

# 基于 GIS 的广东干旱逐日动态模拟与评估

王春林<sup>1,2</sup>, 董永春<sup>3</sup>, 李春梅<sup>2</sup>, 黄珍珠<sup>2</sup>, 何健<sup>2</sup>

(1 中国科学院华南植物园, 广东广州 510650; 2 广东省气候与农业气象中心, 广东广州 510080;

3 广州国际专业气象台, 广东广州 510080)

**摘要:**参考帕默尔(Palmer)旱度模式中土壤水分平衡概念,提出以逐日气温和降水资料,逐日滚动模拟土壤有效水分,并以下层土壤有效含水量构建干旱强度动态指数(DDI).借助GIS技术和包括经度、纬度、海拔、坡度、坡向5个环境因子的地理订正模型,对离散DDI资料进行1 km空间分辨率的精细化反演,能够清晰刻画地形、地貌对干旱程度空间分布的影响.结合土地利用信息,开发业务系统,实现对广东干旱发生、发展及其强度、范围的实时动态监测和评估,为选择合适的时机和地点开展人工增雨作业提供指挥决策依据,并对作业效果进行定量评估.

**关键词:**干旱; 干旱指数; 地理订正; GIS技术; 动态监测

中图分类号:S423

文献标识码:A

文章编号:1001-411X(2006)02-0020-05

## Guangdong Drought Daily Dynamic Simulation and Evaluation Based on GIS

WANG Chun-lin<sup>1,2</sup>, DONG Yong-chun<sup>3</sup>, LI Chun-mei<sup>2</sup>, HUANG Zhen-zhu<sup>2</sup>, HE Jian<sup>2</sup>

(1 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510650, China;

2 Guangdong Climate and Agrometeorology Center, Guangzhou 510080, China;

3 Guangzhou International Specialised Weather Services, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** According to the concept of soil-moisture-balance in Palmer-drought-model, daily drought index (DDI) is defined by available water content (AWC) below level soil. AWC was simulated day by day using daily data of temperature and rainfall. Based on GIS technique and geographic correction model with 5 environmental factors of longitude, latitude, height above the level, grade and slope of terrain, drought spatial distribution with relative high resolution of 1 km was made from scatter data of DDI of 86 stations, which could reflect the effect of terrain factors to drought distribution with more detail. Combined land data, an operation system was developed to monitor and evaluate the occurrence, development, severity degree and distribution of the drought dynamically, and to provide decision-making and evaluation for manmade-rainfall operation.

**Key words:** drought; drought index; geographic correction; GIS technique; dynamic watching

广东地处中国东南沿海低地地区,地势北高南低,属亚热带季风气候区,也是世界上严重的气候脆弱区之一<sup>[1]</sup>.虽然各地年雨量为1 350~2 300 mm,属于我国多雨地区之一,但由于广东降水时空分布不均,时空变率大,且越是多雨区年际变幅越大<sup>[2]</sup>,兼之太阳辐射强、气温高、蒸腾蒸发量大、作物生长

期长,干旱仍然时有发生.随着全球气候变暖,极端气候事件频率加剧,广东干旱灾害可能会更加严重.过去对干旱研究,主要集中在干旱气候特征分析<sup>[2-3]</sup>、面向后评估业务的干旱指标方法研究<sup>[4-13]</sup>,干旱动态监测指标研究则不多见<sup>[14-16]</sup>.在灾害监测、评估方面一般只考虑经度、纬度、海拔3项因子<sup>[17-18]</sup>.

收稿日期:2004-11-16

作者简介:王春林(1970-),男,高级工程师,博士,E-mail:wangcl@grmc.gov.cn

基金项目:广东省科技计划项目(2003C32607;2004B20701002);广东省气象科技研究课题(200303)

王春林等<sup>[19]</sup>在上述3因子地理订正基础上,增加坡度、坡向订正,实现了对寒冷灾害的空间分布精细化反演,取得较好效果.本研究面向干旱动态监测评估需求,根据水分平衡原理模拟土壤水分逐日变化动态并据此构造干旱动态强度指数,采用5因子地理订正模型<sup>[19]</sup>对干旱指数进行空间精细化订正,建立业务系统,实现对广东干旱自动化的动态监测评估.

## 1 研究方法

### 1.1 干旱动态监测指标

1.1.1 逐日水分平衡模型 参考 Perlmer 方法<sup>[8-10]</sup>,将土壤分为2层:上层近似等于耕作层,假设其最大有效含水量  $AWC_{a\_max}$  (available water content, 相当于田间持水量) 为30 mm;下层土壤最大有效含水量  $AWC_{b\_max}$  取决于有效耕作层深度、土壤性质、地下水埋深、补水条件等因素,各地取值在150~250 mm之间,根据经验确定.

逐日水分平衡过程,实质上就是土壤水分逐日补充(通过降水)、蒸散的动态过程.为便于表述,约定  $AWC_{a0}$ 、 $AWC_{a1}$ 、 $AWC_{a2}$  分别为上层土壤前1 d末、补水过程后、失水过程后的有效含水量, $AWC_{b0}$ 、 $AWC_{b1}$ 、 $AWC_{b2}$  分别为下层土壤前1 d末、补水过程后、失水过程后的有效含水量.

假定降水量( $P$ )优先补充上层土壤,即:

$$AWC_{a1} = AWC_{a0} + P, \quad (1)$$

若  $AWC_{a1} > 30$ ,则设定  $AWC_{a1} = 30$ ,此时上层土壤达到田间持水量,更多的降水开始补充下层土壤,可供补充下层土壤的水量( $L$ )为:

$$L = AWC_{a0} + P - 30, \quad (2)$$

下层土壤补水过程为:

$$AWC_{b1} = AWC_{b0} + L, \quad (3)$$

若  $AWC_{b1} > AWC_{b\_max}$ ,则设定  $AWC_{b1} = AWC_{b\_max}$ ,此时下层土壤也达到最大有效含水量,更多的补充将产生径流,径流量为  $AWC_{b0} + L - AWC_{b\_max}$ .

土壤水分散失量(实际蒸散)可以认为是可能蒸散(PE)和土壤干湿程度的函数.假定在上层土壤中,水分散失是以可能速率发生的,经过补水过程后,若  $AWC_{a1} > PE$ ,则,

$$AWC_{a2} = AWC_{a1} - PE, \quad (4)$$

若  $AWC_{a1} < PE$ ,则设定  $AWC_{a2} = 0$ ,首先耗尽所有表层土壤水分,不足部分开始从下层土壤中散失,理论上需从下层土壤散失量( $PE_b$ )为:

$$PE_b = PE - AWC_{a1}, \quad (5)$$

假定下层土壤实际散失量( $E_b$ ),与下层土壤有效含

水量( $AWC_{b1}$ )、需水量( $PE_b$ )和下层土壤最大有效含水量( $AWC_{b\_max}$ )有如下关系:

$$E_b = PE_b \times AWC_{b1} / AWC_{b\_max}. \quad (6)$$

下层土壤失水后最后剩余有效含水量为:

$$AWC_{b2} = AWC_{b1} - E_b. \quad (7)$$

1.1.2 可能蒸散计算 式(4)、(5)中的可能蒸散(PE)对土壤水分平衡的计算有直接影响.为了实现干旱发生、发展的逐日动态监测,需要计算逐日可能蒸散(PE),本文采用20 cm蒸发皿蒸发资料乘经验系数0.6代表可能蒸散<sup>[20]</sup>,与逐日最高气温( $T_{max}$ )拟合(2000年广东省86个气象站资料拟合)得到如下经验公式:

$$PE = 0.011 1T_{max}^2 - 0.287 4T_{max} + 3.669 4, \quad (8)$$

$(R^2 = 0.552 8^*, n = 30 842)$

1.1.3 干旱动态强度等级 参考缺水指数形式,采用下层土壤有效含水量定义逐日干旱动态强度指数(DDI):

$$DDI = 1 - AWC_{b2} / AWC_{b\_max}, \quad (9)$$

DDI变化范围为0~1,根据DDI划分逐日干旱强度等级并统计各等级出现频率.

### 1.2 基于GIS的干旱指数空间精细化订正

1.2.1 资料 基础地理信息数据:借助多种GIS工具软件提供的栅格数据加工模块,完成统一空间范围和空间分辨率的基础地理信息,主要包括4个栅格数据文件:1)省、市、县行政边界;2)海拔;3)坡度、坡向(由海拔高度资料通过CityStar等地理信息系统软件处理生成).行政边界文件中,省界外定义为0,省界内填充市县编码,便于按任意市、县范围统计、切图.原始资料分辨率为3 s × 3 s,相当于0.1 km,考虑到微机处理能力,实际分辨率取30 s × 30 s,即为0.008 33° × 0.008 33°(空间分辨率略高于极轨卫星星下点1.1 km分辨率,可以比较细致反映地形变化),格点数:963(列) × 636(行) = 612 468(Bytes).栅格文件对应左上角坐标为(109.513 3E, 25.520 1N),右下角坐标为(117.535 0E, 20.224 2N).地理信息资料来源于1:250 000测绘地图用地理信息数据集.

基本气象资料:包括广东省86个地面气象站逐日最高气温、降水量以及各个气象站的经度、纬度和海拔资料.资料均来自广东省气象局,可以通过业务网络实时采集.

1.2.2 干旱指数坡度、坡向订正方法 影响干旱程度的环境因子很复杂,这里仅考虑经度、纬度、海拔、坡度、坡向5种因子,并假定上述环境因子是通过影响局地气温条件而影响干旱的程度,而不考虑环境

因子对局地降水、土壤水分运动过程的影响. 经度、纬度、海拔3种因子对干旱指数的影响修正, 可采用常用的多因子线性回归模型<sup>[17-19]</sup>来拟合. 根据气象观测规范, 气象站观测点为平坦地面(坡度、坡向均为0), 因此不能采用上述统计方法对干旱指数进行坡度、坡向修正.

由干旱指数 DDI 定义可知, DDI 与气温呈正相关, 而坡地气温随坡向的分布与直接辐射日总量相似<sup>[21]</sup>, 因此对于坡度  $\alpha$ 、坡向  $\beta$  的坡地, 干旱指数随坡度、坡向变化的规律参照直接太阳辐射日总量近似计算公式表达如下:

$$DDI_{\beta, \alpha} = DDI_0 \times \tau \times f(\beta, \alpha); \quad (10)$$

$$\tau = as + bs^2; \quad (11)$$

$$f(\beta, \alpha) = c \sum_{i=1}^n [u \sin\delta(\omega_{i+1} - \omega_i) + v \cos(\sin\omega_{i+1} - \sin\omega_i) - w \cos\delta(\cos\omega_{i+1} - \cos\omega_i)]. \quad (12)$$

其中,  $u = \sin\varphi \cos\alpha - \cos\varphi \sin\alpha \cos\beta$ ,  
 $v = \cos\varphi \cos\alpha - \sin\varphi \sin\alpha \cos\beta$ ,  
 $w = \sin\beta \sin\alpha$ .

式(10)中  $DDI_{\beta, \alpha}$ 、 $DDI_0$  分别为修正后和修正前的格点干旱指数,  $\tau$  为晴天时平地的大气透明函数(即平地上可能直接太阳辐射与天文辐射之比),  $f(\beta, \alpha)$  为坡度、坡向修正函数. 式(11)为  $\tau$  与平地日照百分率( $s$ )的经验关系式,  $a$ 、 $b$  为经验系数. 根据翁笃鸣<sup>[22]</sup>的研究, 华南地区  $a$ 、 $b$  值分别为 0.250、0.375. 式(12)中  $\varphi$  为地理纬度,  $\delta$  为太阳赤纬,  $\omega$  为时角; 假设不考虑地形遮挡,  $n$  取 1;  $c$  为经验常数, 结合式(8)中干旱指数对气温变化的敏感性特点, 这里  $c$  取 0.3, 以控制坡度、坡向导致干旱指数差异在 0.1 以内.

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱动态监测评估系统的实现

实现对干旱的实时监测评估, 关键在于: (1) 一套效果良好、简洁易用的干旱指标体系; (2) 精度较高的且可操作的精细化地理修正方案; (3) 充分的基础地理信息及其处理软件. 基于上述思路, 建立了“广东省干旱逐日动态监测评估系统”, 系统包括地面气温、降水等资料采集处理、逐日干旱指数计算、精细化地理修正、干旱分析、产品制作与发布等功能, 另有土地利用信息、栅格边界管理等若干辅助模块, 为向市气象局推广应用时定制加工基础数据提供操作平台. 系统流程图见图 1, 下面介绍干旱监测评估过程的具体操作步骤.

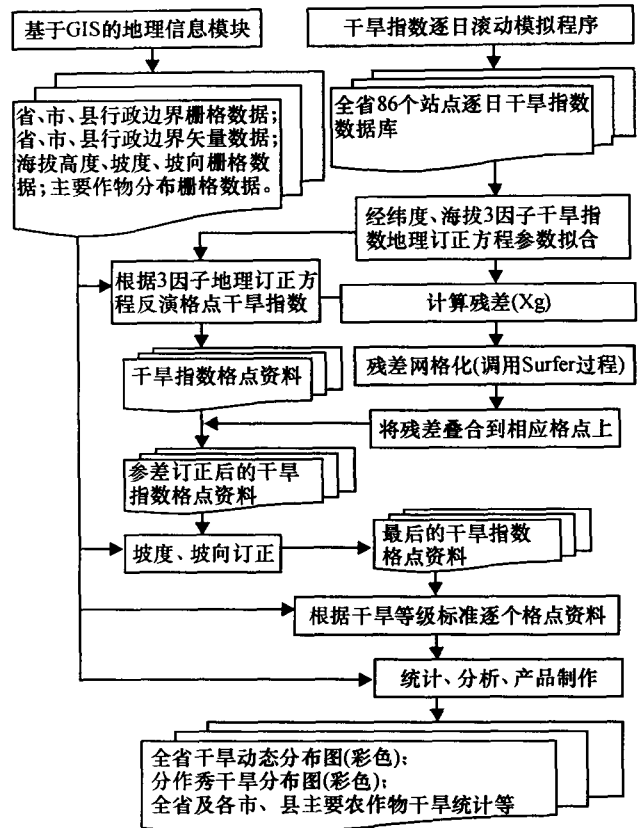


图1 广东省干旱动态监测系统流程图

Fig.1 Flow chart of drought disaster watching and evaluation system of Guangdong Province

(1) 干旱指数逐日滚动模拟. 采用 86 个气象站气温、降水资料和水平衡模型, 逐日滚动模拟单站干旱指数, 更新干旱指数数据库.

(2) 假定经度、纬度、海拔与干旱指数有近似的线性关系, 建立经度、纬度、海拔 3 个因子与干旱指数线性回归方程  $DI(\gamma, \varphi, H)$ , 并根据此回归方程, 结合广东省较高分辨率格点高程数据, 反演格点干旱指数, 得到初步的广东省干旱指数格点数据.

(3) 计算上述回归方程残差(可以理解为水体、植被以及坡度、坡向等其他环境因子所产生的影响)  $Xg = DI(\text{实测}) - DI(\gamma, \varphi, H)$ , 借助工具软件(如 SURFER)完成残差网格化(注意格点数要匹配), 最后将网格化的残差数据叠加到回归方程反演的格点资料上, 得到较好的全省干旱指数格点数据.

(4) 对上述格点数据进一步作坡度、坡向修正, 得到最后的广东省干旱指数格点数据.

(5) 结合干旱等级划分标准(表 1)和土地利用格点数据, 按照行政单位(地区/县)、植被类型逐个格点分析统计不同等级干旱的面积, 实现定量化干旱评估; 其中土地利用格点数据与基础地理信息数据具有统一点数、地理定位和空间分辨率, 目前主要

考虑水稻等大宗农作物和经济林果,依次以 Byte 型正整数(0~255)编码存储在栅格文件中(Binary方式),省界以外为0。

表1 干旱等级划分<sup>1)</sup>

Tab. 1 Drought grade standard

干旱等级	干旱指数	频率 <sup>2)</sup>
drought grade	drought index (DDI)	frequency/%
无旱 no	$0 \leq DDI < 0.40$	53.9
轻旱 light	$0.40 \leq DDI < 0.55$	13.7(67.6)
中旱 medium	$0.55 \leq DDI < 0.70$	15.2(82.8)
重旱 severe	$0.70 \leq DDI < 0.85$	13.5(96.3)
极旱 extreme	$0.85 \leq DDI \leq 1.00$	3.7(100)

1)资料包括1971~2000年广东省86个气象站;2)括号内为累计频率

(6)结合行政边界、河流水体等地理信息,根据最后的干旱指数格点数据,绘制综合干旱分布图(图2)。

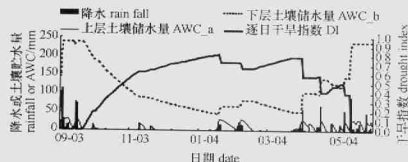


图2 广州干旱逐日动态模拟(2003-09~2004-05)

Fig. 2 Guangzhou daily drought dynamic

## 2.2 效果分析

图2为广州2003年9月至2004年5月逐日干旱动态模拟结果。期间2004年1月18~21日出现

54.7 mm的降水过程,导致干旱指数短暂回落,旱情缓和,但干旱过程持续发展。如根据传统业务上使用的“透雨”指标<sup>[14-15]</sup>,上述过程降水量达到“透雨”标准,认为干旱结束。而实际上由于前期旱情非常严重,水库蓄水和地下水水位均很低,这样的中雨过程只能在一定程度上缓解旱情,而根本不足以解除旱情。因此本文提出的干旱指数动态模拟结果可以反映出降水对干旱过程发生、发展、结束的影响细节,能够更好的描述干旱情况。

上层土壤有效含水量(AWC\_a)对降水过程十分敏感,而下层土壤有效含水量(AWC\_b)变化比AWC\_a平缓且略滞后。在干旱阶段,30 mm以下的降水过程只补充上层土壤水分(所谓“湿地雨”),同时起到阻止下层土壤水分进一步下降的作用,而对增加下层土壤水分意义不大;30 mm以上的降水过程可以增加下层土壤水分,使得旱情趋于缓解。采用下层土壤相对含水量定义干旱过程,可以避免短暂的“湿地雨”将一个过程分裂成多个较短的过程,有利于保持干旱过程的完整性。

图3为干旱指数精细化空间订正效果示例。各地旱情上报以描述定性评价为主,不好与本研究中量化面积统计结果作直接比较分析,但从大趋势上看是基本一致的。与一般的基于三角网插值法等数学方法网格化效果相比,经过坡度、坡向和海拔订正后能够体现丰富的地表细节,反映出地形地貌对干旱的影响。反复试验表明,精细化空间订正效果在粤北多山区比珠江三角洲等地势平坦地区更好。

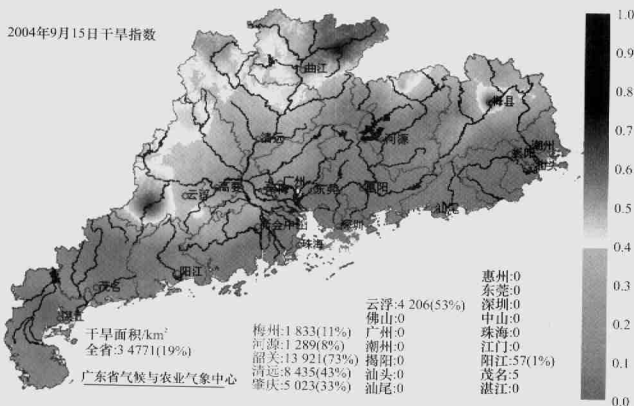


图3 广东省干旱动态监测评估实例

Fig. 3 A sample picture of drought dynamic monitoring and evaluation of Guangdong Province

### 3 讨论与结论

依据水分平衡原理,兼顾业务运行中资料实时可得性,提出采用气温和降水资料逐日滚动模拟土壤有效水分,实现单站干旱强度动态监测,物理意义比较清楚,克服当前普遍使用的面向后评估业务的干旱指标局限性,效果良好。

根据干旱动态强度指标定义,下层土壤最大含水量是反映地区差异的综合指标,对干旱的发展速度以及在特定的降水、气温条件下的干旱频率分布均具有重要影响。在实践中需要结合历史灾情和经验性认识,对各地下层土壤最大有效含水量以及干旱等级划分标准进行调整、标定,使得该干旱指标可适用于任意区域。

采用 GIS 技术实现对干旱指数精细化空间订正,实现干旱强度、范围定量评估。离散气象资料一般可以通过三角网插值法等数学方法网格化,然后绘制等值线图来显示气象要素的空间分布状况。广东省共有 86 个站点,平均每个站点代表 2 000 km<sup>2</sup>,由于地形变化比较复杂,相比之下代表站点过于稀少,常规数学插值手段不能全面反映立体的气候资源丰富性,因此有必要根据地理细节进行订正处理。目前常见的方法认为经度、纬度、海拔与某一气象要素有近似线形关系<sup>[17-18]</sup>,采用经度、纬度、海拔 3 项地理因子多元回归模型,而坡度、坡向则与其他环境因子一并作为“黑箱”考虑,在拟合误差较大时,则通过残差订正来“强迫”样本点拟合效果与实际值一致。随着地理信息技术发展,提取坡度、坡向信息并用于进一步提高地理订正精度,在技术上已经成为可能。本文参考地形对气温影响气候学模型,尝试对干旱指数作坡度、坡向订正,有一定效果,但对反演效果的定量评估,有待开展进一步的试验观测。

干旱是气候、地形、水体、植被综合作用与反馈的结果,理论上只有采用动力生态学模型才能得到更好的监测评估效果。但是由于生态学模型本身的复杂性及其技术、经济可行性问题,在业务领域的普及应用比较困难。本研究结果表明,采用数学模型和 GIS 技术实现对干旱动态监测评估,具有较好的业务应用前景。

#### 参考文献:

- [1] HOUGHTON J. 全球变暖[M]. 戴小苏,石广玉,等译. 北京:气象出版社,1998.
- [2] 贺海晏. 近 40 年广东省的旱涝特征[J]. 热带气象学报,1998,14(4):297-305.
- [3] 陈创买,郑德娟,赵仲辉. 广东干湿气候特征[J]. 热带

气象学报,1997,13(3):193-200.

- [4] 鞠笑生,杨贤为,陈丽娟,等. 我国单站旱涝指标确定和区域旱涝级别划分的研究[J]. 应用气象学报,1997,8(1):26-33.
- [5] 张强,鞠笑生,李淑华. 三种干旱指标的比较和新指标的确定[J]. 气象科技,1998(2):48-52.
- [6] 魏凤英. 华北地区干旱强度的表征形式及其气候变异[J]. 自然灾害学报,2004,13(2):32-38.
- [7] RICHARD R, HEIM J R. A review of twentieth century drought indices used in the United States [J]. Bull Am Meteor Soc,2002,83(8):1 149-1 165.
- [8] QUIRING S M, PAPDRYIAKOU T N. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003,118:49-62.
- [9] JI Lei, PETERS A J. Assessing vegetation response to drought in the northern great plains using vegetation and drought indices [J]. Remote Sensing of Environment, 2003(87): 85-98.
- [10] 范嘉泉,郑剑非. 帕默尔气象干旱研究方法介绍[J]. 气象科技,1984,12(1):63-71.
- [11] 安顺清,邢久星. 修正的帕默尔干旱指数及其应用[J]. 气象,1985,11(12):17-19.
- [12] 刘巍巍,安顺清,刘庚山,等. 帕默尔旱度模式的进一步修正[J]. 应用气象学报,2004,15(2):207-215.
- [13] 刘庚山,郭安红,安顺清,等. 帕默尔干旱指标及其应用研究进展[J]. 自然灾害学报,2004,13(4):21-27.
- [14] 王春林,董永春,宋丽莉. 旱涝灾害实时动态监测指标的研究[M]//黄增明,谢炯光,吴尚森,等. 广东省短期气候预测研究. 北京:气象出版社,2000:154-158.
- [15] 王春林,董永春. 广东省气候灾害监测预警系统简介[J]. 广东气象,1998,增刊(2):4-8.
- [16] 宋丽莉,王春林,董永春. 水稻干旱动态模拟及干旱损失评估[J]. 应用气象学报,2001,12(2):226-233.
- [17] 郭兆夏,朱琳,叶殿秀,等. 在气候资源分析及农业气候区划中的应用[J]. 西安大学学报,2000,30(4):357-359.
- [18] 黄浩辉,刘锦奎,陈新光. 地理信息系统在广东省农业气候资源分析中的应用[J]. 广东气象,2001(4):26-28.
- [19] 王春林,刘锦奎,周国逸,等. 基于 GIS 技术的广东荔枝寒害监测预警研究[J]. 应用气象学报,2003,14(4):487-495.
- [20] 奚玉英,陈国春. 由 20 cm 蒸发皿资料和风速计算水库库面蒸发量[J]. 水电站设计,2002,18(2):76-78.
- [21] 傅抱璞,虞静明,卢其尧. 山地气候资源与开发利用[M]. 南京:南京大学出版社. 1996:132-171.
- [22] 翁笃鸣. 试论总辐射的气候学计算方法[J]. 气象学报. 1964,34(3):304-314.

【责任编辑 周志红】