DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2015.06.42

淮河流域蒸散发能力估算研究

闫方秀[a,b], 王 烨[c], 陆国宾[a,b], 李琼芳[a,b], 张 弘[a,b]
(河海大学 a. 水文水资源学院; b. 国际河流研究所; c. 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 蒸散发能力是水文模型的重要输入项,合理估算流域蒸散发能力直接影响流域产流量的计算精度。选取淮河息县以上流域为研究区,构建考虑土壤蒸发和植物散发的分布式双源蒸散发能力计算模型,并将能逐日动态模拟叶面积指数的植物生长模型与其集成,以日为时间尺度,基于流域土地利用、气象和植物生长资料,计算了2000-2008年研究区每个1 km×1 km栅格的蒸散发能力,并将蒸发皿所在网格的蒸散发能力计算值与蒸发皿观测得到的水面蒸发值进行了相关性分析。结果表明:模型计算的蒸散发能力能较好地反映流域实际蒸散发能力,可以为分布式水文模型提供蒸散发能力输入资料。研究成果为淮河流域蒸散发能力的计算提供了新的途径,对其它流域蒸散发能力的计算也具有参考价值。

关键词: 土地利用域; 双源蒸散发模型; 叶面积指数; 植物生长模型; 淮河上游流
中图分类号:P339 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2015)06-0225-05

Research on estimation of evapotranspiration in upperstream of Huaihe Basin

YAN Fangxiu[a,b], WANG Ye[c], LU Guobin[a,b], LI Qiongfang[a,b], ZHANG Hong[a,b]
(*a. College of Hydrology and Water Resources; b. Center for International River Research;*
c. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, *China*)

Abstract: The capacity of evapotranspiration is an important input part of hydrology model and its rational estimation has direct impact on the precision of runoff calculation. This paper built the dual-source potential evapotranspiration distributed model considering soil evaporation and vegetation evaporation with the input of daily LAI calculated by EPIC model in the upperstream of Huaihe basin. Based on the data of land use, meteorological and plant growth, the paper computed the capacity of evapotranspiration every grid with the size of 1km×1km from 2000 to 2008 and then made the correlation analysis between calculated value and measured value in three evaporation stations. The results revealed that the evapotranspiration capacity calculated by the model can better reflect the real capacity of evapotranspiration and can provide reliable evapotranspiration input for distributed hydrology model. The result can provide a new way for the calculation of evapotranspiration in Huaihe Basin and has reference value for other similar basins.

Key words: land-use; model of dual-source potential evapotranspiration; LAI; plant growth model; upperstream of Huaihe basin

1 研究背景

蒸散发是流域水量平衡方程中的重要支出项,其合理估算直接影响到产流量的计算。在缺少足以反映流域蒸散发的空间变化的蒸散发量观测数据的情况下,如何利用可获得的气象、土地利用和土壤质地资料合理估算流域尺度的蒸散发能力是水文循环研究的重要环节。合理地计算蒸散发一直是水文学

收稿日期:2015-05-21; **修回日期**:2015-06-16
基金项目:国家自然科学基金面上项目(41171220);国家科技支撑计划课题(2012BAB03B03);水利部公益行业经费项目(200901045)
作者简介:闫方秀(1991-),女,山东临沂人,硕士研究生,主要从事水文预报方面的研究。
通讯作者:李琼芳(1966-),女,湖北武汉人,博士,教授,博士生导师,主要从事水文学及水资源研究。

和气象学等相关专业的热点,基于 Penman 公式的双源蒸散发模型在许多学者不断的研究中已趋于成熟,结合遥感和 GIS 技术的快速发展,双源蒸散发模型可合理地模拟不同研究区域蒸散发要素的时空分布,吸引了更多的学者开展相关研究,验证模型在不同流域的适用性。Biftu 等[1] 采用 Penman 公式、Penman – Monteith 公式和双源蒸散发模型计算加拿大具有多种覆被的 Paddle 河流域,模型模拟的流域蒸发量与实测值较为吻合。莫兴国等[2] 对双源蒸散发模型进行改进,用来计算流域实际蒸散发。袁飞[3] 对模型改进并应用于汉江流域,取得了较好的成果。Guan 等[4] 在 2009 年考虑了自然条件下更加复杂的植被分布状况,提出了混合型的双源蒸散发模型。刘晓帆等[5] 应用模型计算老哈河流域逐日蒸散发能力,将其与集水区内蒸发皿资料的回归关系作为混合产流模型的输入,验证了双源蒸散发能力计算模型在半干旱区的适用性。杨雨亭等[6] 比较分析了层状、块状、混合型(与本文模型类似)3 种模型的潜在蒸散发估算能力,得出混合型能更好地适用于下垫面植被覆盖复杂状况。于岚岚[7] 将模型应用于淮河流域,验证了模型的有效性,但未考虑逐日动态叶面积指数。针对淮河流域,通过集成植物生长模型与双源蒸散发能力计算模型,考虑逐日动态植被叶面积指数变化对蒸散发能力影响的相关研究还不多见。因此,本文以淮河流域为研究对象,建立基于 1 km × 1 km 网格、具有物理概念、能显式反映气候特征、植被叶面积指数等因子的时空差异性和土壤特性、流域地形的空间差异性对流域蒸散发量影响的流域双源蒸散发能力计算模型,实现流域蒸散发能力时空变化的动态模拟,为分布式水文模型提供必要的蒸散发输入。

2 基于植物生长的分布式双源蒸散发模型的构建与应用

2.1 简易植物生长模型(EPIC)

叶面积指数(LAI)是植物叶片总面积与植物占地面积的比值,该值随植物生长不断变化。简易植物生长模型[8] 中,对某种植物,当环境温度达到其最低生长温度时,植物才开始生长。本文采用热量单元理论,假定植物成熟需要一定的热量积累且该值可量化。收集研究区域内日平均气温资料,首先根据植物生长期及最低生长温度计算总积温,然后以生长期内的日平均气温作为输入项,采用 *LAI* 发展曲线分 3 个时段动态计算植物的 *LAI*。

第一阶段为早期生长期,近线性升高:

$$LAI_i = LAI_{i-1} + \Delta LAI_i \tag{1}$$

$$\Delta LAI_i = (fr_{LAImx,i} - fr_{LAImx,i-1}) \cdot LAI_{mx} \cdot (1 - \exp(5(LAI_{i-1} - LAI_{mx}))) \tag{2}$$

式中:LAI_i 和 LAI_{i-1} 是植物生长过程中第 i、$i-1$ 天的叶面积指数;ΔLAI_i 是第 i 天和第 $i-1$ 天的变化量;$fr_{LAImx,i}$ 和 $fr_{LAImx,i-1}$ 是第 i、$i-1$ 天植物叶面积指数率,与积热率有关;LAI_{mx} 为植物生长过程中的最大叶面积指数。

进入第 2 阶段成熟期,叶面积指数达到最大值并将保持该最大值。

第 3 阶段为凋零期,植物叶面积指数线性下降,计算公式如下:

$$LAI_i = 16LAI_{mx}(1 - fr_{PHU,i})^2 \tag{3}$$

式中:$fr_{PHU,i}$ 是植物生长过程中第 天的潜在积热率。

上述公式涉及到的参数具体计算过程参考文献[8]。

2.2 双源蒸散发模型[3]

双源蒸散发模型同时考虑土壤蒸发和植物散发,将植被冠层和土壤作为两个相互独立又相互作用的水汽源,分别对土壤表层和植被冠层进行能量的平衡计算,计算方程如下所示:

土壤蒸发能力(mm):

$$E_{ps} = \frac{\Delta \cdot (R_{ns} - G) + \dfrac{\rho C_p D_0}{R_{as}}}{\lambda[\Delta + \gamma(1 + \dfrac{R_{sp}}{R_{as}})]} \tag{4}$$

植被蒸腾能力(mm):

$$E_{pc} = \frac{\Delta \cdot R_{nc} + \dfrac{\rho C_p D_0}{R_{ac}}}{\lambda[\Delta + \gamma(1 + \dfrac{R_{cp}}{R_{ac}})]}(1 - W_{fr}) \tag{5}$$

植物冠层截留蒸发(mm):

$$E_i = \frac{\Delta \cdot R_{nc} + \dfrac{\rho C_p D_0}{R_{ac}}}{\lambda[\Delta + \gamma]} W_{fr} \tag{6}$$

式中:R_{nc} 为植物冠层净辐射,W/m^2;R_{ns} 为土壤表面净辐射,W/m^2;G 为土壤热通量值,W/m^2;ρ 为平均空气密度,kg/m^3;γ 为空气湿度常数值,kPa/℃;Δ 为饱和水汽压梯度值,kPa/℃;C_p 为空气比热值(1.013×10^{-3} kJ/kg·℃);λ 为蒸发潜热值,MJ/kg;W_{fr} 为 潮湿冠层比例值;R_{cp} 为土壤含水量达到田间持水量时植物冠层总气孔阻抗值,s/m[9];R_{sp} 为土壤含水量达到田间持水量时土壤表面阻抗值,500

s/m[9-10]; R_{as} 为土壤表面和植物冠层源汇高度之间的空间动力学阻抗,s/m; R_{ac} 为冠层的总边界层阻抗,s/m; D_0 为植物冠层源汇高度处水汽压强差,kPa。参数具体计算参考文献[3]。

2.3　植物生长模型与分布式双源蒸散发模型集成

双源蒸散发模型参数中的 R_{nc}、R_{ns}、R_{cp} 和植物冠层截留量 S 的计算均需要 *LAI*,*LAI* 逐日动态变化影响土壤蒸发、植物蒸腾和植物冠层截留蒸发。集成双源蒸散发模型与植物生长模型,由植物生长模型计算逐日动态 *LAI* 并将其作为双源蒸散发模型重要输入项计算流域蒸散发能力。

2.4　模型应用

2.4.1　*研究区域概况*　选取息县以上淮河上游流域为研究区,流域范围:东经 113°15′~114°46′,北纬 31°31′~32°43′,流域面积 10 190 km^2。该区域地处我国半干旱气候与湿润气候过渡带,降雨和蒸发时空分布不均匀,多年平均水面蒸发量 900 ~ 1 500 mm,多年平均降水量 920 mm[11]。研究区域只有南湾、石山口、息县 3 个蒸发站,其中,南湾和石山口位于流域中部,息县是流域总出水口,蒸发站数量过少,不能反映流域蒸散发的空间分布变化。

2.4.2　*资料处理*　本论文所需数据资料包括:地形、土地利用、水文、气象和植物生长数据。运用 ArcGIS 软件,结合流域形状图,切割全球分辨率为 1 km × 1 km 的数字高程数据得到研究流域的数字高程图 DEM;参考中国科学院提供的淮河上游流域 2000 年的土地利用空间分布图确定土地利用类型空间分布及面积比例。水文资料,包括降雨量、蒸发皿蒸发数据,由流域雨量站和蒸发站提供;气象资料,包括日平均气温、净辐射、相对湿度、风速,由流域内及其附近的 6 个气象站提供并根据流域 DEM 进行高程修订插值;植物生长数据首先概化流域内不同土地利用类型轮作方式及轮种时间,采用 SWAT 模型的 Plant Growth Database 确定流域上植被的生长数据。

2.4.3　*研究区逐日叶面积指数计算*　流域土地利用类型概化为旱地、水田、林地和灌木林。轮作方式:旱地交替种植冬小麦和夏玉米,水田交替种植冬小麦和水稻。作物生长期:冬小麦 10 月 1 日至次年 5 月 31 日,水稻和夏玉米 6 月 1 日至 9 月 30 日。应用植物生长模型,计算研究区 2000 - 2008 年每个 1 km × 1 km 栅格的 LAI 逐日动态变化过程。下面以 2000 年为例分析其年内变化规律。

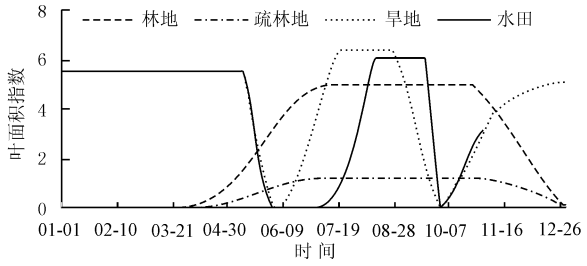

图 1　淮河流域 2000 年不同土地利用类型的叶面积指数年内逐日变化过程

图 1 为流域 4 种覆被年内 *LAI* 变化过程。6 - 9 月,旱地和水田是作物生长期,林地和疏林地也都进入生长旺盛期,且日照充足,降水充沛,有利于植物生长,所以 *LAI* 较高。4 种植被 *LAI* 最大值都出现在 8 月份。10 月至次年 5 月,林地和疏林地由凋零期进入冬季休眠期,*LAI* 从最大值线性下降至零; 旱地和水田则是冬小麦生长期,*LAI* 从 10 月开始近线性增大,1 到 5 月维持最大值,最后进入收割期,*LAI* 降低,随后开始种植玉米和水稻,两种作物生长期内 *LAI* 变化过程同冬小麦相似。

上述分析表明流域内各种土地利用类型上的 *LAI* 年内逐日变化具有明显的季节性,*LAI* 作为双源蒸散发模型重要的输入项,使模型能够考虑植物生长、下垫面和季节多种因子对流域蒸散发的综合影响作用,可有效提高淮河流域蒸散发能力计算精度。

2.4.4　*研究区蒸散发能力计算*　集成植物生长模型和分布式双源蒸散发模型,考虑逐日动态叶面积指数,以日为时间尺度,计算了研究区 2000 - 2008 年每个 1 km × 1 km 栅格的蒸散发能力。

3　计算成果分析

3.1　蒸发皿所在网格的蒸散发能力计算值与蒸发皿水面蒸发观测值逐日过程比较

因计算成果较多,选取息县和南湾两个蒸发站 2005 年数据分析比较蒸发皿所在网格蒸散发能力计算值与蒸发皿水面蒸发观测值变化趋势(图 2)。

由图 2 可看出,蒸散发能力计算值与蒸发皿观测得到的水面蒸发值年内逐日波动趋势基本一致,验证了双源蒸散发模型的合理性及其在淮河流域的适用性。蒸发皿蒸发主要影响因素为气象要素,而本文蒸散发能力计算值则受气象要素和逐日 *LAI* 动态变化影响。下垫面息县为耕地,南湾为林地。对于息县,计算值整体大于观测值,这是因为模型考虑植物散发和土壤蒸发,耕地两种作物轮种,一年四季都有植被生长,蒸散发能力随 *LAI* 变化而变化;对于南

湾,春、夏、秋 3 个季节都处于植被生长期,计算值大于观测值,且夏季旺盛期 *LAI* 达最大此时蒸散发能力计算值也达到最大;冬季为林地休眠期,*LAI* 几乎为零,且冬季淮河流域降水少、气温低,出现计算值小于观测值的情况。

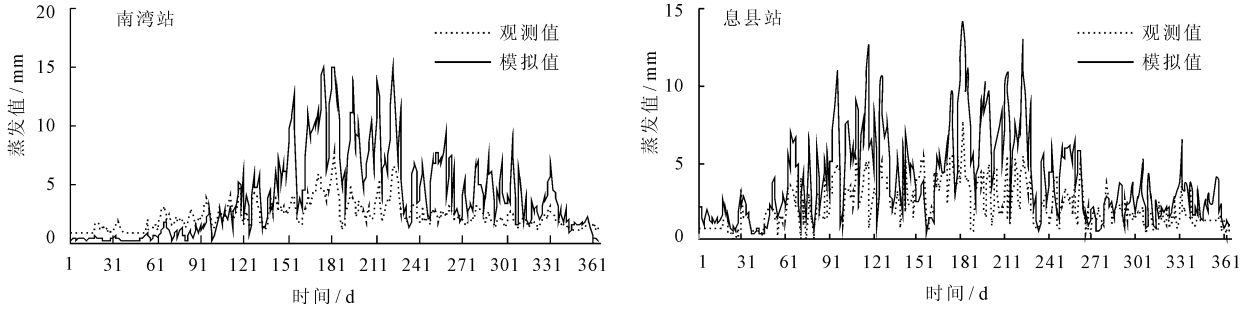

图 2 息县和南湾 2005 年蒸发皿观测值与模型计算值逐日变化过程

3.2 蒸发皿所在网格蒸散发能力计算值和观测值相关性分析

目前,淮河流域水文模拟中的蒸散发能力大多还是采用蒸发皿蒸发乘以折算系数 K_c 这一传统方法,$K_c = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$,其中 K_1 反映水面与陆面蒸发差异,K_2 反映高程差别。K_c 还与时期(月或季)、蒸发下垫面条件等有关。流域只有 3 个蒸发站,由蒸发皿观测值插值计算得到的流域蒸散发能力空间分布会存在较大误差。

本论文采用考虑逐日动态 *LAI* 的双源蒸散发模型计算蒸散发能力。流域内共有南湾、石山口及息县 3 个蒸发站。下面针对这 3 个蒸发站所在网格的蒸散发能力计算值与蒸发皿水面蒸发观测值进行相关性分析,并采用 T 检验验证两变量是否显著相关。

首先对 3 个蒸发站 2000 – 2008 年的观测值与计算值进行日尺度的相关性分析。

表 1 蒸发站 2000 – 2008 年蒸散发能力计算值与观测值相关系数

站点	斜率 k	相关系数 r	T 检验
南湾	1.7063	0.643	
石山口	1.6947	0.631	<0.066
息县	1.405	0.598	

3 个站均通过了显著性水平 $\alpha = 0.01$ 的 T 检验,说明模型计算值与蒸发皿观测值显著相关,验证了双源蒸散发模型在研究区的适用性。3 个站点相关系数和斜率大小不一,这与各站点植被类型(下垫面)有关。南湾、石山口、息县的植被覆盖分别为林地、草地、耕地,相关系数和斜率依次减小,说明蒸散发能力林地最大,其次是草地,耕地最小。此外,3 个蒸发站所在高程也不同。因此流域蒸发皿蒸发折算系数 K_c 应分下垫面、分高程取值,但淮河流域采用蒸发皿蒸发传统方法计算时 K_c 全流域取值相同,而双源蒸散发模型均可以考虑这些因子对流域蒸散发能力的综合影响。所以该模型可有效提高淮河流域蒸散发计算精度。

前面分析可知模型重要输入项动态 *LAI* 年内变化有着明显的季节性,蒸散发能力也受植被生长季节性影响。所以,本文分别对蒸发站 2000 – 2008 年 4 个季节 9 年的蒸发皿水面观测资料与计算的蒸散发能力进行了相关分析,结果见表 2。

表 2 不同季节蒸发站所在网格蒸散发能力计算值与观测值相关系数

季节	相关系数 r			T 检验
	南湾	石山口	息县	
春	0.594	0.569	0.541	
夏	0.577	0.495	0.375	
秋	0.597	0.569	0.558	<0.091
冬	0.341	0.307	0.437	

表 2 中 3 个蒸发站一年四季均通过了显著性水平 $\alpha = 0.01$ 的 T 检验,即模型计算值与蒸发皿观测值在不同季节也是显著相关的。相关系数 r 石山口和息县夏冬偏低,春秋高;南湾冬季明显低于其他季节,夏季也略偏低。原因在于双源蒸散发模型考虑了植物动态 *LAI* 变化。春季,流域内大多植被开始生长,陆面蒸散发能力主要受气象要素影响,因此计算值与观测值相关性最好;夏季,降水量较充沛,植被生长茂盛,*LAI* 整体很高,影响陆面蒸发的不仅有气象要素还有下垫面条件,陆面蒸散发能力受植被截留影响较大,因此相关性较差;秋季,植被生长开始出现衰退,相关性与春季相近;冬季,流域内气温低,降水量少,南湾林地和石山口草地植被生长几乎

停滞,而息县耕地上的冬小麦进入早期生长期,植被 *LAI* 整体偏小,冬季相关性较差但耕地 > 林地 > 草地。上述分析可知,流域蒸发皿蒸发折算系数 K_c 受季节影响较大,不同季节取值应该不同。但淮河流域传统计算方法中未考虑该影响因子,体现不出流域不同季节蒸散发能力变化特点,在这点上,考虑植被生长季节性对蒸散发影响的双源蒸散发模型更能模拟计算流域实际蒸散发能力,优势明显。

4　结　语

本文将考虑流域植被叶面积指数逐日动态变化的分布式双源蒸散发模型应用于淮河息县以上流域,模型计算得到的蒸散发能力计算值与蒸发皿水面蒸发观测值显著相关,但相关系数大小受下垫面、高程、季节、降雨量等因子综合影响。研究表明该模型能够综合考虑流域气象、地形及下垫面的影响,能较好地反映淮河流域实际蒸散发能力的空间分布变化。研究成果为淮河流域蒸散发能力的计算提供了新的途径,对淮河上游无资料地区水文模拟和农作物需水研究具有参考价值。所以,可将模型进一步推广应用到其他流域,提高不同流域分布式水文模型的模拟精度,进而提高水文预报精度。

参考文献:

[1] Biftu G F, Yew Gan T. Assessment of evapotranspiration models applied to a watershed of Canadian Prairces with mixed land – use, Hydrological Processes, 2000,14(7): 1305 – 1325.

[2] Mo Xingguo, Liu Suxia, Liu Zhonghui, et al. Simulating temporal and spatial variation of evapotranspiration over the Lushi basin [J]. Journal of Hydrology, 2004,285(1 – 4): 125 – 142.

[3] 袁 飞. 考虑植被影响的水文过程模拟研究[D]. 南京:河海大学,2006.

[4] Guan H, Wilson J L. A hybrid dual – source model forpotential evaporation and transpiration partitioning[J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(3/4): 405 – 416.

[5] 刘晓帆,任立良,袁 飞,等. 双源蒸散发能力计算模型在半干旱区的适用性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2009,37(2):138 – 142.

[6] 杨雨亭,尚松浩. 双源蒸散发模型估算潜在蒸散发量的对比[J]. 农业工程学报,2012,28(24):85 – 91.

[7] 于岚岚. 分布式双源蒸散发模型的构建与运用研究[J]. 东北水利水电,2015(1):35 – 37.

[8] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation, Version 2000 [EB/OL][2001]. http: //www. brc. tamus. edu/swat/.

[9] Zhou M C, Ishidaira H , Hapuarachchi H P, et al. Estimating potential evapotranspiration using Shuttleworth – Wallace model and NOAA – AVHRR NDVI data to feed a distributed hydrological model over the Mekong River basin [J]. Journal of Hydrology, 2006,327(1 – 2):151 – 173.

[10] Shuttleworth W J, Wallace J S. Evaporation from sparse crops – an energy combination theory[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1985,111(469): 839 – 855.

[11] 水利部淮河水利委员会. 淮河流域防汛水情手册[Z]. 2006.