

# 中国综合农业分区下的Ångström-Prescott公式 系数逐月校正与优选

夏兴生<sup>1,2</sup>, 潘耀忠<sup>1,2</sup>, 朱秀芳<sup>1,3</sup>, 张锦水<sup>1,3</sup>

(1. 北京师范大学地理科学学部 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875; 2. 青海师范大学高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810008; 3. 北京师范大学地理科学学部 遥感科学与工程研究院, 北京 100875)

**摘要:** Ångström-Prescott公式是联合国粮食及农业组织(FAO)推荐的计算地表有效总太阳辐射( $R_s$ )数据以支持参考作物需水量估算等研究的简便方法。本文以优选中国综合农业分区的Ångström-Prescott公式系数 $a_s$ 、 $b_s$ 为目标,采用最小二乘回归方法,以全国范围内121个地面气象站点1957—2010年的逐月 $R_s$ 和日照百分比数据计算获得了各农业区的逐月 $a_s$ 、 $b_s$ 系数,并以2011—2016年的 $R_s$ 观测值为真值,比较验证了分别以 $a_s$ 、 $b_s$ 系数回归值和FAO的建议值计算的 $R_s$ 相对精度。结果表明,38个农业子区逐月的站点平均 $a_s$ 、 $b_s$ 系数取值无论是在时间上还是在空间上均存在不稳定性,且与FAO的推荐值存在明显差异。整体上,以 $a_s$ 、 $b_s$ 系数回归值计算的 $R_s$ 相对精度要优于FAO的建议值计算的 $R_s$ 相对精度,但是在各农业子区内,前者并不是在所有月份均优于后者。综合考虑二者的精度比较结果,建议在全国大规模的实践中,东北区、内蒙古及长城沿线区、黄淮海区、黄土高原区、甘新区仍然使用FAO推荐的Ångström-Prescott公式系数,而在长江中下游区、西南区、华南区、青藏区则建议以校正后的站点均值作为Ångström-Prescott公式的系数;在局部区域高精度的计算中,建议使用优选值作为Ångström-Prescott公式的系数以获得最优的 $R_s$ 估算值。本研究方法简单、可操作性强,在现有的数据条件下,对提高地表太阳辐射和参考作物需水量的计算精度有一定的参考价值。

**关键词:** 太阳辐射; Ångström-Prescott公式; 系数校正; 中国

DOI: 10.11821/dlxb202104008

## 1 引言

太阳辐射是地表圈层(大气圈、水圈和生物圈)一切生物、物理和化学过程中最主要的能量来源<sup>[1]</sup>,也是支持人类社会实现可持续发展的绿色能源之一<sup>[2]</sup>。精确测量或估算高时空分辨率的太阳辐射( $R_s$ )对研究地表环境的变化、粮食的安全生产、太阳能工程的实施等具有极其重要的意义<sup>[2-4]</sup>。许多国家也为此建立了 $R_s$ 观测体系,但因为投资和维护成本高,能够持续投入进行 $R_s$ 观测的站点密度太低<sup>[5]</sup>。以中国为例,仅国家级气象站点就超过2400个,但是中国气象数据网发布的辐射数据集只包含130个站点的辐射观测数据。为此,众多研究者发展了模型来估算 $R_s$ ,通过模型估算 $R_s$ 相比观测 $R_s$ 的性价比更高<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2019-11-08; 修订日期: 2020-10-03

基金项目: 国家高分辨率对地观测系统重大专项; 青海省中央引导地方科技发展专项; 中国人民财产保险股份有限公司灾害研究基金项目(2017D24-03) [Foundation: National High Resolution Earth Observation System Technology Projects of China; Local Scientific & Technological Development Projects of Qinghai Guided by Central Government of China; Disaster Research Foundation of PICC P&C, No.2017D24-03]

作者简介: 夏兴生(1989-), 男, 甘肃庆阳人, 博士, 讲师, 主要从事作物需水量遥感估算研究。

E-mail: xiayuan1104@163.com

通讯作者: 朱秀芳(1982-), 女, 浙江天台人, 博士, 副教授, 主要从事农业和灾害遥感研究。E-mail: zhuxiufang@bnu.edu.cn

目前,已经发展出的模型包括遥感反演模型<sup>[6]</sup>、随机仿真模型<sup>[7]</sup>、经验模型<sup>[8-10]</sup>和机器学习模型<sup>[11]</sup>等。其中基于日照时数和温度的经验模型因其简单易用而得到广泛推广<sup>[12]</sup>,且以Ångström-Prescott公式的结果表现最好<sup>[13-16]</sup>。此外,联合国粮食及农业组织(FAO)推荐的参考作物需水量( $ET_0$ )计算方案中,也建议由Ångström-Prescott公式来计算研究或应用区缺失的 $R_s$ <sup>[17]</sup>。因此,在Ångström-Prescott公式中 $a_s$ 、 $b_s$ 系数对准确估算 $R_s$ 至关重要。

现有研究中 $a_s$ 、 $b_s$ 系数的确定方式主要有两种:在没有实测太阳辐射资料的地区,直接采用Ångström及FAO 56的建议值<sup>[17-23]</sup>,即 $a_s = 0.25$ ,  $b_s = 0.50$ ;但是地表引力分布不均和长期的气候及短期的季节变化造成了大气层组分的时空差异,全球固定的 $a_s$ 、 $b_s$ 具有明显的缺陷。在有实测太阳辐射资料的地区,则采用实测数据进行 $a_s$ 、 $b_s$ 系数的本地化校正,且校正后的系数能够很好地体现大气状况的时空差异对 $R_s$ 的影响<sup>[24-26]</sup>。因此,Ångström-Prescott公式的系数校正受到了科学家的广泛关注。

有研究者通过分析影响 $R_s$ 的因子,将地形<sup>[27]</sup>、气温<sup>[28]</sup>、相对湿度<sup>[29]</sup>和水汽压<sup>[27]</sup>等地理因子<sup>[30-32]</sup>或气象因子<sup>[33]</sup>引入到Ångström-Prescott公式系数的校正中,证明了Ångström-Prescott公式系数受地理(如海拔)和气候/天气因素(如云量)的影响在不同地区之间存在较大差异,并基于其研究假设和公式校正方案给出了建议的公式系数<sup>[34]</sup>。但还有部分研究<sup>[35-40]</sup>指出由于不同变量之间存在相关性,引入其他因子的复杂模型与原有的Ångström-Prescott模型相比,并没有表现出明显的优势<sup>[41-42]</sup>。因此,简单易行的传统回归校正方法仍然被许多研究采用<sup>[42]</sup>。例如,Yin等<sup>[43]</sup>基于回归分析法对1971—2000年中国81个站点的数据分析认为全国固定的 $a_s$ 、 $b_s$ 分别取0.20和0.79时验证误差最小;胡庆芳等<sup>[44]</sup>基于类似的方法讨论了中国不同区域的 $a_s$ 和 $b_s$ 取值。在小区域尺度上,Liu<sup>[45]</sup>、曹雯等<sup>[46]</sup>、袁宏伟等<sup>[47]</sup>、李曼曼等<sup>[48]</sup>和彭世彰等<sup>[49]</sup>分别探讨了黄河流域、安徽、云南、江苏等区域的 $a_s$ 和 $b_s$ 校正值。这些研究虽然证明了FAO推荐的 $a_s$ 和 $b_s$ 系数具有显著的应用误差,且以有限的观测数据分析获得的 $a_s$ 和 $b_s$ 校正值能够降低这一误差,却大都集中在以年为单位的时间尺度上,忽视了 $a_s$ 和 $b_s$ 值在年内是否会随时间发生变化的问题,只有少数研究关注了该问题<sup>[50]</sup>。例如,Liu等<sup>[42]</sup>基于中国北方20个观测站的数据分析表明,年内固定的 $a_s$ 和 $b_s$ 系数可以获得较好的 $R_s$ 计算精度,并减少了模型不必要的复杂性,便于推广应用。但是,中国处于典型的季风气候区,到达地表的太阳辐射年内存在显著变化,在部分区域年内采用统一的 $a_s$ 、 $b_s$ 值可能导致 $R_s$ 估算的季节性误差<sup>[51]</sup>。例如,Li等<sup>[52]</sup>基于长江流域15个站点的观测数据研究表明, $a_s$ 和 $b_s$ 系数在年内会随时间的变化而变化,且基于较短的时间间隔尺度获得的 $a_s$ 和 $b_s$ 系数可以用于估计较长时间间隔尺度的 $R_s$ 。此外,年内固定的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数估算的 $R_s$ 如果直接应用到 $ET_0$ 的计算中,也会由于误差传递而影响到 $ET_0$ 的计算结果<sup>[51]</sup>。因此,全国范围年内 $a_s$ 、 $b_s$ 值的时空变化还需再讨论。

基于以上分析,本文以支持 $ET_0$ 计算为目的,并考虑现有研究中的区域划分与中国的任何农业区划都不匹配的问题,将中国综合农业区划的9个一级农业区38个农业子区作为分区基准,采用最小二乘回归方法计算各农业子区不同月份 $a_s$ 、 $b_s$ 系数的校正值,在此基础上探讨 $a_s$ 、 $b_s$ 在各区的变化特征,并通过与FAO建议值的误差对比,给出逐月逐区的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数最佳校正值,为计算高精度的 $R_s$ 提供参数基础。

## 2 数据来源及预处理

### 2.1 数据来源

根据Ångström-Prescott公式,本文中所使用的数据包括:①1957—2016年的中国辐射月值数据集(共130个站点)中的逐月有效太阳总辐射数据,其中2011年之前的数据

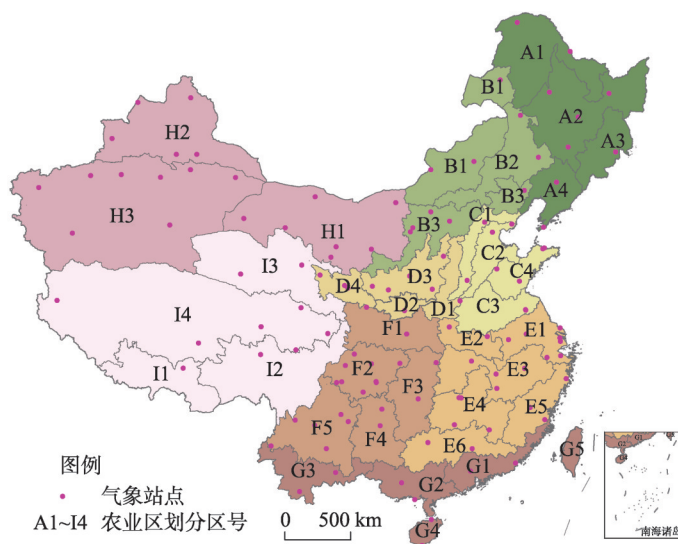
用来推算 $a_s$ 、 $b_s$ 系数, 2011—2016年的数据用来验证以推算的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数计算的 $R_s$ 精度; ② 1957—2016年的中国地面气候资料月值数据集(共756个站点)中逐月的日均日照百分比数据, 作为Ångström-Prescott公式的输入数据; ③ 站点的经纬度数据, 用来计算 $R_a$ 。以上3个数据均来自中国气象数据共享网(<http://data.cma.cn/>); ④ 全国农业委员会发布的《中国综合农业区划图》(图1), 作为本文的农业分区基础。

$$R_s = \left( a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (1)$$

式中:  $n$ 为实际日照持续时间(hour);  $N$ 为最大可能的日照持续时间或日照时数(hour);  $n/N$ 为相对日照持续时间, 也称日照百分率;  $R_a$ 为天顶辐射, 可由站点经纬度计算得到;  $a_s$ 和 $b_s$ 为经验系数;  $a_s + b_s \frac{n}{N}$ 表示太阳辐射的大气透过率。

## 2.2 数据预处理与系数校正过程

数据预处理包括: ① 将站点有效太阳辐射观测值转换为逐月的日均值, 并基于站点编号与日照百分比数据关联。② 根据FAO建议的以日为时段的天顶辐射计算程序求得各站点逐月的日平均 $R_a$ 值<sup>[17]</sup>。③ 理论上, 由于大气层的存在, 地面观测的太阳辐射肯定要小于天顶辐射, 但在实际观测中, 因为仪器设备本身的损耗、损坏或观测操作的错误, 致使个别站点观测的地面太阳辐射值大于天顶辐射值, 在研究中对此进行剔除。最终, 通过站点的关联和数据的筛选得到的中国大陆地区具有有效数据的站点个数为121个(图1)。④ 农业区划则以《中国综合农业区划图》及中国1:25万行政区划矢量数据为基准, 在Albers等积投影下进行空间校正后得到本文所需的分区矢量数据。



注: 基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2016)2923号的标准地图制作, 底图无修改。

A 东北区: A1 兴安岭区, A2 松嫩三江平原区, A3 长白山山地区, A4 辽宁平原区; B 内蒙古及长城沿线区: B1 内蒙古北部区, B2 内蒙古中南部, B3 长城沿线区; C 黄淮海区: C1 燕山太行山山麓平原区, C2 冀鲁豫低洼平原区, C3 黄淮平原区, C4 山东丘陵区; D 黄土高原区: D1 晋东豫西丘陵区, D2 汾渭谷地区, D3 晋陕甘黄土丘陵区, D4 陇中青东丘陵区; E 长江中下游区: E1 长江下游平原区, E2 豫鄂皖低山区, E3 长江中游平原区, E4 江南丘陵区, E5 浙闽丘陵区, E6 南岭丘陵区; F 西南区: F1 秦岭大巴山区, F2 四川盆地, F3 川鄂湘黔边境区, F4 黔桂高原山地区, F5 川滇高原山地区; G 华南区: G1 闽南粤中区, G2 粤西桂南区, G3 滇南区, G4 琼雷及南海诸岛区, G5 台湾; H 甘新区: H1 蒙宁甘区, H2 北疆区, H3 南疆区; I 青藏区: I1 藏南区, I2 川藏区, I3 青甘区, I4 青藏高寒区。

图1 中国综合农业区划及数据站点位置示意

Fig. 1 Location of agricultural comprehensive areas and data stations in China

Ångström-Prescott公式系数校正过程主要包括:数据预处理, $a_s$ 、 $b_s$ 系数的回归计算, $R_s$ 估算结果的验证,各分区逐月 $a_s$ 、 $b_s$ 系数的确定4个部分。具体为:①数据预处理。② $a_s$ 、 $b_s$ 系数的回归计算。基于2011年之前的月太阳总辐射数据和月平均每天的日照百分率数据,采用最小二乘回归方法,逐站点估算 $a_s$ 、 $b_s$ 系数;再按照农业区划统计得到各分区内站点 $a_s$ 、 $b_s$ 系数的平均值作为各农业分区的 $a_s$ 和 $b_s$ 率定值。③ $R_s$ 估算结果的验证。按照Ångström-Prescott公式,基于2011—2016年逐站点逐月的日照百分比观测值、天顶辐射计算值,分别以上一步获得的各农业分区 $a_s$ 、 $b_s$ 系数和FAO的推荐值,计算得到两组 $R_s$ 计算值,并以2011—2016年的 $R_s$ 观测值为基准分析比较二者的相对误差,以达到验证 $a_s$ 、 $b_s$ 系数回归结果可靠性和适用性的目的。④各农业区逐月 $a_s$ 、 $b_s$ 系数的确定。逐区逐月对比最小二乘回归得到的 $a_s$ 和 $b_s$ 系数和FAO建议的 $a_s$ 和 $b_s$ 系数估算的太阳辐射的误差,选择估算误差小的 $a_s$ 和 $b_s$ 系数值作为最终的优选系数。

### 3 结果与分析

#### 3.1 Ångström-Prescott公式系数回归结果

基于最小二乘回归逐月率定的各农业分区站点平均 $a_s$ 、 $b_s$ 系数结果如图2所示。整体上来看, $a_s$ 、 $b_s$ 系数的回归取值在同一农业区的不同月份间存在差异性,在不同农业区的同一月份之间也存在明显的差异。

东北区(A区)整体表现为系数 $a_s$ 相对稳定,而 $b_s$ 波动较大。对系数 $a_s$ 而言,A1区表现为冬、春月份较高,夏、秋月份较低,而其他3个区则表现为从1月份开始逐渐降低至小于0.25后,5月份至8月份又升高至0.25左右,9—10月份出现一个小的回落后在11—12月升高并超过0.25。对系数 $b_s$ 而言,特殊的还是A1区,表现为间隔性的起落,最大值超过0.7,最小值不到0.3,有一半的月份超过0.6,而其他3个区冬、夏月份的 $b_s$ 值较低,春、秋月份的 $b_s$ 值较高。

内蒙古及长城沿线区(B区)系数 $a_s$ 、 $b_s$ 在4—5月、8月、11月各子区之间的取值差异不明显,其他月份各子区之间的取值均存在相对明显的差异,甚至个别月份存在相对极小或极大值,比如B1和B3区在冬季月份表现为系数 $a_s$ 较大,B2区系数 $a_s$ 在10月、12月、2月却相对较小,与之对应的系数 $b_s$ 较大,6月份系数 $a_s$ 、 $b_s$ 的表现又恰好相反。

黄淮海区(C区)系数 $a_s$ 除了3月份和9月份的C2区略显突出外,其他各区各时段的取值都极为稳定,基本徘徊在0.2附近,夏季月份略超过0.2,但均小于0.25,而其他月份则略小于0.2。系数 $b_s$ 除了4月份的C2区出现异常高值(0.66)外,整体上表现为秋末至初春月份各区的取值均较稳定,夏季月份则明显减小,但是二级分区之间仍然存在差异,例如3月、5月、8月、9—10月、12月C2区的系数 $b_s$ 均比其他各区要小。

黄土高原区(D区)因为D1区无有效数据站点,所以结果缺失。D2、D3、D4区的系数 $a_s$ 、 $b_s$ 相互之间差异显著。D2区系数 $a_s$ 在冬、春季月份高于0.2,夏季月份基本与0.2持平,而秋季月份则略低于0.2,系数 $b_s$ 表现为夏、秋月份稳定偏高、春季月份偏低、其他月份略微偏高的“大波浪”形态;D3区系数 $a_s$ 除1月份为0.24外,其他月份则稳定在0.2之下,3月、10月的值最小,为0.13,而系数 $b_s$ 与 $a_s$ 呈对应相反的状态,值较大,且波动性明显;D4区的系数 $a_s$ 在8月份异常偏高,对应的 $b_s$ 却异常偏低,1—3月、6—7月、11—12月的系数 $a_s$ 略微偏高,对应的 $b_s$ 相对偏低,其他月份与之相反,但是系数 $b_s$ 整体处于较高值范围。

长江中下游区(E区)除了E3区、E5区比较突出之外,整体上系数 $a_s$ 稳定偏低,系



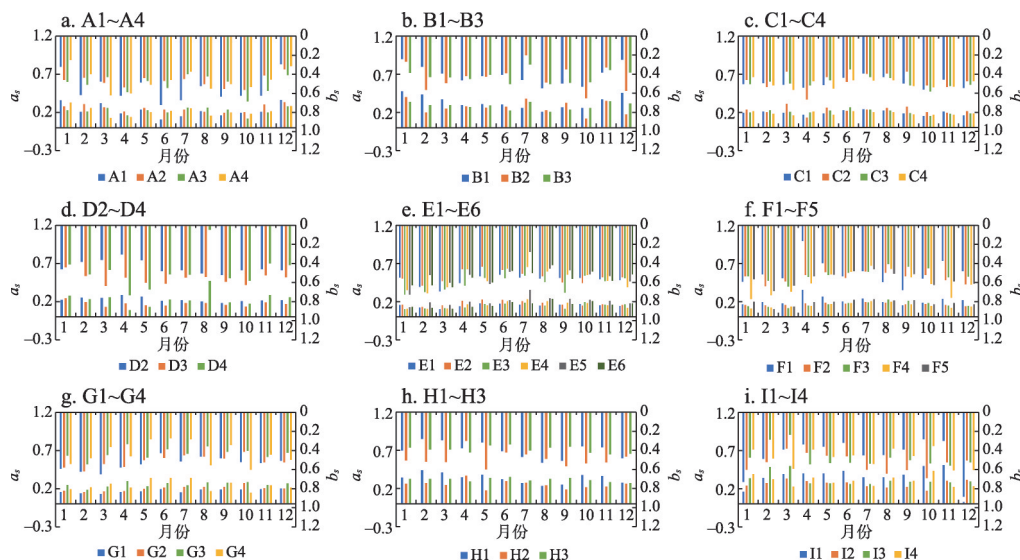


图2 各农业区基于最小二乘回归计算的 $a_s$ 和 $b_s$ 系数逐月站点均值

Fig. 2 Monthly station mean value of coefficients  $a_s$  and  $b_s$  calculated by least square regression for each agricultural area

数 $b_s$ 稳定偏高, $a_s$ 在冬、春月份较低,夏、秋月份较高, $b_s$ 与之相反,但是二级区域之间的差异也比较明显。如,E5区的 $a_s$ 明显较其他区高,E2区的 $a_s$ 在4—6月份明显高于其他区。 $b_s$ 除夏季月份外,基本所有区均越过了0.5,E3区在1月份达到最大值0.73。

西南区(F区)表现最为明显的是F1区,其 $a_s$ 系数首先波动上升,后又波动下降,而对应的 $b_s$ 为相反的变化规律;其次是F4区, $b_s$ 系数表现为明显的先下降后上升的变化规律,且在0.42~0.77之间变化,幅度较大,而对应的 $a_s$ 虽然有相反的变化规律,但变化幅度较小,基本徘徊在0.1~0.2之间;其他分区的变化基本与F4区的类似,但较F4区变幅小,且稳定。

相比较而言,华南区(G区)在时间序列上最为稳定,具体来说, $a_s$ 表现为G4区在5—7月偏高,其他月份则处于微弱的波动变化,而其他二级区则表现为下半年月份略微比年初月份高,对应 $b_s$ 则相反。二级区之间的 $a_s$ 值在2—3月、5—7月、9月份统一表现为 $G1 < G2 < G3 < G4$ ,而 $b_s$ 值则表现为 $G1 > G2 > G3 > G4$ ,其他月份各区之间则存在不规律的差异。

与D区类似,甘新区(H区)3个二级农业区的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数没有明显的统一规律,也是各自呈现自有的变化特点,其中H3区的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数变化相比其他两区较稳定,H1区呈现波动性变化,且幅度不稳定,而H2区前3个月比较稳定,下半年 $a_s$ 系数则表现为先降低后升高的规律, $b_s$ 系数与 $a_s$ 系数的变化同样相反。

类似D区和H区,青藏区(I区)整体上也未呈现出明显的变化规律,各二级分区都有自己的特点,I1区的 $a_s$ 系数先升高至0.4并稳定之后,突然越过0.4又开始先下降后上升至0.5左右,12月份则突降至0.02;I2区的 $a_s$ 系数表现为年初开始缓慢上升,3月份达到最高值后,开始以阶梯形态缓慢降低,10月到最小值后又有所回升;I3区的 $a_s$ 系数1—3月突出较高,其他月份则徘徊在0.3附近;I4区的 $a_s$ 系数呈现幅度较小的波动变化。 $b_s$ 系数除值与 $a_s$ 不同外,变化趋势仍然与 $a_s$ 表现为相反的规律,因此,不再赘述。

以上结果说明了基于最小二乘回归分析获取的38个农业子区的Ångström-Prescott公式系数具有空间、时间上的不稳定性,与太阳辐射大气透过率具有时空不稳定性的特点

相一致,而FAO推荐的Ångström-Prescott公式系数全球固定取值( $a_s = 0.25$ ,  $b_s = 0.50$ )完全忽视了这一特点。因此,有必要逐区对比分析最小二乘回归得到的 $a_s$ 和 $b_s$ 系数和全球固定取值之间差异,以及由此计算的 $R_s$ 精度差异,从而筛选得到各农业子区的最优 $a_s$ 、 $b_s$ 系数取值。

### 3.2 精度比较

图3和图4分别是基于回归的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数和FAO推荐的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数计算的6年(2011—2016年) $R_s$ 均值逐月相对误差在各农业区的站点平均值。图3的误差分布明显较图4集中。在图4中,长江中下游区(E区)、西南区(F区)年内的相对误差变化幅度明显要高于其他地区,而在区域之间,同样表现为长江中下游区(E区)、西南区(F区)的相对误差高于其他地区;图3中误差变化幅度显著降低。说明FAO推荐的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数固定值无法体现区域性大气条件的时空变化对 $R_s$ 的影响从而导致了系统误差,而基于回归的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数能够削弱系统误差。从具体数值上来看,以回归的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数计算的 $R_s$ 相对误差在大部分农业区均集中在20%以内,只有E区、F区的少数点(月份)大于20%(图3),而以FAO推荐值计算的 $R_s$ 小于20%相对误差的点(月份)明显减少,特别是在E区、F区的大部分点(月份)都大于20%(图4)。因此,从相对误差的年内变化结果可看出,以观测值回归得到的逐月 $a_s$ 、 $b_s$ 系数要优于FAO建议的全球固定值。

图5是逐月统计的分别以回归的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数和FAO推荐的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数计算的 $R_s$ 平均相对误差全国均值。从图5可以直接看出,使用回归的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数计算的 $R_s$ 在各月份上均要优于使用FAO推荐值计算的结果,前者计算的 $R_s$ 相对误差比后者减小了1%~6%,冬春季的减小幅度较大,夏秋季的减小幅度较小。

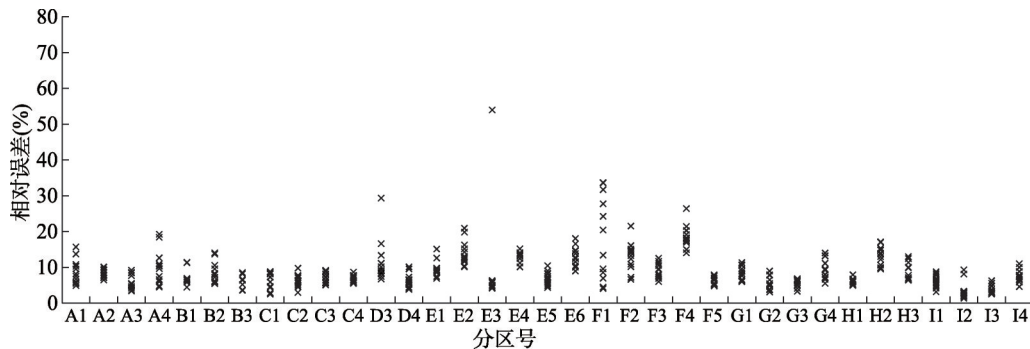


图3 各农业子区基于回归的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数计算的 $R_s$ 年内相对误差分布

Fig. 3 Relative error distribution of  $R_s$  in each agricultural sub-area calculated based on regression coefficients  $a_s$  and  $b_s$

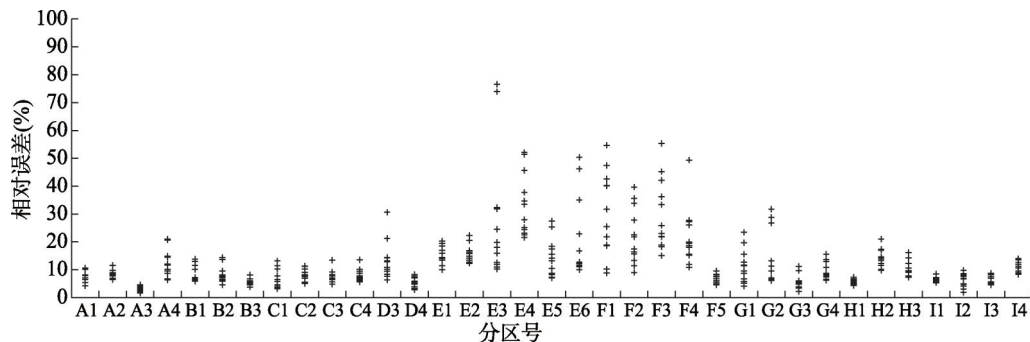


图4 各农业子区基于推荐的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数计算的 $R_s$ 年内相对误差分布

Fig. 4 Relative error distribution of  $R_s$  in each agricultural sub-area was calculated based on recommended coefficients  $a_s$  and  $b_s$

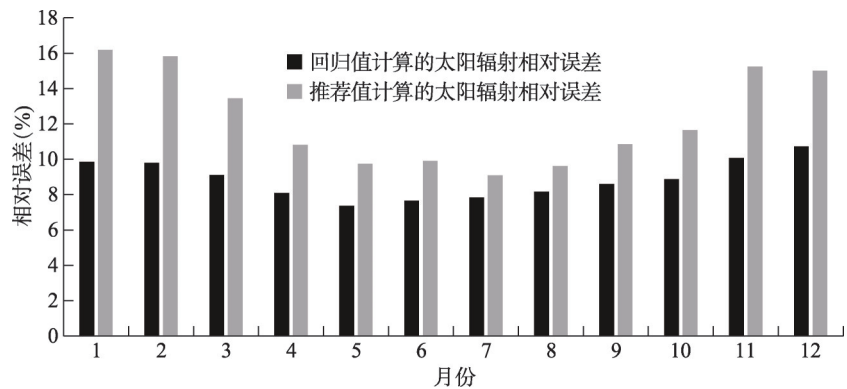


图5 基于回归和推荐 $a_s$ 、 $b_s$ 系数计算的 $R_s$ 相对误差全国站点逐月均值

Fig. 5 National monthly mean of  $R_s$  relative errors was calculated based on regression and recommended coefficients  $a_s$  and  $b_s$  respectively

图6是不同区域不同月份 $a_s$ 、 $b_s$ 系数回归结果和FAO推荐值分别计算的 $R_s$ 相对误差6年均值的差值对比。红色表示 $a_s$ 、 $b_s$ 系数回归结果计算的 $R_s$ 相对误差小于FAO推荐值计算的 $R_s$ 相对误差，即回归值优于推荐值，取值大小表示某一特定区域中12个月中有多少个月回归值优于推荐值；黑色的含义与红色相反。由图6可以看出，虽然图3至图5的结果表明，整体上基于历史观测值回归计算得到的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数计算的 $R_s$ 要优于FAO推荐的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数计算的 $R_s$ ，但是，在具体的应用中，并不是在所有农业区所有月份的回归值计算的 $R_s$ 均优于FAO推荐值计算的 $R_s$ 结果，仅有E、F、I三区的回归值计算的 $R_s$ 平均误差优于FAO推荐值计算的 $R_s$ ，A、B、C、D四个区全年有近一半的月份FAO推荐值计算的 $R_s$ 优于回归值计算的 $R_s$ ，G、H区各有3个月份FAO的推荐值计算的 $R_s$ 更好。具体到农业子区，整体趋势上继承了大区的结果，比如A、B、C、D四个大区的农业子区中，FAO

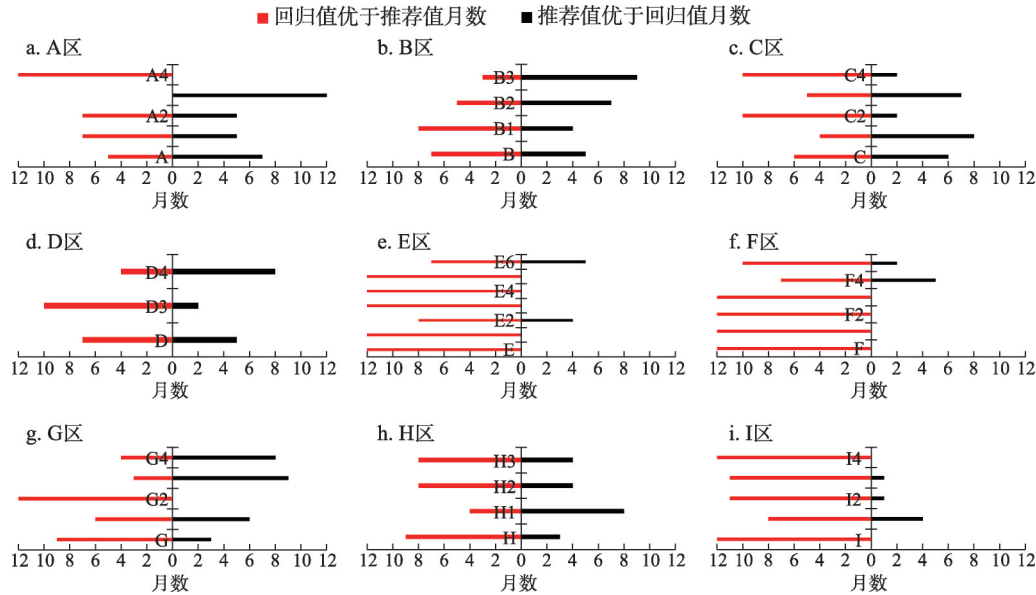


图6  $a_s$ 、 $b_s$ 系数回归值和FAO推荐值分别计算的 $R_s$ 相对误差比较结果

Fig. 6 Comparison of results of  $R_s$  relative error calculated by  $a_s$  and  $b_s$  values from regression and FAO recommended value respectively

推荐值计算的 $R_s$ 优于回归值计算的 $R_s$ 的月份较多,而E、F、I三区的则较少,其他区居中。其中,需要说明的是,D1区因无有效的站点观测数据,而D2区由于缺失验证年份的观测数据而无法验证结果。

### 3.3 最优系数确定

从上述误差分析的结果而言,全国整体来说, $a_s$ 、 $b_s$ 系数回归结果要比FAO的推荐值可靠,且计算的 $R_s$ 误差在年内也比较稳定,但是,具体到某一个农业子区, $a_s$ 、 $b_s$ 系数回归值并不完全可靠。在不引入其他方法的条件下,将 $a_s$ 、 $b_s$ 系数回归值与FAO的推荐值结合使用是最简单易行的方案。因此,通过逐区逐月对比最小二乘回归得到的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数和FAO建议的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数计算的 $R_s$ 误差对比结果(图6),选择误差小的 $R_s$ 计算值对应的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数值作为最终的优选取值(表1)。

## 4 讨论

影响地表太阳辐射的因素主要包括纬度、季节、海拔、坡向(遮挡物)、气候、天气。其中,纬度和季节的变化决定了太阳直射点在地表的位置和最大日照时间,而特定的时空条件下,这两个变量可以看作固定值,因此,也就决定了达到地表的太阳辐射初始值。在地表形态均一、没有大气层存在的假设下,这一初始值即为 $R_a$ 。但实际上,因为地表形态的不均一和大气层的存在,到达地表的太阳辐射存在时空变化,进而导致 $a_s$ 、 $b_s$ 系数在不同农业区的变化。具体如下:

地球的大气厚度因引力分布不均的特性而存在空间上的差异,首先就体现了固定的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数的缺陷。另外,受气候和季节变化及人类活动的影响,大气的组分和厚度也会随之变化。但是,在现有 $a_s$ 、 $b_s$ 系数的回归校正方案中<sup>[42-54]</sup>,大多是基于获取的数据的时间尺度而获得固定的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数,而不是随时间变化的动态 $a_s$ 、 $b_s$ 系数。考虑到这一点,本文逐月进行了多年数据的回归分析,从而得到了不同农业区逐月的 $a_s$ 、 $b_s$ 值,以体现不同农业区 $a_s$ 、 $b_s$ 系数年内随季节的变化情况。对比夏兴生等<sup>[54]</sup>基于年内尺度的中国各农业区 $a_s$ 、 $b_s$ 系数的校正结果,可以看出绝大部分月份逐月回归的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数计算的 $R_s$ 的平均均方根误差(RMSE)和平均相对误差(MRE)均要优于年内固定的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数,逐月系数对应的纳什系数(NSE)结果则大于固定系数对应的NSE结果(图7),说明中国区域年内季节性的变化对 $a_s$ 、 $b_s$ 系数的取值具有一定的影响,在较高精度的 $R_s$ 估算中 $a_s$ 、 $b_s$ 系数随季节变化的事实不可忽略。

对于观测值时间序列长度变化对 $a_s$ 、 $b_s$ 系数的影响,目前仅有Xia等<sup>[55]</sup>基于获得年内固定的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数进行了讨论,未见有其他相关文献。本研究则选择地形较为平坦的C3区,通过取区域内有效观测数据站点平均值的方式,规避了站点数据的不连续性,以5 a为数据量的起点和步长,回归获取了4个月份不同数据序列长度下的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数(图8)。从图8可知,系数 $a_s$ 在冬季月份(1月)基本保持不变;春季月份(4月)随着数据序列长度的增加而逐渐减小;夏季月份(7月)在5年的数据序列长度上最小,在10~40 a的数据序列长度上基本保持不变,45 a、50 a的数据序列长度上突然增大;秋季月份(10月)则处于波动的变化中,但波动幅度不大。系数 $b_s$ 则在秋、冬季一直处于较平稳的波动变化之中;在春季处于波动增大的趋势;夏季处于波动减小的趋势。由此可见,观测数据的时间序列长度对 $a_s$ 、 $b_s$ 系数或多或少存在影响,即 $a_s$ 、 $b_s$ 系数本身对回归数据序列长度的敏感性在不同的月份表现不同,而现有研究,包括本研究在内,均未考虑到这一点。此外,观察不同时间序列数据逐月回归的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数在2011—2015年应用的平均相



表1 中国不同农业区逐月的Ångström-Prescott公式系数优选值  
Tab. 1 Monthly optimum value for coefficients of Ångström-Prescott equation formula for each agricultural area in China

分区号	1月		2月		3月		4月		5月		6月		7月		8月		9月		10月		11月		12月	
	$a_s$	$b_s$	$a_s$	$b_s$	$a_s$	$b_s$	$a_s$	$b_s$	$a_s$	$b_s$	$a_s$	$b_s$	$a_s$	$b_s$	$a_s$	$b_s$	$a_s$	$b_s$	$a_s$	$b_s$	$a_s$	$b_s$	$a_s$	$b_s$
A1	0.36	0.32	0.20	0.62	0.32	0.48	0.18	0.62	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.19	0.62	0.21	0.62	0.21	0.62
A2	0.28	0.46	0.31	0.44	0.26	0.49	0.25	0.50	0.26	0.44	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.30	0.41	0.33	0.35
A3	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50
A4	0.33	0.25	0.26	0.40	0.13	0.62	0.14	0.60	0.20	0.51	0.22	0.46	0.25	0.37	0.16	0.55	0.20	0.50	0.18	0.53	0.21	0.45	0.28	0.31
B1	0.47	0.24	0.43	0.32	0.37	0.39	0.29	0.46	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.27	0.50	0.26	0.53	0.37	0.38	0.45	0.25
B2	0.40	0.27	0.20	0.56	0.25	0.49	0.25	0.50	0.25	0.50	0.27	0.39	0.38	0.20	0.23	0.49	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50
B3	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.23	0.49	0.25	0.48	0.25	0.50	0.32	0.38
C1	0.19	0.50	0.21	0.49	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.21	0.46	0.16	0.54
C2	0.23	0.46	0.25	0.50	0.31	0.37	0.13	0.66	0.26	0.43	0.22	0.48	0.25	0.50	0.25	0.39	0.27	0.37	0.20	0.52	0.19	0.54	0.22	0.47
C3	0.20	0.50	0.23	0.48	0.25	0.50	0.25	0.50	0.22	0.46	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.19	0.52	0.25	0.50	0.18	0.52	0.25	0.50
C4	0.21	0.43	0.18	0.52	0.25	0.50	0.21	0.47	0.17	0.55	0.21	0.46	0.20	0.47	0.20	0.46	0.25	0.50	0.17	0.54	0.17	0.53	0.18	0.47
D2	0.22	0.46	0.25	0.38	0.25	0.36	0.28	0.30	0.26	0.37	0.21	0.48	0.22	0.47	0.20	0.50	0.18	0.52	0.20	0.47	0.21	0.46	0.22	0.47
D3	0.24	0.44	0.25	0.50	0.25	0.50	0.18	0.55	0.15	0.60	0.14	0.61	0.18	0.55	0.18	0.54	0.15	0.59	0.13	0.62	0.19	0.52	0.17	0.54
D4	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.13	0.67	0.22	0.51	0.21	0.52	0.25	0.50	0.19	0.56	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50
E1	0.16	0.55	0.12	0.64	0.10	0.69	0.14	0.60	0.18	0.53	0.17	0.52	0.16	0.55	0.15	0.56	0.16	0.55	0.17	0.55	0.15	0.57	0.14	0.58
E2	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.21	0.46	0.23	0.43	0.22	0.47	0.21	0.51	0.19	0.53	0.16	0.60	0.14	0.60	0.16	0.54	0.25	0.50
E3	0.10	0.73	0.11	0.70	0.11	0.67	0.12	0.63	0.17	0.55	0.17	0.55	0.18	0.53	0.15	0.59	0.11	0.71	0.19	0.53	0.16	0.58	0.16	0.56
E4	0.10	0.68	0.10	0.71	0.11	0.65	0.16	0.46	0.15	0.58	0.20	0.45	0.23	0.44	0.21	0.48	0.19	0.52	0.18	0.52	0.15	0.58	0.12	0.65
E5	0.13	0.73	0.19	0.52	0.16	0.60	0.20	0.52	0.18	0.61	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.21	0.53	0.18	0.59
E6	0.13	0.63	0.12	0.63	0.11	0.65	0.13	0.55	0.14	0.60	0.19	0.48	0.18	0.50	0.23	0.42	0.17	0.56	0.21	0.48	0.16	0.58	0.17	0.52
F1	0.16	0.59	0.19	0.51	0.18	0.55	0.35	0.17	0.26	0.40	0.20	0.54	0.24	0.48	0.19	0.59	0.15	0.68	0.18	0.56	0.24	0.37	0.22	0.48
F2	0.15	0.53	0.15	0.64	0.16	0.59	0.17	0.52	0.19	0.49	0.17	0.55	0.19	0.49	0.18	0.50	0.16	0.53	0.17	0.52	0.16	0.57	0.14	0.62
F3	0.14	0.53	0.13	0.58	0.11	0.64	0.14	0.54	0.16	0.52	0.18	0.50	0.19	0.49	0.23	0.41	0.21	0.43	0.18	0.45	0.15	0.55	0.14	0.54
F4	0.11	0.77	0.12	0.73	0.25	0.50	0.14	0.61	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.20	0.46	0.16	0.54	0.25	0.50	0.12	0.76	0.13	0.62
F5	0.20	0.56	0.25	0.50	0.13	0.63	0.19	0.53	0.20	0.52	0.22	0.48	0.23	0.46	0.21	0.51	0.22	0.51	0.25	0.50	0.18	0.59	0.16	0.61
G1	0.15	0.59	0.14	0.62	0.13	0.65	0.15	0.58	0.16	0.55	0.19	0.43	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50
G2	0.17	0.58	0.15	0.62	0.16	0.54	0.17	0.57	0.19	0.50	0.21	0.48	0.22	0.45	0.22	0.46	0.22	0.48	0.27	0.41	0.21	0.52	0.20	0.53
G3	0.25	0.50	0.25	0.50	0.23	0.45	0.30	0.33	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.27	0.42
G4	0.19	0.54	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.34	0.28	0.25	0.50	0.28	0.34	0.25	0.50	0.25	0.50	0.21	0.50
H1	0.25	0.50	0.25	0.50	0.41	0.29	0.35	0.38	0.25	0.50	0.25	0.50	0.27	0.47	0.23	0.53	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50
H2	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.37	0.30	0.17	0.60	0.30	0.42	0.27	0.44	0.24	0.49	0.25	0.50	0.21	0.53	0.23	0.52	0.26	0.47
H3	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50	0.29	0.42	0.34	0.35	0.35	0.34	0.30	0.40	0.32	0.37	0.34	0.36	0.31	0.42	0.25	0.50	0.27	0.43
I1	0.16	0.73	0.34	0.49	0.39	0.39	0.25	0.50	0.40	0.36	0.43	0.32	0.35	0.45	0.35	0.45	0.38	0.39	0.25	0.50	0.25	0.50	0.25	0.50
I2	0.24	0.60	0.27	0.52	0.25	0.50	0.30	0.42	0.28	0.45	0.28	0.46	0.23	0.60	0.21	0.64	0.22	0.60	0.17	0.69	0.30	0.52	0.31	0.50
I3	0.33	0.47	0.48	0.29	0.49	0.24	0.27	0.55	0.27	0.53	0.26	0.53	0.26	0.54	0.30	0.47	0.29	0.50	0.29	0.53	0.28	0.56	0.25	0.50
I4	0.39	0.39	0.32	0.48	0.22	0.59	0.34	0.39	0.28	0.47	0.30	0.45	0.24	0.54	0.34	0.38	0.30	0.46	0.43	0.35	0.22	0.61	0.23	0.60

对误差变化(图9)可知,10 a时间序列数据对应的平均误差整体要低于其他时间序列长度,说明 $a_s$ 、 $b_s$ 系数的回归存在最优的数据序列长度,且在小于15 a的数据序列长度变化中对 $R_s$ 精度影响可能比较敏感,在大于15 a的数据序列长度变化中对 $R_s$ 精度影响可能不敏感。因此,在今后的研究中有必要再讨论全国范围内逐月 $a_s$ 、 $b_s$ 系数的年际变化,并通过分析 $a_s$ 、 $b_s$ 系数回归校正的最优数据序列长度,对数据站点进行筛选,避免现有研究中站点之间存在有效数据量的差异而引起的样本量不公平性,以期实现各农业区 $a_s$ 、 $b_s$ 系数的动态预测,从而服务于 $R_s$ 和 $ET_0$ 等的动态估算。

现有回归校正 $a_s$ 、 $b_s$ 系数的方案也可能平滑掉了天气现象在不同季节的随机变化以及人类活动短时间大量向大气排放污染物等引起的局部区域大气层特性的变化。海拔越高,太阳辐射的传输路径越短, $a_s$ 、 $b_s$ 系数就越大,阳坡能够接收太阳直射的能量,阳坡的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数也会大于阴坡。目前已有研究及本研究中,Ångström-Prescott公式的系数校正均是基于气象站点观测数据进行的,而气象站点基本都位于开阔的向阳地面,所以,坡向(遮挡物)对 $a_s$ 、 $b_s$ 系数的影响在现有数据观测条件下均未给予考虑。本研究主要服务于 $ET_0$ 的计算,因此,基于中国综合农业区划获得 $a_s$ 、 $b_s$ 系数的区域站点平均值。但是,这一分区实际上与上述影响地表太阳辐射时空特征的因素并不对应,

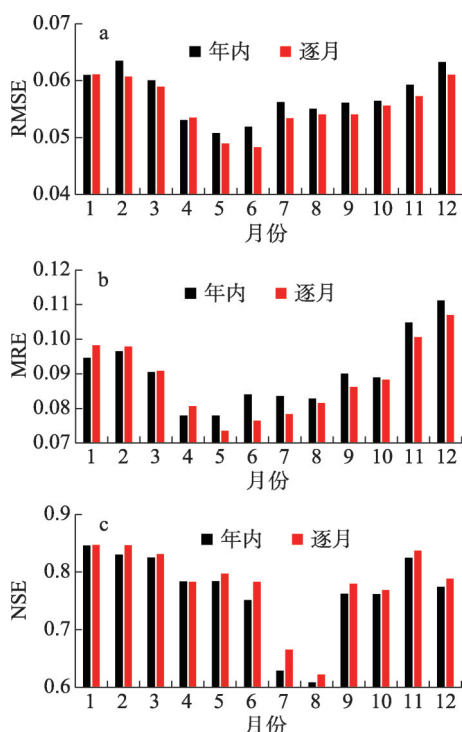


图7 2011—2016年年内回归和逐月回归 $a_s$ 、 $b_s$ 系数逐月平均值RMSE、MRE、NSE比较  
Fig. 7 Comparison of the monthly mean values of RMSE, MRE and NSE between the fixed  $a_s$  and  $b_s$  coefficients regressed within a yearly scale and of the monthly regressing  $a_s$  and  $b_s$  coefficients from 2011 to 2016

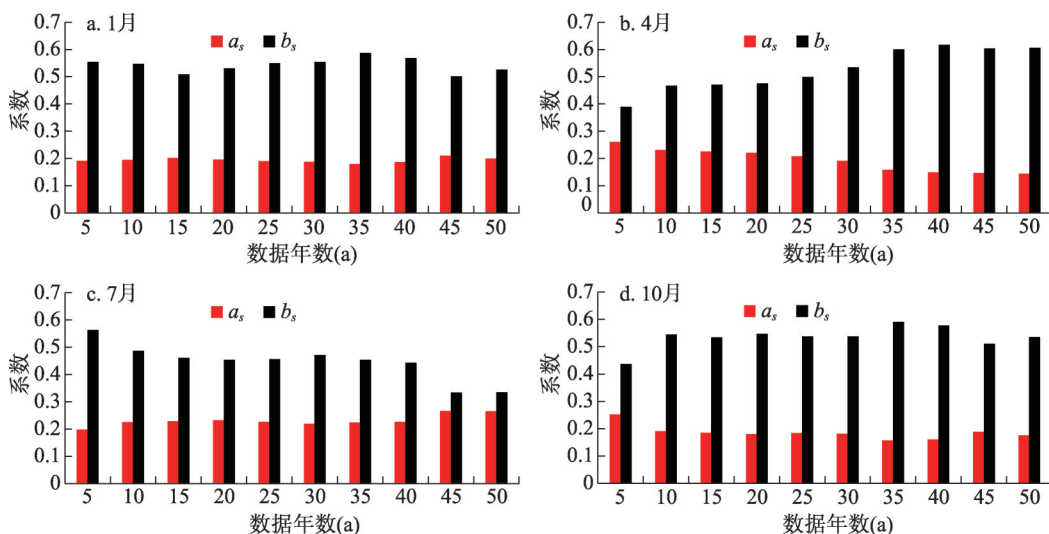


图8 C3区回归的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数随时间序列数据长度的变化

Fig. 8  $a_s$  and  $b_s$  coefficients of monthly regression in C3 varying with the length of time series data

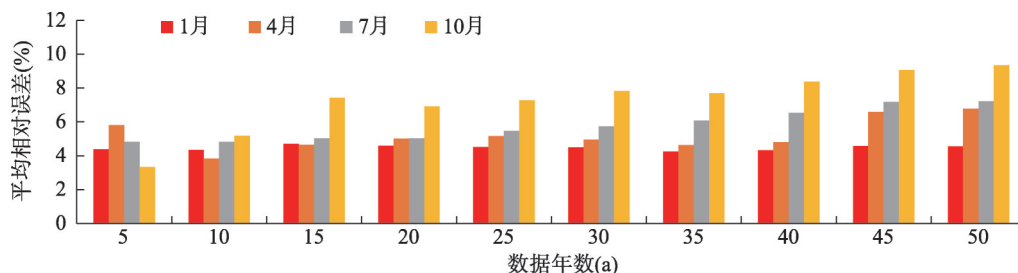


图9 2011—2015年C3区不同时间序列数据逐月回归的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数平均相对误差

Fig. 9 Mean relative errors of  $a_s$  and  $b_s$  coefficients regressed monthly by different time series data in C3 for 2011 to 2015

以农业分区内站点的平均结果代表整个区域的取值也会导致误差。比如, 基于独立站点的研究中, 海拔也是固定值, 不需要考虑, 而在系数的区域化研究中, 大多则取的是区域的均值<sup>[44, 53]</sup>, 相当于区域平均海拔条件下的取值。本文也不例外, 利用农业综合区划区域统计取 $a_s$ 、 $b_s$ 的站点均值代表整个农业区的取值。从图1可以直观地看出, 中国的气象站点空间分布东南部较密集、西北部较稀疏, 各农业区内站点密度存在差异, 各区平均取值可能会存在因样本量差异而带来各区精度差异。所以, 如果是支持诸如太阳能工程等其他领域的研究与应用, 则需要进一步基于站点的结果分析 $a_s$ 、 $b_s$ 系数与地形等要素的相关性, 从而提高 $a_s$ 、 $b_s$ 系数的空间可扩展性, 实现网格化的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数以替代区域值, 从而扩展其应用领域。

## 5 结论

本文利用最小二乘回归方法, 基于121个站点的气象观测数据计算了中国38个农业区逐月的Ångström-Prescott公式系数, 并通过逐区逐月对比回归得到的 $a_s$ 和 $b_s$ 系数取值和FAO建议的 $a_s$ 和 $b_s$ 系数取值估算的 $R_s$ 的误差, 优选了估算误差小的 $R_s$ 对应的 $a_s$ 和 $b_s$ 系数取值作为Ångström-Prescott公式系数最终的应用值。主要结论如下:

(1) 基于本文计算的Ångström-Prescott公式系数取值在9个农业大区的时空分布特征无统一的变化规律, 符合大气环境存在不稳定的时空差异特点, 且在大部分农业子区的回归取值与FAO推荐的全球固定取值( $a_s = 0.25$ ,  $b_s = 0.50$ )存在差异。因此, 有必要讨论Ångström-Prescott公式系数的本地化取值与全球固定值的精度差异, 以优选 $a_s$ 、 $b_s$ 系数应用值。

(2) 整体上, 以 $a_s$ 、 $b_s$ 系数回归值计算的 $R_s$ 相对精度要优于FAO的建议值计算的 $R_s$ 相对精度。但是, 在各农业区的具体应用中, 2个来源的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数计算的 $R_s$ 精度则参差不齐。因此, 综合不同尺度的 $R_s$ 计算值相对误差结果, 从全国整体应用的角度, 建议A、B、C、D、H五个大区继续使用FAO推荐的Ångström-Prescott公式系数, 而剩余的4个大区则建议使用本研究基于最小二乘回归方法率定的Ångström-Prescott公式系数, 而在具体的有较高精度要求的农业子区或更小尺度的应用中, 还是建议使用逐月逐区的优选系数进行 $R_s$ 的计算。

本文基于逐月的时间尺度进行Ångström-Prescott公式系数的本地化研究, 不仅丰富了Ångström-Prescott公式系数的校正案例, 也对提高参考作物需水量的计算有一定的参考价值。虽然基于现有的数据条件, 考虑季节变化因素经过逐月回归、验证和优选, 提供了支持各农业区 $ET_0$ 计算的Ångström-Prescott公式系数, 但是仍然存在一些不足, 需要

进一步探讨:① 本文仅基于获得的月尺度数据进行了 $a_s$ 、 $b_s$ 系数的本地化取值讨论,而更精细化的旬尺度、日尺度 $a_s$ 、 $b_s$ 系数取值在地球科学领域和太阳能工程领域的应用可能更为广泛,因此,需要进一步收集更精细时间尺度的数据进行深入的研究;② 在全国范围内再讨论时间序列数据长度变化对逐月 $a_s$ 、 $b_s$ 系数的影响,在确定最优数据量的基础上,进一步分析影响 $a_s$ 、 $b_s$ 系数的影响因子,改进现有方案,以进一步提高 $a_s$ 、 $b_s$ 系数应用值的精度;③  $a_s$ 、 $b_s$ 系数本身是太阳辐射大气透过率的反映,而遥感技术对大气层各项指标的反演研究在现阶段已经取得了丰硕的成果,且国内外基于能量平衡的原理,也提出了不少太阳辐射大气透过率的表达式,因此,探索 $a_s$ 、 $b_s$ 系数与遥感反演的大气参数(如气溶胶光学厚度或密度)的关系,在现有太阳辐射大气透过率表达式的基础上,尝试构建网格化的 $a_s$ 、 $b_s$ 系数取值也是Ångström-Prescott公式精细化应用的潜在突破点。

### 参考文献(References)

- [1] 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. *Energy Conversion and Management*, 2014, 87: 975-989.
- [2] Paulescu M, Stefu N, Calinoiu D, et al. Ångström-Prescott equation: Physical basis, empirical models and sensitivity analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 62: 495-506.
- [3] Pan T, Wu S H, Dai E F, et al. Estimating the daily global solar radiation spatial distribution from diurnal temperature ranges over the Tibetan Plateau in China. *Applied Energy*, 2013, 107: 384-393.
- [4] Qin J, Chen Z Q, Yang K, et al. Estimation of monthly-mean daily global solar radiation based on MODIS and TRMM products. *Applied Energy*, 2011, 88(7): 2480-2489.
- [5] Paulescu M, Paulescu E, Gravila P, et al. *Weather Modeling and Forecasting of PV Systems Operation*. London: Springer, 2013.
- [6] Olseth J A, Skartveit A. Solar irradiance, sunshine duration and daylight illuminance derived from METEOSAT data for some European sites. *Theoretical and Applied Climatology*, 2001, 69(3-4): 239-252.
- [7] Richardson C W. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resources Research*, 1981, 17(1): 182-190.
- [8] Ångström A. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1924, 50(210): 121-126.
- [9] Prescott J A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, 1940, 64: 114-122.
- [10] Li M F, Liu H B, Guo P T, et al. Estimation of daily solar radiation from routinely observed meteorological data in Chongqing, China. *Energy Conversion and Management*, 2010, 51(12): 2575-2579.
- [11] Chen J L, Liu H B, Wu W, et al. Estimation of monthly solar radiation from measured temperatures using support vector machines: A case study. *Renewable Energy*, 2011, 36(1): 413-420.
- [12] 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. *Renewable Energy*, 2012, 44: 431-438.
- [13] Iziomon M G, Mayer H. Assessment of some global solar radiation parameterizations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002, 64(15): 1631-1643.
- [14] Trnka M, Žalud Z, Eitzinger J, et al. Global solar radiation in Central European Lowlands estimated by various empirical formulae. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 131(1-2): 54-76.
- [15] Almorox J, Hontoria C. Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(9-10): 1529-1535.
- [16] Zhang Q W, Cui N B, Feng Y, et al. Comparative analysis of global solar radiation models in different regions of China. *Advances in Meteorology*, 2018: 3894831. DOI: 10.1155/2018/3894831.
- [17] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 1998, 56(9): D05109.
- [18] Lu Yanyu, Tian Hong, Lu Jun, et al. Spatial-temporal variation characteristics of gross solar radiation in Anhui province from 1961 to 2010. *Meteorological Science and Technology*, 2016, 44(5): 769-775. [卢燕宇, 田红, 鲁俊, 等. 近50年安



- 徽省太阳总辐射的时空变化特征. 气象科技, 2016, 44(5): 769-775.]
- [19] Zhao Jun, Li Wangping, Li Fei. Climatological calculation and analysis of global solar radiation in the Loess Plateau. *Arid Zone Research*, 2008, 25(1): 53-58. [赵军, 李旺平, 李飞. 黄土高原太阳总辐射气候学计算及特征分析. 干旱区研究, 2008, 25(1): 53-58.]
- [20] Du Yaodong, Mao Huiqin, Liu Aijun, et al. The climatological calculation and distributive character of global solar radiation in Guangdong province. *Resources Science*, 2003, 25(6): 66-70. [杜尧东, 毛慧琴, 刘爱君, 等. 广东省太阳总辐射的气候学计算及其分布特征. 资源科学, 2003, 25(6): 66-70.]
- [21] Cui Rixian. The analysis of spatiotemporal variation characteristics of global solar radiation in Shandong province. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(10): 1780-1791. [崔日鲜. 山东省太阳总辐射的时空变化特征分析. 自然资源学报, 2014, 29(10): 1780-1791.]
- [22] Mai Miao, Huo Yan, Zeng Yan, et al. The distribution characteristics of total solar radiation in Jiangsu province. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2012, 32(3): 269-274. [买苗, 火焰, 曾燕, 等. 江苏省太阳总辐射的分布特征. 气象科学, 2012, 32(3): 269-274.]
- [23] Ma J Y, Luo Y, Shen Y B, et al. Regional long-term trend of ground solar radiation in China over the past 50 years. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(7): 1242-1253.
- [24] Wen Duming. Discussion on the climatological calculation of solar radiation. *Acta Meteorologica Sinica*, 1964, 34(3): 304-315. [翁笃鸣. 试论总辐射的气候学计算方法. 气象学报, 1964, 34(3): 304-315.]
- [25] Ju Xiaohui, Tu Qipu, Li Qingxiang. Discussion on the climatological calculation of solar radiation. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2005, 28(4): 516-521. [鞠晓慧, 屠其璞, 李庆祥. 我国太阳总辐射气候学计算方法的再讨论. 南京气象学院学报, 2005, 28(4): 516-521.]
- [26] Yang Guiyu, Wang Zhisheng, Wang Hao, et al. Potential evapotranspiration evolution rule and its sensitivity analysis in Haihe river basin. *Advances in Water Science*, 2009, 20(3): 409-415. [杨贵羽, 王知生, 王浩, 等. 海河流域ET<sub>0</sub>演变规律及灵敏度分析. 水科学进展, 2009, 20(3): 409-415.]
- [27] Liu J D, Pan T, Chen D L, et al. An improved ångström-type model for estimating solar radiation over the Tibetan Plateau. *Energies*, 2017, 10(7): 892.
- [28] Ojoso J O, Komolafe L K. Models for estimating solar radiation availability in southwestern Nigeria. *Nigerian Journal of Solar Energy*, 1987, 6: 69-77.
- [29] Ododo J C, Sulaiman A T, Aidan J, et al. The importance of maximum air temperature in the parameterisation of solar radiation in Nigeria. *Renewable Energy*, 1995, 6(7): 751-763.
- [30] Glover J, McCulloch J S G. The empirical relation between solar radiation and hours of bright sunshine in the high-altitude tropics. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1958, 84(359): 56-60.
- [31] Gopinathan K K. A general formula for computing the coefficients of the correlation connecting global solar radiation to sunshine duration. *Solar Energy*, 1988, 41(6): 499-502.
- [32] Zhou J, Wu Y Z, Yan G. General formula for estimation of monthly average daily global solar radiation in China. *Energy Conversion and Management*, 2005, 46(2): 257-268.
- [33] Halouani N, Nguyen C T, Vo-Ngoc D. Calculation of monthly average global solar radiation on horizontal surfaces using daily hours of bright sunshine. *Solar Energy*, 1993, 50(3): 247-258.
- [34] 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. *Earth and Space Science*, 2019, 6(10): 1976-1986.
- [35] Yorukoglu M, Celik A N. A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(15-16): 2441-2450.
- [36] Ertekin C, Yaldiz O. Comparison of some existing models for estimating global solar radiation for Antalya (Turkey). *Energy Conversion and Management*, 2000, 41(4): 311-330.
- [37] Ögelman H, Ecevit A, Tasdemiroğlu E. A new method for estimating solar radiation from bright sunshine data. *Solar Energy*, 1984, 33(6): 619-625.
- [38] Akinoglu B G, Ecevit A. A further comparison and discussion of sunshine based models to estimate global solar radiation. *Solar Energy*, 1990, 15(10): 865-872.
- [39] Almorox J, Hontoria C. Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(9-10): 1529-1535.
- [40] Iziomon M G, Mayer H. Assessment of some global solar radiation parameterizations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002, 64(15): 1631-1643.

- [41] 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. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(3-4): 697-710.
- [42] 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? *Energy Conversion and Management*, 2010, 51(12): 2565-2574.
- [43] Yin Y H, Wu S H, Zheng D, et al. Radiation calibration of FAO56 Penman-Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(1): 77-84.
- [44] Hu Qingfang, Yang Dawen, Wang Yintang, et al. Effects of Ångström coefficients on  $ET_0$  estimation and the applicability of FAO recommended coefficient values in China. *Advances in Water Science*, 2010, 21(5): 644-652. [胡庆芳, 杨大文, 王银堂, 等. Ångström公式参数对 $ET_0$ 的影响及FAO建议值适用性评价. *水科学进展*, 2010, 21(5): 644-652.]
- [45] Liu X Y, Mei X R, Li Y Z, et al. Variation in reference crop evapotranspiration caused by the Ångström-Prescott coefficient: Locally calibrated versus the FAO recommended. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(7): 1137-1145.
- [46] Cao Wen, Xu Ying, Duan Chunfeng. Research on applicability of solar radiation parametric model in Anhui province. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(26): 207-212. [曹雯, 许莹, 段春峰. 安徽省太阳总辐射参数化模型的适用性研究. *中国农学通报*, 2014, 30(26): 207-212.]
- [47] Yuan Hongwei, Yuan Xianjiang, Tang Guangmin, et al. Correction of parameters in Ångström formula and analysis of total solar radiation characteristics in Huaibei plain. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018, 36(5): 426-432. [袁宏伟, 袁先江, 汤广民, 等. 淮北平原Ångström公式参数校正及太阳总辐射时空特征分析. *排灌机械工程学报*, 2018, 36(5): 426-432.]
- [48] Li Manman, Mei Xurong, Zhong Xiuli, et al. Parameterization of Ångström-prescott radiation model in Yunnan province. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(6): 100-105. [李曼曼, 梅旭荣, 钟秀丽, 等. 云南省Ångström-prescott辐射模型参数化研究. *农业工程学报*, 2012, 28(6): 100-105.]
- [49] Peng Shizhang, Xu Junzeng, Ding Jiali, et al. Influence of  $a$ , and  $b$ , values on determination of reference crop evapotranspiration by Penman-Monteith formula. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2006, 25(3): 5-8. [彭世彰, 徐俊增, 丁加丽, 等.  $a$ 和 $b$ 取值对参考作物蒸发蒸腾量计算结果的影响. *灌溉排水学报*, 2006, 25(3): 5-8.]
- [50] Paulescu M, Stefu N, Calinoiu D, et al. Ångström-Prescott equation: Physical basis, empirical models and sensitivity analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 62: 495-506.
- [51] Xia Xingsheng, Zhu Xiufang, Pan Yaozhong, et al. Influence of solar radiation empirical values on reference crop evapotranspiration calculation in different regions of China. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(2): 254-266. [夏兴生, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 地表太阳辐射经验值对参考作物需水量计算的影响. *农业机械学报*, 2020, 51(2): 254-266.]
- [52] 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. *Renewable Energy*, 2012, 44: 431-438.
- [53] Huang Zhongdong, Guo Yifei, Zhang Yan, et al. Using the Ångström-Prescott formula to calculate solar radiation from sunshine duration in China. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(4): 77-83. [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. *灌溉排水学报*, 2019, 38(4): 77-83.]
- [54] Xia Xingsheng, Zhu Xiufang, Pan Yaozhong, et al. Calibrating and optimizing the parameters in angstrom equation for calculating evapotranspiration from mainland China. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(1): 123-130. [夏兴生, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 基于年内尺度的中国大陆地区Angstrom公式参数校正与优选. *灌溉排水学报*, 2020, 39(1): 123-130.]
- [55] Xia X S, Zhu X F, Pan Y Z, et al. Calibration and optimization of the Ångström-Prescott coefficients for calculating  $ET_0$  within a year in China: The best corrected data time scale and optimization parameters. *Water*, 2019, 11(8): 1706. DOI: 10.3390/w11081706.

## Monthly calibration and optimization of Ångström-Prescott equation coefficients for agricultural comprehensive area in China

XIA Xingsheng<sup>1,2</sup>, PAN Yaozhong<sup>1,2</sup>, ZHU Xiufang<sup>1,3</sup>, ZHANG Jinshui<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Academy of Plateau Science and Sustainability, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 3. Institute of Remote Sensing Science and Engineering, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Ångström-Prescott equation is the recommended algorithm for calculating the radiation coefficients for the Penman-Monteith formula, which is the standard method for reference crop evapotranspiration recommended by the Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. The calibration and optimization of  $a_s$  and  $b_s$  coefficients in the equation is the key to accurately calculate the surface solar radiation. This study aims at obtaining the Ångström-Prescott equation coefficients  $a_s$  and  $b_s$ , which are optimized for China's comprehensive agricultural areas. The monthly average solar radiation ( $R_s$ ) (from Dataset of Monthly Values of Radiation Data from Chinese Surface Stations) and srelative sunshine duration data (from Dataset of Monthly Values of Climate Data from Chinese Surface Stations) at 121 stations during 1957-2016 were collected. Using the data from 1957 to 2010, we calculated the monthly  $a_s$  and  $b_s$  coefficients for each area through the least squares regression. Then, taking the observation values of  $R_s$  from 2011 to 2016 as the true values, we estimated and compared the relative accuracy of  $R_s$  calculated by regression values of coefficients  $a_s$  and  $b_s$  and that calculated by FAO suggested coefficients  $a_s$  and  $b_s$ . The results showed that the monthly average coefficients  $a_s$  and  $b_s$  of each area are significantly different from the FAO recommended coefficients both temporally and spatially. There are some differences between regions and within regions, and the relative value of  $a_s$  and  $b_s$  shows the opposite state. The relative error range (0-54%) of solar radiation calculated by the regression  $a_s$  and  $b_s$  coefficients is small, while the relative error range (0-77%) of solar radiation calculated by the FAO recommended value is large. So, overall, the relative accuracy of  $R_s$  calculated by regression values of  $a_s$  and  $b_s$  coefficients is better than that calculated by the FAO suggested coefficients. The relative error was reduced by 1% to 6%, and the relative error decreases more in winter and spring than in summer and autumn. However, regression values of  $a_s$  and  $b_s$  coefficients perform worse in some months and some agricultural areas for verification in application. It is said that the regression values of  $a_s$  and  $b_s$  are not entirely reliable. For each month and each agricultural area, the best scheme is to combine the regression values of  $a_s$  and  $b_s$  coefficients with the FAO recommended values. Therefore, we chose the  $a_s$  and  $b_s$  coefficients with the minimum  $R_s$  estimation error as the final coefficients and made a coefficient recommendation table for 38 agricultural production and management areas in the Chinese mainland. This study further illustrates the necessity of localization modification of Ångström-Prescott equation coefficients in application, and enriches the case study of coefficient calibration of Ångström-Prescott equation in China, which is helpful for improving the accuracy of calculation of surface solar radiation and reference crop evapotranspiration based on existing data.

**Keywords:** solar radiation; coefficient calibration; Ångström-Prescott equation; China