

CRAE 模型在新疆和田绿洲的适用性分析

蒋春宇, 黄领梅, 沈冰, 梅星, 董德福

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安, 710048)

摘要: 新疆和田绿洲降水较少和气候干旱, 蒸散发是区域内水分消耗的主要途径, 合理估算蒸散发量可为绿洲地区水资源的合理配置等提供依据。利用和田站 2006–2014 年的气象资料以及 2006–2014 年的水文资料, 运用 CRAE 模型和水量平衡法计算和田绿洲实际蒸散发量, 验证 CRAE 模型在该地区的适用性。结果表明: 模型模拟结果平水年和多年平均实际蒸散发量结果较好, 枯水年和丰水年的结果误差较大; 模型计算的蒸发能力 ET_p 与 P–M 公式和 Hargreaves 公式相比结果更为合理; 利用水量平衡系数、总量平衡系数和相关系数对计算结果进行评价, 误差均在合理范围内。CRAE 模型在和田绿洲地区应用效果较好, 可用于估算该地区多年实际蒸散发量。

关键词: CRAE 模型; 实际蒸散发; 适用性; 和田绿洲

中图分类号: P332.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)02-0051-04

Applicability of CRAE model in Hotan oasis of Xinjiang

JIANG Chunyu, HUANG Lingmei, SHEN Bing, MEI Xing, DONG Defu

(State Key Lab Cultivation Base of Northwest Arid Ecology and Hydraulic Engineering,
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The precipitation is less and the climate is arid in hotan oasis of Xinjiang. The evapotranspiration is the main way of water consumption in the region. The reasonable estimation of evapotranspiration can provide the basis for the reasonable allocation of water resources in oasis area. Based on the meteorological data from 2006 to 2014 and hydrology data from 2006 to 2014, the paper used CRAE model and water balance method to calculate the actual evapotranspiration in Hetian oasis, and verified the applicability of CRAE model in this area. The results show that the simulation result of flat water years is better than that of mean annual actual evapotranspiration, the error results of dry year and wet year is larger; the result of evaporation capacity ET_p calculated by the model is more reasonable than that of P–M equation and Hargreaves formula; the paper used water balance coefficient, total amount balance coefficient and correlation coefficient to evaluate the results of calculation. The error is in a reasonable range. The CRAE model has good application effect in the area of oasis, which can be used to estimate the actual evapotranspiration in the area.

Key words: CRAE model; evapotranspiration; suitability; Hotan oasis

蒸散发作为大气系统和陆面系统水循环的纽带, 是气候系统的核心过程, 地球表面 70% 的降水通过蒸散发返回大气。而在干旱地区, 90% 的水分在蒸散发过程中耗散^[1], 又由于降水较少和气候干旱等原因, 水资源短缺严重。新疆和田河作为塔里木河三大源流之一, 汇入塔河的水量逐年减少, 严重威胁塔河干流两岸的生态环境, 同时对沿岸各地的

经济发展和人们生活产生影响, 使干流两岸沙漠化加重。因此为保证向塔河供应水量, 需合理估算和田绿洲实际蒸散发量, 以便对绿洲地区城市用水、水库调蓄、农业灌溉等进行水资源调度和配置。

而计算区域实际蒸散发量的方法有多种^[2–4], 如水量平衡原理、互补相关理论、作物系数法、遥感技术等。其中, 加拿大 Morton 基于互补原理提出的

收稿日期: 2015-08-26; 修回日期: 2015-11-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51109176)

作者简介: 蒋春宇(1990-), 女, 黑龙江伊春人, 在读硕士研究生, 主要从事水文学及水资源研究。

通讯作者: 黄领梅(1972-), 女, 四川乐至人, 博士, 副教授, 主要从事水文学及水资源研究。

CRAE 模型,仅输入气温、气压、湿度等气象资料即可计算出不同时间段的陆面实际蒸散发,避免了复杂的“植被-土壤”系统^[5]。CRAE 模型估算小流域实际蒸散发十分有效,满足干旱半干旱地区实际蒸散发估算的生产要求,并且参数在一定地域范围内可以移用,具有较好的普遍性^[6-7]。运用 CRAE 模型和水量平衡法对和田绿洲的实际蒸散发量进行估算,利用两种计算结果的绝对误差和相对误差分析、运用 P-M 公式、Hargreaves 公式和 CRAE 模型计算的 ET_p 进行对比分析以及采用水量平衡系数、总量平衡系数和相关系数等评价指标,验证 CRAE 模型在特殊的水文环境下模拟实际蒸散发量的精度,以及在和田绿洲地区的适用性。

1 研究区概况

和田绿洲位于新疆和田河中游,包括和田县、墨玉县、洛浦县与和田市,是昆仑山北坡最大的绿洲,面积为 8 420 km²,也是和田地区人们生产、生活的主要场所,同时受气候变化影响也最为明显。绿洲内干旱少雨,蒸发强烈,多风沙,多年平均降水量为 38.7 mm,但多年平均水面蒸发量却高达 2 648 mm^[8],干旱指数 25~842^[9],属于大陆性暖温带干燥沙漠气候。和田河是和田绿洲形成和发展主要依赖的补给水源,绿洲地区主要以灌溉农业为主,耕地面积达 2 318 km²。而农业用水中除作物根系吸收的水,其余水量均用于田间土壤蒸散发。根据 2014 年统计年鉴,和田地区第一产业(主要包括农业、林业、牧业、渔业)水量为 45.39 亿 m³,占总用水量的 98%。绿洲消耗的水量大部分被蒸散发耗散,可见合理估算实际蒸散发量对调控绿洲的实际蒸散发量和进行合理水资源配置具有非常重要的意义。

2 资料与方法

2.1 资料

采用和田气象站 1956-2014 年逐日平均气温、日照百分率、平均气压、相对湿度等气象数据,该数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.nmic.cn>);收集的径流资料为喀拉喀什河上的乌鲁瓦提站、艾格利亚站和玉龙喀什河上的同古孜洛克站、吐直鲁克站 4 个水文站 2006-2014 年月径流数据。

2.2 CRAE 模型

加拿大的 Morton^[5]提出的互补相关法(Complementary Relationship Areal Evapotranspiration,简称

CRAE)成功地避开了复杂的“土壤-植被”系统,仅输入常规的气象资料,即日照、湿度、气温,就可以估算出不同时间段的陆面蒸散发量^[10]。因此可得到流域多年蒸散发量,可较好地反映流域多年蒸散发量时空变化规律。CRAE 模型的计算原理为:

$$dET_p + dET_a = C \quad (1)$$

$$ET_p + ET_a = 2ET_w \quad (2)$$

式中: ET_p 为区域蒸散发能力; ET_a 为陆面实际蒸散发; ET_w 为“湿润环境”区域陆面蒸散发量,单位均为 mm。CRAE 模型计算值能够较好地反映流域降水量对蒸散发量的影响,计算成果比简单的水量平衡估值更接近实际^[11]。

ET_w 采用修正后的 Priestley-Taylor 来计算,其表达式为:

$$ET_w = a + b(1 + \gamma p / \Delta_p)^{-1} R_{Tp} \quad (3)$$

式中: a 是常数,反映对流的影响,辐射期较强时,此项作用较小; Δ_p 为饱和水汽压曲线上 T_p 对应的斜率; R_{Tp} 为 T_p 对应的净辐射量, W/m²。据应用美国、加拿大等资料的率定 $a = 14$ W/m², $b = 1.20$,根据不同地区的情况,对 b 进行一定的调整。

ET_p 采用 Morton 公式,即联立求解下列水汽输送方程与能量平衡方程得到:

$$ET_p = R_T - \lambda_T f_T (T_p - T) \quad (4)$$

$$\text{及 } ET_p = f_T (v_p - v_d) \quad (5)$$

式中: 斯蒂芬-波尔兹曼常数 ($\sigma = 5.76 \times 10^{-8}$ W/(m² · K²)); 蒸散发面的热辐射系数 ($\varepsilon = 0.92$); R_T 是对应的蒸散发面(植物表面-土壤)的净辐射量, W/m²; f_T 是水汽输送系数; v_d 和 v_p 分别是露点温度 (T_d) 和平衡温度 (T_p) 对应的饱和水汽压 (mbar 或 hPa)。

其中计算净辐射 R_T 的公式为:

$$R_T = (1 - \alpha) G - B \quad (6)$$

式中: α 为月平均反射率; G 为总短波辐射量, W/m²,即月平均日全球入射量; B 表示月平均日净长波辐射量, W/m²,其中计算反射率 α 过程中需对干燥季节无雪晴朗天气反射率极大值 α_0 进行调整。和田绿洲的海拔为 1 375 m,根据翟禄新^[13]对模型的校正,在西北地区,海拔小于 1 650 m 时,净长波辐射的计算应运用修正后的孙治安公式,即:

$$B = 0.8685 \varepsilon \sigma (T_a + 273)^4 \cdot [1 - (1.035 - 0.295 e^{-0.166 W \infty})] \cdot \{1 - 0.54 e^{0.02 h^2} [1 - (0.25 + 0.50 S) / (0.75 + 2 \times 10^{-2})]\} e^{0.18 h} \quad (7)$$

式中: W_{∞} 为水汽含量,%; h 为以 km 表示的站点海拔高程; S 为日照百分率,%, T_a 为大气温度,℃。其余符号意义同前。模拟中其它变量(如平衡温度 T_p 、水汽输送系数 f_i 、环球入射量 G 等)均沿用模型推荐公式。

2.3 模型验证方法

为验证模型在和田绿洲的适用性,首先用水量平衡法计算的 实际蒸散发量与模型模拟的进行比较,水量平衡法计算的 实际蒸散发为:上游水文站(乌鲁瓦提站、同古孜洛克站)径流量 - 下游水文站(艾格利亚站、吐直鲁克站)径流量 + 年降水量 - 工业、生活等用水 = 实际蒸散发量。并用水量平衡系数 (RE)、总量平衡系数 (R) 和相关系数 (r) 来评定模型适用性。且计算出的 3 个系数值均越接近于 1 表明模型率定的结果越好。其次,将模型计算成果与 P - M 公式和 Hargreaves 公式的计算实际蒸散发量的成果进行对比分析。

3 适用性判识

3.1 误差分析

为验证 CRAE 模型在和田绿洲的有效、准确性,将模型计算结果与水量平衡计算结果进行比较,对比结果见表 1 和图 1。由表 1 中可知,从模拟的实际蒸散发量的绝对误差和相对误差来看均在 20% 的允许误差范围内。由图 1 中可知,除去 2009 年(极枯水年)和 2013 年(极丰水年),其它年份模拟效果均较理想。根据径流资料可知,多年平均来水量为 627 mm,2009 和 2013 年乌鲁瓦提站、同古孜洛克站的来水总和分别为 419、862 mm,因此可知模型在模拟极枯水年和极丰水年的实际蒸散发量时存在较大误差。由于和田河是和田绿洲主要水源,和田河的补给主要是高山积雪融水,而水量平衡法没考虑流域蓄水量的年际变化,导致在极枯水年和极丰水年计算的 实际蒸散发量极小或极大。

同时模型本身用相对湿度和气压来作为湿度资料,而温度和湿度的非线性关系导致的误差^[12]以及和田绿洲特殊的来水条件也是导致模拟结果在极丰水年和极枯水年的存在较大的误差的原因。在多年实际蒸散发量估算时,极丰水年和极枯水年的误差对其影响是较小的,因此模型在和田绿洲的适用性较好。

3.2 ET_p 对比分析

根据模型的计算原理可知, ET_p 和 ET_w 的计算精度决定了模型估算蒸散发量 ET_a 的准确性。其中

实际蒸散发量 ET_a 和蒸发能力 ET_p 的关系十分密切^[13],因此,将模型计算过程中得到的 ET_p 与董德福^[14]运用 P - M 公式、Hargreaves 公式分别计算的 ET_{p0} 和 ET_{ph} 进行对比分析。由图 2 中 P - M 公式、Hargreaves 公式、CRAE 模型计算的 ET_p 对比可知,3 者计算结果趋势基本相同, ET_p 小于 ET_{p0} , ET_p 大于 ET_{ph} 。原因在于:

表 1 水量平衡计算与修正后的模型计算的
实际蒸散发量对比表

年份	水量平衡/ mm	模型计算/ mm	绝对误差/ mm	相对误差/ %
2006	417.29	430.36	-13.06	-3.13
2007	412.28	416.87	-4.59	-1.11
2008	461.47	417.71	43.76	9.48
2009	364.09	435.20	-71.11	-19.53
2010	511.56	416.91	94.64	18.50
2011	422.45	428.97	-6.53	-1.55
2012	492.38	408.19	84.19	17.10
2013	528.76	432.09	96.67	18.28
2014	389.02	401.18	-12.15	-3.12
均值	444.37	420.83	23.54	5.75

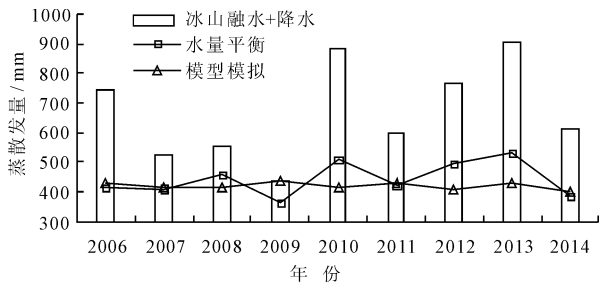


图 1 和田绿洲 CRAE 模型与水量平衡
计算的 实际蒸散发量图

- (1) P - M 公式是假定一种假想作物冠层的蒸散发速率,假定作物的作物高度为 12 cm,而在下垫面的温度与参考高度处的大气温度存在较大差异时,计算结果明显偏大^[15]。由于绿洲周围都是沙漠地区,地表温度较高^[16],因此在该地区地表温度与气温差异较大,P - M 公式计算出的 ET_{p0} 也相对较大。
- (2) 运用 Hargreaves 公式在计算 ET_{ph} 时只考虑了河道补给地下水这一单向水分运移,并没有考虑在河道干涸时,地下水对河道的补给,而 CRAE 模型的计算结果中则包含这因素,因此这也是导致 ET_p 偏大的主要原因。
- (3) CRAE 模型既考虑了水量和能量平衡方

程,也考虑了蒸发过程中地表水量与地下水量的互补^[17],弥补了 P-M 公式和 Hargreaves 公式中的不足,从而也说明 ET_p 计算结果更符合实际情况。

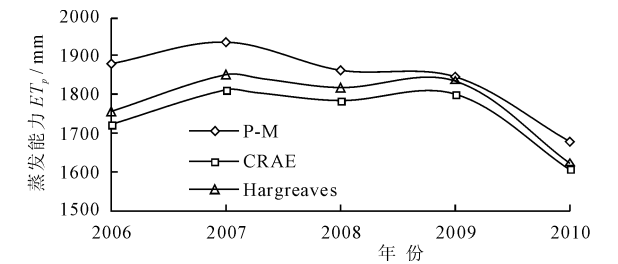


图2 P-M 公式、Hargreaves 公式、CRAE 模型计算的 ET_p 对比图

3.3 评价指标分析

通过对比分析得到的年实际蒸散发和月实际蒸散发的模型适用性评价结果见表 2,由于验证的时间序列只有 9 年,而且 2013 与 2009 年为极丰、枯年,对相关系数影响较大,因此年实际蒸散发量相关系数不做计算。通过分析水量平衡系数、总量平衡系数和相关系数,3 个参数均接近于 1,说明模型模拟的和田绿洲的实际蒸散发结果合理,且对月实际蒸散发量的模拟结果要优于年实际蒸散发量。

表 2 月和年实际蒸散发量评价指标比较结果

评价指标	水量平衡系数	总量平衡系数	相关系数
月蒸散发	0.97	1.04	0.95
年蒸散发	0.93	1.01	

4 结 论

本文将 CRAE 模型应用到和田绿洲,利用实测水文气象资料进行率定、验证,对 CRAE 模型在和田绿洲适用性进行分析。CRAE 模型模拟的实际蒸散发量与水量平衡结果相比,误差均在允许误差范围内,仅在极丰、枯年存在较大误差,模型自身的缺陷及该地区特殊的来水情况,是模型模拟丰水年和枯水年误差较大的主要因素;对比分析 CTAE 模型、P-M 公式和 Hargreaves 公式计算的 ET_p ,CRAE 模型更全面的考虑了蒸散发过程机制,计算结果也更接近实际情况;评价指标的计算,表明模型模拟的实际蒸散发量精度较高,月实际蒸散发量的模拟结果要优于年实际蒸散发量。综上所述,模型可以较好的模拟和田绿洲的实际蒸散发量,进而利用模型模拟结果对该地区的

实际蒸散发量进行时空变化分析。

参考文献:

[1] 王国华,赵文智. 遥感技术估算干旱区蒸散发研究进展[J]. 地球科学进展,2011, 26(8):848-858.

[2] 刘绍民,孙睿,孙中平,等. 基于互补相关原理的区域蒸散发量估算模型比较[J]. 地理学报,2004,59(3):331-340.

[3] 王霞. 基于 SEBAL 模型的极端干旱气候区域蒸散发的遥感估算[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2012.

[4] 王旭明,刘海军,张睿昊,等. 河套灌区参考作物蒸发蒸腾量估算方法研究[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(3):95-101.

[5] Morton F I. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology[J]. Journal of Hydrology,1983,66(1):1-76.

[6] 冯伟,张万军. 陆面蒸发估算的 CRAE 模型探讨[J]. 中国农学通报,2005,21(8):86-87.

[7] Xu Zongxue, Li J Y. A distributed approach for estimating catchment evapotranspiration: comparison of the combination equation and the complementary relationship approaches[J]. Hydrological Processes, 2003, 17(8):1509-1523.

[8] 梅星,沈冰,莫淑红,等. 新疆和田与陕西西安的 ET_0 的比较[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(6):91-95.

[9] 沈冰,赵长森,魏勇,等. 和田绿洲水土资源开发战略构想[J]. 干旱区资源与环境,2006,20(2):100-103.

[10] 梅星. 陕西关中农区实际蒸散发的时空分布规律研究[D]. 西安:西安理工大学,2012.

[11] Allen R G, Tasumi M, Trezza R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - model[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering - Asce,2007,133(4):380-394.

[12] 翟禄新. 近 50a 来中国西北气候变化及其水文响应分析[D]. 兰州:兰州大学,2008.

[13] 范伶俐,张光亚. 广东实际蒸散发与潜在蒸散发的关系研究[J]. 广东海洋大学学报,2013,33(3):71-77.

[14] 董德福. 不同因素对和田绿洲蒸散发的影响研究[D]. 西安:西安理工大学,2013.

[15] 邱新法,曾燕,刘昌明. 陆面实际蒸散研究[J]. 地理科学进展,2003,22(2):118-124.

[16] 黄洁,金莉莉,李振杰,等. 南疆沙漠腹地地温变化特征[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(1):148-153.

[17] 冯伟,张万军. 陆面蒸发估算的 CRAE 模型探讨[J]. 中国农学通报,2005,21(8):86-87+274.