

地面有效辐射气候学模型评估和参数优化^{*}

曹雯^{1,2} 段春锋³ 杨太明² 刘瑞娜²

CAO Wen^{1,2} DUAN Chunfeng³ YANG Taiming² LIU Ruina²

1. 安徽省气象科学研究所,安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室,合肥,230031
2. 安徽省农业气象中心,合肥,230031
3. 安徽省气候中心,合肥,230031

1. *Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing Key Laboratory of Anhui Province, Anhui Meteorological Institute, Hefei 230031, China*
2. *Anhui Agrometeorological Center, Hefei 230031, China*
3. *Anhui Climate Center, Hefei 230031, China*

2016-04-29 收稿,2016-07-15 改回。

曹雯,段春锋,杨太明,刘瑞娜. 2016. 地面有效辐射气候学模型评估和参数优化. 气象学报,74(6):947-958

Cao Wen, Duan Chunfeng, Yang Taiming, Liu Ruina. 2016. Evaluation and parameter optimization of surface effective radiation climatology models. *Acta Meteorologica Sinica*, 74(6):947-958

Abstract Based on surface radiation balance data and daily meteorological observations collected at 19 radiation stations in China from 1993 to 2012, the applicability of seven empirical methods for the estimation of surface effective radiation (including Brunt model, Penman modified model, Верлянд model, FAO24 modified model, FAO56-PM model, Deng Genyun model, and Tong Hongliang model) was assessed and a revised method applicable to China was established by re-fitting the formula using new observational data. The iterative solution method and the multivariate regression analysis method with the minimum root mean square error (RMSE) was used as the objective function in the revised method. Results showed that the effective radiation over China was underestimated by all the above seven models. The mean absolute percentage error (MAPE) and RMSE derived from the Tong Hongliang model was 27.0% and 24.5 W/m² respectively, which are less than those from the other six models. Thereby the Tong Hongliang model was the best among the seven models for estimating the effective radiation over China, followed by the Penman modified model and the Deng Genyun model. The FAO56-PM model was not applicable to China due to its low accuracy. For individual stations, the accuracy of the Deng Genyun model was the highest in the eastern plain area while the Tong Hongliang model was suitable for the plateau area because it includes the altitude correction in the atmospheric moisture calculation. Correlation analysis indicated that the water vapor pressure was the most critical factor affecting the estimated error of the effective radiation. Therefore, the regional models were established for the eastern and western areas respectively based on geographical distribution of the water vapor pressure. The RMSE calculated by the revised models, which were developed based on observations, for entire China and for the eastern and western areas were 20.8 and 21.4 W/m² respectively. Results of the new models were more accurate than that of the seven models mentioned above. Furthermore, the regional model produced smaller errors than the model for entire China at most of the stations, indicating that it is necessary to distinguish the eastern and western areas in the development of new methods for determination of effective radiation. The western regional model was obviously more accurate than Deng Genyun model in the western area and the eastern regional model was obviously more accurate than Tong Hongliang model in the eastern area. Therefore the regional models developed in this study

* 资助课题:国家自然科学基金项目(41405111)、安徽省自然科学基金项目(1408085QD73)。

作者简介:曹雯,主要从事农业气象和蒸散模型优化研究。E-mail: sgfxy_0@163.com

通讯作者:段春锋,主要从事气候变化与气候预测研究。E-mail: dcf118@126.com

were recommended as the standard climatology models for calculation of the effective radiation over China.

Key words Effective radiation, Model, Assessment, Parameter optimization

摘要 基于中国 19 个辐射站 1993—2012 年的地面辐射平衡资料和气象资料,分析评估了布朗特法、彭曼法、别尔良德法、FAO24 法、FAO56-PM 法、邓根云法和童宏良法 7 种参数化方案计算中国地面有效辐射的适用性;并以均方根误差最小为目标函数,利用步长加速法和多元回归法迭代求解最优参数,建立适合于中国的最优参数化逐日有效辐射估算方法。结果表明:参与评估的 7 种方案都不同程度低估了中国的有效辐射;从全中国总体误差水平看,童宏良法的平均绝对百分比误差和均方根误差小于其他 6 种方案,分别为 27.0% 和 24.5 W/m^2 ,估算效果较好;其次是彭曼法和邓根云法;FAO56-PM 法精度较低,不适用于中国的有效辐射估算。针对单站来说,邓根云法在东部平原地区的精度最高,童宏良法由于考虑了海拔高度的订正,适用于西部高原地区。相关分析表明水汽压是影响有效辐射估算误差的最关键因素,因此根据水汽压的地理分布规律,分东部区和西部区建立分区方案。基于观测资料建立的全中国方案和分区方案的均方根误差分别为 20.8 和 21.4 W/m^2 ,精度均高于已有参与评估的 7 种方案;而且在绝大多数站点,分区方案的误差小于全中国方案,所以划分东部区和西部区进行有效辐射模型参数化很有必要。同时发现,分区方案在西部区明显优于邓根云法,在东部区明显优于童宏良法,因此推荐其作为中国有效辐射的计算方法。

关键词 有效辐射,模型,评估,参数优化

中图法分类号 P422.2

1 引言

地面有效辐射为地面向上的长波辐射与大气逆辐射之差,它是地面通过长波辐射交换而实际损失的热量(周淑贞等,1997)。作为地面辐射平衡的重要分量(孙治安等,1986a)和地-气能量交换的重要形式之一(曾燕等,2007),有效辐射在研究气温日变化规律、夜间低温形成、预报最低气温、辐射雾和辐射霜冻(Jiménez, et al, 1987; 孙治安等, 1986a)以及农田蒸散计算等方面发挥重要作用。与辐射平衡其他分量相比,有效辐射是辐射观测中最难测定的一项(孙治安等,1986b),其实测资料往往通过对辐射平衡方程中其他要素的观测而间接获得(曾燕等,2007)。然而中国目前只有 19 个辐射台站能够获得有效辐射资料,远远不能满足气象、农业和生态等领域研究和应用的需要。

长期以来,为了克服有效辐射观测的缺乏,中外众多学者研究了一系列利用地面气象观测要素获得有效辐射的气候学计算方法。Angstrom 在 1915 年最早提出基于气温、水汽压和云量的经验方法(刘绍民等,1994);Brunt(1939)、别尔良德(卢兵,1994)和 Penman(1956)等在 20 世纪 30—50 年代提出利用气温、水汽压和日照百分率计算有效辐射的经验方法;Swinbank(1963)和 Idso 等(1969)在 20 世纪 60 年代提出基于气温和云量的经验方法;国际粮农组

织(Food and Agriculture Organization, FAO)在 1977 年的 FAO24 报告(Doorenbos, et al, 1977)和 1998 年的 FAO56 报告(Allen, et al, 1998)中,推荐了基于彭曼法改进后的参数化方案,并获得全球广泛应用。中国学者孙治安等(1986a, 1986b)利用探空站资料,对别尔良德理论公式进行简化;初步简化的公式计算量很大,并且需要探空资料,因此在同年进一步讨论了利用地面资料计算有效辐射的参数化方案。童宏良(1989)在孙治安等(1986a, 1986b)工作的基础上,根据全中国 12 个站的观测资料,用大气含水量作为变量,并考虑海拔高度的订正,将全中国分成平原和高原两大区域,分别拟合出计算有效辐射的参数化方案。邓根云(1979)用北京日射站 1964—1965 年的资料,对彭曼法进行修正,给出了计算有效辐射的参数化方案。季国良等(1987)、李韧等(2006)和巩远发等(2005)给出了青藏高原地区有效辐射的气候学计算方法及其时空变化特征。刘绍民等(1994)检验了中外有效辐射各种参数化方案在新疆的计算效果,从中找出了计算新疆有效辐射较可靠的方法。曾燕等(2007)对比分析了多种有效辐射的理论计算模型,通过对模型、参数和经验系数的优化选择,确定了计算黄河流域有效辐射的方法。Yin 等(2008)发现通过彭曼法获得的中国 3 个代表站的有效辐射与观测值较吻合,而 FAO56 报告中推荐的有效辐射参数化方案未经修正直接用于中国

误差较大。

通过对已有研究进展的梳理和总结,发现有效辐射气候学计算方法的关键成果主要集中在 20 世纪,近十几年来发展缓慢;而且中国主要是利用区域或代表站的数据对模型进行参数优化和效果评估,资料年限普遍较短,在时空上均缺乏更为广泛的研究。气候变暖背景下,原有的有效辐射气候学模型参数化方案目前在中国范围的适用性如何值得探讨;同时,随着辐射资料的不断丰富和积累,通过对模型参数进行改进和修正来提高有效辐射计算精度也很有必要。因此,本研究拟基于中国 19 个辐射站 1993—2012 年的地面辐射平衡资料和气象资料,分析评估多种估算有效辐射的参数化方案在中国的适用性,并在此基础上进行参数修正,以期获得一种适合于中国的有效辐射估算的最优参数化方法。

2 资料与方法

2.1 研究资料

数据资料来源于中国国家气象信息中心提供的“中国地面气象要素日值数据集(V3.0)”和“中国气象辐射基本要素日值数据集(V2.0)”。这两个数据集分别包含了中国基本、基准气象站、一般气象站在内的两千余个站点从 1951 年以来地面气象要素逐

日观测要素和自 1957 年以来的共 130 个观测站的辐射基本要素日值观测数据。根据中国国家气象信息中心编写的评估报告,两个数据集在制作过程中都经过全面的质量检测、质量控制、人工核查和数据更正,其中辐射要素数据的实有率均在 99.0% 左右,数据正确率接近 100%。

由于有效辐射没有观测资料,需要依据辐射平衡方程(如式(1))将其看成地表得到的净短波辐射(总辐射减去反射辐射)与净全辐射的余项而间接计算得到。将通过辐射平衡方程倒算获得的有效辐射值作为评估各种参数化方案效果优劣的标准,下文简称标准值。

$$R_0 = R_s(1 - A) - R_{ni} \quad (1)$$

式中, R_0 为净辐射, R_s 为太阳总辐射, A 为地表反射率, R_{ni} 为有效辐射。根据“中国气象辐射基本要素日值数据集(V2.0)”概要说明,全中国只有 19 个辐射站(表 1)的资料包括总辐射、净全辐射和反射辐射等完整辐射要素的逐日数据,且观测年份开始于 1993 年。因此,本研究使用了这 19 个气象站点 1993—2012 年的逐日辐射数据和逐日气象数据,包括净辐射、太阳总辐射、反射辐射、平均气温、最低气温、最高气温、水汽压、相对湿度和日照时数。

表 1 19 个辐射台站信息表
Table 1 Radiation stations used in this study

站号	站名	经度(°E)	纬度(°N)	海拔高度(m)	资料年份	有效辐射标准值(W/m ²)
58362	上海	121.45	31.40	5.5	1993—2012 年	54.8
57494	武汉	114.05	30.60	23.6	1993—2012 年	46.3
54511	北京	116.47	39.80	31.3	1993—2012 年	76.0
54342	沈阳	123.52	41.73	49.0	1993—2012 年	72.1
59287	广州	113.48	23.22	70.7	1993—2012 年	44.7
57083	郑州	113.65	34.72	110.4	1993—2012 年	63.8
50953	哈尔滨	126.77	45.75	142.3	1993—2012 年	73.9
59948	三亚	109.58	18.22	419.4	1993—2012 年	64.3
50136	漠河	122.52	52.97	433.0	1993—2012 年	64.6
56294	成都	104.02	30.67	506.1	1993—2003 年	39.9
56187	温江	103.87	30.75	547.7	2004—2012 年	40.1
51463	乌鲁木齐	87.65	43.78	935.0	1993—2012 年	82.6
52267	额济纳旗	101.07	41.95	940.5	1993—2012 年	121.6
51709	喀什	75.98	39.47	1289.4	1993—2012 年	86.3
52889	兰州	103.88	36.05	1517.2	1993—2004 年	81.0
52983	榆中	104.15	35.87	1874.4	2005—2012 年	82.5
56778	昆明	102.65	25.00	1888.1	1993—2012 年	70.9
52818	格尔木	94.92	36.42	2807.6	1993—2012 年	106.4
55591	拉萨	91.13	29.67	3648.9	1993—2012 年	115.3

本研究利用辐射平衡数据,通过余项法倒算获得的全中国 19 个辐射站的有效辐射标准值范围为 39.9—121.6 W/m²(表 1),总体由东南向西北递增,主要的低值区位于四川省境内,高值区位于新疆东北部和青藏高原,值域范围和分布规律与孙治安等(1986b)、朱晓晨等(2014)的研究结论基本一致,反映的宏观趋势也与 NCEP 再分析资料(朱晓晨等,2014)相似。其中,拉萨 6—8 月的标准值分别为 116.3、83.5 和 78.8 W/m²,值域和夏季波动规律与第一次、第二次青藏高原科学实验(翁笃鸣等,1984;卞林根等,2001)及 1982—1983 年青藏高原地面热源观测试验(王可丽等,1994)的数据基本一致;武汉的标准值为 46.3 W/m²,与地理位置靠近、由美国能源大气辐射(ARM)项目支持的寿县观测值(43.7 W/m²)比较接近;上海夏季的有效辐射标准值为 48.5 W/m²,与附近站点南京的观测值(44.8 W/m²)(王可丽等,1994)也在相同范围。因此,与观测资料和已有成果的对比说明本研究的余项法计算结果具有较高的可信度。此外,由于有效辐射资料的缺乏,余项法在孙治安等(1986a)、童宏良(1989)、卞林根等(2001)、李韧等(2011)和朱晓晨等(2014)的研究中已被广泛应用,将其获得的倒算资料作为实测值或标准值,来评估和建立地面有效辐射气候学模型及分析有效辐射时空变化特征。考虑到观测手段与精度的不断进步和提高,本研究利用辐射平衡观测资料获得的有效辐射值可信度较已有研究进一步提升,可作为参数化方案评估和建立的标准值。

2.2 研究方法

2.2.1 有效辐射模型的 7 种参数化方案

有效辐射为地表支出长波辐射与大气逆辐射之差。一般而言,地面有效辐射的强弱随地面温度、气温、空气湿度及云况而变化(曾燕等,2007)。中外多数研究从有效辐射的理论公式出发,同时考虑影响有效辐射的气象因子,将计算有效辐射的经验公式表达为气温、水汽压、云量或日照百分率的函数,其中受到广泛应用的一种基本形式为

$$R_{nl} = \sigma T^4 (a_0 + a_1 \sqrt{e_a}) (b_0 + (1 - b_0) S) \quad (2)$$

式中, R_{nl} 为有效辐射(W/m²); σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数,等于 5.67×10^{-8} W/(K⁴ · m²); T 为平均气温(K); e_a 为水汽压(kPa); S 为日照百分率; a_0

+ $a_1 \sqrt{e_a}$) 和 $(b_0 + (1 - b_0) S)$ 分别通过水汽压和日照百分率反映水汽和云量对有效辐射的影响, a_0 、 a_1 和 b_0 是经验参数,其中 b_0 在 0—1,参数的大小可以反映水汽和云量等要素对有效辐射的影响程度。

中外众多学者借鉴有效辐射经验公式的基本形式并利用不同地区的观测资料,拟合获得多种计算有效辐射的参数化方案,本研究评估了其中 7 种常用方案,具体包括

(1) 布朗特法。Brunt(1939)提出的参数化方法

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{\min}^4 + T_{\max}^4}{2} \right) (0.56 - 0.092 \sqrt{10e_a}) \cdot \left(0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right) \quad (3)$$

(2) 彭曼法。Penman(1956)利用英国的观测资料,在 Brunt(1939)工作的基础上,提出的另一套参数化方法

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{\min}^4 + T_{\max}^4}{2} \right) (0.56 - 0.079 \sqrt{10e_a}) \cdot \left(0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right) \quad (4)$$

(3) 别尔良德法。别尔良德提出了计算地面有效辐射的理论公式,并对其进行简化,得到了相应的参数化方法(卢兵,1994)

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{\min}^4 + T_{\max}^4}{2} \right) (0.39 - 0.058 \sqrt{10e_a}) \cdot \left(0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right) \quad (5)$$

(4) FAO24 法。联合国粮农组织在 1977 年的灌溉与排水研究报告中推荐的参数化方法(Doorenbos, et al, 1977)

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{\min}^4 + T_{\max}^4}{2} \right) (0.34 - 0.044 \sqrt{10e_a}) \cdot \left(0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right) \quad (6)$$

(5) FAO56-PM 法。联合国粮农组织在 1998 年推荐的估算参考作物蒸散的彭曼-蒙蒂斯模型中给出的参数化方法(Allen, et al, 1998)

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{\min}^4 + T_{\max}^4}{2} \right) (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \cdot \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (7)$$

(6) 邓根云法。邓根云(1979)用北京日射站资料,对 Brunt(1939)的参数进行了本地化

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{\min}^4 + T_{\max}^4}{2} \right) (0.32 - 0.026\sqrt{10e_a}) \cdot (E_{RMS}) \cdot \left(0.3 + 0.7 \frac{n}{N} \right) \quad (8)$$

(7)童宏良法。童宏良(1989)根据中国12个站的观测资料,用大气含水量代替水汽压作为变量,并考虑海拔高度的订正,将全中国分成平原和高原两大区域,分别拟合出地面有效辐射经验公式的参数。平原区和高原区公式分别见式(9)和(10)

$$\text{平原区: } R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{\min}^4 + T_{\max}^4}{2} \right) (0.32 - 0.093\sqrt{W_{\infty}}) \cdot \left(0.43 + 0.57 \frac{n}{N} \right) \quad (9)$$

$$\text{高原区: } R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{\min}^4 + T_{\max}^4}{2} \right) (0.304 - 0.021\sqrt{W_{\infty}}) \cdot \left(0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right) \exp(0.00012z) \quad (10)$$

$$W_{\infty} = (0.1054 + 0.1513 \times 10e_a) \exp(0.00006z) \quad (11)$$

式(3)—(10)中, R_{nl} 、 σ 和 e_a 所表示的物理量及其单位同前文,由于式(3)—(6)、(8)和(11)的原始形式要求 e_a 的单位为hPa,因此本研究将数据单位由kPa换算成hPa,公式的参数即可保持不变; T_{\min} 为日最低气温(K); T_{\max} 为日最高气温(K); n 为实际日照时数(h), N 为可能日照时数(h), n/N 即为日照百分率 S ,其中 $N = 24\omega_s/\pi$, ω_s 是日落时的时角, π 取3.1415926;式(7)中 R_s 为太阳总辐射(W/m^2), R_{so} 为晴空辐射(W/m^2),均根据FAO56彭曼-蒙蒂斯公式推荐的参数进行计算;式(9)和(10)中 W_{∞} 为大气含水量(g/cm^3),可基于实际水汽压 e_a 利用式(11)来计算, z 为海拔高度(m)。

2.2.2 误差分析

为了评价有效辐射模型各种参数化方案的精度,计算并比较了估算值与标准值的平均偏差(E_{MB})、平均绝对百分比误差(E_{MAP})和均方根误差

$$(E_{RMS})。 \quad E_{MB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_{nl\text{估算},i} - R_{nl\text{标准},i}) \quad (12)$$

$$E_{MAP} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\left| \frac{R_{nl\text{估算},i} - R_{nl\text{标准},i}}{R_{nl\text{标准},i}} \right| \times 100\% \right)}{n} \quad (13)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{nl\text{估算},i} - R_{nl\text{标准},i})^2}{n}} \quad (14)$$

式(12)—(14)中, $R_{nl\text{估算},i}$ 和 $R_{nl\text{标准},i}$ 分别表示利用参数化方案获得的有效辐射估算值和通过辐射平衡倒算获得的标准值, n 表示研究时段内的样本数。以上指标越接近于0,说明误差越小,精度越高(段春锋等,2015)。

3 结果分析

3.1 有效辐射模型不同参数化方案的适用性评估

基于1993—2012年的气象资料和辐射资料,利用2.2.1节中的7种常用参数化方案计算全中国19个辐射台站的逐日有效辐射估算值,并与标准值进行比较,获得不同参数化方案效果的多种指标。从表2可以看出,7种方案的估算值与标准值均具有较高的相关性,相关系数普遍超过0.70,且通过0.05的显著性检验;其中邓根云法的相关系数最大,其次是童宏良法,布朗特法的相关系数最小。7种方案的平均偏差均为负值,表明整体上都不不同程度低估了有效辐射。由于别尔良德法、FAO24法和FAO56-PM法在19个站点的估算值一致表现为偏小,因此总体低估程度较大;而其他4种方案均存在估算值偏大的站点,由于正、负偏差的抵消作用,低估程度相对较小。

表2 7种参数化方案的估算误差

Table 2 Errors produced in the seven different effective radiation parameterization methods

	R	$E_{MB}(W/m^2)$	$E_{MAP}(\%)$	$E_{RMS}(W/m^2)$
布朗特法	0.71	-12.9	35.1	29.4
彭曼法	0.76	-4.4	29.6	25.4
别尔良德法	0.74	-27.2	41.5	35.2
FAO24法	0.77	-28.7	42.1	35.9
FAO56-PM法	0.77	-30.8	44.3	37.8
邓根云法	0.79	-12.6	27.1	25.8
童宏良法	0.78	-8.0	27.0	24.5

平均绝对百分比误差和均方根误差的大小可以直观反映不同参数化方案的精度和效果。童宏良法的平均绝对百分比误差和均方根误差小于其他 6 种方案,分别为 27.0%和 24.5 W/m²,估算效果最好;其次是彭曼法和邓根云法;FAO56-PM 法的平均绝对百分比误差和均方根误差最大,分别达到 44.3%和 37.8 W/m²,精度较低,不适用于中国有效辐射估算,这与 Yin 等(2008)的结论基本一致。具体针对每个站点进行分析可以发现,在上海、武汉、北京、沈阳、广州、郑州、哈尔滨、三亚、漠河、成都和温江这 11 个站点,邓根云法的平均绝对百分比误差和均方根误差最小,基本都未超过 30.0%和 23.0 W/m²,是估算效果最好的方案;精度排在第 2 位的是童宏良法或彭曼法(图 1)。这 11 个站点海拔都在 600 m 以下,属于平原站,且多数都分布在中国东部,说明邓根云法适用于在东部平原地区计算有效辐射。中国东部地区比西部湿度大,云量变化复杂,邓根云法中的参数尤其是日照百分率项的参数相较于其他方案,更加科学描述了水汽和云量对大气逆辐射的作用,并进一步反映到对有效辐射的影响,这可能是邓根云公式在东部平原区效果最好的重要原因。而且邓根云仅使用北京日射站资料获得的方案在东部基本都适用,说明有效辐射模型的参数在中国东部地区具有较强的一致性。而在乌鲁木齐、额济纳旗、喀什、兰州、榆中、昆明、格尔木和拉萨这 8 个站,童宏良法或彭曼法的平均绝对百分比误差和均方根误差最小,大多都未超过 25.0%和 28.5 W/m²;其中除了额济纳旗、昆明和拉萨外,其他 5 个站点的最优方案均为童宏良法(图 1)。这 8 个站点海拔都超过 900 m,属于高原站,除了昆明之外都分布在中国西部,具有湿度较小、云量较少的气候特征。童宏良法由于在公式拟合时针对高原区考虑了海拔高度的订正,获得的参数合理描述了高原地区水汽和云量对有效辐射的影响,适用性较强。此外,对童宏良法进行评估时,将逐日数据累计到月有效辐射值后的估算平均绝对百分比误差为 -8.4%,绝对值超过童宏良(1989)建模时的 7.6%;其中西部高山站和东部平原站的平均绝对百分比误差为 -2.5%和 -12.6%,绝对值分别小于和大于童宏良(1989)的 7.5%和 7.6%,说明童宏良法对海拔高度的影响考虑全面并且表达准确,对高原有效辐射的模拟在资料年代逐步变化发展的情况下依然能保持较高精

度。

有效辐射模型参数化方案在不同月份的适用情况既有共性也存在差异。图 2 是 7 种方案的估算效果在年内的变化情况。可以看出,7 种方案的平均偏差在绝大多数月份都是负值,只有布朗特法和彭曼法在秋、冬两季的平均偏差为正值,表明 7 种方案在大部分月份都低估了有效辐射。7 种方案的偏差在年内成单谷型分布,普遍在夏季偏小最显著。偏离程度最大的是 FAO56-PM 法,其次是 FAO24 法;童宏良法的偏离程度最小(图 2a)。7 种方案的平均绝对百分比误差和均方根误差在年内成单峰型分布,峰值大多出现在夏季。其中,邓根云法和童宏良法在多数月份的误差小于其他 5 种模型,估算效果较好;但在春季彭曼法的精度最高;同时,这 3 种方案的误差值随季节变化而发生波动的幅度相对较小,说明在年内具有较稳定的适用性。FAO56-PM 法、FAO24 法和别尔良德法在春、夏和秋 3 季的精度明显偏低,但冬季与其他 4 种方案误差的差异较小。以上特征与不同季节有效辐射本身大小有关,也与影响辐射传输的因子包括气温、水汽和云量等的季节差异有关。

综上所述,中外不同年代学者已经建立的有效辐射估算方法在对辐射传输过程的表达上、物理规律的解释上和公式的表现形式上均有其实用价值和可取之处。整体上看,基于中国个别站点数据或区域资料修正的本地参数化方案,如邓根云法和童宏良法的适用性普遍优于国际上或全球推荐的方案,但已有研究的年代较早,当时的资料序列较短或研究区域有局限性,在保持模型原有基本形式的前提下,气候演变等因素将导致模型参数发生变化,因此随着资料不断丰富和积累,有必要利用中国近年来的观测数据对模型参数进行修正。

有效辐射受温度、湿度和云量等影响(Li, et al, 2016)。通过计算和分析 7 种方案平均绝对百分比误差与气温、水汽压和日照百分率 3 种因子的相关系数可以发现,除了 FAO56-PM 法外,其他 6 种方案的平均绝对百分比误差均与水汽压的相关性最强,相关系数分别为 0.90(布朗特法)、0.68(彭曼法)、0.85(别尔良德法)、0.64(FAO24 法)、-0.45(邓根云法)和 0.64(童宏良法);相关性其次是日照,表明水汽压是影响有效辐射估算误差的最关键因素。水汽压本身与海拔高度关系密切,海拔越高,

水汽压越低,所以高原地区水汽压较低,平原地区水汽充足,水汽压相对较高;水汽压还存在东、西差异,中国东部地区湿润,水汽压较高,西部地区相对干燥,水汽压较低。以上分析表明,水汽压受海拔高度与经度两者共同影响,而中国地势整体存在西高东

低的特征,所以根据水汽压的地理分布规律,有必要分东部区和西部区来对中国有效辐射估算模型进行参数修正或优化。这也与童宏良(1989)在建模时考虑划分平原区和高原区的思路基本一致。

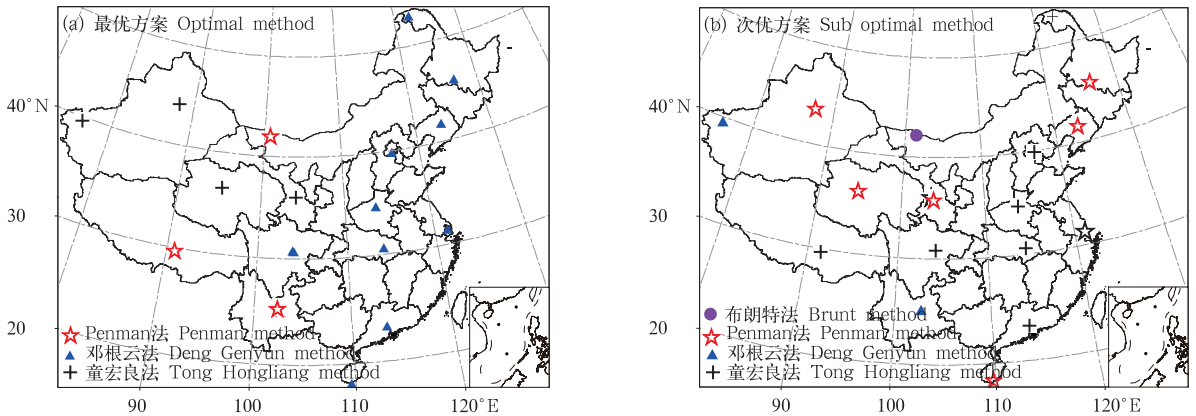


图1 中国19个辐射站计算有效辐射的最优(a)和次优(b)参数化方案

Fig. 1 Optimal (a) and sub optimal (b) parameterization methods for calculation of the effective radiation at 19 radiation stations in China

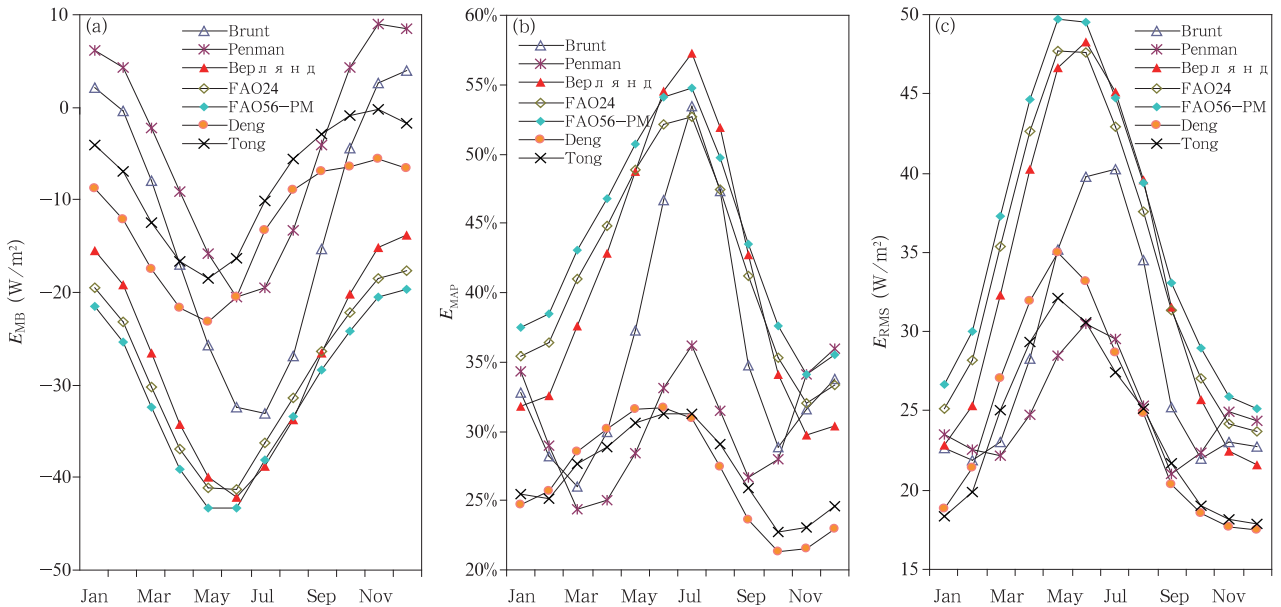


图2 7种参数化方案估算误差的年内分布

Fig. 2 Annual distributions of errors from the seven effective radiation parameterization methods

3.2 有效辐射模型最优参数化方案的建立

本研究在借鉴以往有效辐射经验公式的基本形式并对现有资料深入分析的基础上,对公式参数进

行了修正。首先,利用1993—2012年上海、武汉和北京等中国19个辐射站数据,通过辐射平衡方程倒算获得逐日有效辐射标准值;其次,采用最优化方法

中的步长加速法,对式(2)中的参数 b_0 在 0—1 以 0.01 为步长迭代取值,同时将日最高气温、日最低气温、水汽压和日照百分率代入式(2),利用多元回归法求解不同 b_0 情况下对应的 a_0 和 a_1 ;最后,计算不同 b_0 、 a_0 和 a_1 情况下的有效辐射值,以计算值与标准值之间的均方根误差最小为目标函数,确定公式中 a_0 、 a_1 和 b_0 。由于本研究资料的时间序列相对较短,因此采用交叉验证的方法,将序号为奇数的样本用于建立参数化方案,序号为偶数的样本用于效果检验。2.1 节的评估分析表明,海拔高度和经度的差异会导致最优参数化方案的不同。所以除了将 19 个辐射站的资料作为整体建立全中国通用方案外,还分别利用海拔低于 600 m 的 11 个东部台站和海拔高于 900 m 的 8 个西部台站资料拟合获得了适用于东部区和西部区的分区参数化方案,并对两种方案精度进行了检验对比。全中国方案建模样本总数为 60340,检验样本总数为 60339;分区方案东部区和西部区建模样本总数分别为 35356 和 24984,检验样本总数分别为 35356 和 24983。两种方案具体参数见式(15)—(17), R_{nl} 、 σ 、 T_{min} 、 T_{max} 、 e_a 、 n 和 N 所表示的物理量及其单位同前文。

$$\text{全中国: } R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{min}^4 + T_{max}^4}{2} \right) (0.447 - 0.153\sqrt{e_a}) \cdot \left(0.26 + 0.74 \frac{n}{N} \right) \quad (15)$$

$$\text{东部区: } R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{min}^4 + T_{max}^4}{2} \right) (0.405 - 0.133\sqrt{e_a}) \cdot \left(0.28 + 0.72 \frac{n}{N} \right) \quad (16)$$

$$\text{西部区: } R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{min}^4 + T_{max}^4}{2} \right) (0.457 - 0.143\sqrt{e_a}) \cdot \left(0.26 + 0.74 \frac{n}{N} \right) \quad (17)$$

检验结果表明,从 19 个站的总体状况来看,全中国方案和分区方案标准值与估算值的相关系数分别为 0.81 和 0.84,且均通过 0.05 显著性检验,高于已有参与评估的 7 种方案;两者的平均偏差均为负值,表明对标准值有所低估,但程度较小,未超过 1.0 W/m^2 。从图 3 中可以看出,代表站北京和兰州利用分区方案估算的有效辐射值与标准值对应坐标点紧密、均匀分布在 1:1 线附近,线性关系近似等于 1,表明估算值与标准值总体比较接近,但标准值较小(小于 20.0 W/m^2)时,估算值明显偏大,标准值较大(大于 150.0 W/m^2)时,估算值明显偏小。分区方案的平均绝对百分比误差和均方根误差分别为 21.7% 和 20.8 W/m^2 ,小于全中国方案的 22.3% 和 21.4 W/m^2 ;而且在绝大多数站点,分区方案的精度高于全中国方案,所以划分区域进行有效辐射模型参数化很有必要,可以对全中国方案有一定改善。因此,将分区方案作为估算中国有效辐射的修正方案。

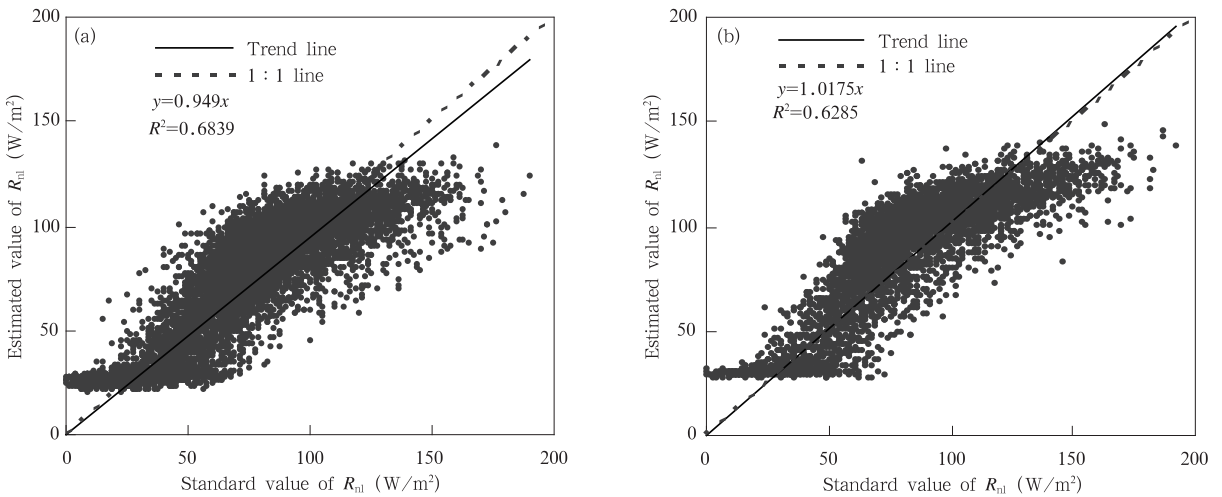


图 3 北京(a)和兰州(b)有效辐射标准值与估算值对比

Fig. 3 Comparisons between standard values and estimated values of effective radiation for Beijing (a) and Lanzhou (b)

从 2.1 节的评估结果可以看出,已有参数化方案中,邓根云法和童宏良法在中国具有较强的适用性。为了更清晰说明参数优化的效果,分别利用修正方案、邓根云法和童宏良法计算获得 19 个辐射站的逐日有效辐射估算值,并与标准值进行对比。从 19 个站的总体状况来看,修正方案估算值与标准值的相关超过了邓根云法和童宏良法,低估程度也明显小于后两者;修正方案的均方根误差为 20.8 W/m^2 ,其中东部区和西部区分别为 18.4 和 24.2 W/m^2 ,明显小于邓根云法的 25.8 W/m^2 和童宏良法的 24.5 W/m^2 。分区方案的逐日估算值累计到月有效辐射值后的平均相对误差为 4.4% ,小于童宏良

(1989)建模时的 7.6% ,精度得到进一步提高。图 4 是修正方案与邓根云法和童宏良法在 19 个辐射站的估算精度差异,分别用 $E_{\text{RMS修正-邓根云}}$ 和 $E_{\text{RMS修正-童宏良}}$ 来表示。从图中可以看出,超过 80% 辐射站的 $E_{\text{RMS修正-邓根云}}$ 和 $E_{\text{RMS修正-童宏良}}$ 均为负值,表明修正方案的精度高于邓根云法和童宏良法,说明随着气候变化和资料充实,对参数进行修正优化有助于提高有效辐射的估算效果。同时还发现, $E_{\text{RMS修正-邓根云}}$ 的绝对值在西部区普遍大于东部区, $E_{\text{RMS修正-童宏良}}$ 的绝对值在东部区普遍超过西部区,说明修正方案在西部区明显优于邓根云法,在东部区明显优于童宏良法。

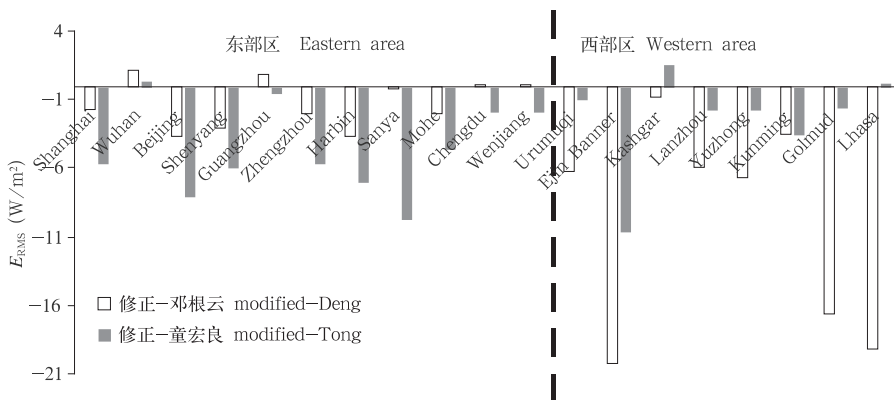


图 4 修正方案与邓根云法和童宏良法的估算精度差异

Fig. 4 Differences in estimation accuracy between modified method and Deng Genyun method and that between modified method and Tong Hongliang method

修正方案的误差在年内基本也都成单峰型分布,从 1 月开始逐渐增大,至 5 月出现峰值后又逐渐减小(图 5)。其在 2—9 月的误差明显小于邓根云和童宏良法,改善效果显著;但是在冬季误差接近甚至超过以上两种公式,因此在冬季可考虑使用精度更高的邓根云法。上述分析表明有效辐射参数化方案的效果存在年内差异,在今后有必要分季节或分月对模型参数优化进行更加细致的探讨。

综上所述,本研究建立的修正方案使用了时段新、年代长的辐射资料和气象要素资料,同时考虑到影响长波辐射传输过程的主要因素存在区域差异,分东部区和西部区拟合公式,而且精度高于已有参与评估的 7 种方案和建立的全中国方案,因此推荐修正方案作为中国有效辐射的计算方法。依据《中国气象地理区划手册》(中国气象局预测减灾司, 2006),给出适用区域见表 3,东部区方案适用于内

蒙古东部、东北地区、华北地区、黄淮地区、江汉地区、江淮地区、江南地区、华南地区和西南地区东部,西部区方案适用于西北地区、西藏地区、内蒙古西部和西南地区西部。

4 结论与讨论

4.1 结论

基于中国 19 个辐射站 1993—2012 年的地面辐射平衡资料和气象资料,分析评估了布朗特法、彭曼法、别尔良德法、FAO24 法、FAO56-PM 法和邓根云法 7 种估算地面有效辐射的参数化方案在中国的适用性;并以计算值与标准值的均方根误差最小为目标函数,利用步长加速法和多元回归法迭代求解最优参数,建立适合于中国的最优参数化有效辐射估算方法。主要结论如下:

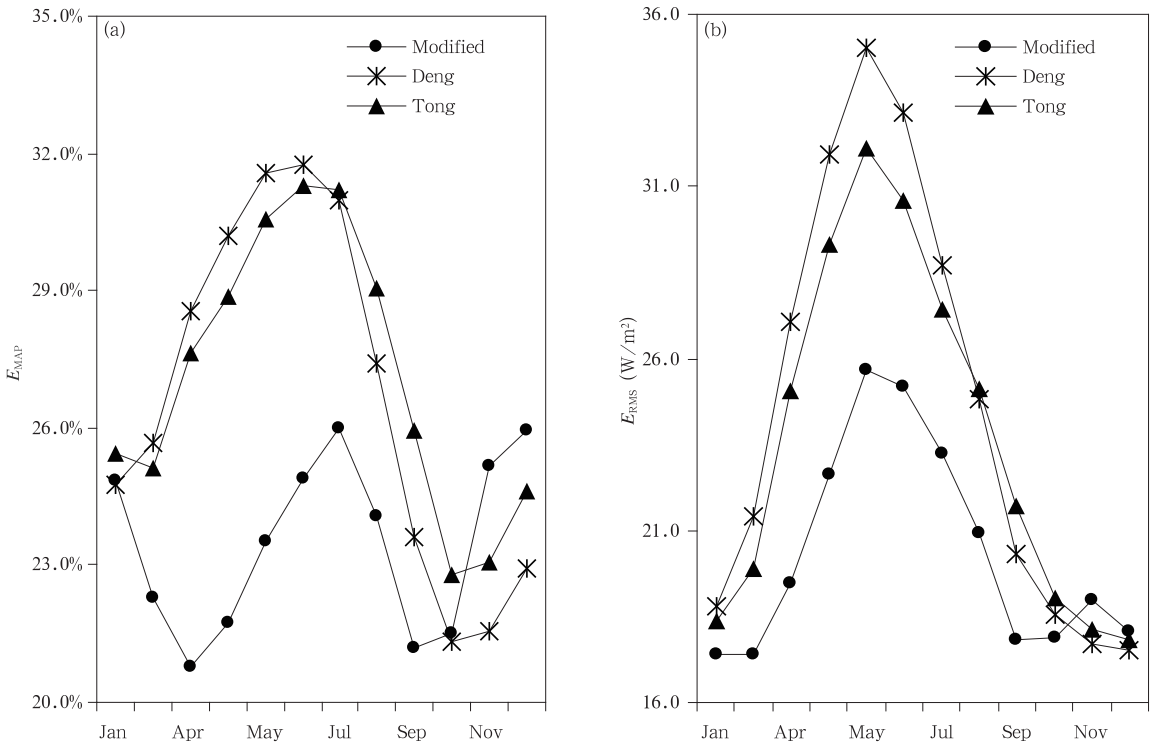


图5 3种有效辐射参数化方案估算误差的年内分布 (a. E_{MAP} , b. E_{RMS})

Fig. 5 Annual distributions of errors generated by three effective radiation parameterization methods (a. E_{MAP} , b. E_{RMS})

表3 中国有效辐射的气候学计算推荐方法

Table 3 Recommended climatology methods to calculate the effective radiation over China

地区	参数化方案
东部区(内蒙古东部、东北地区、华北地区、黄淮地区、江汉地区、江淮地区、江南地区、华南地区和西南地区东部)	$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{min}^4 + T_{max}^4}{2} \right) (0.405 - 0.133\sqrt{e_a}) \left(0.28 + 0.72 \frac{n}{N} \right)$
西部区(西北地区、西藏地区、内蒙古西部和西南地区西部)	$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{min}^4 + T_{max}^4}{2} \right) (0.457 - 0.143\sqrt{e_a}) \left(0.26 + 0.74 \frac{n}{N} \right)$

(1)参与评估的7种参数化方案都不同程度低估了中国的有效辐射。其中别尔良德法、FAO24法和FAO56-PM法在19个站点的估算值一致表现为偏小,而其他4种方案存在少数估算值偏大的站点。

(2)从中国总体误差水平看,童宏良法的平均绝对百分比误差和均方根误差小于其他6种模型,分别为27.0%和24.5 W/m^2 ,估算效果较好;其次是彭曼法和邓根云法;FAO56-PM法的平均相对误差和均方根误差最大,精度较低,不适用于中国的有效辐射估算。针对单站来说,邓根云法在东部平原地区的精度最高,童宏良法由于考虑了海拔高度的订正,适用于西部高原地区。

(3)7种方案的偏差在年内成单谷型分布,平均绝对百分比误差和均方根误差在年内成单峰型分布,谷值和峰值均基本出现在夏季。其中,邓根云法和童宏良法在多数月份的误差小于其他5种方案,估算效果较好。7种方案效果的年内特征与不同季节有效辐射本身大小有关,也与影响辐射传输的因子包括气温、水汽和云量等的季节差异有关。

(4)相关分析表明水汽压是影响有效辐射估算误差的最关键因素,因此根据水汽压地理分布规律,分东部区和西部区建立分区方案。基于实测资料建立的全中国方案和分区方案的均方根误差分别为20.8和21.4 W/m^2 ,精度均高于已有参与评估的7

种方案;而且在绝大多数站点,分区方案的误差小于全中国方案,所以划分东部区和西部区进行有效辐射模型参数化很有必要。同时发现,分区方案在西部区明显优于邓根云法,在东部区明显优于童宏良法。

(5)通过对有效辐射估算不同方案的评估和参数修正,最终推荐中国有效辐射的气候学计算方法为东部区:

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{\min}^4 + T_{\max}^4}{2} \right) (0.405 - 0.133\sqrt{e_a}) \cdot (0.28 + 0.72n/N);$$

西部区:

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{\min}^4 + T_{\max}^4}{2} \right) (0.457 - 0.143\sqrt{e_a}) \cdot (0.26 + 0.74n/N)。$$

4.2 讨论

(1)与其他常规气象要素相比,地面辐射平衡要素的观测误差相对较大,而且资料年限较短,站点稀少,对于幅员广阔的中国来说,研究成果的代表性有限。未来有必要结合遥感、探空等多源数据,针对有效辐射模型的参数评估和优化开展更加细致深入的工作。

(2)研究结果发现有效辐射模型参数化方案的估算精度存在季节差异,尤其是在夏季的误差较大,这也是造成总体误差较大的原因之一。在今后的工作中将进一步按季节或月尺度重新拟合计算公式参数,以便提高模拟精度。

参考文献

卞林根, 陆龙桦, 逯昌贵等. 2001. 1998年夏季青藏高原辐射平衡分量特征. *大气科学*, 25(5): 577-588. Bian L G, Lu L H, Lu C G, et al. 2001. The characteristics of radiation balance components of the Tibetan Plateau in the summer of 1998. *Chinese J Atmos Sci*, 25(5): 577-588 (in Chinese)

邓根云. 1979. 水面蒸发量的一种气候学计算方法. *气象学报*, 37(3): 87-96. Deng G Y. 1979. A climatic calculative method of evaporation from open water. *Acta Meteor Sinica*, 37(3): 87-96 (in Chinese)

段春锋, 曹雯, 黄勇等. 2015. 气象要素时间分辨率对参考作物蒸散估算的影响. *农业工程学报*, 31(14): 158-164. Duan C F, Cao W, Huang Y, et al. 2015. Effect of time resolution of meteorological variables on estimation of reference evapotranspiration. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 31(14): 158-164 (in Chinese)

巩远发, 段廷扬, 陈隆勋等. 2005. 1997/1998年青藏高原西部地区辐射平衡各分量变化特征. *气象学报*, 63(2): 225-235. Gong

Y F, Duan T Y, Chen L X, et al. 2005. The variation characteristics of radiation budget components of the western Tibetan Plateau in 1997/1998. *Acta Meteor Sinica*, 63(2): 225-235 (in Chinese)

季国良, 江灏, 查树芳. 1987. 青藏高原地区有效辐射的计算及其分布特征. *高原气象*, 6(2): 141-149. Ji G L, Jiang H, Zha S F. 1987. The computation and some distribution characteristics of effective radiation over the Qinghai-Xizang Plateau and its adjacent areas. *Plateau Meteor*, 6(2): 141-149 (in Chinese)

李韧, 杨文, 季国良等. 2006. 青藏高原有效辐射参数化. *太阳能学报*, 27(3): 274-278. Li R, Yang W, Ji G L, et al. 2006. Parameterization of effective radiation over the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Energ Solaris Sinica*, 27(3): 274-278 (in Chinese)

李韧, 赵林, 丁永建等. 2011. 青藏高原地面有效辐射变化及其对表层土温的影响. *冰川冻土*, 33(5): 1022-1032. Li R, Zhao L, Ding Y J, et al. 2011. Variations of surface effective radiation and its effect on superficial ground temperatures on Tibetan Plateau. *J Glaciol Geocryol*, 33(5): 1022-1032 (in Chinese)

刘绍民, 李银芳. 1994. 新疆地面有效辐射计算方法探讨. *新疆气象*, 17(2): 27-29. Liu S M, Li Y F. 1994. Discussion on computation method of ground effective radiation in Xinjiang. *Bimonth Xinjiang Meteor*, 17(2): 27-29 (in Chinese)

卢兵. 1994. 鄱阳湖水面积蒸发量计算方法探析. *江西水利科技*, 20(4): 347-354. Lu B. 1994. Probe into the calculating method of evaporation capacity in Poyang Lake. *Jiangxi Hydr Sci Technol*, 20(4): 347-354 (in Chinese)

孙治安, 翁笃鸣. 1986a. 我国有效辐射的气候计算及其分布特征(上)——地面有效辐射理论计算方法的探讨. *南京气象学院学报*, 9(3): 228-238. Sun Z A, Weng D M. 1986a. Climatological calculation and distributional features of effective radiation over China part I: Theoretical discussion of calculation methodology. *J Nanjing Inst Meteor*, 9(3): 228-238 (in Chinese)

孙治安, 翁笃鸣. 1986b. 我国有效辐射的气候计算及其分布特征(下)——地面有效辐射的经验计算及其时空分布. *南京气象学院学报*, 9(4): 335-347. Sun Z A, Weng D M. 1986b. Climatological calculation and distributional features of effective radiation over China part II: Empirical computation method and distributional features. *J Nanjing Inst Meteor*, 9(4): 335-347 (in Chinese)

童宏良. 1989. 我国蒸发力计算的气候学方法. *南京气象学院学报*, 12(1): 19-33. Tong H L. 1989. A climatic calculation method for the evaporation power in China. *J Nanjing Inst Meteor*, 12(1): 19-33 (in Chinese)

王可丽, 钟强, 侯萍. 1994. 青藏高原地区云对地面有效辐射的影响(I): 综合分析. *高原气象*, 13(1): 57-64. Wang K L, Zhong Q, Hou P. 1994. Effect of cloud on the surface effective radiation over the Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteor*, 13(1): 57-64 (in Chinese)

翁笃鸣, 冯燕华. 1984. 青藏高原夏季地面有效辐射和大气逆辐射特征分析. *科学通报*, 29(13): 796-799. Weng D M, Feng Y

- H. 1985. Characteristics of surface effective and atmospheric back radiations in the Qingzang Plateau in summer. *Chin Sci Bull*, 30(1): 80-84
- 曾燕, 邱新法, 刘昌明等. 2007. 黄河流域有效辐射拟合研究. *地理科学*, 27(3): 342-347. Zeng Y, Qiu X F, Liu C M, et al. 2007. Effective radiation simulation of the Yellow River Basin. *Sci Geograph Sinica*, 27(3): 342-347 (in Chinese)
- 中国气象局预测减灾司. 2006. 中国气象地理区划手册. 北京: 气象出版社. Forecasting and Mitigation Department of China Meteorological Administration. 2006. Handbook of China Meteorological and Geographical Division. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 周淑贞, 张如一, 张超. 1997. 气象学与气候学. 第2版. 北京: 高等教育出版社. Zhou S Z, Zhang R Y, Zhang C. 1997. Meteorology and Climatology. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press (in Chinese)
- 朱晓晨, 邱新法, 曾燕等. 2014. 中国有效辐射的遥感估算方法研究. *云南大学学报(自然科学版)*, 36(5): 674-682. Zhu X C, Qiu X F, Zeng Y, et al. 2014. The research on the estimation method of effective radiation in China based on remote sensing data. *J Yunnan Univ(Natur Sci)*, 36(5): 674-682 (in Chinese)
- Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO
- Brunt D. 1939. Physical and Dynamical Meteorology. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press
- Doorenbos J, Pruitt W O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations
- Idso S B, Jackson R D. 1969. Thermal radiation from the atmosphere. *J Geophys Res*, 74(23): 5397-5403
- Jiménez J I, Alados-Arboledas L, Castro-Diez Y, et al. 1987. On the estimation of long-wave radiation flux from clear skies. *Theor Appl Climatol*, 38(1): 37-42
- Li R, Zhao L, Wu T H, et al. 2016. The impacts of net long-wave radiation on the surface soil thermal regimes over the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Environ Earth Sci*, 75(3): 271
- Penman H L. 1956. Evaporation: An introductory survey. *Neth J Agric Sci*, 4: 9-29
- Swinbank W C. 1963. Long-wave radiation from clear skies. *Quart J Roy Meteor Soc*, 89(381): 339-348
- Yin Y H, Wu S H, Zheng D, et al. 2008. Radiation calibration of FAO56 Penman-Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China. *Agric Water Manag*, 95(1): 77-84