

引用格式: 谭清华, 刘玉洁, 宋献方, 等. 中国太阳辐射时空变化及不同时间尺度 Ångström-Prescott 模型校正参数适用性比较[J]. 2022, 44(2): 287–298. [Tan Q H, Liu Y J, Song X F, et al. Spatiotemporal changes of solar radiation and the adaptability comparison of Ångström-Prescott calibration parameters at different temporal scales in China[J]. 2022, 44(2): 287–298.] DOI: 10.18402/resci.2022.02.06

中国太阳辐射时空变化及不同时间尺度 Ångström-Prescott 模型校正参数适用性比较

谭清华^{1,2}, 刘玉洁^{1,2}, 宋献方^{2,3}, 潘 韬^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘 要: 逐日太阳辐射是作物模型的关键输入变量, 被广泛用于计算太阳辐射的 Ångström-Prescott 模型(A-P 公式)校正工作主要建立在月尺度数据上, 开展不同区域日尺度及更大时间尺度校正及参数适用性研究有助于提高太阳辐射计算和作物模型模拟准确性, 指导区域农业生产。本文基于中国九大农业区划和 104 个辐射站点的 1981—2016 年逐日太阳辐射实测资料, 分析了中国年太阳辐射时空分布特征; 在此基础上, 分别在日尺度和月尺度校正 A-P 公式, 并对其校正参数(a_s 和 b_s)的适用性进行检验评价。结果表明: ①中国年太阳辐射在 1990 年前后经历了由“变暗”到“变亮”的转变, 总体呈增加趋势($7.32 \pm 30.31 \text{ MJ/m}^2/\text{a}$), 空间上呈西高东低的分布特征; ②日尺度 A-P 公式校正拟合效果优于月尺度, 且月尺度的校正参数存在明显的空间异质性; 参数 a_s 的空间分布存在地带性, 呈东南低西北高的特征, 而 b_s 与海拔正相关; ③日尺度和月尺度校正参数可互换, 但在年尺度上线性 A-P 公式不再适用。本文对提高太阳辐射计算精度和指导区域农业生产具有一定的参考价值。

关键词: 太阳辐射; Ångström-Prescott 公式; 参数化; 多尺度; 适用性; 农业区划; 中国

DOI: 10.18402/resci.2022.02.06

1 引言

太阳辐射对许多地球表面和大气过程(例如植物的光合作用和蒸散)具有重要作用^[1], 是农业、环境、水文和生态模型构建过程中必不可缺的关键变量^[2,3]。精确的太阳辐射数据对作物模型模拟和指导区域农业生产尤为重要。太阳辐射可通过卫星图像进行评估, 也可采用气象站的日强度辐射计进行地面测量^[4,5]。与卫星数据相比, 地面测量数据的精度更高, 结果更可靠^[6], 但测量设备的校准困难且维护成本高, 只有少数气象站点具备测量太阳辐射

的条件^[7,8]。较之太阳辐射, 日照时数、气温、降水量等均为气象站点的常规观测变量。因此, 前人基于可获取的气象数据, 建立了多种估算太阳辐射的经验模型^[9–11](如基于云量、日照和温度等)以及结合不同气象变量的混合模型^[12]。在这些模型中, 基于日照的模型总体优于基于温度或其他气象变量的经验模型^[12,13], 其中 Ångström-Prescott 太阳辐射线性估算模型(下文简称 A-P 公式)及其修正版本具有较高的估算准确性^[14], 且操作简便, 在全球许多地方得到广泛验证和应用^[15,16]。前人研究表明, A-P 公式参数

收稿日期: 2020-10-20; 修订日期: 2021-06-11

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项课题(XDA28060200; XDA20040301); 国家自然科学基金优秀青年基金项目(42122003); 中国科学院青年创新促进会优秀会员项目(Y202016)。

作者简介: 谭清华, 女, 湖南娄底人, 博士生, 主要从事气候变化影响研究。E-mail: tanqh.17s@igsnrr.ac.cn

通讯作者: 刘玉洁, 女, 甘肃天水人, 研究员, 从事全球变化与粮食安全研究。E-mail: liuyujie@igsnrr.ac.cn

受到地理位置、海拔和气候等因素的影响,具有位置依赖性^[17,18],直接采用联合国粮食及农业组织(FAO)的建议值可能增加研究结果的不确定性^[19,20],因此,进行A-P公式参数的本地化校正对提高太阳辐射计算准确性十分必要^[21,22]。

逐日太阳辐射是作物模型的重要输入因子。最初A-P公式的构建基于月平均数据库^[12],因此目前大部分研究采用月太阳辐射数据校正A-P公式参数以估算太阳辐射^[23,24]。但基于月尺度计算所得结果无法精确刻画生长季内太阳辐射逐日变化,难以满足作物生长模拟的精度需求,增加了研究结果的不确定性^[25-27]。为降低因时间不匹配导致的不确定性,一些学者在可获取日太阳辐射实测数据的部分站点或区域,在日尺度和更大时间尺度对A-P公式参数进行校正,探究不同时间尺度校正参数的差异及可互换性^[28-30],结果表明,不同时间尺度校正的A-P公式参数存在差异,其中日尺度校正的A-P公式参数可应用到更大时间尺度(如月或季),但将月或更大尺度校正参数应用到日尺度模型时,不同区域计算得出的太阳辐射精度存在显著的差异^[31]。综上,全国基于月尺度辐射数据的A-P公式参数校正已有较多研究^[32-34],但不同时间尺度的A-P公式校正及校正参数适用性研究目前仅在黄河流域、长江流域及少数站点开展^[28,29],且已有研究的空间划分与农业区划不匹配,现有结论在全国及不同农业区域是否适用有待考证。

中国农业区域范围广,区域间气候条件差异大,太阳辐射变化对作物生长与生产有显著影响,分析不同区域太阳辐射的时空变化和不同时间尺度A-P公式校正参数的适用性,提高太阳辐射计算准确性,对优化作物模型模拟和指导区域农业生产至关重要。因此,本文基于中国九大农业区划,利用1981—2016年全国104个站点的逐日太阳辐射和日照时数观测数据,分析了全国及不同农业区域年太阳辐射的时空分异特征;在此基础上,基于A-P公式分别在日尺度和月尺度对模型参数进行校正,分析不同时间尺度校正参数的分布特征,并对模型拟合效果进行评估;将日尺度和月尺度校正参数分别应用到月和年、日和年时间尺度模型,比较不同

时间尺度太阳辐射计算的准确性,检验校正参数的适用性。

2 数据与研究方法

2.1 研究区域与数据处理

采用中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)的中国九大农业区划数据,将全国划分为东北平原区、北方干旱半干旱区、黄淮海平原区、黄土高原区、青藏高原区、长江中下游地区、四川盆地及周边地区、华南区和云贵高原区等9个农业区域(图1)。

实测数据采用中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)提供的1981—2016年104个辐射站点的太阳辐射(MJ/m²/d)和日照时数(h)逐日观测数据。受各种因素影响,观测数据存在缺失等异常情况。因此,在统计分析之前对获取的日值数据进行处理,用多年平均值代替观测异常值和缺失值,避免对分析结果产生影响。当数据的每月时间<20天,或每年月数<12个月时,对相应数据进行舍弃,以保证数据的代表性。

2.2 A-P公式

在无法获取实测太阳辐射资料的地区,FAO灌

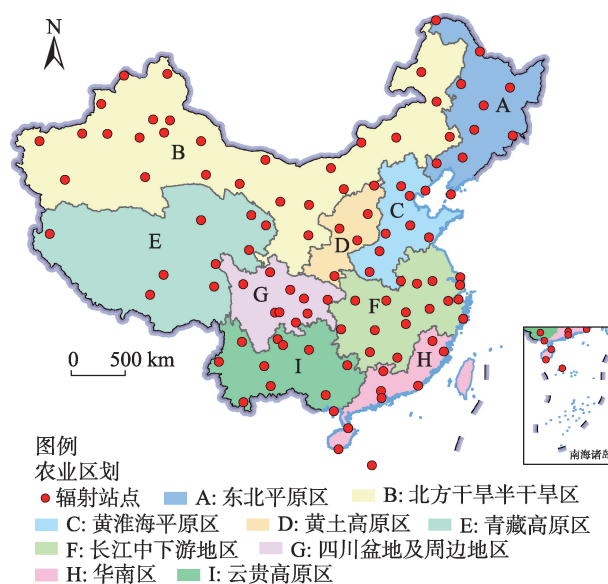


图1 中国九大农业区划和104个辐射站点空间分布

Figure 1 Spatial distribution of the nine agricultural regions and 104 radiation stations in China

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1827号标准地图制作,底图边界无修改。

2022年2月

溉和排水第56号文件建议通过A-P公式进行估算太阳辐射^[16]。应用A-P公式的同时,部分学者对模型进行优化,提供了多种不同形式的经验模型如多次线性、指数、对数和复合模型等^[12,13]。对不同形式经验模型进行了比较分析,结果表明线性A-P公式的计算精度与其他模型相当甚至更高,这与Makade等^[14]的结果一致。因此,选取更简便的线性A-P公式计算太阳辐射。定量太阳辐射和日照时数关系的A-P公式如下:

$$R_s = (a_s + b_s \cdot n/N) R_a \quad (1)$$

式中: R_s 为太阳辐射(MJ/m²/d), a_s 和 b_s 为经验参数,其中 a_s 表示在阴天到达地球表面的天文辐射分数, b_s 表示无云大气的传输特性(气溶胶密度); n 为实际日照持续时间(h); N 为最大可能的日照持续时间(h); n/N 为相对日照持续时间,也称日照百分率; R_a 为天文辐射(MJ/m²/d),可由以下方程^[1]计算得出:

$$R_a = 24 \cdot 60 / \pi \cdot G_{sc} \cdot d_r [\omega_s \sin(\Phi) \sin(\delta) + \cos(\Phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (2)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos(J \cdot 2\pi / 365) \quad (3)$$

$$\delta = 0.409 \sin(J \cdot 2\pi / 365 - 1.39) \quad (4)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\Phi) \tan(\delta)] \quad (5)$$

$$N = \omega_s \cdot 24 / \pi \quad (6)$$

式中: π 为圆周率; G_{sc} 为太阳常数,取值0.082; d_r 为反向日地相对距离; ω_s 为日落时角; Φ 为纬度(rad); δ 为太阳赤纬; J 为天数。

2.3 模型校正与检验分析

首先,基于1981—2000年的实测日太阳辐射和日照时数数据,从日尺度和月尺度分别对 R_s/R_a 和 n/N 进行最小二乘线性回归以校正A-P公式,得到日尺度和月尺度校正参数,并采用决定系数(R^2)评价A-P公式的拟合效果。其次,将日尺度和月尺度校正参数分别应用到月和年尺度、日和年尺度A-P公式,利用2001—2016年的实测日照时数数据估算不同时间尺度的太阳辐射,并采用同时期实测逐日太阳辐射及其累计月值和年值分别验证A-P公式估算准确性。最后,采用 R^2 、标准化均方根误差NRMSE和纳什有效系数NSE检验A-P公式校正参数在不同时间尺度模型的适用性,各项指标计算过

程如下:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{sim}} - Y^{\text{mean}})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}} - Y^{\text{mean}})^2} \quad (7)$$

$$NRMSE = \frac{1}{Y^{\text{mean}}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}} - Y_i^{\text{sim}})^2} \quad (8)$$

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}} - Y_i^{\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}} - Y^{\text{mean}})^2} \right] \quad (9)$$

式中: Y_i^{sim} 为第 i 个计算值; Y^{mean} 为观测值的均值; Y_i^{obs} 为第 i 个观测值; n 为观测值的个数。NRMSE值越小表明适用性越好,当NRMSE<0.1表示适用性优,当NRMSE>0.3表示适用性较差。NSE在 $(-\infty, 1]$ 区间,当 $0 < NSE < 1$,视为可接受的表现,且越接近1表示表现越好,当NSE<0则表示不可接受。

2.4 气候变化趋势和空间变异性

采用线性趋势方法分析年太阳辐射的趋势变化,将观测的年太阳辐射 \hat{X}_t 与时间序列 t 进行最小二乘回归拟合,即:

$$\hat{X}_t = a_0 + kt, \quad t = 1, 2, 3, \dots, n \quad (10)$$

式中: a_0 为截距;回归系数 k 即为气候变化趋势, $k > 0$ 表示年太阳辐射增加, $k < 0$ 则表示年太阳辐射下降。

变异系数是衡量序列观测值离散程度的一个统计量,选取变异系数衡量全国及不同农业区域太阳辐射及校正参数的空间变异性,计算公式如下:

$$C.V. = \frac{\sigma}{\mu} \quad (11)$$

式中: $C.V.$ 表示变异系数; σ 表示样本标准偏差; μ 表示样本平均值。一般认为, $C.V. < 0.1$ 为弱变异性, $0.1 < C.V. < 1.0$ 为中等变异性, $C.V. > 1.0$ 为强变异性。

3 结果与分析

3.1 太阳辐射变化时空分异

1981—2016年间,全国年太阳辐射总体呈增加趋势,但存在明显的时空差异(图2)。全国年太阳辐射多年平均值为 4992.60 ± 909.53 MJ/m²,空间上由东南地区向西北内陆增加,呈现出西北高、东南低,内陆高、沿海低,干燥区高、湿润区低的分布特征。青藏高原区为稳定的太阳辐射高值区,区域年太阳辐射平均值为 6326.60 ± 621.87 MJ/m²,其中,西

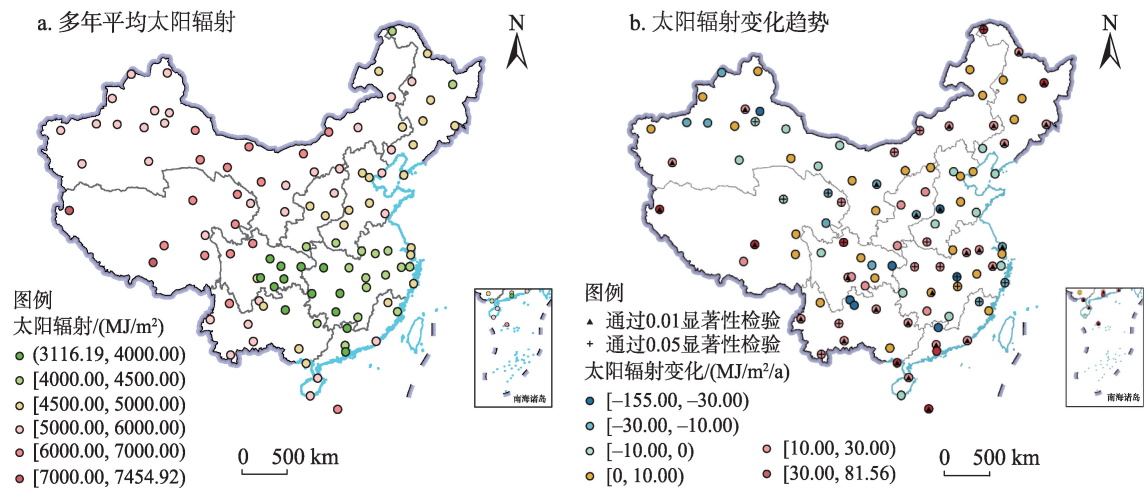


图2 1981—2016年中国104个辐射站点的多年平均太阳辐射及其变化趋势空间分布

Figure 2 Spatial distribution of multi-year average solar radiation and its variation trend of 104 radiation stations in China, 1981-2016

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1827号标准地图制作,底图边界无修改。

藏站年太阳辐射值最高(7454.92 MJ/m²)。太阳辐射次高值区由青藏高原区向北方干旱半干旱区延伸,区域年太阳辐射达5627.42±424.21 MJ/m²。造成这种分布特征的主要原因是:上述地区主要为西北沙漠地区,云量和降水量少,大气逆辐射较弱,导致大气对太阳辐射的削弱作用减弱。此外,云贵高原区的年太阳辐射在也较高(5126.01±754.34 MJ/m²),尤其是该区域西北部高值较为明显。与此相反,四川盆地及周边地区地势较低,云雨较多,削弱了太阳辐射到达地面的总量,为太阳辐射低值区,区域年太阳辐射均值为3505.45±1320.71 MJ/m²,其中重庆沙坪站太阳辐射值最低(3116.17

MJ/m²)。此外,长江中下游地区、东北平原区和黄淮海平原区为次低值区。

1981—2016年间,全国年太阳辐射总体呈先下降后上升的变化趋势(表1)。大部分区域在20世纪80年代经历了“变暗”,即年太阳辐射呈下降趋势。其中,黄淮海平原区和青藏高原区在1981—1990年时段内的年太阳辐射下降趋势最为明显;相反,四川盆地及周边地区和华南地区的年太阳辐射在该时段内总体呈上升趋势。1991—2016年,所有区域的年太阳辐射增加,呈“变亮”趋势,云贵高原区年太阳辐射上升趋势最为明显。1981—2016年,全国年太阳辐射值总体呈增加趋势,变化率为7.32±

表1 各农业区域不同时段太阳辐射变化 (MJ/m²/a)

Table 1 Trend of annual solar radiation in different periods and agricultural regions (MJ/m²/a)

农业区域	1981—1990年	1991—2016年	1981—2016年
东北平原区	-9.98±106.99	2.70±23.82	10.43±20.89
北方干旱半干旱区	-22.70±91.23	4.72±16.07	1.40±33.75
黄淮海平原区	-52.93±42.26	8.34±11.06	4.37±42.88
黄土高原区	-34.17±7.44	18.08±18.21	11.07±11.72
青藏高原区	-43.32±104.96	10.10±27.92	8.74±32.94
长江中下游地区	-30.36±78.74	3.49±13.98	5.95±26.99
四川盆地及周边地区	1.49±46.41	18.37±15.92	4.56±21.48
华南地区	3.62±75.14	7.74±25.03	18.60±31.16
云贵高原区	-37.34±76.77	20.01±17.00	12.57±29.97
全国	-28.04±83.57	7.63±19.34	7.32±30.31

注:数值为中值±标准差。

2022年2月

30.31 MJ/m²/a,所有农业区域均以增加趋势为主,但区域间差异明显。其中,华南地区和云贵高原区的年太阳辐射增加最明显,变化趋势值分别为18.60±31.16 MJ/m²/a和12.57±29.97 MJ/m²/a;而北方干旱半干旱区、黄淮海平原区和四川盆地及周边地区的年太阳辐射微弱增加,变化趋势值均低于5 MJ/m²/a。站点尺度上,全国有70个站点年太阳辐射呈增加趋势(图2b),其中35个站点增加趋势显著,包含在0.01水平上显著的23个站点,主要分布在东北平原区、东部沿海和云贵高原地区。年太阳辐射显著减

少的站点零星分布在北方干旱半干旱区中西部、长江中下游区和青藏高原区东南部,其中,宁夏银川站、山西侯马站和江苏吕泗站的年太阳辐射在0.01水平上显著下降。

3.2 不同时间尺度A-P公式校正及参数分布

日尺度和月尺度的A-P公式校正结果表明,所有站点A-P公式的校正均通过显著性检验($p<0.05$),但校正参数的数值和拟合效果存在差异。如表2所示,日尺度上,全国A-P公式校正参数 a_{sd} 中位数为0.18±0.04, b_{sd} 为0.55±0.05;超过70%的站点日

表2 全国及不同农业区域日尺度和月尺度A-P公式校正参数统计值

Table 2 Statistics of the calibrated parameters of the Ångström-Prescott (A-P) model at daily and monthly scales in different agricultural regions

区域	统计值	日尺度				月尺度			
		a_{sd}	b_{sd}	$a_{sd}+b_{sd}$	R^2	a_{sm}	b_{sm}	$a_{sm}+b_{sm}$	R^2
东北平原区	中位数	0.19	0.54	0.73	0.81	0.21	0.52	0.71	0.49
	标准差	0.04	0.03	0.04	0.05	0.05	0.11	0.08	0.15
	变异系数	0.21	0.05	0.06	0.06	0.26	0.21	0.11	0.31
北方干旱半干旱区	中位数	0.22	0.54	0.75	0.81	0.25	0.49	0.73	0.57
	标准差	0.04	0.05	0.03	0.05	0.06	0.06	0.03	0.15
	变异系数	0.18	0.08	0.04	0.07	0.22	0.14	0.04	0.26
黄淮海平原区	中位数	0.17	0.53	0.70	0.82	0.18	0.50	0.70	0.60
	标准差	0.02	0.03	0.02	0.04	0.04	0.07	0.04	0.19
	变异系数	0.14	0.05	0.03	0.05	0.22	0.14	0.06	0.32
黄土高原区	中位数	0.18	0.52	0.71	0.82	0.22	0.47	0.67	0.54
	标准差	0.02	0.01	0.02	0.06	0.07	0.09	0.03	0.20
	变异系数	0.12	0.03	0.03	0.08	0.29	0.21	0.05	0.39
青藏高原区	中位数	0.20	0.57	0.79	0.73	0.22	0.61	0.81	0.47
	标准差	0.05	0.06	0.05	0.18	0.07	0.11	0.06	0.28
	变异系数	0.24	0.10	0.06	0.27	0.38	0.19	0.08	0.56
长江中下游地区	中位数	0.14	0.56	0.71	0.86	0.14	0.58	0.71	0.85
	标准差	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.08
	变异系数	0.13	0.05	0.05	0.03	0.16	0.06	0.05	0.10
四川盆地及周边地区	中位数	0.16	0.59	0.75	0.82	0.16	0.61	0.77	0.87
	标准差	0.04	0.05	0.06	0.28	0.05	0.06	0.07	0.29
	变异系数	0.26	0.08	0.08	0.38	0.28	0.10	0.09	0.38
华南地区	中位数	0.16	0.54	0.69	0.81	0.15	0.54	0.70	0.79
	标准差	0.05	0.04	0.05	0.06	0.08	0.11	0.07	0.18
	变异系数	0.26	0.07	0.08	0.07	0.42	0.20	0.10	0.26
云贵高原区	中位数	0.18	0.55	0.75	0.83	0.17	0.56	0.74	0.85
	标准差	0.03	0.05	0.04	0.05	0.06	0.10	0.05	0.09
	变异系数	0.17	0.09	0.05	0.06	0.29	0.18	0.07	0.11
全国	中位数	0.18	0.55	0.73	0.82	0.19	0.53	0.72	0.67
	标准差	0.04	0.05	0.05	0.11	0.06	0.09	0.06	0.21
	变异系数	0.23	0.08	0.06	0.14	0.32	0.18	0.08	0.33

尺度 A-P 公式校正拟合系数 R^2 大于 0.80, 表明整体上 A-P 公式校正效果良好。区域上, 日尺度 A-P 公式校正参数 a_{sd} 在北方干旱半干旱区有最大值, 其次为青藏高原区, 而在长江中下游地区有最小值; 参数 b_{sd} 在四川盆地及周边地区最大, 其次为青藏高原区, 而黄淮海平原区最小。长江中下游地区日尺度 A-P 公式的拟合效果优于其他区域, 而青藏高原区尤其在西藏噶尔和那曲站点拟合效果较差。

与日尺度校正参数相比, 月尺度的 A-P 公式校正参数 a_{sm} 较大, 而参数 b_{sm} 整体偏小。如表 2 中拟合系数 R^2 所示, 月尺度拟合效果相比日尺度模型下降。区域上, 月尺度 A-P 公式校正参数 a_{sm} 在北方干旱半干旱区有最大值 (0.25 ± 0.06), 而在华南地区有最小值 (0.15 ± 0.08); 参数 b_{sm} 在青藏高原区和四川盆地及周边地区最大, 而在北方干旱半干旱区最小。月尺度 A-P 公式的校正效果在四川盆地及周边地区

最佳, 而在青藏高原区效果较差。

为进一步分析 A-P 公式校正参数的空间特征, 对校正参数与地理因子(经度, 纬度和海拔)进行偏相关分析(表 3)。结合相关分析结果和空间分布特征(图 3)可以看出, 参数 a_s 与经度在 0.01 水平上显著负相关, 与纬度在 0.01 水平上显著正相关, 总体呈东南低而西北高的空间分布特征(图 3a、3c)。参数 b_s 与经度相关关系不显著, 但日尺度校正参数 b_{sd}

表 3 校正参数与地理因子相关性分析

Table 3 Correlation analysis of the calibrated parameters and geographical factors

因子	a_{sd}	b_{sd}	a_{sm}	b_{sm}
经度	-0.36**	0.09	-0.36**	0.18
纬度	0.38**	-0.17	0.36**	-0.20*
海拔	0.31	0.28**	0.17	0.17

注: *表示通过 0.05 显著性检验, **表示通过 0.01 显著性检验。

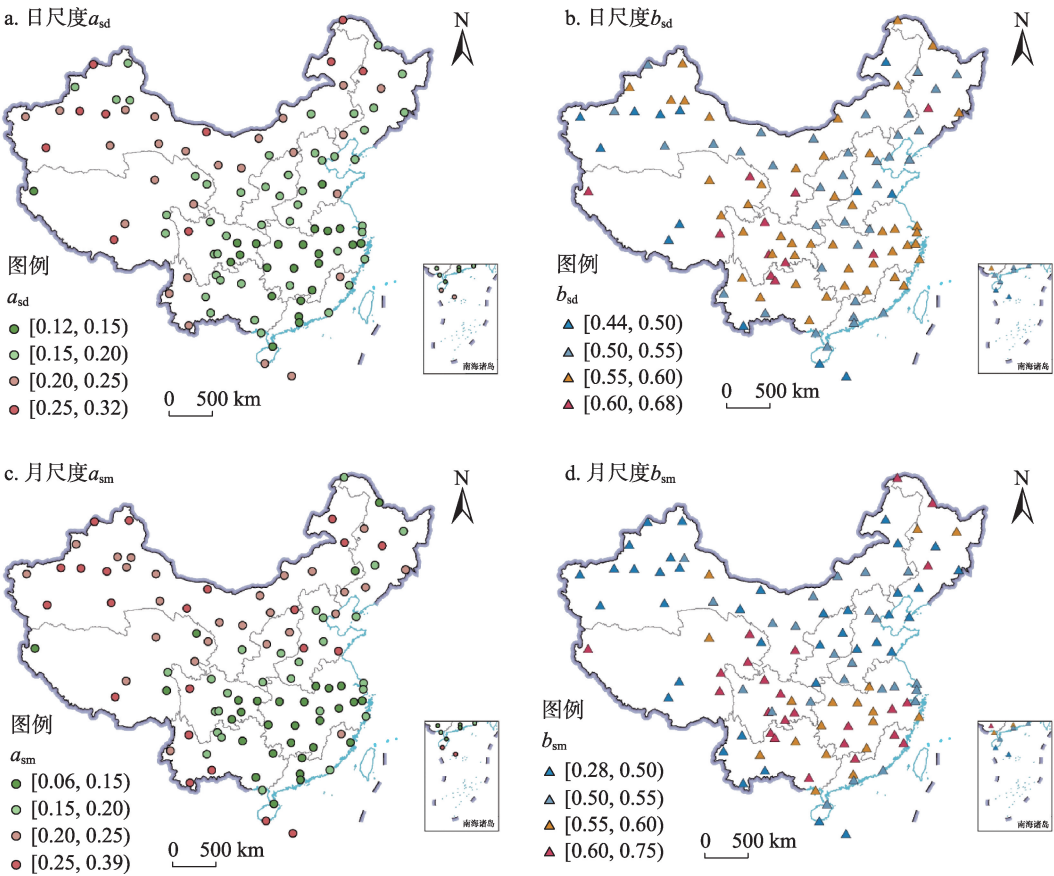


图 3 不同时间尺度 A-P 公式校正参数空间分布

Figure 3 Spatial distribution of the calibrated parameters of the Ångström-Prescott (A-P) model at different temporal scales

注: 基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2019)1827 号标准地图制作, 底图边界无修改。

2022年2月

与海拔在0.01水平上显著正相关,而月尺度校正参数 b_{sm} 与纬度在0.05水平上显著负相关,空间上大体呈现由东南向西北逐渐降低(图3b、3d)。然而,不同时间尺度的校正参数的空间异质性存在一定差异。如表2所示,全国所有站点的日尺度校正参数 a_{sd} 变异系数为0.23,表现为中等变异性; b_{sd} 的变异系数为0.08,为弱变异性;月尺度校正参数 a_{sm} 和 b_{sm} 的变异系数分别为0.32和0.18,呈中等变异性,均大于日尺度参数的变异系数,表明校正参数的空间异质性随时间尺度递增。

3.3 不同时间尺度校正参数适用性比较

日尺度校正参数应用到月尺度模型整体效果良好(图4a)。全国辐射超过一半站点拟合系数 $R^2 > 0.92$,其中 R^2 在东北平原区和北方干旱半干旱区均

较高,但在青藏高原区和华南区较低;所有站点的 NSE 均值为 0.83 ± 0.10 , NSE 同样在东北平原区(0.87 ± 0.03)和北方干旱半干旱区(0.86 ± 0.05)具有高值,而在青藏高原区以及四川盆地及其周边地区站点较低;全部站点的 $NRMSE$ 值均小于0.30,其中有16个站点的 $NRMSE$ 值低于0.10,表明日尺度校正参数应用于月尺度模型估算效果良好。

月尺度校正参数应用到日尺度模型效果如图4c所示。其中, R^2 结果显示东北平原区和北方干旱半干旱区模拟效果最优;全国超过60%的站点 $NSE > 0.75$,整体上模型具有较高的精确性,但青藏高原地区 NSE 低(0.58 ± 0.11),效果较差;全国所有站点的 $NRMSE$ 值在0.14~0.32之间,表明月尺度校正参数应用到日尺度模型整体效果良好,但青藏高

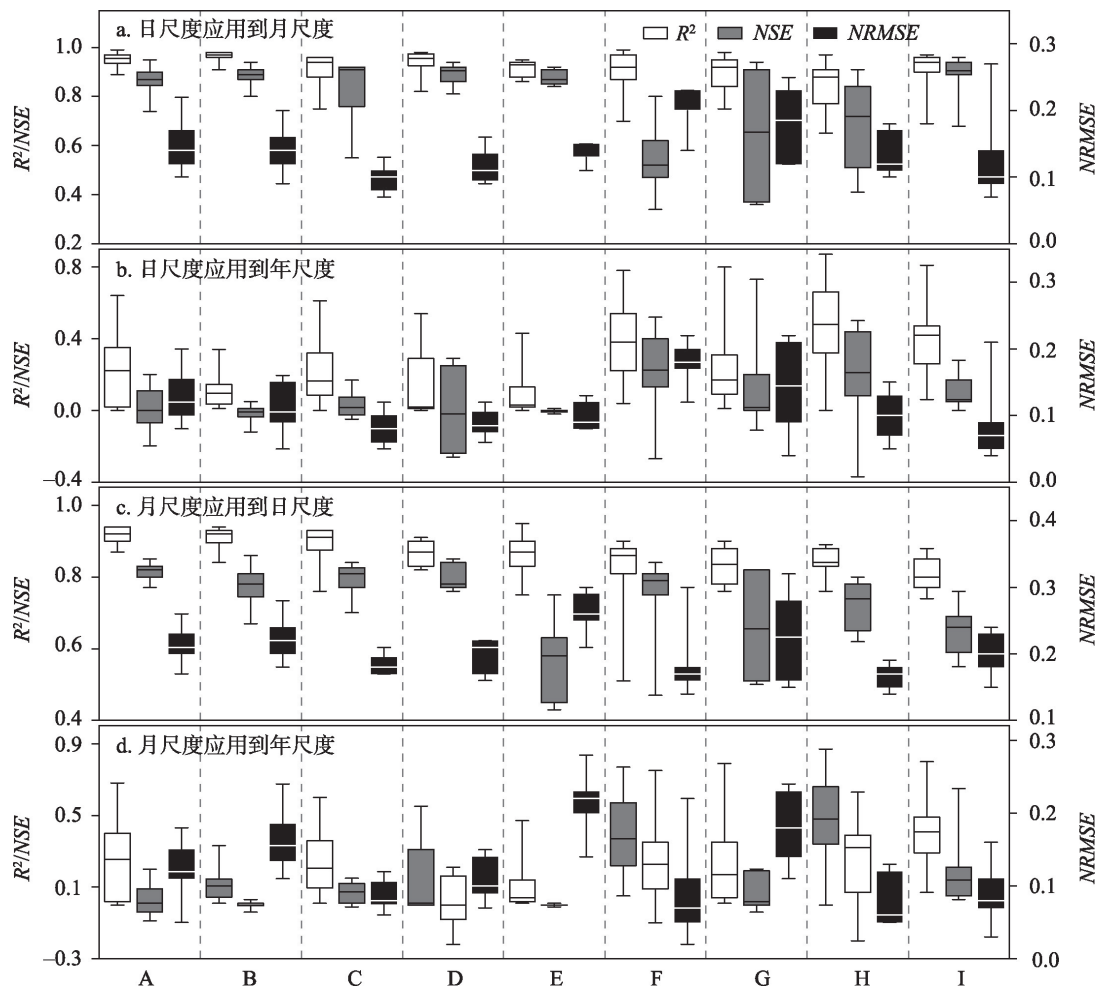


图4 不同时间尺度校正参数适用性的检验参数统计值

Figure 4 Statistics of the test results for the applicability of the calibrated parameters at different temporal scales

原地区部分站点的 $NRMSE > 0.30$, 适用性低于其他区域。此外, 日尺度和月尺度校正参数在年尺度模型不适用(图 4b、4d)。如将日尺度校正参数应用到年尺度模型时, 全国 NSE 平均值低于 0.10, 超过 30% 的站点出现负值, 且 R^2 均值小于 0.30; 将月尺度校正参数应用到年尺度模型时, 全国有 29 个站点的 $NSE < 0$, 超过 60% 站点的 $R^2 < 0.50$ 。

综上, 日尺度和月尺度校正参数具有良好的可互换性。其中, 日尺度校正参数应用到月尺度模型的适用性高于月尺度校正参数应用到日尺度模型, 而日尺度和月尺度校正参数在年尺度模型的应用效果差。此外, 青藏高原区和四川盆地及周边地区的部分站点在不同时间尺度校正的参数计算太阳辐射普遍产生较大的误差, 适用性弱。

4 讨论

中国作为农业大国, 种植面积广, 分析不同农业区域太阳辐射变化特征, 并对 A-P 公式进行本地化校正, 对提高作物模型模拟精度, 指导区域农业生产具有重要意义。本文结果表明, 全国年太阳辐射在研究时段内经历了一次由“变暗”到“变亮”的转变, 其主要原因可归结为 20 世纪 80 年代开放政策下工业发展造成的大气污染所产生的气溶胶负荷^[35], 经过近几十年的环境治理, 太阳辐射的下降趋势有所缓解并逐渐呈上升趋势。在研究时段内, 大部分农业区域太阳辐射呈现与全国基本一致的变化趋势, 但变化幅度存在差异。其中, 1990 年前黄淮海平原区的太阳辐射下降幅度最明显, 在 1991—2016 年间呈微弱上升趋势。太阳辐射下降会影响作物的生长发育和生产, 而该区是中国重要的粮仓之一, 因此在今后的生产管理中需要考虑太阳辐射变化的影响, 以保障粮食安全。

本文基于实测太阳辐射数据, 在日尺度和月尺度校正的 A-P 公式参数与前人研究结果基本一致^[21,28]。A-P 公式校正参数受地理位置和大气条件(如水汽和污染)等影响, 存在明显的空间差异^[32,33]。参数 a_s 受大气条件如湿度、含尘量、云层类型和厚度以及污染物浓度的影响^[34,36], 同时受经度和平均日照时数的影响程度较高^[37]; b_s 受海拔的影响, 主要取决于总含水量和浊度^[21]。本文中校正参数与地理因子相

关分析表明, 在全国尺度上, 参数 a_s 与纬度正相关, 与经度负相关, 此结论与前人基本一致^[21,22]。卫琦等^[37]对校正参数的地理分布特征分析表明, 受经度变化的影响, 相近纬度条件下太阳辐射呈现西侧数值大, 东侧数值小的分布特点; 且东侧是东南季风的迎风坡, 多阴雨天气, 西侧是背风坡, 多晴朗天气, 故由经度引起的天气状况是东西侧太阳辐射产生差异的主要影响因素; 而海拔高度决定了空气的稀薄程度与透明度以及大气对太阳辐射的削弱作用, 最终影响到达地面的太阳辐射。值得注意的是, 参数校正模型在青藏高原区站点的拟合效果较差, 其主要原因是海拔和水汽压对 A-P 公式校正参数的影响^[21,38]。青藏高原地形复杂, 海拔被认为是影响 A-P 公式参数的主要因素^[21], 同时, 受气团影响而剧烈变化的水汽压对辐射传输产生影响, 导致模型精度降低^[38]。此外, 四川盆地及其周边地区的部分站点 A-P 校正参数适用性较差, 主要原因为该区气候多变, 盆地层积云覆盖范围大, 云量和相对湿度的变化对太阳辐射与日照时间的关系产生较大影响^[39]。为提升区域太阳辐射经验模型的模拟精度, 在不同区域建立校正参数对驱动因素的敏感性模型是有效途径之一^[19,38,40]。已有学者开展了构建驱动因素—参数模型的工作, 但缺乏一致的结论, 有待深入评估校正参数对驱动因素敏感性的区域差异及其模拟精度。

A-P 公式校正参数存在时间依赖性。由于影响参数的大气因素在一年中经常发生变化, A-P 公式参数通常被认为在一年中有所不同^[29], 大部分学者认为时间依赖性的参数会更准确地描述 n/N 和 R_s/R_a 的关系, 具有更高的预测准确性^[26]。本文中参数的时间依赖性表现明显, 日尺度和月尺度校正参数具有可互换性。但在年度尺度上, 大多数地点的 n/N 和 R_s/R_a 之间的关系不宜用线性 A-P 模型描述, 这与 Liu 等^[28]在黄河流域研究得出的日尺度和月尺度下校正的参数可互换、但将日尺度下的参数运用到年尺度效果较差的结论一致。此外, Li 等^[29]表明在可接受的精度下, 日尺度校正参数应用到月尺度内(如 5 天、10 天), 模型具有普遍适用性。然而, 当月尺度数据用于校正 A-P 公式参数时, 如果气候时间

2022年2月

序列不够长,可能降低模型计算精度^[41];而日尺度模型的校正对时间年限要求较低,相比更大的时间尺度模型在时间年限上有优势^[31]。本文结果表明,部分站点的月尺度校正参数应用到日尺度模型时效果较差,主要原因是辐射观测年限较短,采用月尺度数据校正A-P公式参数时准确度下降。因此,将月尺度校正参数计算的太阳辐射数据作为作物模型输入变量时可能降低模型模拟的准确性。太阳辐射模型的校正最终服务于指导作物生产,不同时间尺度太阳辐射模型校正模拟的准确性对作物产量的影响还有待进一步深入研究。

此外,在“变暗”和“变亮”的背景下,由于大气环境由清洁变脏,太阳辐射与日照时数的关系可能发生变化^[35]。分别用1981—1990年和1991—2000年两个时段的日实测数据对A-P公式进行校正,与采用1981—2000年数据校正的结果相比,不同时段的校正参数 a_s 具体表现为,1981—1990年<1981—2000年<1991—2000年,拟合参数 R^2 与此一致,而参数 b_s 则相反,表明1981—1990年的大气污染对太阳辐射与日照时数的关系产生影响,但随着空气质量的改善,影响逐渐减弱。青藏高原区的太阳辐射总体呈上升趋势,但在20世纪80年代显著下降^[42],这可能也是导致该区A-P公式拟合效果较差的原因之一。综上,探究不同背景时段内太阳辐射和日照时数的关系对提高太阳辐射模拟精度具有重要意义,今后将考虑使用移动线性回归等方法深入研究各农业区域不同时段A-P公式参数的变化及其对太阳辐射计算和作物模型模拟的影响。

5 结论

基于中国九大农业区划和104个辐射站点实测辐射资料,分析了中国1981—2016年太阳辐射的时空分异特征,采用最小二乘回归法分别在日和月尺度校正A-P公式,并检验评估不同农业区域的拟合效果和参数适用性。主要结论如下:

(1)研究时段内中国年太阳辐射存在明显的时空分异特征,总体呈先下降后上升的时间变化趋势,空间上呈西部高东部低的特征,青藏高原区为太阳辐射高值区,四川盆地及周边地区为低值区。

(2)A-P公式校正参数 a_s 与经度显著负相关,与

纬度显著正相关,参数 b_s 与海拔呈正相关关系;日尺度A-P公式校正拟合效果优于月尺度,校正参数的空间异质性随着时间尺度递增。

(3)日尺度和月尺度A-P校正参数具有可互换性,而在年尺度上线性A-P公式不再适用,且研究时段的选取将影响太阳辐射与日照时数的关系。

参考文献(References):

- [1] 陶苏林, 戚易明, 申双和, 等. 中国1981—2014年太阳总辐射的时空变化[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(11): 143–147. [Tao S L, Qi Y M, Shen S H, et al. The spatial and temporal variation of solar radiation over China from 1981 to 2014[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(11): 143–147.]
- [2] 郭映, 董阳, 党慧慧, 等. 基于不同时间尺度玉米蒸散蒸腾量及其影响因素[J]. 资源科学, 2014, 36(7): 1501–1508. [Guo Y, Dong Y, Dang H H, et al. Evapotranspiration and transpiration of maize in two time scales and the environmental effects[J]. Resources Science, 2014, 36(7): 1501–1508.]
- [3] 郭梦瑶, 余敦先, 张利平, 等. 渭河流域潜在蒸散量变化的气候归因[J]. 资源科学, 2020, 42(5): 907–919. [Guo M Y, She D X, Zhang L P, et al. Climate explanation of the potential evapotranspiration changes in Weihe River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(5): 907–919.]
- [4] Despotovic M, Nedic V, Despotovic D, et al. Review and statistical analysis of different global solar radiation sunshine models[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 52: 1869–1880.
- [5] 应王敏, 刘晓洁, 房世峰, 等. 基于机器学习的日尺度短波净辐射气候资源遥感反演研究[J]. 资源科学, 2020, 42(10): 1998–2009. [Ying W M, Liu X J, Fang S F, et al. Retrieval of daily net surface shortwave radiation climatic resources based on machine learning[J]. Resources Science, 2020, 42(10): 1998–2009.]
- [6] Hove T, Manyumbu E, Rukweza G. Developing an improved global solar radiation map for Zimbabwe through correlating long-term ground-and satellite-based monthly clearness index values[J]. Renewable Energy, 2014, 63: 687–697.
- [7] 吴立峰, 王娟, 张富仓, 等. 几种模型在南方地区总辐射量估算中的精度分析[J]. 中国农业气象, 2017, 38(3): 150–162. [Wu L F, Wang J, Zhang F C, et al. Accuracy analysis of several global solar radiation models based on empirical and GRNN methods in south China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(3): 150–162.]
- [8] 张青雯, 崔宁博, 冯禹, 等. 基于气象资料的日辐射模型在中国西北地区适用性评价[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 189–196. [Zhang Q W, Cui N B, Feng Y, et al. Evaluation on applicability of

- daily solar radiation model in Northwest China based on meteorological data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(2): 189–196.]
- [9] Hassan M A, Khalil A, Kaseb S, et al. Independent models for estimation of daily global solar radiation: A review and a case study [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 1565–1575.
- [10] Paulescu M, Stefu N, Calinoiu D, et al. Ångström–Prescott equation: Physical basis, empirical models and sensitivity analysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 62: 495–506.
- [11] Fan J L, Chen B Q, Wu L F, et al. Evaluation and development of temperature: Based empirical models for estimating daily global solar radiation in humid regions[J]. Energy, 2018, 144: 903–914.
- [12] Chen J L, He L, Yang H, et al. Empirical models for estimating monthly global solar radiation: A most comprehensive review and comparative case study in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 108: 91–111.
- [13] Zhang J Y, Zhao L, Zhang Y, et al. A critical review of the models used to estimate solar radiation[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 70: 314–329.
- [14] Makade R G, Jamil B. Statistical analysis of sunshine based global solar radiation (GSR) models for tropical wet and dry climatic region in Nagpur, India: A case study[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 87: 22–43.
- [15] Prescott J A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation[J]. Transactions of the Royal Society of South Australia, 1940, 64: 114–118.
- [16] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration—Guidelines for Computing Crop Water Requirements[M]. Rome: FAO, 1998.
- [17] 罗红英, 李丹, 崔远来, 等. 西藏农业区Ångström–Prescott公式参数选取研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 149–155. [Luo H Y, Li D, Cui Y L, et al. Study on parameter selection of Ångström–Prescott in Tibet agricultural region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(3): 149–155.]
- [18] 赵娜, 王治国, 张复明, 等. 海河流域太阳辐射计算模型评估及时空变异规律[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(3): 53–58. [Zhao N, Wang Z G, Zhang F M, et al. Calculation model evaluation and spatial–temporal variations of solar radiation in Haihe Basin[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2017, 40(3): 53–58.]
- [19] Liu Y J, Tan Q H, Pan T. Determining the parameters of the Ångström–Prescott model for estimating solar radiation in different regions of China: Calibration and modeling[J]. Earth and Space Science, 2019, 6(10): 1976–1986.
- [20] 夏兴生, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 基于年内尺度的中国大陆地区Ångström公式参数校正与优选[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 123–130. [Xia X S, Zhu X F, Pan Y Z, et al. Calibrating and optimizing the parameters in Ångström equation for calculating evapotranspiration from Chinese mainland[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(1): 123–130.]
- [21] Liu X Y, Li Y Z, Zhong X L, et al. Towards increasing availability of the Ångström–Prescott radiation parameters across China: Spatial trend and modeling[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 87: 975–989.
- [22] 黄仲冬, 郭乙霏, 张彦, 等. 基于Ångström–Prescott公式的中国太阳辐射与日照时间的关系研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(4): 77–83. [Huang Z D, Guo Y F, Zhang Y, et al. Using the Ångström–Prescott formula to calculate solar radiation from sunshine duration in China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(4): 77–83.]
- [23] Mousavi R, Sabziparvar A A, Marofi S, et al. Calibration of the Ångström–Prescott solar radiation model for accurate estimation of reference evapotranspiration in the absence of observed solar radiation[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 119(1): 43–54.
- [24] Makade R G, Chakrabarti S, Jamil B. Prediction of global solar radiation using a single empirical model for diversified locations across India[J]. Urban Climate, 2019, DOI: 10.1016/j.uclim.2019.100492.
- [25] 李茂芬, 李玉萍, 郭澎涛, 等. 逐日太阳总辐射估算方法研究进展[J]. 热带作物学报, 2015, 36(9): 1726–1732. [Li M F, Li Y P, Guo P T, et al. Advances in daily global solar radiation estimating [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2015, 36(9): 1726–1732.]
- [26] Wang J, Wang E L, Yin H, et al. Differences between observed and calculated solar radiations and their impact on simulated crop yields[J]. Field Crops Research, 2015, 176: 1–10.
- [27] 向友珍, 吴立峰, 张富仓, 等. 基于常规气象资料估算南方地区日辐射总量方法比较[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 181–192. [Xiang Y Z, Wu L F, Zhang F C, et al. Comparison of total radiation estimation methods in south area based on conventional meteorological data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 181–192.]
- [28] Liu X Y, Mei X R, Li Y Z, et al. Calibration of the Ångström–Prescott coefficients (a , b) under different time scales and their impacts in estimating global solar radiation in the Yellow River Basin [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(3): 697–710.
- [29] Li M F, Fan L, Liu H B, et al. Impact of time interval on the Ångström–Prescott coefficients and their interchangeability in estimating radiation[J]. Renewable Energy, 2012, 44: 431–438.
- [30] Manzano A, Martín M L, Valero F, et al. A single method to estimate the daily global solar radiation from monthly data[J]. Atmosphere Research, 2015, 166: 70–82.

2022年2月

- [31] 张佳飞. 多时间尺度太阳辐射估算模型[D]. 重庆: 西南大学, 2013. [Zhang J F. Estimation Models of Solar Radiation at Different Time Scales[D]. Chongqing: Southwest University, 2013.]
- [32] 张亚丽, 田义超, 林俊良, 等. 1961–2017年广西北部湾海岸带太阳总辐射时空动态特征[J]. 生态科学, 2020, 39(4): 145–155. [Zhang Y L, Tian Y C, Lin J L, et al. Temporal-spatial dynamic change characteristics of solar radiation in Beibu Gulf coastal zone during 1961–2017[J]. Ecological Science, 2020, 39(4): 145–155.]
- [33] 毛飞, 赵玉金, 孙涵, 等. 1961–2010年中国Ångström-Prescott系数时空变化特征[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(1): 43–51. [Mao F, Zhao Y J, Sun H, et al. Spatial and temporal change characteristics of Ångström-Prescott coefficients in China in 1961–2010[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2016, 39(1): 43–51.]
- [34] Liu X Y, Mei X R, Li Y Z, et al. Choice of the Ångström-Prescott coefficients: Are time-dependent ones better than fixed ones in modeling global solar irradiance?[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51: 2565–2574.
- [35] Liu J D, Linderholm H, Chen D L, et al. Changes in the relationship between solar radiation and sunshine duration in large cities of China[J]. Energy, 2015, 82: 589–600.
- [36] 夏兴生, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 中国综合农业分区下的Ångström-Prescott公式系数逐月校正与优选[J]. 地理学报, 2021, 76(4): 888–902. [Xia X S, Pan Y Z, Zhu X F, et al. Monthly calibration and optimization of Ångström-Prescott equation coefficients for agricultural comprehensive area in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(4): 888–902.]
- [37] 卫琦, 徐俊增, 彭世彰, 等. Ångström公式参数率定及其随经度与海拔的变化[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(2): 6–10. [Wei Q, Xu J Z, Peng S Z, et al. Calibration of Ångström coefficients and its variation with longitude and altitude[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(2): 6–10.]
- [38] Liu J D, Pan T, Chen D L, et al. An improved angstrom-type model for estimating solar radiation over the Tibetan Plateau[J]. Energies, 2017, 10(7), 892–892.
- [39] 熊燕琳, 周筠珩. 四川地区地面太阳总辐射时空分布及气象影响因素研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(12): 162–171. [Xiong Y L, Zhou Y J. Temporal-spatial distribution of ground surface total solar radiation and meteorological influencing factors for Sichuan area[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2020, 41(12): 162–171.]
- [40] 刘媛媛, 胡琦, 和骅芸, 等. 中国不同时间尺度地表太阳总辐射估算研究[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(2): 175–183. [Liu Y Y, Hu Q, He H Y, et al. Estimation of total surface solar radiation at different time scales in China[J]. Climate Change Research, 2021, 17(2): 175–183.]
- [41] De Souza J L, Lyra G B, Dos Santos C M, et al. Empirical models of daily and monthly global solar irradiation using sunshine duration for Alagoas State, Northeastern Brazil[J]. Sustainable Energy Technology, 2016, 14: 35–45.
- [42] 于海敬, 程梦笛, 张庆国, 等. 西藏日太阳总辐射估算模型的优化与时间尺度效应[J]. 地球与环境, 2019, 47(1): 43–49. [Yu H J, Cheng M D, Zhang Q G, et al. Estimation model optimization for daily total solar radiation in Tibet and time-scale effects[J]. Earth and Environment, 2019, 47(1): 43–49.]

Spatiotemporal changes of solar radiation and the adaptability comparison of Ångström–Prescott calibration parameters at different temporal scales in China

TAN Qinghua^{1,2}, LIU Yujie^{1,2}, SONG Xianfang^{2,3}, PAN Tao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Daily solar radiation is a key input variable for crop models. Calibration for the parameters of the Ångström-Prescott model (A-P model), one of the most widely used models for calculating solar radiation, is mostly based on monthly solar radiation data. Investigation on calibrating the parameters at different temporal scales and analyzing their applicability is needed for improving the accuracy of solar radiation calculation and crop model simulation. Based on observed data of solar radiation and sunshine time of 104 radiation stations in China from 1981 to 2016, the spatiotemporal changes of observed solar radiation were analyzed. The parameters(a_s and b_s) of the A-P model were calibrated at different temporal scales, and their adaptability was evaluated. The results show that: (1) In China, average annual solar radiation was high in the west and low in the east. Annual solar radiation experienced a transition from “dimming” to “brightening” around 1990, with an overall increase rate of $7.32 \pm 30.31 \text{ MJ/m}^2/\text{a}$ during the study period; (2) The performance of A-P model calibration at the daily scale was better than that at the monthly scale, and the spatial heterogeneity of calibrated parameters was obvious at the monthly scale. In addition, the calibrated parameter a_s decreased with increasing longitude, and increased with increasing latitude, showing a spatial pattern of low in the southeast and high in the northwest; the spatial distribution of b_s was positively correlated with altitude; (3) The parameters calibrated at the daily and monthly scales are interchangeable; however, the linear A-P model was no longer applicable at the annual scale. This study is helpful for improving the accuracy of solar radiation calculation and providing some guidance for regional agricultural production.

Key words: solar radiation; Ångström-Prescott model; parameterization; multi-scale; applicability; agricultural regionalization; China