

参考作物蒸散量的分布式模型

牛振国, 李保国, 张凤荣, 陈焕伟

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘要: 在对参考作物蒸散量计算模型的参数(气压、辐射)进行地形(坡度、坡向和高度)校正的基础上, 利用 GIS 的空间分析功能, 建立了基于数字高程模型 (DEM) 的区域参考作物蒸散量的分布式模型。并以内蒙古半干旱鄂尔多斯高原沙地区(面积为 114 km²)的考考赖流域为例, 计算了该区参考作物蒸散量的空间分布。参数校正前后的计算结果比较表明: 参考作物蒸散量在受地形影响的情况下, 具有较大的空间变异性, 且这种变异程度随模型空间分辨率的降低而减小。模型的建立与实现提高了区域蒸散估算的精度, 对于区域水分平衡研究和分布式地理模型以及沙质荒漠化防治模式研究具有重要意义。

关键词: 参考作物蒸散量; 数字高程模型; 辐射; 地理信息系统

中图分类号: P 334⁺.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2002)03-303-05

区域蒸散的空间分布受控于气候、地形、植被或土地利用、土壤水分状况等因素。对此, 不少学者采用不同的方法进行了研究^[1~5], 但这些研究所建立的蒸散模型一般尺度偏大, 地形因素上考虑了高度变化的影响。而实际上由于局部地形的变化, 如坡度和坡向等, 极大地影响着地表实际接受的太阳辐射量^[6,7], 从而影响局地的蒸散量。目前 Penman-Monteith 公式被认为是计算参考作物蒸散量较精确的计算方法之一^[4]。1990 年联合国粮农组织在意大利召开蒸散量计算的专题会议上推荐使用该公式^[8]。

本文应用 Penman-Monteith 公式, 通过对影响蒸散的参数进行坡度、坡向和高度的地形校正, 利用 GIS 技术, 建立基于数字高程模型 (DEM: Digital Elevation Model) 的参考作物蒸散量的分布式模型, 同时以内蒙古半干旱鄂尔多斯高原沙地区的考考赖流域为例, 计算不同地形条件下参考蒸散量的差异, 以反映地形控制下的微气象条件对水分分布的影响。

1 材料与方方法

计算参考作物蒸散量的 Penman-Monteith 公式及各参数的计算方法见文献[8~9], 在地表起伏较小的情况下, 坡向不同所带来的气温的差异很小。在中纬度地区, 就一般相对高差几十到一二百米的中等坡度的地形而言, 在夏季通常百叶箱高度的气温, 南坡比北坡高不足 1℃, 东西坡的平均气温与平地接近^[7]。本文研究区的高差和范围均相对较小, 地形所带来的气温的影响可以忽略。主要是坡度和坡向对辐射的影响, 同时海拔较高对气压也有一定影响。因此, 模型建立时仅考虑对辐射和气压进行校正。

收稿日期: 2001-04-13; 修订日期: 2001-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (39990490) 资助

作者简介: 牛振国(1972 -), 男, 山东沾化人, 中国农业大学资源与环境学院在读博士生, 主要从事资源环境信息技术、土地资源管理等研究。

1.1 气压校正

Penman-Monteith 公式中干湿表系数与大气压有关,而后者又与海拔有关,因此可依据计算该参数的公式^[9],利用地理信息系统(GIS)所生成的DEM对此进行校正。计算过程中,将DEM中每个栅格的数据依次读入进行计算,即可得到经过地形海拔校正的该参数。

1.2 辐射计算校正

起伏地面接受到的实际辐射包括直接的太阳辐射、大气的散射辐射和逆辐射以及其余下垫面的短波反射和长波辐射,其计算十分复杂。本文只考虑直接的太阳辐射。根据布格-兰伯特定律,可以推出坡地与水平面上辐射通量的比值等于坡地与水平面上天文辐射通量之比。据此,至少在我国的纬度范围内可以近似地认为下式成立^[7]:

$$R_s / R_a = R_s / R_a \quad (1)$$

式中 R_s 、 R_a 分别是坡度为 α 坡向为 β 的坡面上的实际太阳辐射和天文太阳辐射; R_s 、 R_a 分别是地面上的实际太阳辐射和天文太阳辐射。这样对坡地辐射的校正就相当于在大气外层对相应假设坡地的天文辐射进行校正。傅抱璞^[7]研究给出 R_a 的计算公式为

$$R_a = \frac{24 \times 60}{2 \cdot r^2} I_0 [(\cos \phi \cos \delta - \sin \phi \sin \delta \cos \alpha) (\sin \phi \cos \delta + \cos \phi \sin \delta \cos \alpha) \sin \alpha + (\cos \phi \cos \delta + \sin \phi \sin \delta \cos \alpha) (\sin \phi \cos \delta - \cos \phi \sin \delta \cos \alpha) \sin \alpha] \quad (2)$$

式中 I_0 为太阳常数 ($0.0820 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{min}$); r^2 为以日地距离为单位的日地距离; α 、 β 分别表示坡面的坡度和坡向; δ 为太阳赤纬; ϕ 为地理纬度; α_1 、 α_2 为坡地日出日落时角。平地日出日落时角为: $\alpha = \arccos(-\tan \phi \tan \delta)$ 。坡地的日出日落时角 α_1 和 α_2 与太阳赤纬、坡度和坡向等密切相关,计算较为复杂,详细计算公式参见文献^[7]。本文借助于DEM首先求出不同地形条件下的太阳日出日落时角 α_1 和 α_2 ,根据(2)式求出 R_a ,再依据(1)式原理,分别用 R_s 、 R_a 替代 Penman-Monteith 公式中的 R_s 、 R_a ,这样就完成了对坡地辐射计算的校正。

1.3 DEM的建立与模型的实现

利用研究区的 1:1 万的地形图,经扫描然后用交互矢量化生成数字等高线图,依次为等高线赋值,对图幅进行坐标的校正。利用 ArcView GIS 软件进行 TIN 插值,生成 DEM(图 1)。利用生成的 DEM 派生研究区的坡度图和坡向图,坡度表示为度,坡向以正北为 0° ,正南为 190° ,顺时针增加。这样得到具有高度、坡度和坡向因子的栅格图。栅格的大小视研究的精度和计算的能力设定。本研究采用 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的栅格,即每个栅格代表地面 100 m^2 的面积,同时每个栅格具有海拔、坡度和坡向等地形属性特征,作为分析计算的最小单元。

基于 DEM 参考作物蒸散量的计算流程示意图(图 2)。辐射校正模型的计算机实现利用 GIS 软件 ArcView 3.2 的二次开发语言 Avenue 和 Visual Basic 程序语言联合编制,这样可以实现模型与 GIS 的完整融合,以最大程度地利用 GIS 软件对空间数据的处理与分析功能,同时也可以弥补现有 GIS 软件在专业领域的不足。

1.4 试验地区概况

以内蒙古伊金霍洛旗的鄂尔多斯沙地草地生态实验站为基础(图 1),包括考考赖沟流域,该河为黄河的二级支流,流域位于鄂尔多斯高原向黄土高原过渡的地带。地理坐标为 $39^\circ 27' 3.3'' \text{ N}$, $110^\circ 7' 40.1'' \text{ E} \sim 39^\circ 34' 6.5'' \text{ N}$, $110^\circ 13' 43.4'' \text{ E}$,面积为 114.14 km^2 。海拔 $1232 \sim 1412 \text{ m}$,地貌以起伏的丘陵、梁地及河流谷地与滩地为主,各种类型相间分布。其多年平均降水量为

250 ~ 400 mm。降水量变率大，7 ~ 9 月降水量占全年降水量的 60 % ~ 70 %。而日照充足，光能资源丰富，年蒸发量为 2600 mm。土壤以风沙土、棕钙土、草甸土和盐碱土为主。模型计算采用的气象数据是鄂尔多斯沙地草地实验站的气象观测数据，包括日最高温度、最低温度、最大湿度、最小湿度、风速以及日照时数等。

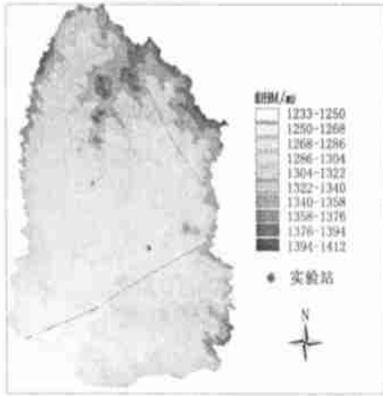


图 1 研究区数字高程模型 (DEM)
Fig. 1 Digital elevation model of study area

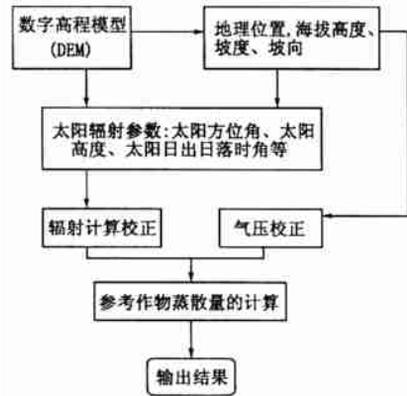


图 2 基于 DEM 参考作物蒸散量计算示意
Fig. 2 Scheme of computing PET based on DEM

2 结果与讨论

2.1 气压校正的结果分析

模型以 2000 年 8 月 29 日为例，对该日潜在蒸散量在不考虑地形因素的影响时，实验站处的潜在蒸散为 4.815 mm/d。在仅考虑地形对气压的影响时，蒸散量的空间差异与海拔具有明显的对应性，符合空间分布规律(图 3)。此时蒸散量呈现较小的空间变异性，其变化范围为 4.811 ~ 4.828 mm/d，标准差为 0.0020。这与研究区内地形的相对高差较小有关。

2.2 辐射的综合校正分析

在考虑地形坡度、坡向对蒸散的影响时，蒸散的空间差异性显著增大(图 4)，最小值与最大值分别为 0.011 mm/d 和 5.323 mm/d，标准差为 0.1782。最小值出现在阴坡且坡度较大的部位，该点坡度为 65.6°，坡向为 348.35°，与相邻栅格的高度相差大于 20 m，即由于阴坡，地形的遮蔽作用，造成蒸散的动力只有空气动力的作用。

不同坡向蒸散的统计分析表明(表 1)，南坡和北坡因受一天内辐射的影响较大而呈现大的差异，而东、西坡则相对较小。除南坡外，各坡向的蒸散量均小于平地的蒸散量。反映了坡向对蒸散的影响。

表 1 不同坡向蒸散的统计分析

Table 1 Evapotranspiration statistics in different slope direction

坡 向	面积/km ²	最小值/(mm d ⁻¹)	最大值/(mm d ⁻¹)	平均/(mm d ⁻¹)	标准差
北坡(337.5°~360.0°~22.5°)	12.47	0.011	4.830	4.736	0.1615
东坡(67.5°~112.5°)	6.47	3.792	4.840	4.744	0.0828
西坡(247.5°~282.5°)	9.93	0.066	4.899	4.810	0.0870
南坡(157.5°~202.5°)	10.82	3.007	5.323	4.989	0.1003

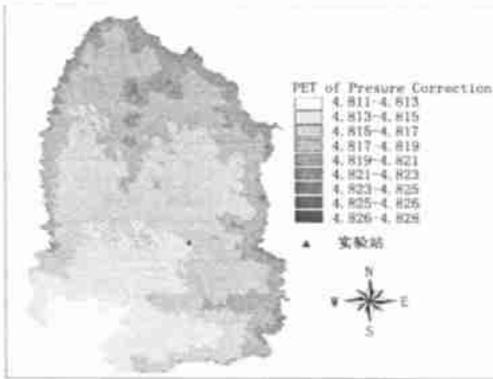


图 3 经气压校正的潜在蒸散

Fig. 3 Potential evapotranspiration of pressure correction

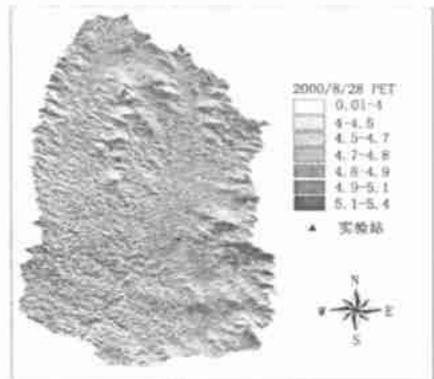


图 4 基于 DEM 的潜在蒸散量

Fig. 4 Potential evapotranspiration based on DEM

2.3 不同空间分辨率对蒸散分布的影响

DEM 的空间分辨率反映了对真实地形的表达程度。分辨率越高,则越能刻画实际地形的状况,但在模型运算时又会增大运算量。所以 DEM 的建立要同时视研究需要和计算机计算能力的情况而定。通过对不同分辨率的 DEM 进行的蒸散的模拟表明(表 2),随分辨率的降低,由于对地形的表达能力降低,从而使得蒸散的空间差异性降低(以 2000 年 8 月 28 日为例)。潜在蒸散量的标准差(γ)与空间分辨率(X)回归分析得出: $Y = -0.0462 \ln(X) + 0.2857, R^2 = 0.998$ 。

表 2 不同空间分辨率下计算的蒸散量的分布统计分析

Table 2 Evapotranspiration statistics in different spatial resolving power

分辨率 X/m	最小值/ $(mm \cdot d^{-1})$	最大值/ $(mm \cdot d^{-1})$	平均/ $(mm \cdot d^{-1})$	标准差 γ
10	0.0114	5.323	4.903	0.1792
20	0.0809	5.312	4.912	0.1491
30	0.0619	5.275	4.817	0.1289
50	1.5521	5.242	4.823	0.1039

2.4 问题讨论

本文的研究以方法的建立为主,应用仅以一天为例进行了说明。实际上只要具备研究区域的 DEM 和常规的气象观测资料,就可以利用本文所研究的成果,计算任一时段的区域潜在蒸散量。由于地形资料和气象资料的可获取性以及计算机的普及,模型建立与实现对于根据不同地形部位自然生态环境的模拟来进行作物、草木等不同植被类型的规划,提高区域作物生产潜力的估算水平等都具有重要意义。同时对区域水土资源的规划与管理以及土地利用/覆被变化研究也具有一定意义。

由于分布式模型要求有大量数据资料的支持,本文基于研究区的实际情况,对温度和阳坡地形的遮阴未加考虑。但对于地形条件非常复杂的区域,上述因素必须进行相应校正。

3 结 论

利用 GIS 技术和对参考作物蒸散发过程物理机制的认识,建立基于 DEM 的参考作物蒸散量的分布式模型并实施。经初步应用表明:在经过坡度和坡向等地形因子的校正后,蒸散的空间分布具有较大的空间差异性,并且差异性随空间分辨率的降低而减小,反映了地形对蒸散的

影响。这与通常计算作物田间水分消耗或流域水分平衡时采取集总式的处理方法相比, 空间精度大大提高。

参考文献:

- [1] Szilagyi J, Parlange M B. Defining watershed-scale evaporation using a normalized difference vegetation index[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1999, 35(5): 1245 - 1256.
- [2] Gurtz J, Baltensweiler A, Lang H. Spatially distributed hydrotope-based modelling of evapotranspiration and runoff in mountainous basins[J]. Hydrological Processes, 1999, 13(17): 2751 - 2768.
- [3] Hashmi M A, Garcia L A, Fontane D G. Spatial estimation of regional crop evapotranspiration[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 39(5): 1345 - 1351.
- [4] Hashmi M A, Garcia L A. Spatial and temporal errors in estimating regional evapotranspiration[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1998, 124(2): 108 - 114.
- [5] Chung H W, Choi J Y, Bae S J. Calculation of spatial distribution of potential evapotranspiration using GIS[A]. ASAE Annual International Meeting[C]. Minneapolis, Minnesota, USA, 10-14 August, 1997. Paper - American Society of Agricultural Engineers. 1997, No. 973030.
- [6] 傅抱璞. 不同地形下辐射收支各分量的差异与变化[J]. 大气科学, 1998, 22(3): 178 - 190.
- [7] 傅抱璞. 山地气候[M]. 北京: 科学出版社, 1983. 61 - 72.
- [8] Smith M. Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements[R]. FAO Rome, 1991
- [9] Richard G Allen, Luis S Pereira, Dirk Raes, Martin Smith. <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e07.htm>[OL]. FAO UN Rome, 1998.

A distributed model of reference evapotranspiration based on the DEM^{*}

NIU Zhen-guo, LI Bao-guo, ZHANG Feng-rong, CHEN Huan-wei

(Resource and Environment college, China Agriculture University, Beijing 100094, China)

Abstract: A distributed model for regional reference evapotranspiration was developed and applied for the daily simulation of evapotranspiration on August 28, 2000 in Ordos sandland basin of the Kaokolaigou river (area 114 km²). In the distributed evapotranspiration model, the radiation and vapour pressure strongly related to topography were adjusted firstly by utilizing GIS spatial analysis, then the spatial distribution of reference evapotranspiration was calculated and analyzed. Among the parameters, the temperature and wind speed were considered uniformity within the basin because of small variations in them. The result shows that the spatial variation of reference evapotranspiration is obvious because the radiation is depended highly on slope and aspect. The variation of reference evapotranspiration is increased with the enhancing spatial resolution of the model. The model is helpful for improving estimation of regional evapotranspiration, regional water balance study and distributed geographical model study and combating desertification.

Key words: reference evapotranspiration; digital elevation model; radiation; geographic information system

* The project is supported by National Natural Science Fund of China (No. 39990490).