡, 付强, 等. 区域尺度蒸散发遥感估算——反演与数据同化研究进展[J]. 地理科学, 2018, 38(3). (YIN J, OU Z F, FU Q, et al. Review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation; inversion and data assimilation[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(3): 448-456. (in Chinese)) DOI: 10.13249/j.cnki.sgs. 2018. 03. 015.
- [8] JIA L, SU Z, VAN DEN HURK B, et al. Estimation of sensible heat flux using the Surface Energy Balance System (SEBS) and ATSR measurements[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2003, 28(1-3): 75-88. DOI: 10.1016/S1474-7065(03)00009-3.
- [9] GOKMEN M, VEKERDY Z, VERHOEF A, et al. Integration of soil moisture in SEBS for improving evapotranspiration estimation under water stress conditions [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 121(138): 261-274. DOI: 10.1016/j.rse. 2012. 02. 003.
- [10] HUANG C, YAN L, GU J, et al. Improving estimation of evapotranspiration under water-limited conditions based on SEBS and MODIS data in arid regions [J]. Remote Sensing, 2015, 7(12): 16795-16814. DOI: 10.3390/rs71215854.
- [11] LOSGEDARAGH S Z, RAHIMZADEGAN M. Evaluation of SEBS, SEBAL, and METRIC models in estimation of the evaporation from the freshwater lakes (Case study: Amirkabir dam, Iran)[J]. Journal of Hydrology, 2018, 561: 523-531. DOI: 10.1016/j.jhydrol. 2018. 04. 025.
- [12] 占车生, 夏军. 中国陆面蒸散发量的遥感反演及时空格局[M]. 北京: 知识产权出版社. 2010. (ZHAN C S, XIA J. Remote sensing inversion and temporal spatial pattern of evapotranspiration in China[M]. Beijing: Intellectual Property Publishing House. 2010 (in Chinese))
- [13] MA Y, LIU S, ZHANG F, et al. Estimations of regional surface energy fluxes over heterogeneous oasis-desert surfaces in the middle reaches of the Heihe River during HiWATER-MUSOEXE[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2015, 12(3): 671-675. DOI: 10.1109/LGRS. 2014. 2356652.
- [14] FU Q, WANG X, WANG Z, et al. Analysis of the effects of different snow cover mulches on spatio-temporal variations of farmland soil moisture. Applied Engineering in Agriculture, 2015, 31(6): 919-928.
- [15] 姜艳阳, 王文, 周正昊. MODIS MOD16 蒸散发产品在中国流域的质量评估[J]. 自然资源学报, 2017, 32(3): 517-528. (JIANG Y Y, WANG W, ZHOU Z H. Evaluation of MODIS MOD16 pvapotranspiration product in Chinese River basins[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(3): 517-528. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb. 20160440.
- [16] SONG X, SONG S, SUN W, et al. Recent changes in extreme precipitation and drought over the Songhua River basin, China, during 1960 to 2013[J]. Atmospheric Research, 2015, 157: 137-152. DOI: 10.1016/j.atmosres. 2015. 01. 022.
- [17] YAO W, HAN M, XU S. Estimating the regional evapotranspiration in Zhalong wetland with the Two-Source Energy Balance (TSEB) model and Landsat7/ETM+ images[J]. Ecological Informatics, 2010, 5(5): 348-358. DOI: 10.1016/j.ecoinf. 2010. 06. 002.
- [18] SU Z. Remote sensing of land use and vegetation for mesoscale hydrological studies[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(2): 213-233. DOI: 10.1080/014311600210803.
- [19] BRUTSAERT W. Aspects of bulk atmospheric boundary layer similarity under free-convective conditions [J]. Reviews of Geophysics, 1999, 37(4): 439-451. DOI: 10.1029/1999RG900013.
- [20] ZHAN C, YIN J, WANG F, et al. Regional estimation and validation of remotely sensed evapotranspiration in China[J]. Catena, 2015, 133(133): 35-42. DOI: 10.

- 1016/j. catena. 2015. 04. 018.
- [21] JUNG M, REICHSTEIN M, CIAIS P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply [J]. *Nature*, 2010, 467 (7318): 951-954. DOI: 10. 1038/nature09396.
- [22] BALDOCCHI, D. Breathing of the terrestrial biosphere; lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems [J]. *Australian Journal of Botany*, 2008, 56 (1): 1-26. DOI: 10. 1071/BT07151.
- [23] MU Q, ZHAO M, RUNNING S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115 (8): 1781-1800. DOI: 10. 1016/j. rse. 2011. 02. 019.
- [24] 严家宝, 贾绍凤, 吕爱锋, 等. 近十年中国陆地水储量变化及其时空分布规律 [J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(4): 21-28. (YAN J B, JIA S F, LYU A F, et al. Spatial-temporal variation characteristics of China terrestrial water storage in the last ten years [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14 (4): 21-28. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2016. 04. 004.
- [25] 冯险峰. 基于过程的中国陆地生态系统生产力和蒸散遥感研究 [D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2004. (FENG X F. Process based remote sensing study on productivity and evapotranspiration of terrestrial ecosystems in China [D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese))
- [26] 杨扬, 杨启东, 孙旭映, 等. 三个陆面过程模式在西北半干旱区的模拟性能对比 [J]. *气候与环境研究*, 2016, 21(4): 405-417. (YANG Y, YANG Q D, SUN X Y. A comparative research of the simulation capability of NOAH, SHAW, and CLM models in Semi-Arid areas of northwestern China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2016, 21 (4): 405-417. (in Chinese))
- [27] 董晴晴, 占车生, 王会肖, 等. 2000 年以来的渭河流域实际蒸散发时空格局分析 [J]. *干旱区地理*, 2016, 39 (2): 327-335. (DONG Q Q, ZHAN C S, WANG H X, et al. Spatio-temporal patterns of actual evapotranspiration in the Weihe River basin since 2000 [J]. *Arid Land Geography*, 2016, 39(2): 327-335. (in Chinese)) DOI: 10. 18402/resci. 2017. 02. 10.
-
- (上接第 66 页)
- [24] YANG R, XU Z G, CHAI J R, et al. Permeability test and slope stability analysis of municipal solid waste in Jiangcungou landfill, Shaanxi, China [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2016, 66(7): 655-662. DOI: 10. 1080/10962247. 2015. 1093038.
- [25] 仵彦卿. 多孔介质渗流与污染物迁移数学模型 [M]. 北京: 科学出版社, 2012. (WU Y Q. Mathematics method of flow and contaminant in porous media [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [26] 李旺林, 刘长余, 汤怀义. 地下水设计理论与工程实践 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2012. (LI W L, LIU C Y, TANG H Y. Design theory and engineering practice of groundwater reservoir [M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2012. (in Chinese))
- [27] 李全文, 常金源, 徐文刚, 等. Geostudio 软件模拟降雨入渗过程中边界条件的探讨 [J]. *水利规划与设计*, 2019(2): 54-57, 87. (LI Q W, CHANG J Y, XU W G, et al. Discussion on the boundary conditions of rainfall infiltration process by Geostudio software [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2019 (2): 54-57, 87. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-2469. 2019. 02. 017.
- [28] 李秀珍, 何思明. 基于 Mein-Larson 入渗模型的浅层降雨滑坡稳定性研究 [J]. *灾害学*, 2015, 30(2): 16-20. (LI X Z, HE S M. A study on stability of shallow rain-induced landslide based on Mein-Larson infiltration model [J]. *Journal of Catastrophology*, 2015, 30 (2): 16-20. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-811X. 2015. 02. 004.