

## 流域参考作物腾发量分布式计算模型

安贵阳<sup>1,2</sup>, 郝振纯<sup>3</sup> (1. 浙江省水利水电勘测设计院, 浙江杭州 310002; 2. 浙江大学海洋学院, 浙江舟山 316000; 3. 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** 地形(坡度、坡向、地形遮蔽等)对太阳辐射的空间分布影响显著,并进而造成了参考作物腾发量( $ET_0$ )空间分布的巨大差异。基于淮河史灌河流域数字高程模型(DEM)对参考作物腾发量计算模型中所涉及的几个参数(包括气压、温度、辐射)进行地形校正,改进并建立了考虑地形影响的流域参考作物腾发量计算模型。结果表明,改进的参考作物腾发量计算模型的计算结果的空间分布差异显著,更好地反映了地形对于 $ET_0$ 空间分布的影响。辐射和 $ET_0$ 随着坡向的变化由南坡至北坡依次减少。该研究结果提高了起伏地形影响下 $ET_0$ 空间分布估算的精度,并为流域水资源综合规划和利用提供重要依据。

**关键词** 参考作物腾发量; 数字高程模型; 分布式模型; 史灌河流域

**中图分类号** P334+.1 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)17-001-03

### A Distributed Model of Reference Crop Evapotranspiration Based on the DEM of Shiguanhe River Basin

AN Gui-yang<sup>1,2</sup>, HAO Zhen-chun<sup>3</sup> (1. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy & Hydro-Electric Power, Hangzhou, Zhejiang 310002; 2. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan, Zhejiang 316021; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098)

**Abstract** The spatial distribution of solar radiation is significantly impacted by topography (slope, aspect and terrain inter-shielding) and in turn makes large differences in spatial distribution of reference crop evapotranspiration. Parameters (vapor pressure, temperature and solar radiation) strongly related to topography were adjusted based on the digital elevation model (DEM) of Shiguanhe River Basin, then a distributed model of reference evapotranspiration was established to calculate reference crop evapotranspiration. The results showed that spatial variation of reference crop evapotranspiration is obvious for the reference evapotranspiration and is strongly related to the topography. Solar radiation and reference evapotranspiration in southern slope is bigger than others and in northern slope is smallest. The model is helpful for improving the estimation of regional reference evapotranspiration, water resources planning and utilization.

**Key words** Reference crop evapotranspiration; Digital elevation model; Distributed model; Shiguanhe River Basin

参考作物腾发量( $ET_0$ )是水文循环过程最重要的组成部分之一,同时也是作物需水量计算的关键因子,其计算精度显著影响作物需水量估算的准确程度<sup>[1-2]</sup>。参考作物腾发量的时空变化特性对生态和水文过程的影响也非常显著。1990年,联合国粮农组织(FAO)根据Penman-Monteith公式的假定,给出了计算参考作物腾发量的标准化公式,并形成一套完整的相关处理方法<sup>[3]</sup>。该方法使参考作物腾发量和作物需水量的计算有了统一的基础。但是,这套方法在计算中仅考虑了海拔的影响,对地形的影响考虑较少,而流域下垫面中除地质、土壤、植被等因素外,地形对水文过程的影响较大,其坡度、坡向和小地形因素的不同都会直接造成土壤水分再分配以及坡面接收太阳辐射能量的空间差异<sup>[4-5]</sup>,进而影响到蒸散发的空间分布。以前的改进模型在地形对于参考作物腾发量的影响方面考虑较少,并且一般尺度偏大,在某些台站稀疏地区插值精度也普遍偏低。笔者利用Penman-Monteith公式,基于淮河史灌河流域数字高程模型(DEM)的改进并建立了流域参考作物腾发量分布式计算模型,并利用该模型对地形(坡度、坡向、地形遮蔽等)影响下的气压、温度、辐射进行了校正,并综合这些校正后的因素计算出流域参考作物腾发量,综合考虑了地形对气压、辐射和蒸散发等的影响,以期提高流域参考作物腾发量的计算精度。

## 1 材料与方法

**1.1 研究区概况** 淮河史灌河是淮河一级河流,位于115°17'~115°55'E,31°12'~32°18'N。地跨安徽省金寨县、河南省商城县和固始县。入淮河口以上全长211 km,流域内蒋集站控制面积5 930 km<sup>2</sup>,整个流域呈南北走向。流域内地形复杂,既有高山峻岭,主峰金刚台海拔1 576 m,又有低山丘陵,还有广阔的平原,山区水流湍急,平原河网发育。史灌河上游为深山区,下垫面覆盖良好;下游为丘陵平原区,地势低。

**1.2 数据来源** 模型计算采用的气象资料是研究区域内固始站的气象观测数据,选择日期为1959~2009年6月15日的平均气象资料,包括日最高气温、最低气温、平均气温、相对湿度、风速和日照时数。

**1.3 气压校正** 在参考作物腾发量的计算中,若有实测的气压资料最好,但很多情况下气压资料获得较难,所以在没有大气压资料的情况下,基于海拔的大气压估算公式如下:

$$P = 101.3 \times \left( \frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (1)$$

式中, $P$ 为校正大气压, $z$ 为海拔高度。

**1.4 考虑遮蔽的辐射校正** 太阳辐射能量空间分布不仅与纬度和高度有关,而且受局部地形因素的影响,这些地形因素包括坡度、坡向、地形遮蔽等。这些因素对地表实际接收太阳辐射量的影响很大,进而极大地影响蒸散发的分布。根据布格-兰伯特定律,可以推出坡地与水平面辐射通量比值等于坡地与水平面上天文辐射通量之比。因此,在我国范围内可近似认为<sup>[6]</sup>:

**基金项目** 国家自然科学基金项目(41371047);中国科学院战略性先导科技专项(XDA05110102);浙江省水利厅科技项目(RC1524)。

**作者简介** 安贵阳(1986-),男,江苏赣榆人,工程师,博士,从事水文水资源与气候变化影响研究。

**收稿日期** 2016-05-06

$$S'_{slope}/S_{slope} = S'_{flat}/S_{flat} \quad (2)$$

式中,  $S'_{slope}$  和  $S_{slope}$  分别为坡面的直接辐射和天文辐射;  $S'_{flat}$  和  $S_{flat}$  分别为平面直接辐射和天文辐射。坡地的辐射校正就相当于相应坡地的天文辐射校正<sup>[7]</sup>。  $S_{slope}$  和  $S_{flat}$  的计算公式如下:

$$S_{flat} = \frac{24}{\pi} I_0 E_0 (\omega_s \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \sin\omega_s) \quad (3)$$

$$S_{slope} = \frac{I_0 TE_0}{2\pi} \sum_{i=1}^n g_i [u \sin\delta (\omega_{s,i} - \omega_{r,i}) + v \cos\delta (\sin\omega_{s,i} - \sin\omega_{r,i}) - w \cos\delta (\cos\omega_{s,i} - \cos\omega_{r,i})] \quad (4)$$

$$\begin{cases} u = \sin\varphi \cos\alpha - \cos\varphi \sin\alpha \cos\beta \\ v = \sin\varphi \sin\alpha \cos\beta + \cos\varphi \cos\alpha \\ w = \sin\alpha \sin\beta \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $I_0$  为太阳常数,  $E_0$  为地球轨道修正因子,  $\delta$  为太阳赤纬,  $T$  为日长,  $\varphi$  为地理纬度,  $\alpha$  为坡度,  $\beta$  为坡向,  $n$  为可照时角离散数目,  $n = 36$ 。  $\omega_{r,i}$  和  $\omega_{s,i}$  为微分时段内的日出日没时角,  $g_i$  为地形遮蔽度。地形遮蔽系数  $g_i$  的取值依据以下法则:

$$g_i = \begin{cases} 1.0 & d_i = d_{i-1} = 1 \\ 0 & d_i = d_{i-1} = 0 \\ 0.5 & d_{i-1} = 1 \text{ 且 } d_i = 0 \text{ 或 } d_{i-1} = 0 \text{ 且 } d_i = 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中, 表示在  $(\omega_{i-1}, \omega_i)$  时段内, 研究点的日照状况完全取决于两端点时刻的日照状况。若两端点时刻可照(遮蔽), 则整段可照(遮蔽); 若一时刻可照, 另一时刻遮蔽, 则整段有一半时间可照(遮蔽)。具体计算过程参见文献[8]。

**1.5 地形影响下温度校正** 理论上认为, 太阳辐射分布纬带性和海陆分布的影响分别决定了温度分布的纬带性和经向变化, 海拔高度决定了大气温度的垂直梯度<sup>[9]</sup>, 而研究区在经向影响上可忽略不计, 所以其多元一次回归方程为:

$$T = a_0 + a_1\varphi + a_2H \quad (7)$$

式中,  $a_0, a_1, a_2$  为回归系数,  $\varphi$  和  $H$  分别为观测站点的纬度和海拔高度。根据来自史灌河流域周围 14 个气象站点(武汉、英山、黄石、安庆、黄山、信阳、阜阳、固始、寿县、蚌埠、六安、霍山、合肥、麻城) 1959~2009 年的日平均气温。建立史灌河流域 1959~2009 年 6 月 15 日平均温度的回归方程依次如下:

$$T = 31.199 - 0.666 \times \varphi - 10.033 \times H \quad (8)$$

式中, 回归系数负相关指数  $R$  为 0.995, 通过了  $F = 0.01$  的显著性检验。

## 2 结果与分析

**2.1 气压校正结果** 淮河史灌河流域内地形的相对高差变化较大, 北部平原区与南部山区海拔差异明显, 而地形中海拔高度与气压之间具有显著的相关性。气压的校正如公式(1)所示, 基于 DEM 的气压校正结果如图 1 所示, 研究区气压值将由单一站点气压值变成全流域分布的气压值, 变化范围为 84.08~101.04 kPa, 其空间分布差异与海拔具有明显的相关性, 也因为这样的相关性进而影响研究区  $ET_0$  的空间分布。

**2.2 辐射校正结果** 小地形因素(坡度、坡向、地形遮蔽)对辐射有显著的影响, 从而在一定程度上影响温度和  $ET_0$  的空间分布。从图 2 可以看出, 坡面辐射的最小值和最大值分别为 13.13 和 44.21 MJ/m<sup>2</sup>。由于北部平原区相互遮蔽较少, 辐射值普遍较大, 而南部山区由于海拔差异较大, 地形遮蔽较多, 所以辐射值普遍较小。由于太阳高度的不同, 其入射角的变化往往与有角度的南坡形成直角照射, 所以南部山区无遮蔽的南坡所接受的辐射相对其他坡向较大。

**2.3 温度校正结果** 从图 3 可以看出, 温度的校正与海拔高度相关性较大。南部山区由于海拔普遍较高, 所以随着海拔的提升, 南部山区温度比北部平原低, 史灌河流域校正后的温度的最小值和最大值分别为 16.24 和 25.45 °C。

**2.4 蒸发校正结果** 从图 4 可以看出, 与以前单一站点计算  $ET_0$  相比, 空间变异显著增大, 精度提高, 解决了以前“点带面”过程中精度较低的问题, 蒸发最小值和最大值分别为 1.65 和 5.41 mm/d。

**2.5 不同坡向辐射和蒸散发统计** 坡向每 45° 为 1 个分区, 分为 8 个坡向。选取 90 m 分辨率的流域 DEM 计算地形影响下的蒸散发值。平地情况下, 无论辐射和蒸散发值都大于其他坡向值。南坡所接受的辐射量最大, 达到 36.33 MJ/m<sup>2</sup>; 北坡辐射量最小, 为 22.78 MJ/m<sup>2</sup>。东南与西南, 正东和正西, 东北和西北 3 组坡向组内差异较小, 大多在 1 MJ/m<sup>2</sup> 以内, 而组与组之间的差异则相对较大。蒸发值的坡向分布与辐射值相类似, 南坡的蒸发值最大, 为 4.20 mm/d; 北坡的蒸发值最小, 为 2.44 mm/d(表 1)。

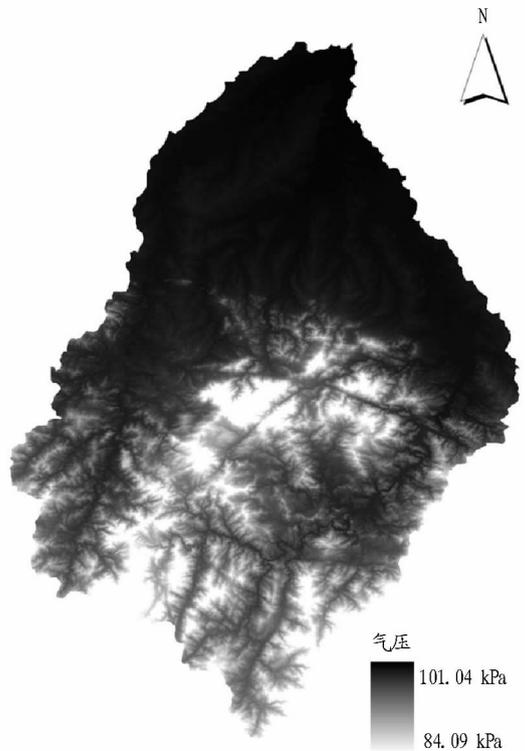


图 1 基于 DEM 校正后气压的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of pressure after DEM correction

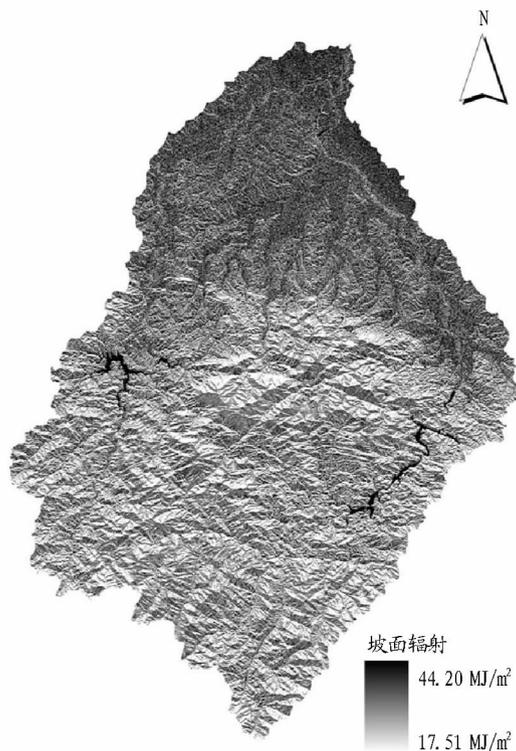
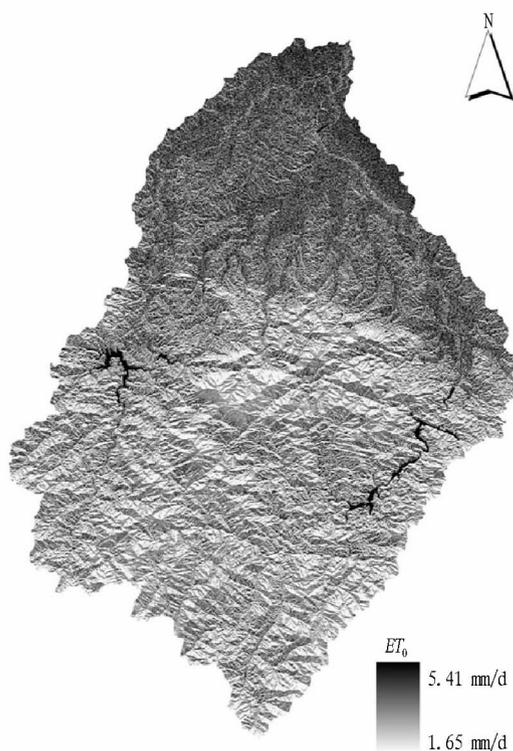


图 2 基于 DEM 校正后坡面辐射的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of slope radiation after DEM correction

图 4 基于 DEM 校正后  $ET_0$  的空间分布Fig.4 Spatial distribution of  $ET_0$  after DEM correction表 1 不同坡向的辐射和  $ET_0$  均值Table 1 The average values of different slope radiation and  $ET_0$ 

坡向 Slope	90 m	
	辐射 Radiation MJ/m <sup>2</sup>	蒸发 Evaporation mm/d
正北 North (337.5° ~ 360°, 0 ~ 22.5°)	22.77	2.44
东北 Northeast (22.5° ~ 67.5°)	25.35	2.73
正东 East (67.5° ~ 112.5°)	29.74	3.26
东南 Southeast (112.5° ~ 157.5°)	33.88	3.81
正南 South (157.5° ~ 202.5°)	36.63	4.20
西南 Southwest (202.5° ~ 247.5°)	34.16	3.85
正西 West (247.5° ~ 282.5°)	30.67	3.37
西北 Northwest (282.5° ~ 337.5°)	26.03	2.82

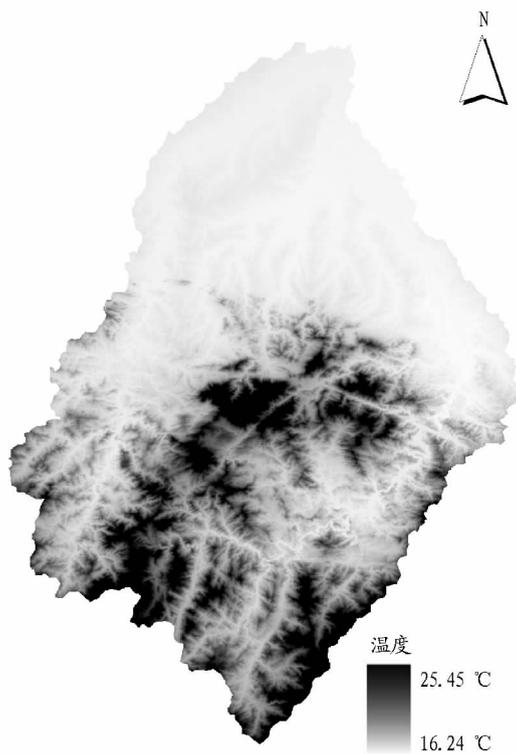


图 3 基于 DEM 校正后温度的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of temperature after DEM correction

### 3 讨论与结论

笔者改进了参考作物腾发量计算模型,在原有基础上考虑了坡度、坡向以及小地形中遮蔽对气压、坡面辐射、温度和

参考作物腾发量空间分布的影响。研究所用的资料包括 DEM 资料和气象资料,二者都是相对比较容易获得的资料。研究结果对地形影响下参考作物腾发量的计算进行了较大改进,推进了地形条件较为复杂的山地地区空间蒸散发计算的研究,提高了区域空间蒸散发计算研究的精度,为水资源综合规划和农业水管理等提供了依据。目前,对于地形影响下参考作物腾发量分布式计算模型的研究报道很少。牛振国等<sup>[7]</sup>基于内蒙古考考赖沟流域 DEM 数据,建立了参考作物腾发量分布式计算模型,这与该研究结果相一致。目前,研究还处于模型建立和应用阶段,目前研究结果还缺少有力的验证,在今后的研究中还需要进一步完善。

该研究利用 GIS 技术,在数字高程模型的基础上,改进并建立了基于 DEM 的流域参考作物腾发量分布式计算模  
(下转第 49 页)

表 2 附子秸秆腐解液对水稻种子萌发、根系生长及发芽指数的化感效应指数

Table 2 Allelopathic effects of decomposition liquids on seed germination, root length and germination index of rice

处理 Treatments	浓度 Concentration	发芽率 Germination rate		根长 Root length		发芽指数 Germination index	
		3 d	7 d	3 d	7 d	3 d	7 d
CK		—	—	—	—	—	—
SBW <sub>7</sub>	原液	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
	25% 稀释液	-0.38	-0.21	-0.48	-0.11	-0.68	-0.30
SBW <sub>15</sub>	原液	-1.00	-0.35	-1.00	-0.13	-1.00	-0.44
	25% 稀释液	-0.51	-0.25	-0.47	0.31	-0.74	0.08
SSW <sub>7</sub>	原液	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
	25% 稀释液	-0.50	-0.19	-0.53	-0.04	-0.77	-0.23
SSW <sub>15</sub>	原液	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
	25% 稀释液	-0.46	-0.17	-0.50	-0.50	-0.73	-0.21
SW <sub>7</sub>	原液	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
	25% 稀释液	-0.54	-0.13	-0.46	-0.12	-0.75	-0.02
SW <sub>15</sub>	原液	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
	25% 稀释液	-0.41	-0.18	-0.31	-0.08	-0.59	-0.25

秆腐解液对水稻种子萌发的试验表明,原液中除 SBW<sub>15</sub> 处理 7 d 外均无种子萌发,无根系生长,可能是由于原液中附子残茬腐解释放的化感物质含量极高,严重抑制了水稻萌发。将附子秸秆腐解液稀释到 25% 后,处理 3 d 水稻种子萌发率及根系长度均显著低于对照 ( $P < 0.05$ ),但处理 7 d 种子萌发率及根系长度与对照相比差异均不显著;各稀释液之间处理 3 d 水稻种子萌发率及根系长度均无显著性差异,但处理 7 d 根系长度差异较大。从化感效应指数分析来看,除 25% SBW<sub>15</sub> 处理 7 d 对根长及发芽指数为化感正效应外,其余各腐解稀释液处理 3 d 及 7 d 对根长、发芽率及发芽指数均为化感负效应,且不同腐解稀释液处理 3 d 的抑制作用均比 7 d 强。以上结果表明,随着处理时间的推移,附子秸秆腐解液对水稻种子的抑制作用有所降低,甚至表现出促进作用,这一结果与前人的研究<sup>[4-6]</sup> 较为一致。分析其原因可能是由于水稻种子前期经过化感物质的作用,得到一定抗逆锻炼,活力提高。

生产实践表明附子—水稻种植模式能有效克服附子连

作障碍,提高附子生产效益<sup>[2]</sup>,但是该模式下附子秸秆残茬直接还田影响水稻秧苗生长的现象不容忽视。该研究表明,附子秸秆腐解原液对水稻有极强的化感抑制作用,这极有可能是生产上附子秸秆还田后引起水稻僵苗的重要因素。然而,究竟是哪一种或者哪几种化感物质起主要抑制作用及其浓度范围还需进一步研究。

#### 参考文献

- [1] 涂舒. 附子发展现状调查及思考[J]. 南方农业, 2015, 9(9): 110-111.
- [2] 邓琼芳, 王远均, 王艳萍. 江油市水稻—附子套作高效栽培技术[J]. 四川农业科技, 2014(8): 12-13.
- [3] 张重义, 林文雄. 药用植物的化感自毒作用与连作障碍[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 189-196.
- [4] 吴会芹, 董林林, 王倩. 玉米、小麦秸秆水浸提液对蔬菜种子的化感作用[J]. 华北农学报, 2009, 24(S1): 140-143.
- [5] 张琴, 李艳宾, 李勇, 等. 不同腐解方式下棉秆腐解液对棉花种子萌发的化感效应[J]. 种子, 2011, 30(4): 17-21.
- [6] 于建光, 顾元, 常志州. 小麦秸秆浸提液和腐解液对水稻的化感效应[J]. 土壤学报, 2013, 50(2): 349-356.
- [7] 赵祥升, 侯大斌, 甘炳春, 等. 植物激素对附子中生物碱含量的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(22): 179-182.
- [8] 李宏, 朱占林, 李志刚, 等. 根茬腐解液对大豆种子活力的影响[J]. 作物杂志, 2006(6): 53-55.

(上接第 3 页)

型。将该模型应用于淮河史灌河流域,结果表明改进的参考作物腾发量计算模型计算结果的空间分布差异显著,更好地反映了地形对  $ET_0$  空间分布的影响。辐射和  $ET_0$  随着坡向的变化由南坡至北坡依次减少。该研究结果克服了以前参考作物腾发量计算中多依靠单点资料的缺点,将流域蒸散发的计算推进到面的尺度,经过校正得到的结果也更符合地形的分布,大大提高了流域参考作物腾发量的计算精度。

#### 参考文献

- [1] 刘晓英, 李玉中, 王庆锁. 几种基于温度的参考作物蒸散量计算方法的评价[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 12-18.
- [2] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements: Irrigation and drainage

paper 56[M]. Rome, Italy: United Nations Food and Agriculture Organization, 1998.

- [3] WANG W G, PENG S Z, YANG T, et al. Spatial and temporal characteristics of reference evapotranspiration trends in the Haihe River Basin, China [J]. Journal of hydrologic engineering, 2011, 16: 239.
- [4] 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(2): 178-190.
- [5] 曾燕, 邱新法, 刘昌明, 等. 起伏地形下黄河流域太阳直接辐射分布式模拟[J]. 地理学报, 2005, 60(4): 680-688.
- [6] 傅抱璞. 山地气候[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 61-72.
- [7] 牛振国, 李保国, 张凤荣, 等. 参考作物腾发量的分布式模型[J]. 水科学进展, 2002, 13(2): 303-307.
- [8] 曾燕, 邱新法, 缪启龙. 起伏地形下我国日照时间的空间分布[J]. 自然科学进展, 2003, 13(5): 545-549.
- [9] 杨昕, 汤国安, 王春, 等. 基于 DEM 的山区气温地形修正模型[J]. 地理科学, 2007, 27(4): 525-530.