

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2009.02.003

双源蒸散发能力计算模型在半干旱区的适用性

刘晓帆,任立良,袁 飞,徐 静

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:利用 20 世纪 70 年代的水文气象资料、地形和土地覆被资料以及双源蒸散发能力计算模型计算了老哈河流域甸子水文站以上集水区内 30" 栅格单元的逐日蒸散发能力,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来验证双源蒸散发能力计算模型在半干旱区的适用性.结果表明:由双源蒸散发能力计算模型计算的蒸散发能力与当地的蒸发皿资料在时间上具有较好的相似性和一致性,并且该蒸散发能力可以取代蒸发皿资料作为混合产流模型的输入进行径流模拟,且两者的模拟精度相当.

关键词:蒸散发能力 半干旱区 相关分析 径流

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2009)02-0138-05

蒸散发是土壤-植被-大气连续系统中水分运动重要而复杂的过程,是水量平衡的重要组成部分^[1].在干旱、半干旱区域,80% 以上的降水都消耗于地表蒸散发.蒸散发的强度与土壤、植被、大气热力状况密切相关^[2],实际蒸散发量通常被认为是蒸散发能力、土壤蓄水量以及土壤和植被的一些特性函数.区域蒸散发量的计算在降水径流计算、水资源评价及干旱评估中均占有重要的地位.目前,计算蒸散发能力有许多气象学方法和经验公式,简单的如桑斯威特公式,仅需要平均气温资料,但在计算较短时段的可能蒸散发量时误差会很大.空气动力学方法及涡动相关法是水汽输送法的分支,一般能准确地计算蒸散发量,但由于方法本身复杂及测定困难,其应用不可能普及^[3];Penman-Monteith 公式用空气动力学阻抗代替 Penman 公式中的经验风速函数,但由于它采用单层结构,仅适用于计算均质稠密植被的蒸散发量,不适用于稀疏植被^[4].Mo 等^[5]发展了基于 Penman-Monteith 公式的双源蒸散发模型,发展后的双源蒸散发模型可用于计算实际蒸散发量.袁飞^[6]对双源蒸散发模型进行了改进,改进的双源蒸散发模型可用于能够计算流域各处不同植被类型在整个生育期内的蒸散发能力,反映植被覆盖空间差异性对蒸散发能力的影响.

本文利用基于 Penman-Monteith 公式的双源蒸散发能力计算模型,在空间分辨率为 30" 的数字高程模型(DEM)的基础上,计算 1970~1979 年老哈河流域上游甸子站以上集水区域内每个栅格的逐日蒸散发能力,并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^[7]的输入来验证双源蒸散发能力计算模型在半干旱区域的适用性.

1 双源蒸散发能力计算模型

双源蒸散发能力计算模型^[6]将土壤和冠层作为 2 个相互独立又相互作用的源汇,土壤表面和冠层的能量平衡计算分别进行.蒸散发能力由 3 部分构成:植被蒸腾能力(E_{pc}),即土壤含水量达到田间持水量时,干燥植被叶面气孔所散失的水分;截留蒸发(E_i),即被雨水淋湿叶面上的截留雨水蒸发;土壤蒸发能力(E_{ps}),即土壤含水量达到田间持水量时,裸土表面或冠层以下土壤表面所散失的水分.计算公式为

$$E_{pc} = \frac{\Delta R_{nc} + \frac{\rho c_p D_0}{r_{ac}}}{\lambda \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_{cp}}{r_{ac}} \right) \right]} (1 - W_{fr}) \quad (1)$$

收稿日期:2008-03-28

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2006CB400502)

作者简介:刘晓帆(1982—),女,辽宁大石桥人,博士研究生,主要从事数字水文及流域水文过程模拟研究.

$$E_i = \frac{\Delta R_{nc} + \frac{\rho c_p D_0}{r_{ac}}}{\lambda (\Delta + \gamma)} W_{fr} \tag{2}$$

$$E_{ps} = \frac{\Delta (R_{ns} - G) + \frac{\rho c_p D_0}{r_{as}}}{\lambda \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_{sp}}{r_{as}} \right) \right]} \tag{3}$$

式中： R_{nc} ——冠层净辐射； R_{ns} ——土壤表面净辐射； G ——土壤热通量； ρ ——平均空气密度； c_p ——空气比热容； Δ ——饱和水汽压梯度； γ ——空气湿度常数； λ ——蒸发潜热； W_{fr} ——潮湿冠层比例； r_{cp} ——土壤含水量达到田间持水量时的冠层总气孔阻抗； r_{sp} ——土壤含水量达到田间持水量时的土壤表面阻抗； r_{ac} ——冠层总边界层阻抗； r_{as} ——土壤表面与冠层源汇高度间的空气动力学阻抗； D_0 ——冠层源汇高度处的水汽压。

此外,本文也考虑了水面蒸发(ET)的计算^[8]：

$$ET = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} 0.408 (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 2.624 (1 + 0.536 u_2) (e_s - e_a) \tag{4}$$

式中： R_n ——太阳净辐射； e_s ——饱和水汽压； e_a ——实际水汽压； u_2 ——2 m 高度处的风速。

2 研究区域及资料

2.1 区域概况

以老哈河流域甸子水文站控制的集水区作为研究区域,集水面积为 1 643 km².老哈河流域位于 40.9°N ~ 42.9°N,117.2°E ~ 120.0°E 之间(图 1).该流域多年平均年降水量为 451 mm,但时空分布不均,88% 以上的降水集中在 5 ~ 9 月,因此该流域属于我国北方典型的半干旱区域.甸子水文站控制的集水区位于老哈河流域的上游,地势较高,平均海拔 950 m,植被覆盖较好.

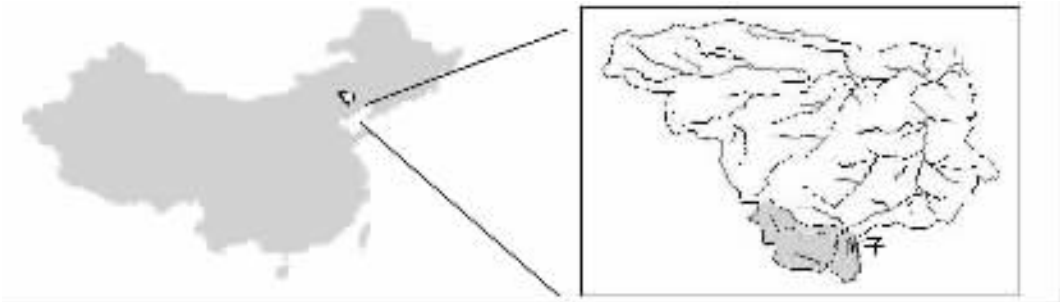


图 1 老哈河流域地理位置
Fig. 1 Location of Laohahe watershed

2.2 资料准备

a. 地形资料采用美国国家地球物理中心的全球 1 km 基础高程资料 GLOBE 数据来描述甸子站控制集水区的地形分布(图 2(a)).该 DEM 的空间分辨率为 30",运用数字高程流域水系模型 DEDNM(digital elevation drainage network model)^[9]自动生成流域边界和水系(图 1).

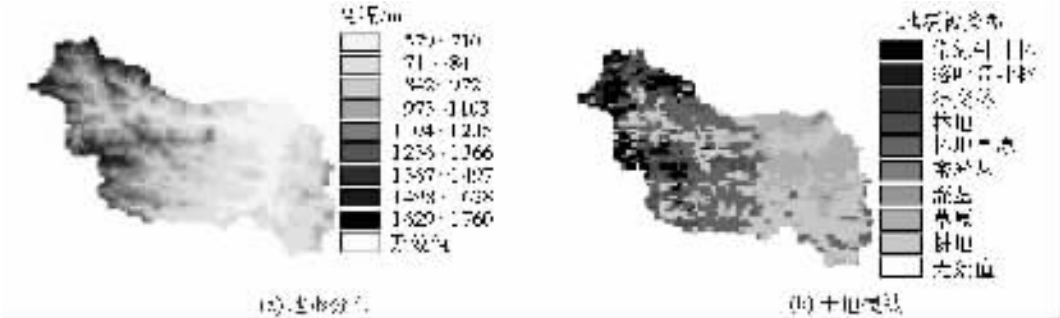


图 2 甸子站控制集水区数字高程及土地覆被类型
Fig. 2 Digital elevation map and Land cover map of study area

b. 土地覆被资料采用美国马里兰大学全球 1 km 土地覆被资料 UMD (University of Maryland's 1 km global land cover data), 空间分辨率为 30". 如图 2(b) 所示, 甸子站控制集水区主要分布了常绿针叶林、林地、林地草原、草原和耕地 5 种植被类型, 分别占集水区面积的 9.7%, 11.3%, 24.7%, 20.0% 和 32.6%.

c. 可归一化植被指数 NDVI (normalized difference vegetation index) 来源于美国地质调查局 USGS 地球资源观测系统 EROS (earth resources observation system). 该指数的空间分辨率是 1 km × 1 km, 时间分辨率为 1 旬. 本文利用 NDVI 资料来反演研究区域的叶面积指数 LAI (leaf area index).

d. 水文气象数据包括日平均气温, 最高、最低气温, 水汽压, 风速, 日照时间, 日降水, 日蒸发以及甸子站的日径流资料. 其中日降水资料来源于甸子站控制集水区内的 8 个雨量站, 日蒸发资料来源于集水区内的 2 个蒸发站, 其他气象资料来源于老哈河流域邻近的 4 个气象站 (赤峰、围场、建平和承德). 采用反距离平方法将水文气象资料插值到空间分辨率为 30" 的栅格单元^[10], 并利用老哈河流域及周边 15 个气象站 35 a 的资料拟合出经验公式, 对气温、水汽压和风速在高程上进行修正:

$$T_a = -0.586Z_{100} + T_{obs} \tag{5}$$

$$e_a = e_{obs} \exp(-0.0257Z_{100}) \tag{6}$$

$$u_a = u_{obs} [3.6 - 2.6 \exp(-0.0569Z_{100})] \tag{7}$$

式中: Z_{100} ——栅格单元与气象站之间的高程差, 单位为 100 m; T_a, e_a, u_a ——栅格单元的气温、水汽压和风速; $T_{obs}, e_{obs}, u_{obs}$ ——气象站实测的气温、水汽压和风速.

3 结果分析

3.1 计算的蒸散发能力与蒸发皿资料的相关分析

20 世纪 70 年代, 甸子水文站控制集水区主要有甸子 (41°25' N, 118°50' E) 和西泉 (41°25' N, 118°34' E) 2 个蒸发站, 这 2 个蒸发站所在栅格的植被类型分别为耕地和林地草原. 为了验证计算的蒸散发能力 (E_p) 与蒸发皿观测资料 (ET_{pen}) 在时间上的相似性和一致性, 建立蒸发皿观测资料 (蒸发皿的口径为 20 cm) 与其所在栅格单元的蒸散发能力之间的一元线性回归模型. 利用最小二乘法估计回归方程及其相关系数 R 的结果见图 3. 从 2 个站点拟合的情况可以看出, 计算的日蒸散发能力与蒸发皿观测资料存在较好的正相关性. 导致 2 个站点回归方程差异的原因主要是 2 个站点植被覆盖类型不同, 具有物理机制的双源蒸散发能力计算模型充分考虑了植被类型对蒸散发能力的影响. 由于双源蒸散发能力计算模型考虑了植被类型及其生长情况对蒸散发能力的影响, 本文又计算了甸子站月蒸散发能力与蒸发皿观测资料在不同季节内的相关系数. 甸子站春季 (3 ~ 5 月)、夏季 (6 ~ 8 月)、秋季 (9 ~ 11 月) 和冬季 (12 ~ 2 月) 的相关系数分别为 0.93, 0.48, 0.83 和 0.81. 夏季相关系数偏低的原因是夏季植被生长茂盛, 植被截留受降水的影响较大, 而蒸发皿观测资料没有考虑植被截留. 由此可见, 双源蒸散发能力计算模型计算的蒸散发能力与蒸发皿观测资料在时间上有较好的相似性和一致性.

3.2 日径流过程模拟

将由双源蒸散发能力计算模型计算的植被蒸腾能力、土壤蒸发能力和植被截留作为混合产流模型^[6]的输入来计算每个栅格单元的实际蒸散发量和产流量, 然后用马斯京根法进行河道汇流演算. 由于混合产流模型为概念性模型, 有 11 个参数需要率定. 本文没有考虑参数的空间分布, 所率定的参数为流域平均参数. 将 1970 ~ 1976 年作为率定期, 1977 ~ 1979 年作为验证期. 参数率定时采用确定性系数和径流深相对误差来评价模型的精度.

混合产流模型各参数率定结果如表 1 所示, 模型精度评价结果如表 2 所示. 从表 2 可以看出, 率定期除了 1972 年以外, 其他年份的确定性系数均在 0.6 以上, 有的年份确定性系数达到了 0.9. 率定期 7 a 的平均径

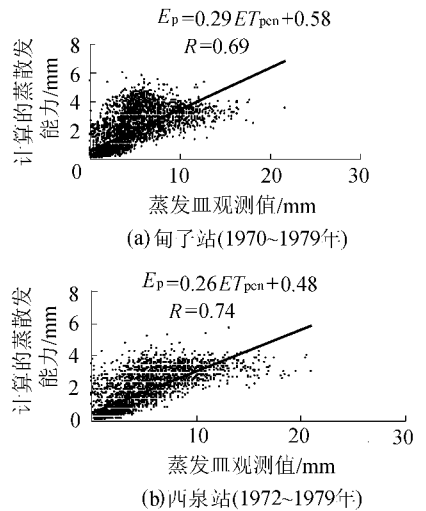


图 3 日蒸发皿观测值与计算的蒸散发能力回归分析

Fig. 3 Regression relationship between calculated potential evapotranspiration and that by evaporation pan

流量误差为 2.9%,其中 1970 年、1972 年和 1976 年的径流深相对误差超过了 $\pm 20\%$ 。这种较大的水量平衡误差主要来源于 2 个方面:(a)半干旱区人类活动对河道径流量的影响较大;(b)半干旱区的产流机制较复杂,现有的水文模型还不能准确地描述产流过程,需要继续改进。1972 年模拟的径流量比实测的径流量大 56.6%,从实测的水文资料计算得到 1972 年的降水量为 502 mm,径流深为 51 mm,其径流系数(0.103)比 20 世纪 70 年代平均的径流系数(0.167)少了 64%。在实际蒸发量年际变化不很显著的情况下,1972 年模拟的径流误差可以认为是人类活动对河道径流量的影响。验证期模拟的精度比率定期好,单年的确定性系数均在 0.8 以上,且单年的径流深相对误差均在 10% 以内,平均确定性系数为 0.90,平均径流深相对误差为 -3.1% 。以 1972 年和 1978 年为例给出了模拟径流和实测径流过程的对比(图 4)。

表 1 混合产流模型各参数率定结果

Table 1 Calibrated results of hybrid model

参数	土壤蓄水容量/mm			分布曲线指数		流域平均下渗能力/ (mm·h ⁻¹)		下渗能力 衰减系数	地下水日 消退系数	马斯京根参数	
	上层	下层	深层	蓄水容量	下渗能力	最大值	稳渗值			Ke/h	Xe
参数值	20	80	40	0.3	0.3	21	3	0.27	0.84	24	0.28

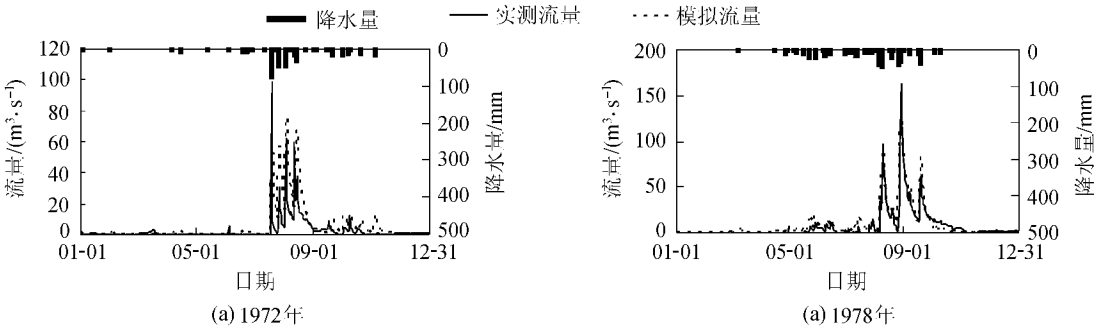


图 4 甸子水文站实测日径流过程与混合产流模型模拟的日径流过程比较

Fig. 4 Comparison between observed daily runoff process and that simulated by hybrid model

为了进一步说明双源蒸散发能力计算模型在半干旱区的适用性,本文同时采用蒸发皿观测资料作为混合产流模型的输入对甸子站 20 世纪 70 年代的日径流过程进行模拟,并对比以上 2 种模拟结果采用反距离平方方法将蒸发皿观测值插值到分辨率为 30"的栅格单元上。表 3 为以蒸发皿观测资料作为输入的混合产流模型的径流模拟精度。对比表 2 和表 3,在率定期内,与双源蒸散发能力计算模型耦合的混合产流模型的径流模拟精度略低于以蒸发皿观测资料作为输入的混合产流模型,表现为前者的平均确定性系数比后者低 1%,并且前者的平均径流深相对误差比后者大 1.04%,而在验证期内,与双源蒸散发能力计算模型耦合的混合产流模型的径流模拟精度明显优于以蒸发皿观测资料作为输入的混合产流模型,前者的平均确定系数比后者高 7%,并且径流相对误差也小于后者。总体上,2 种情况径流模拟的精度相当。

表 2 与双源蒸散发能力计算模型耦合的径流模拟精度

Table 2 Precision of runoff simulated with hybrid model coupled with two-source potential evapotranspiration model

验证时段	年份	确定性系数	径流相对误差/%
率定期	1970	0.72	-24.0
	1971	0.82	-18.6
	1972	0.36	56.6
	1973	0.90	-6.0
	1974	0.83	3.4
	1975	0.79	13.2
	1976	0.63	20.5
验证期	1977	0.85	0.4
	1978	0.90	2.5
	1979	0.91	-10.0

表 3 以蒸发皿观测资料作为输入的径流模拟精度

Table 3 Precision of runoff simulated with hybrid model with input data of evaporation pan

验证时段	年份	确定性系数	径流相对误差/%
率定期	1970	0.68	-7.6
	1971	0.84	-20.2
	1972	0.44	45.7
	1973	0.90	0.1
	1974	0.78	9.7
	1975	0.83	-5.6
	1976	0.67	11.8
验证期	1977	0.80	-15.8
	1978	0.86	7.7
	1979	0.81	17.1

4 结 论

具有物理机制的双源蒸散发能力计算模型考虑空间植被类型对蒸散发能力的影响,能够更好地描述蒸散发能力在空间上的变异性.该模型在我国南方湿润地区的汉江流域已有成功的应用^[5].而本文的研究目的主要是探讨双源蒸散发能力计算模型在半干旱区的适用性.由双源蒸散发能力计算模型计算的老哈河流域甸子水文站控制的集水区的蒸散发能力与当地的蒸发皿观测资料在时间上具有较好的相似性和一致性.通过径流模拟对比分析发现,利用双源蒸散发能力计算模型计算的蒸散发能力可以取代蒸发皿观测资料作为混合产流模型的输入进行径流模拟,且两者的模拟精度相当.因而,双源蒸散发能力计算模型能够应用于我国北方半干旱地区的蒸散发能力的计算.

参考文献：

[1] 李相虎,任立良,王贵作,等.月蒸散发能力解集模型研究[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(3):295-299.
[2] 武夏宁,胡铁松,王修贵,等.区域蒸散发估算测定方法综述[J].农业工程学报,2006,22(10):257-262.
[3] 黄贤庆,刘新仁.大尺度蒸发模型研究[J].河海大学学报:自然科学版,2000,28(4):13-18.
[4] STANNARD D I. Comparison of Penman-Monteith, Shuttleworth-Wallace, and modified Priestley-Taylor evapotranspiration models for wildland vegetation in semiarid rangeland[J]. Water Resource Res, 1993, 29(5):1379-1392.
[5] MO X, LIU S, LIN Z, et al. Simulating temporal and spatial variation of evapotranspiration over the Lushi basin[J]. Journal of Hydrology, 2004, 285:125-142.
[6] 袁飞.考虑植被影响的水文过程研究[D].南京:河海大学,2006.
[7] 胡春歧.半干旱半湿润地区产流计算方法的研究[C]//水文情报预报学术交流会议论文选集.北京:中国水利水电出版社,1993:57-62.
[8] SHUTTLEWORTH W J. Evaporation[M]//MAIDMENT D R. Handbook of hydrology. New York: McGraw-Hill, 1993.
[9] MARTZ W, GARBRECHT J. Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models[J]. Computers and Geosciences, 1992, 18(6):747-761.
[10] ASHRAF M, LOFTIS J, HUBBARD K G. Application of geostatistics to evaluate partial weather station networks[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 84:255-271.

Applicability of two-source potential evapotranspiration model in semiarid areas

LIU Xiao-fan, REN Li-liang, YUAN fei, XU Jing

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the hydrometeorological data from the 1970s and topographical and land cover data with a spatial resolution of 30" × 30", the daily potential evapotranspiration of the Laohahe watershed upstream from the Dianzi hydrological station was calculated using the two-source potential evapotranspiration model. In order to verify the applicability of the two-source potential evapotranspiration model in semiarid areas, the regression relationship between the calculated potential evapotranspiration and measured with an evaporation pan was established and regarded as the input of the hybrid runoff generation model. The results indicate that good temporal similarity and consistence occur between the potential evapotranspiration calculated with the two-source potential model and that calculated with the field evaporation pan. The calculated potential evapotranspiration can replace the pan evaporation as the input of the hybrid model to simulate daily runoff, and the simulation precisions of the two approaches is close.

Key words: potential evapotranspiration; semiarid area; correlation analysis; runoff