doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.028

地表太阳辐射经验值对参考作物需水量计算的影响

夏兴生[1,2]　朱秀芳[2,3]　潘耀忠[1,4]　张锦水[2,3]

(1. 北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学遥感科学与工程研究院, 北京 100875;
3. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 4. 青海师范大学地理科学学院, 西宁 810016)

摘要: 针对中国太阳辐射站点观测数据较少的客观条件,以联合国粮农组织(FAO)建议的通过 Angstrom 公式及其参数计算的地表太阳辐射(R_{s-c})对中国九大农业区基于 Penman - Monteith(PM)公式计算的参考作物需水量(ET_{0-PM})的影响为目标,利用中国地面气候资料月值数据集和中国辐射月值数据集中的 112 个站点 1957 年 1 月—2017 年 3 月的气象要素逐月有效观测日均值数据,通过对比分析和相关分析,讨论了站点 R_{s-c} 与观测的地表太阳辐射(R_{s-o})的时空差异,以及二者分别输入 PM 公式获得的 ET_{0-c} 和 ET_{0-o} 的时空差异。结果表明:基于年内时空尺度的各农业区 R_{s-c} 和 R_{s-o} 存在显著且不稳定的差异,R_{s-c} 直接替代 R_{s-o} 参与计算 ET_{0-c} 可能出现较大的误差。基于 R_{s-c} 和 R_{s-o} 分别计算的 ET_{0-c} 和 ET_{0-o},无论是在全国,还是各个农业区,均存在显著的线性相关性,R^2 超过 0.67,ET_{0-c} 平均值只有 0.06 ~ 0.26 mm/d 的误差。考虑中国的农业地域类型,应对北方地区的"春旱"灌溉需求,可以直接以 R_{s-c} 计算获得 ET_{0-c},而在全国范围内的夏季"伏旱"期,输入 R_{s-c} 计算的 ET_{0-c} 比输入 R_{s-o} 计算的 ET_{0-o} 偏大。在高精度的节水农业应用中,建议研究相应的校正模型对夏季 ET_{0-c} 进行校准。

关键词: 参考作物需水量; 太阳辐射; Penman - Monteith 公式; 差异性分析; 中国; 农业区

中图分类号: S161.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)02-0254-13　　**OSID**:

Influence of Solar Radiation Empirical Values on Reference Crop Evapotranspiration Calculation in Different Regions of China

XIA Xingsheng[1,2]　ZHU Xiufang[2,3]　PAN Yaozhong[1,4]　ZHANG Jinshui[2,3]

(1. *State Key Laboratory of Remote Sensing Science*, *Beijing Normal University*, *Beijing* 100875, *China*
2. *Institute of Remote Sensing Science and Engineering*, *Beijing Normal University*, *Beijing* 100875, *China*
3. *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology*, *Beijing Normal University*, *Beijing* 100875, *China*
4. *School of Geographical Sciences*, *Qinghai Normal University*, *Xining* 810016, *China*)

Abstract: Solar radiation (R_s) is a necessary input variable for Penman - Monteith (PM) formula recommended by FAO to calculate reference crop evapotranspiration (ET_{0-PM}). The influence analysis of solar radiation (R_{s-c}) from Angstrom equation and its parameters on ET_{0-c} calculation based on PM was taken as the objective in nine agricultural regions of China. Using monthly valid average solar radiation (R_{s-o}) (from dataset of monthly values of radiation data from Chinese Surface Stations) and relative sunshine duration data (from dataset of monthly values of climate data from Chinese Surface Stations) at 112 stations during Jan. 1957—Mar. 2017, through comparative analysis and correlation analysis, the spatiotemporal differences between R_{s-c} and R_{s-o} were mainly explored. Then the spatiotemporal differences between ET_{0-c} and ET_{0-o} were obtained by input R_{s-c} and R_{s-o} to PM respectively, and it was also analyzed for illustrating the applicability of R_{s-c} to ET_{0-PM} calculation in different regions of China. The result showed that R_{s-c} and R_{s-o} in the nine agricultural regions had significant and unstable spatial and temporal differences. There may be a large error when R_{s-c} directly replaced R_{s-o} to participate in the calculation of ET_{0-PM}. However, the analysis of the spatiotemporal difference of ET_{0-c} and ET_{0-o} showed that whether in the entire continent, or the agricultural regions, ET_{0-c} and ET_{0-o} were characterized by a significant and relatively stable linear correlation, the R^2 was more than 0.67 and the error of mean ET_{0-c}

收稿日期: 2019-06-08　修回日期: 2019-08-11

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项、国家重点研发计划项目(2018YFC1504603)和中国人民财产保险股份有限公司灾害研究基金项目(2017D24-03)

作者简介: 夏兴生(1989—),男,博士生,主要从事作物需水量遥感估算研究,E-mail: xiayuan1104@163.com

通信作者: 潘耀忠(1965—),男,教授,博士,主要从事农业和灾害遥感研究,E-mail: pyz@bnu.edu.cn

was only 0.06 ~ 0.26 mm/d. Considering China's agricultural region types, dealing with the "spring drought" in the northern area of irrigation demand, the application can be directly to get ET_{0-PM} by R_{s-c}, but for the "summer drought" period nationally, ET_{0-c} was slants bigger than ET_{0-o}, and the corresponding correction model was necessary in the application of high precision of water-saving agriculture.

Key words: reference crop evapotranspiration; radiation parameters; Penman - Monteith formula; difference analysis; China; agricultural regions

0　引言

参考作物需水量(ET_0)是农业灌溉作业的主要参考指标。联合国粮农组织(FAO)1998 年发布的《Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements》(FAO 56)推荐 Penman - Monteith(PM)公式为基于气象站点观测数据计算 ET_0 的标准方法[1]。此后,这一方法得到了广泛应用[2-7]。然而,在实践中,因为气象/气候观测站点分布的时空差异及建设配置条件的差异,PM 公式所要求的输入要素数据并不是在所有地区均能够通过观测获取,特别是在较大尺度的研究应用中,往往无法获得完整的观测数据。针对这一问题,FAO 56 建议,基于可获取的气象/气候要素观测数据,以经验或理论方程估算获得缺失数据[1]。这一处理方式已经被应用于很多研究中[8]。但是,在不同的时空尺度下,气象/气候要素受大气及地表环境影响,其估算值和观测值存在不同程度的差异,进而对 ET_0 的计算结果产生影响。因此,从 20 世纪 70 年代开始,很多学者针对不同的地理区探索了不同气象/气候要素对基于 PM 公式计算 ET_0 的敏感性[9-14],结果表明,不同地区不同时段,不同的气象/气候因子对基于 PM 计算的 ET_0 结果(ET_{0-PM})敏感性不同,而在没有各要素观测值的条件下,采用 FAO 56 建议的方案计算各要素值、输入 PM 公式获得的 ET_0 存在偏差。

中国目前仅国家级观测站点就超过 2 400 个,普遍能观测到与工农业生产密切相关的气温、湿度、气压、风速等常规气象要素,唯独能够获得地表太阳辐射数据的站点较少,而地表太阳辐射又是获得 ET_{0-PM} 必不可少的参量[10,12-13]。因此,研究太阳辐射参数对准确计算 ET_{0-PM} 具有重要的意义。文献[15-26]基于不同时空尺度的研究说明了太阳辐射参数对 ET_{0-PM} 的影响不能忽略,也评价了 FAO 56 推荐的地表太阳辐射 R_s 计算方法(Angstrom 公式)在各自研究尺度的适用性,并提出了基于 Angstrom 公式计算 R_s 的本地化参数,以满足 ET_{0-PM} 计算的要求。但是这些研究大部分局限于小区域或少数站点,且时间尺度不统一。仅有胡庆芳等[18]、YIN 等[21]进行了全国尺度的研究讨论,但也存在时空尺度的差异性,且空间划分与农业区划不匹配。因此,太阳辐射数据的极度缺乏及已有研究成果的时空差异性,给大规模计算高精度的 ET_{0-PM} 带来了困难。实际应用中,FAO 56 建议的通过 Angstrom 公式及其参数计算 R_s,仍然是大规模计算 ET_{0-PM} 的首选。

本研究以中国九大农业行政区划为研究区,试图从更精细的时空尺度,基于多年平均观测数据对比分析 FAO 56 建议的通过 Angstrom 公式及对应参数计算的太阳辐射经验值 R_{s-c} 与观测值 R_{s-o} 的时空差异,以及输入 PM 公式获得的 ET_0 结果(ET_{0-c})的可靠性,以丰富基于 R_{s-c} 计算 ET_{0-c} 的研究案例,为大尺度区域寻求更稳定合理和高精度的标准参考作物需水量计算方案提供参考。

1　数据及预处理

1.1　气象观测数据与处理

本研究使用的气象观测数据来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn/),包括中国地面气候资料月值数据集和中国辐射月值数据集,数据的时间尺度为 1957 年 1 月—2017 年 3 月,具体数据要素及用途见表 1。

数据预处理上,首先,通过站点编号将中国地面气候资料月值数据集、中国辐射月值数据集、站点经纬度进行关联,使得所有要素数据均一一对应,并将月 R_{s-o} 数据转换为日均值,与此同时,将所有要素校正为 PM 公式要求的对应高度(如风速要求为 2 m 相对高度)的标准数值[1];其次,根据 FAO 56 建议的以日为时段的天顶辐射计算程序,以上一步得到的共有数据站点的纬度求得各站点逐月的日平均天顶辐射 R_a,并依据 R_a 大于 R_s 的规律,剔除 R_{s-o} 大于 R_a 的数据记录。最终,参考 FAO 计算 ET_{0-PM} 的案例,确保每个站点至少有 15 年的累计观测数据,共得到有效数据站点 112 个(图 1,图中 A 表示东北平原区、B 表示北方干旱半干旱区、C 表示黄淮海平原区、D 表示黄土高原区、E 表示青藏高原区、F 表示长江中下游地区、G 表示四川盆地及周边地区、H 表示华南区、I 表示云贵高原区)。

表 1 数据及用途

Tab. 1 Data declaration

数据集	数据要素	原始数据单位	本研究数据单位	用途
中国地面气候资料月值数据集	平均气压 P	0.1 hPa/d	kPa/d	计算湿度计常数 γ
	平均水汽压 e_a	0.1 hPa/d	kPa/d	计算参考作物需水量 ET_{0-PM}
	平均最小气温 T_{min}	0.1℃/d	℃/d	计算平均气温 T_{mean}、饱和水汽压 e_s、饱和水汽压斜率 Δ、土壤热通量 G、地表净输出长波辐射 R_{nl}
	平均最大气温 T_{max}	0.1℃/d	℃/d	
	平均风速 u_2	0.1 m/(s·d)	m/(s·d)	计算参考作物需水量 ET_{0-PM}
	日照百分率 n/N	%/d	0.01/d	计算地表太阳辐射 R_s
	站点经纬度	(° ′)	(°)	计算天顶辐射 R_a
中国辐射月值数据集	地表太阳辐射 R_s	0.01 MJ/(m²·month)	MJ/(m²·d)	计算作物表面净辐射 R_n,本研究中,其观测值表示为 R_{s-o},估算值表示为 R_{s-c}

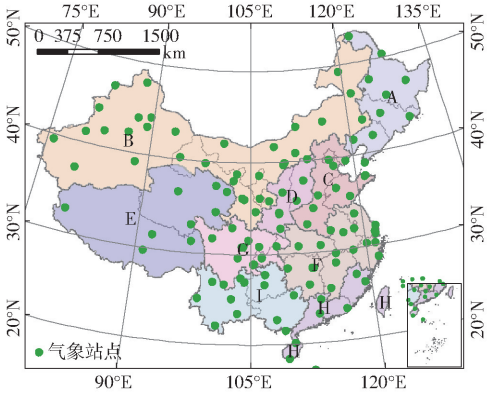


图 1 农业区划及数据站点位置

Fig. 1 Agricultural regions and data stations location

1.2 农业区划数据

农业区划数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/dataList.aspx)发布的以省级行政区划界线划分的中国九大农业区划数据,包括东北平原区、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、云贵高原区(图 1)。

2 基于 Penman-Monteith 公式的 ET_0 算法

2.1 基于气象观测值的 ET_0 计算过程

根据 FAO PM 公式的输入要素[1],基于气象站点观测值的 ET_{0-PM} 计算公式为

$$ET_{0-PM}=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\dfrac{900}{T_{mean}+273}u_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)} \tag{1}$$

其中

$$T_{mean}=\frac{T_{max}+T_{min}}{2} \tag{2}$$

$$e_s=\frac{e(T_{max})+e(T_{min})}{2} \tag{3}$$

$$e(T)=0.6108\exp\frac{17.27T}{T+237.3} \tag{4}$$

$$\Delta=\frac{4098\left(0.6108\exp\dfrac{17.27T_{mean}}{T_{mean}+237.3}\right)}{(T_{mean}+237.3)^2} \tag{5}$$

$$\gamma=\frac{C_PP}{\varepsilon\lambda}=6.65\times10^{-4}P \tag{6}$$

$$R_n=R_{ns}-R_{nl} \tag{7}$$

$$R_{ns}=(1-a)R_{s-o} \tag{8}$$

$$R_{nl}=\sigma\frac{T_{max,k}^4+T_{min,k}^4}{4}(0.34-0.14\sqrt{e_a})\cdot\left(1.35\frac{R_s}{R_{so}}-0.35\right) \tag{9}$$

$$R_{so}=(0.75+2\times10^{-5}Z)R_a \tag{10}$$

式中 T——大气温度,℃

$e(T)$——空气温度 T 时的饱和水汽压,kPa

λ——水汽化潜热,取 2.45 MJ/kg

C_P——常压下的比热容,取 1.013×10^{-3} MJ/(kg·℃)

ε——水蒸气分子量与干燥空气分子量的比,取 0.662

R_{ns}——地表净太阳短波辐射,MJ/(m²·d)

a——发射率或冠层发射系数,以草为假想的参考作物时,取 0.23

σ——Stefan-Boltzmann 常数,取 4.903×10^{-9} MJ/(K⁴·m²·d)

$T_{max,k}$——24 h 内最高绝对温度,K

$T_{min,k}$——24 h 内最低绝对温度,K

R_{so}——晴空条件下到达地表的太阳总辐射,也称晴空太阳辐射,MJ/(m²·d)

R_s/R_{so}——相对短波辐射值,其值小于等于 1.0

Z——观测站的海拔,m,因 $2\times10^{-5}Z$ 实际值较小,在计算中可忽略不计

以月为计算区间的土壤热通量计算式为

$$G_{month,i}=0.07(T_{month,i+1}-T_{month,i-1}) \tag{11}$$

式中 $G_{month,i}$——第 i 月的土壤热通量,MJ/(m²·d)

$T_{month,i-1}$——第 $i-1$ 月的大气平均温度,℃/d

$T_{\text{month},i+1}$——第 $i+1$ 月的大气平均温度，℃/d

2.2 FAO 56 建议的 R_s 和 R_{so} 估算方法

在不能测得太阳辐射 R_s 的地区，FAO 56 建议通过 Angstrom 公式进行估算[1]，公式为

$$R_{s-c} = \left(a_s + b_s \frac{n}{N}\right) R_a \tag{12}$$

$$R_{so} = (a_s + b_s) R_a \tag{13}$$

式中　n——实际日照持续时间，h

N——最大可能的日照持续时间或日照时数，h

a_s——回归常数，表示在阴天条件下，R_a 到达地面的比例（即 $n=0$）

其中 $a_s + b_s$ 表示晴天条件下，R_a 到达地面的比例（即 $n=N$），此时太阳总辐射即为晴空太阳辐射 R_{so}；前文已经说明已有研究在对中国区域 a_s、b_s 的校正结果上存在时空尺度不统一的缺陷，很难直接应用。因此，本研究继续使用 FAO 56 的建议值[1]，即 $a_s = 0.25$，$b_s = 0.50$。

3 R_{s-c} 与 R_{s-o} 及对应计算的 ET_{0-PM} 对比结果

3.1 R_{s-c} 与 R_{s-o} 年内变化对比结果

图 2 是通过 FAO 56 建议的 Angstrom 公式及其参数计算得到的全国及九大农业区的 R_{s-c} 和 R_{s-o} 站点均值的年内变化。结果表明，在变化趋势上，二者在全国及各区均保持一致，但是全国及各区的数值差异却比较明显。除 E 区外，其他各区均表现为 R_{s-c} 大于 R_{s-o}。在二者的绝对差值上，C、D、E、F、G、H、I 区比较稳定，只有夏秋季略微偏大于冬春季；A 区在 9 月到次年 3 月的 R_s 差值非常微小，在 4—8 月却较大；B 区在所有区中表现最好，除 7、8 月有微小的差值外，其他月份几乎接近于 0。

图 3 是全国及九大农业区站点 R_{s-c} 和 R_{s-o} 各季均值的相关关系图。以 R^2 为评判标准，全国范围内无论是年均还是各季都相关性显著，R^2 超过 0.8，但各区的结果却表现参差不齐。全年相关性表现相对较显著且稳定的仅有 B、E、G 区；A 区在秋冬季节相关性较好，春夏较差；C 区春季略好，其他季节较差；D 区除冬季外，其他季节表现较好；而 F、H、I 区则是在夏季相关性较差，其他季节均较好。各区的年平均相关性方面，D、E、F、G、H、I 区 R_{s-c} 和 R_{s-o} 的相关性相对较好，其他区的相对较差。

图 4 是 R_{s-c} 与 R_{s-o} 逐月相对差值（$R_{DS} = R_{s-c} - R_{s-o}$）的时空分布。从图可以看出，E 区和 G 区西侧、B 区北侧常年 R_{s-c} 小于 R_{s-o}，B 区西北部和中部冬春季节 R_{s-c} 小于 R_{s-o}，夏秋季节 R_{s-c} 大于 R_{s-o}，其中，E 区和 G 区西侧的绝对差值相对较大，B 区北侧的绝对差值相对较小，3 个区域的差值随季节变化较稳定。其他地区常年 R_{s-c} 大于 R_{s-o}，其中，F、H、I 区和 G 区东侧的绝对差值较大，春、夏季最大，最高达到 4.41 MJ/(m²·d)。A、C、D 区季节性变化明显，冬季绝对差值最小，夏季最大，春、秋居中。

3.2 基于 R_{s-c} 和 R_{s-o} 计算的 ET_{0-PM} 对比结果

图 5 是分别通过 R_{s-c} 和 R_{s-o} 计算的 112 个站点 ET_{0-PM}（分别表示为 ET_{0-c} 和 ET_{0-o}）在全国及各农业区的站点均值年内变化。从图 5 可看出，B、E 区的 ET_{0-c} 和 ET_{0-o} 逐月站点均值几乎重合；A 区除

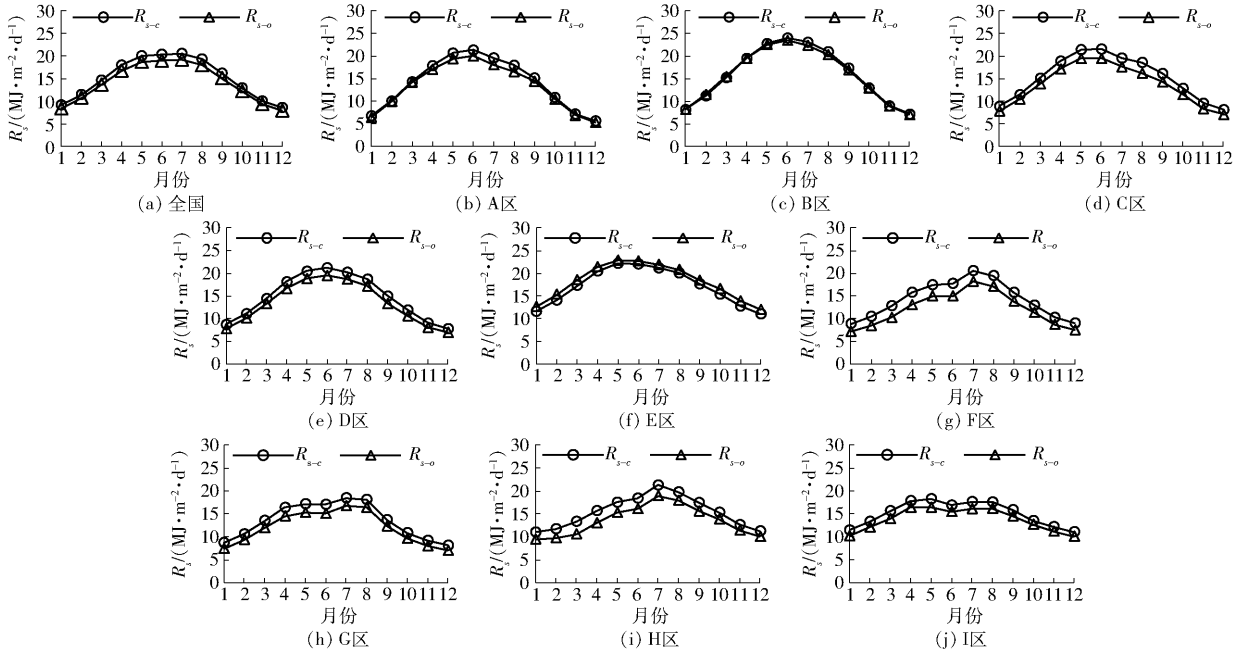
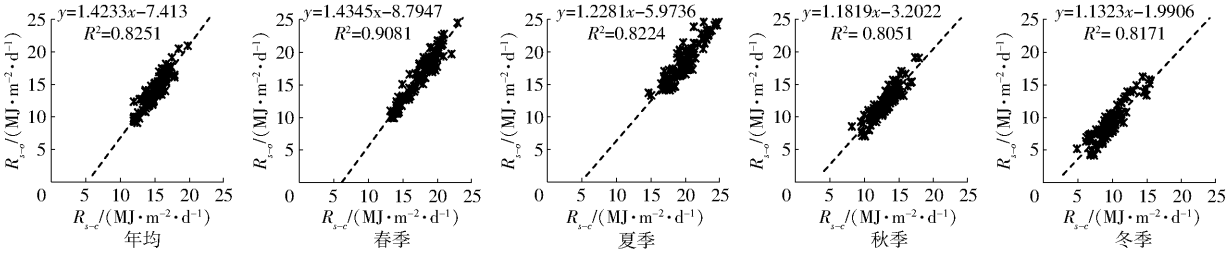
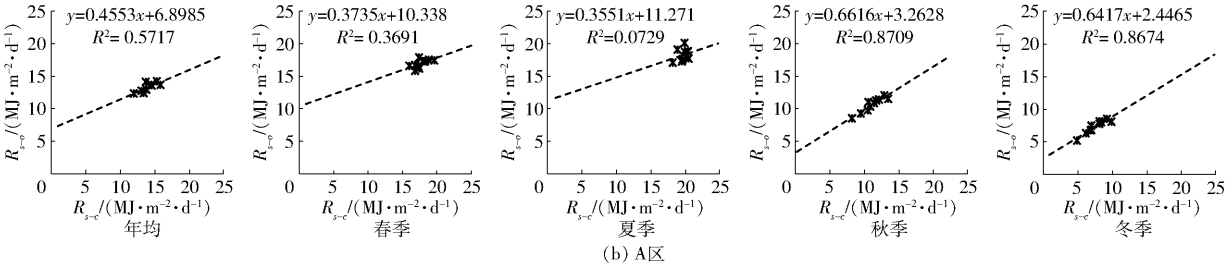


图 2　全国及各区平均 R_{s-c} 和 R_{s-o} 年内变化对比曲线

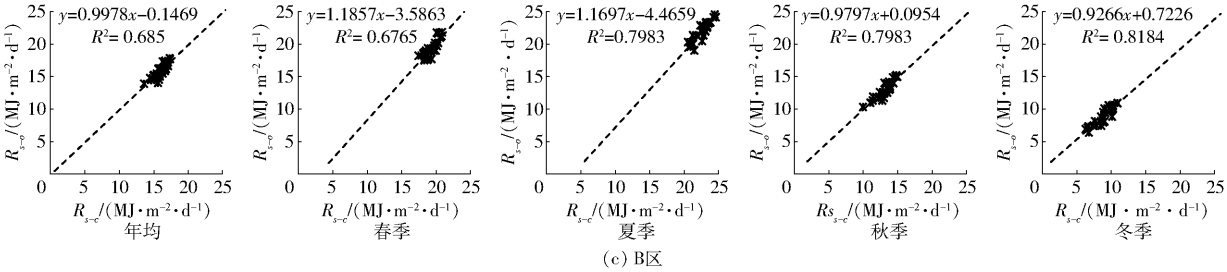
Fig. 2　Comparison curves of annual changes of average R_{s-c} and R_{s-o} in the whole country and various regions



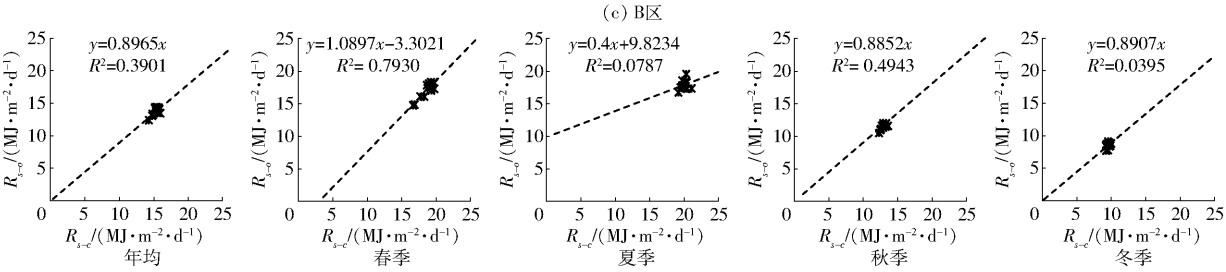
(a) 全国



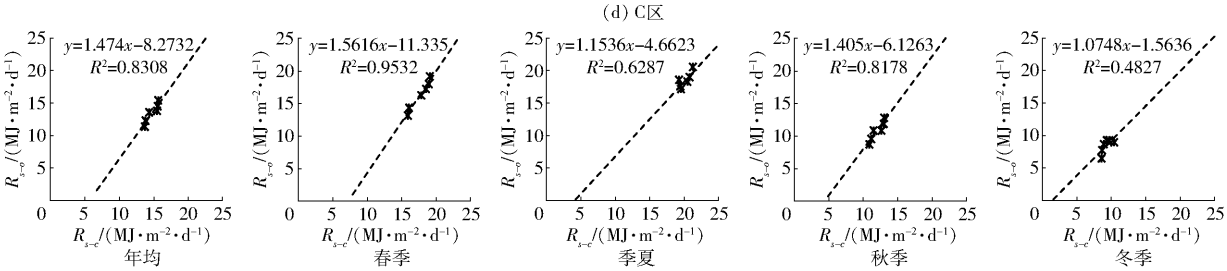
(b) A区



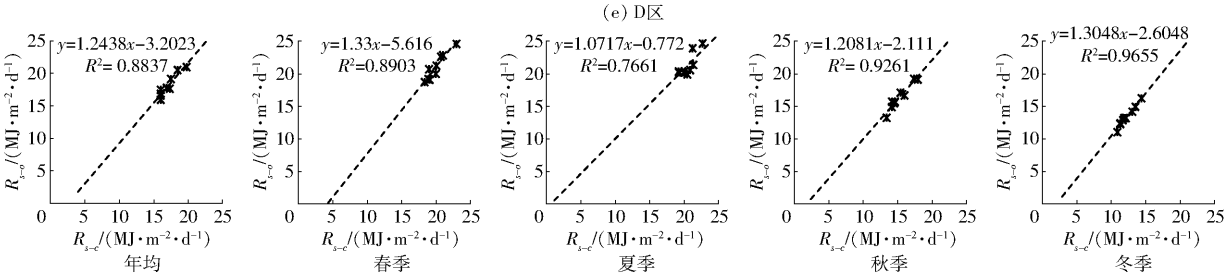
(c) B区



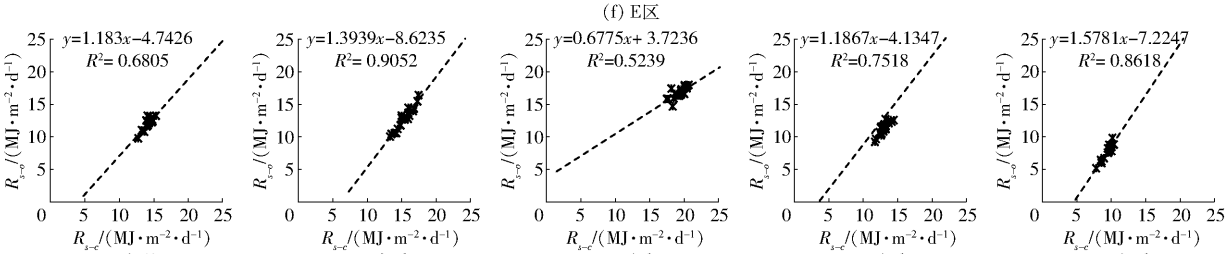
(d) C区



(e) D区



(f) E区



(g) F区

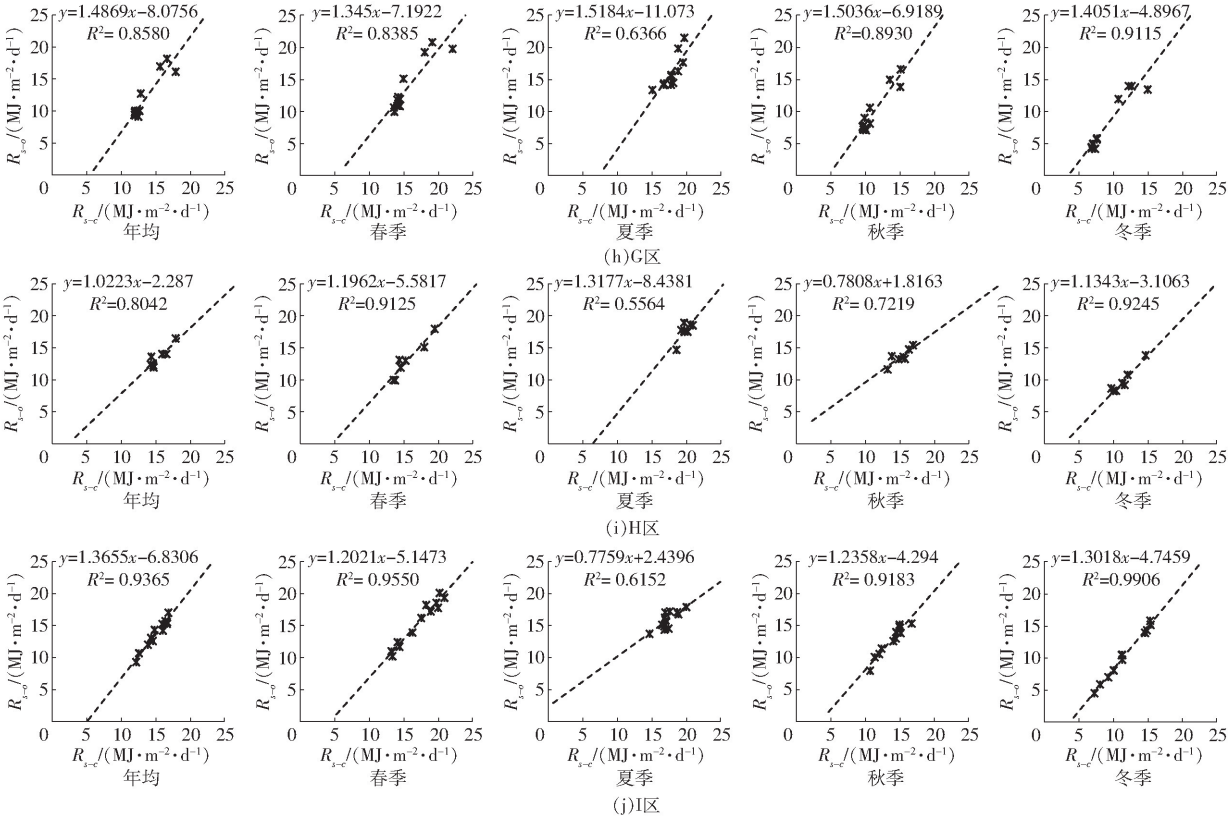


图 3　全国及各区站点 R_{s-c} 和 R_{s-o} 各季均值的相关关系

Fig. 3　Correlation of quarterly stations mean of R_{s-c} and R_{s-o} in the whole country and various regions

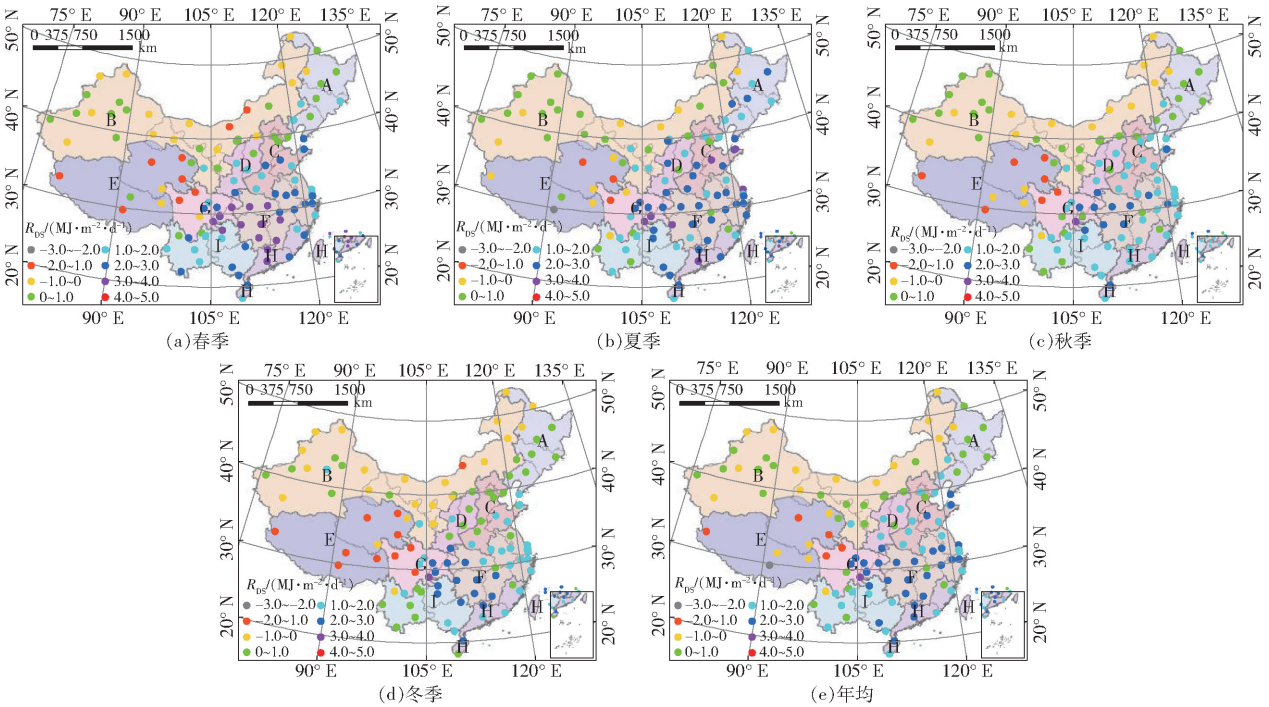


图 4　R_{s-c} 和 R_{s-o} 相对差值的时空分布

Fig. 4　Relative difference spatiotemporal distributions of R_{s-c} and R_{s-o}

5 ~8 月外，其他月份也几乎重合；C、D、I 区季节变化明显，冬季基本重合，夏季差值增大；F、G、H 区虽然常年存在相对较大的绝对差值，但比较稳定。

图 6 是全国及各农业区基于 R_{s-c} 和 R_{s-o} 计算得到的站点 ET_{0-c} 和 ET_{0-o} 各季均值关系。ET_{0-c} 和 ET_{0-o} 在各季节均表现为显著的线性相关性，而且较为稳定，R^2 均超过 0.67，最大值更是接近于 1，线性回归系数与 1.0 的绝对差值在大部分农业区不超过 0.1，少数在 0.1 ~ 0.2 之间，只有个别超过 0.2。ET_{0-c} 和 ET_{0-o} 的年均相关性除 F、G 区的 R^2 较小外

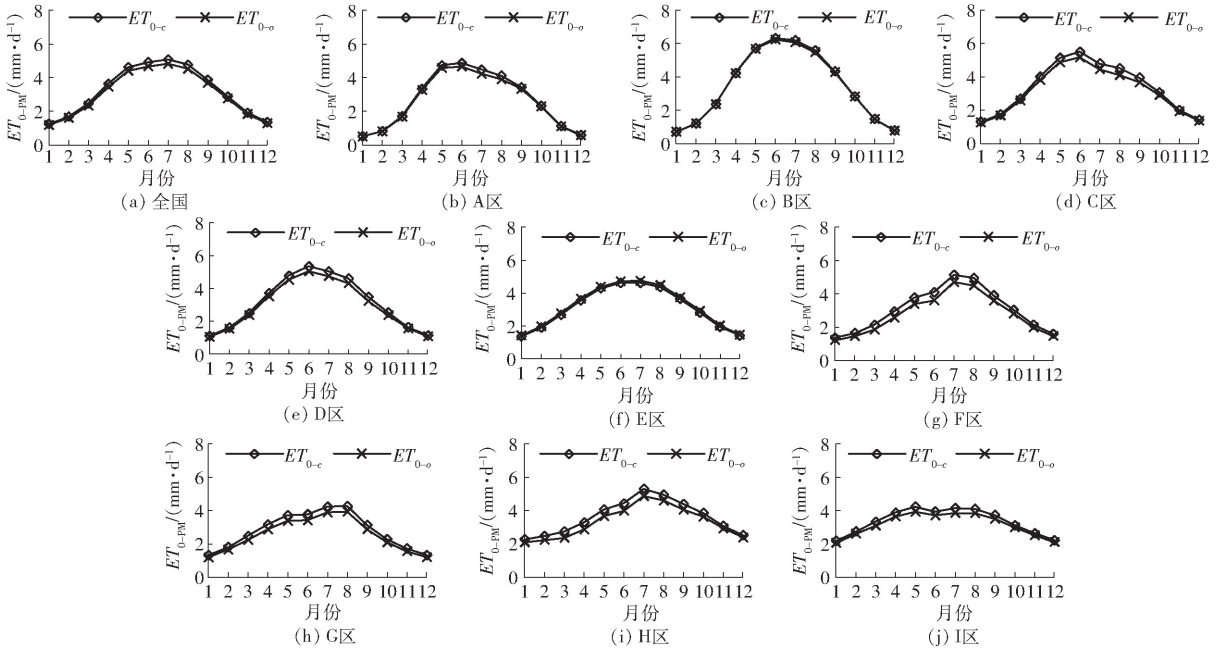


图 5 基于 R_{s-c} 和 R_{s-o} 分别计算的 ET_{0-PM} 逐月站点均值结果对比曲线

Fig. 5 Comparison curves of monthly station mean of ET_{0-PM} results calculated by R_{s-c} and R_{s-o} respectively

(分别为 0.770 6、0.866 4),其他区均超过 0.95,回归系数除 D 区外,其他区均在 1.0 左右。

图 7 是在其他输入参数不变的情况下,由 R_{s-c} 和 R_{s-o} 分别计算的 ET_{0-c} 和 ET_{0-o} 相对差值($R_{DE}=ET_{0-c}-ET_{0-o}$)时空分布。ET_{0-c} 和 ET_{0-o} 年均相对差值主要集中在 -0.25 ~ 0.25 mm/d 之间,其中,B 区常年维持在 -0.25 ~ 0.25 mm/d,A、D、E 区和 G 区西北部的绝对差值仅在夏季会有站点突破 0.25 mm/d,C、I、H 区则表现为春夏部分站点偏高,并在夏季达到最大值,而剩余 F 区和 G 区东南部只有冬季的绝对差值在 0.25 mm/d 以内,其他季节则较高,夏季甚至突破 0.5 mm/d。

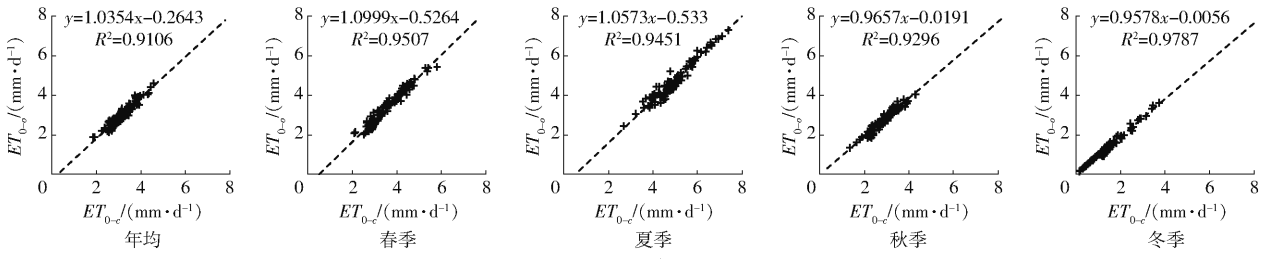
4 分析与讨论

4.1 R_{s-c} 与 R_{s-o} 对比结果分析

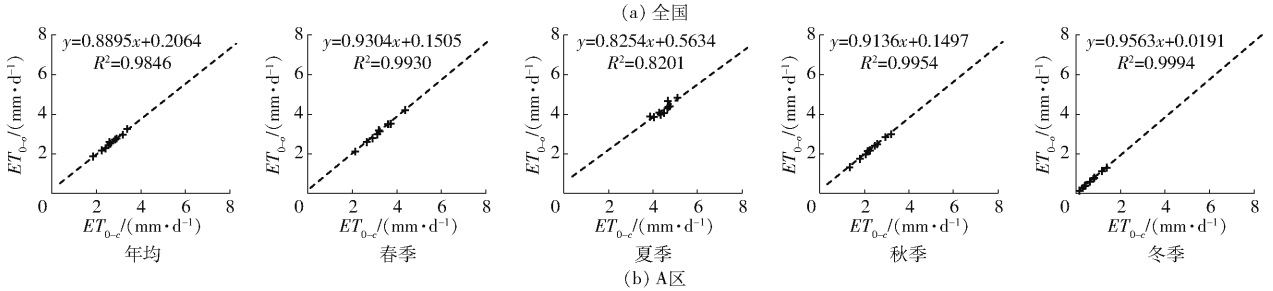
分析 R_{s-c} 与 R_{s-o} 的逐月站点均值比较结果(图 2)可知,FAO 56[1] 推荐的 Angstrom 公式及其参数只有在 E 区的 R_{s-c} 比实际值偏小,且绝对差值非常平稳,说明该区中低纬度和高海拔的地理区位特点使到达其地面的太阳辐射基本不受季节变化的影响;而在其他 8 个农业区计算的 R_{s-c} 均比实际值偏大,且季节变化较明显,夏季偏离程度最大。二者基于全国站点的平均值与 C、D、F、G、H、I 区的表现一致,但是在 A、B、E 区的影响下,R_{s-c} 偏离 R_{s-o} 的程度较这 6 个区有所减小,但仍然表现为 R_{s-c} 全年大于 R_{s-o} 的规律。

R_{s-c} 与 R_{s-o} 的相关性结果(图 3)显示,112 个站点的年均值和各季均值相关性显著,但是各农业区的 R^2 结果却参差不齐,且无论是全国还是各农业区,二者的线性回归系数均不稳定,偏离 $y=x$ 斜线的程度也不均一,说明 R_{s-c} 与 R_{s-o} 存在一定的差异,且不同尺度之间的差异程度不同,二者的相对差值时空分布(图 4)也印证了这一点,即北方农业区 R_{s-c} 与 R_{s-o} 的年内绝对差值整体相对较小,南方农业区相对较大,春夏季略微大于秋冬季,与我国雨热同期的典型季风气候造成的季节性天气条件削弱到达地面的太阳辐射规律相符合,但 R_{s-c} 与 R_{s-o} 相对差值的时空波动却是南方农业区比北方农业区小一些,可能是南方地区常年多云雨的稳定天气条件所造成的。

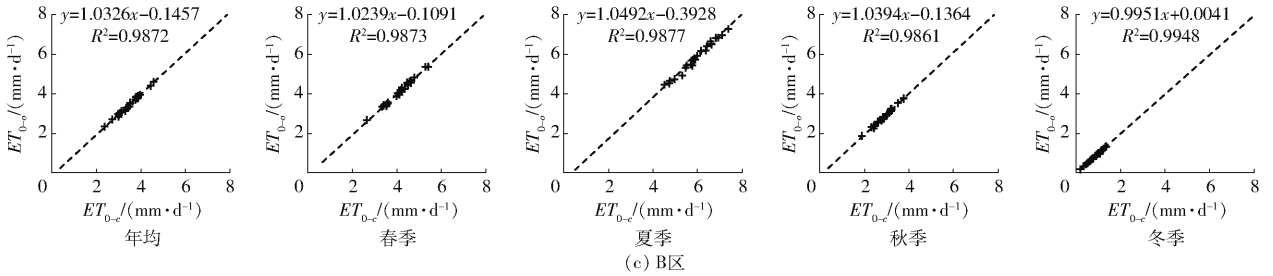
为了进一步验证 R_{s-c} 与 R_{s-o} 的差异是否显著,本研究基于统计学中讨论两组样本差异是否显著的独立样本 T 检验方法进行了检验,结果表明(表 2),全国年均及各季节的方差方程 Levene 检验显著性概率 P 值和 T 检验的显著性概率 P 值均小于 0.05,可见,R_{s-c} 和 R_{s-o} 存在显著差异。而各区的 Levene 检验显著性概率 P 值均大于 0.05,T 检验的显著性概率 P 值却在不同区、不同季节差异明显,A、D、I 区在夏季的 T 检验 P 值小于 0.05,H 区则在夏季和秋季 T 检验 P 值小于 0.05,而 C、F 区则全年的 T 检验 P 值均小于 0.05,说明在这些区域的特定时段,R_{s-c} 和 R_{s-o} 存在显著差异,其他时段 R_{s-c} 和 R_{s-o} 差异不显著;只有 B、E、G 区的 T 检验 P 值全年均大于 0.05,说明在这三大区域全年 R_{s-c} 和 R_{s-o} 差异不显著。针对年内平均而言,C、F、H 的 T 检验 P 值小于 0.05,其他区均大于 0.05。因此,从统计分析的角



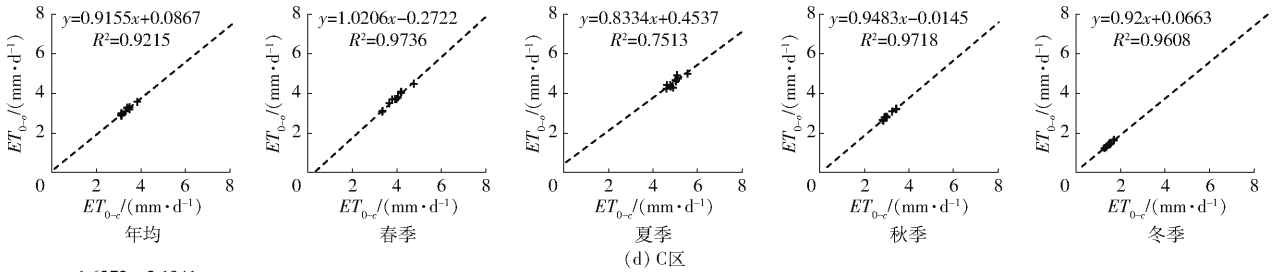
(a) 全国



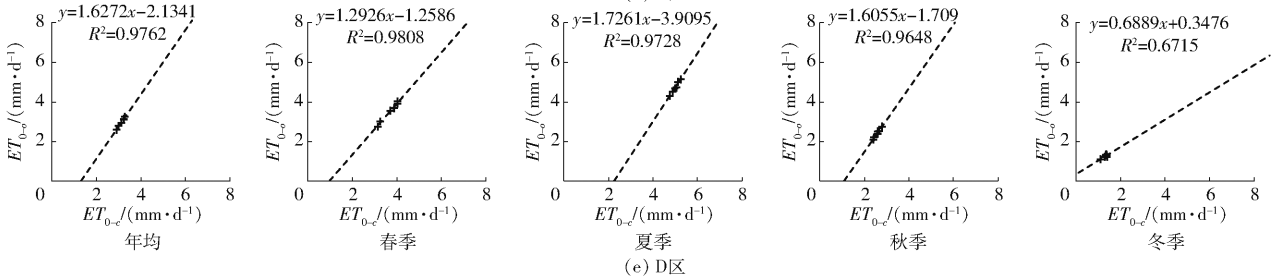
(b) A区



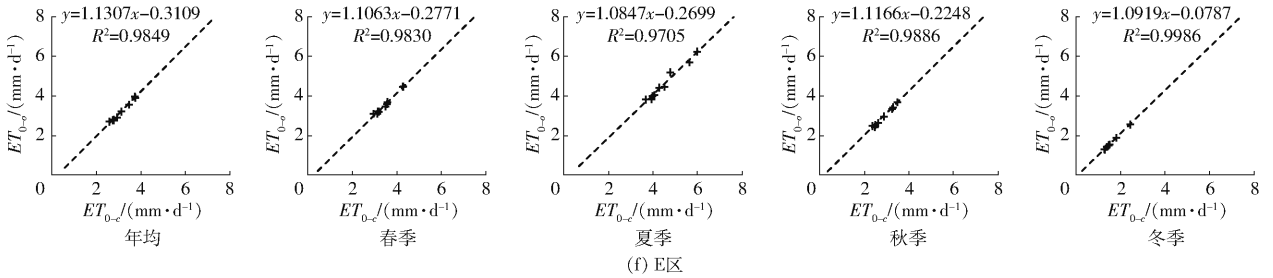
(c) B区



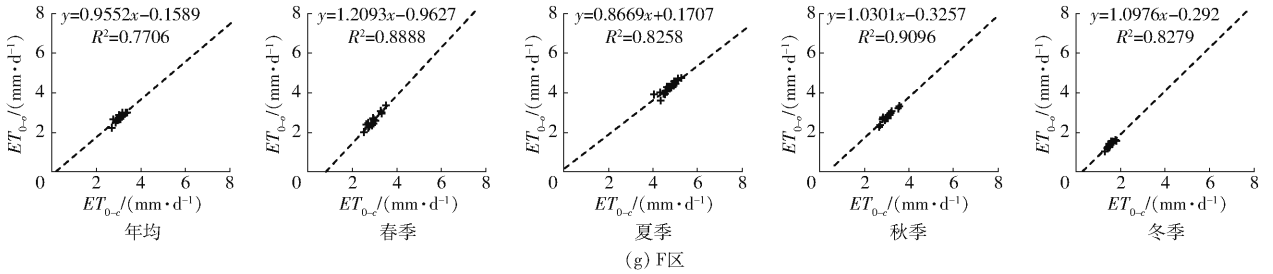
(d) C区



(e) D区



(f) E区



(g) F区

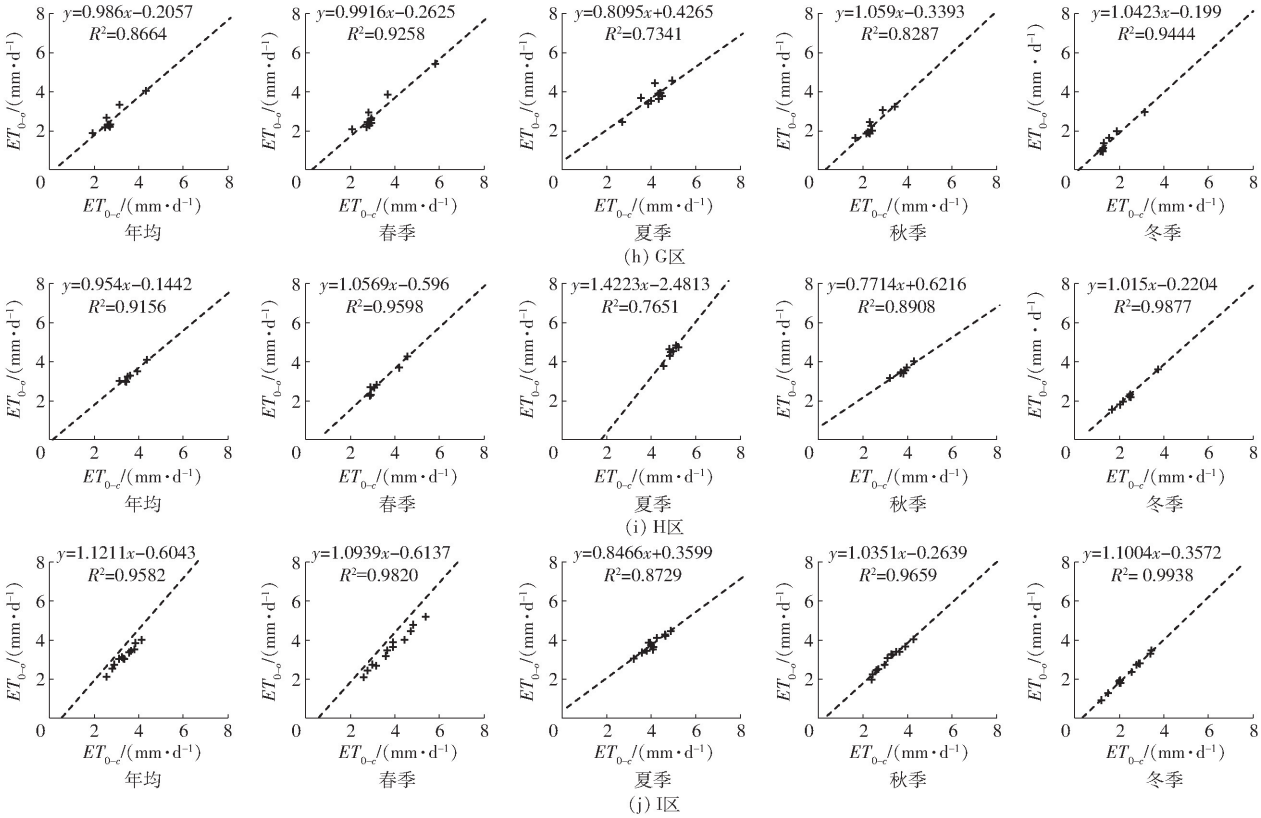


图 6 基于 R_{s-c} 和 R_{s-o} 分别计算的 ET_{0-PM} 各季均值相关关系

Fig. 6 Quarterly correlation of stations mean ET_{0-PM} calculated by R_{s-c} and R_{s-o} respectively

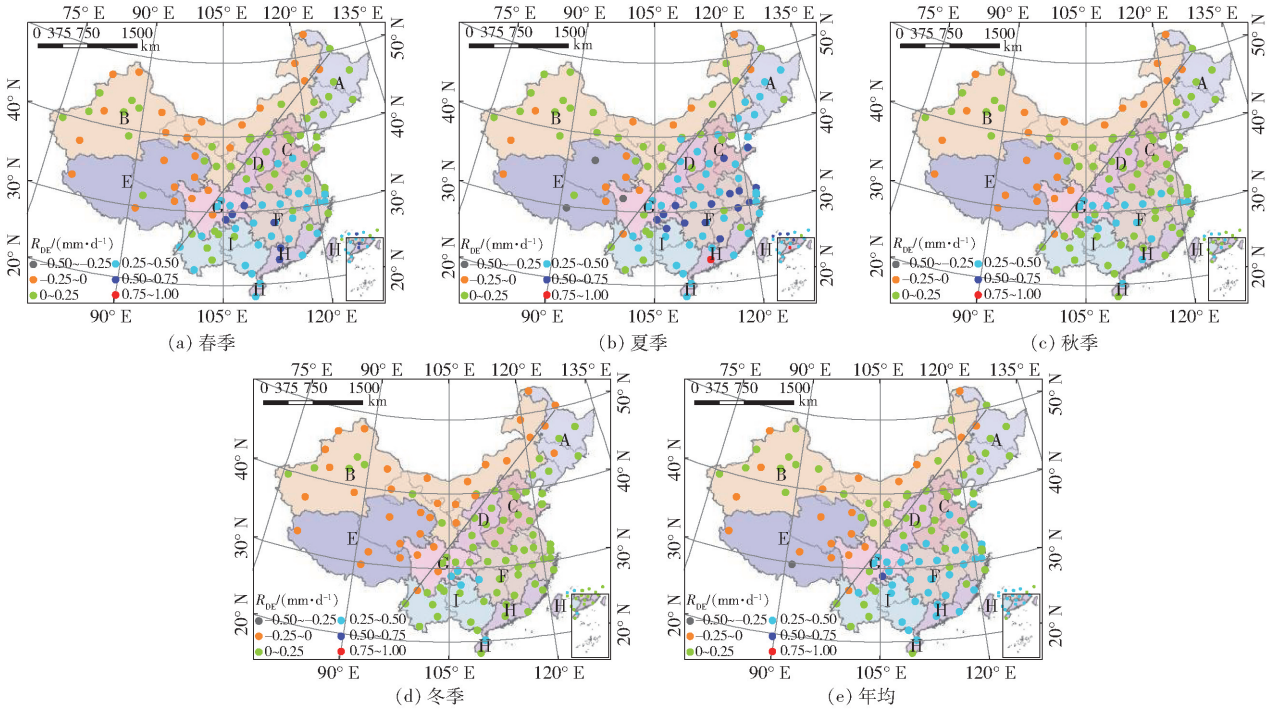


图 7 基于 R_{s-c} 和 R_{s-o} 计算的 ET_{0-PM} 相对差值时空分布

Fig. 7 Spatiotemporal distribution of relative difference of ET_{0-PM} calculated by R_{s-c} and R_{s-o} respectively

度，R_{s-c} 和 R_{s-o} 只是在不同区域的特定时段差异性不显著，可以相互替代使用，而在其他时段则差异显著，不可相互替代。因此，在全国范围内基于 FAO 建议的 Angstrom 公式及其参数估算 R_s 时，其结果与观测值的差异不容忽视。

综合而言，因为雨热同期的季风气候造成的多年月平均尺度大气组分时空分布不均一，在全国及九大农业区的所有月份均使用 FAO 推荐的 Angstrom 公式及其 a_s、b_s 系数固定值计算的 R_{s-c} 和 R_{s-o} 存在一定的时空差异。根据 PM 公式，推测使用 R_{s-c} 直接替代 R_{s-o}

表 2　R_{s-c}和 R_{s-o}各季节独立样本 T 检验结果(P 值)

Tab. 2　T test results of quarterly independent samples of R_{s-c} and R_{s-o}

农业区	年均		春		夏		秋		冬	
	Levene 检验	T 检验	Levene 检验	T 检验	Levene 检验	T 检验	Levene 检验	T 检验	Levene 检验	T 检验
全国	<0.001	<0.001	<0.001	0.003	<0.001	<0.001	0.008	0.003	0.022	0.028
A	0.250	0.101	0.196	0.088	0.323	0.001	0.403	0.432	0.239	0.671
B	0.216	0.510	0.118	0.961	0.144	0.092	0.404	0.626	0.470	0.856
C	0.294	<0.001	0.409	0.004	0.344	<0.001	0.856	<0.001	0.255	<0.001
D	0.403	0.101	0.282	0.230	0.689	0.024	0.530	0.110	0.294	0.130
E	0.339	0.202	0.226	0.253	0.233	0.445	0.590	0.217	0.565	0.105
F	0.181	<0.001	0.180	<0.001	0.793	<0.001	0.289	<0.001	0.068	<0.001
G	0.058	0.230	0.092	0.245	0.076	0.051	0.090	0.319	0.023	0.453
H	0.972	0.029	0.769	0.091	0.512	0.005	0.584	0.047	0.698	0.134
I	0.242	0.113	0.264	0.216	0.590	0.016	0.384	0.238	0.308	0.419

计算 ET_{0-PM}可能会引起误差，青藏高原(E 区)的 ET_{0-PM}可能会偏小，其他地区可能会偏大，且 C、D、E、F、G、H、I 区的 ET_{0-PM}绝对差值可能会常年相对比较稳定，A、B 区可能随季节的变化而变化明显。

4.2　ET_{0-c}和 ET_{0-o}对比结果分析

分析各区站点 ET_{0-c}和 ET_{0-o}均值的时空差异(图 5)，北方农业区的 ET_{0-c}与 ET_{0-o}绝对差值整体较小，南方农业区则整体略大，年内变化与 R_{s-c}和 R_{s-o}的表现(图 2)一致，年初、年尾较小，年中略大，且二者的数值相对差异上也与 R_{s-c}和 R_{s-o}的表现基本相符，但总体较小，ET_{0-c}与 ET_{0-o}平均只有 0.06 ~ 0.26 mm/d 的差值。

对比 ET_{0-c}和 ET_{0-o}(图 6)与 R_{s-c}和 R_{s-o}(图 3)的相关性分析结果可知，ET_{0-c}和 ET_{0-o}在各个农业区的不同季节，均表现为显著的线性相关性，而且较为稳定，回归系数也较 R_{s-c}和 R_{s-o}的结果好，大部分拟合直线与 $y = x$ 斜线吻合度较好，说明 ET_{0-c}和 ET_{0-o}的整体差异较小，仅个别农业区在特定时段 ET_{0-c}与 ET_{0-o}偏差略大。

综合分析 ET_{0-c}和 ET_{0-o}相对差值时空分布(图 7)可知，大致以“胡焕庸线”为界，西北地区站点的绝对差值较小，常年维持在 0 ~ 0.25 mm/d；而“胡焕庸线”以东的北方地区则遵循季风气候的变化规律，绝对差值表现为先增大后减小，夏季的差值大部分站点在 0.5 mm/d 以内，个别站点会超过 0.5 mm/d，南方地区则随季节变化而变化明显，大致以长江、珠江为中线，从春季开始由中线向两侧随着时间的变化不断增大，在夏季达到最大值，但大部分站点在 0.75 mm/d 以内，个别站点会超过 0.75 mm/d，而后，则由两侧向中线随时间变化逐渐减小，在冬季达到最小值。总的来说，ET_{0-c}和 ET_{0-o}在北方农业区的差异较小，南方农业区的差异略大，且夏季较明显。

同样，为进一步确定 ET_{0-c}和 ET_{0-o}是否存在显著性差异，也对二者进行了独立样本 T 检验的统计学验证，结果表明(表 3)，ET_{0-c}和 ET_{0-o}的方差方程 Levene 检验显著性概率 P 值均大于 0.05，但是，在全国尺度上、C 区年均及 C 区和 H 区的夏季 ET_{0-c}和 ET_{0-o}的 T 检验 P 值却小于 0.05，而 F 区则是全年的 T 检验 P 值小于 0.05，说明在这些特定的时空尺度下 ET_{0-c}和 ET_{0-o}差异显著，其他时空尺度下，ET_{0-c}和 ET_{0-o}的差异并不显著。

表 3　基于 R_{s-c}和 R_{s-o}计算的两组 ET_{0-PM}独立样本 T 检验结果(P 值)

Tab. 3　T test results of two groups of independent ET_{0-PM} samples calculated by R_{s-c} and R_{s-o} respectively

农业区	年均		春		夏		秋		冬	
	Levene 检验	T 检验	Levene 检验	T 检验	Levene 检验	T 检验	Levene 检验	T 检验	Levene 检验	T 检验
全国	0.412	0.029	0.138	0.107	0.423	0.044	0.971	0.098	0.828	0.456
A	0.768	0.651	0.870	0.785	0.888	0.178	0.817	0.839	0.893	0.961
B	0.709	0.812	0.813	0.949	0.727	0.683	0.737	0.848	0.990	0.997
C	0.944	0.047	0.949	0.292	0.797	0.003	0.884	0.097	0.800	0.365
D	0.215	0.182	0.488	0.495	0.275	0.086	0.268	0.194	0.865	0.347
E	0.596	0.684	0.740	0.700	0.642	0.777	0.614	0.641	0.858	0.724
F	0.793	<0.001	0.366	0.001	0.798	<0.001	0.781	0.004	0.331	0.002
G	0.602	0.356	0.767	0.497	0.774	0.167	0.369	0.348	0.664	0.604
H	0.940	0.174	0.919	0.315	0.394	0.021	0.779	0.161	0.981	0.608
I	0.774	0.344	0.705	0.505	0.956	0.161	0.746	0.543	0.719	0.705

综上所述,实际应用时,在没有 R_{s-o} 的条件下,西北和青藏高原地区全年,黄土高原、黄淮海平原、东北平原地区的春、秋、冬季,南方地区的冬季,使用 R_{s-c} 获得的 ET_{0-c} 与 ET_{0-o} 相对误差较小且具有一定的时空稳定性,可以直接替代 ET_{0-o} 使用;而黄土高原、黄淮海平原、东北平原地区的夏季,南方地区的春、夏、秋季因受季风气候的影响,相对误差会略微偏大,且不稳定,因此,在这些时空尺度下使用 R_{s-c} 获得参考作物需水量,建议研究相应的方法进行校正,否则会有误差,且偏大。考虑到中国地区的典型季风气候特点、农业生产制度和大宗作物的灌溉需求,春季的北方地区一般容易发生旱灾,即"春旱",灌溉工程的设计和灌溉作业以参考冬季和春季的 ET_0 为主,基于 PM 公式大规模计算 ET_{0-PM} 在缺少辐射观测数据的条件下可使用 FAO 56 建议的 Angstrom 公式及其参数计算获得太阳辐射值;在全国范围的夏季"伏旱"期间,无论是北方还是南方,输入 R_{s-c} 计算的 ET_{0-c} 则比输入 R_{s-o} 计算的 ET_{0-o} 偏大。因此,在高精度的节水农业应用中,有必要研究相应的校正模型进行夏季的 ET_{0-c} 校准。

4.3 讨论

4.3.1 R_{s-c} 计算方案的系统误差

从图 3、4、6、7 的结果分析可知,采用 FAO 56 建议的 Angstrom 公式系数固定值计算 R_{s-c} 未考虑不同时空尺度下地表大气性质的变化导致实际到达地面的太阳辐射时空变化,所以 R_{s-c} 的计算结果存在明显的系统误差,进一步致使 ET_{0-c} 的计算结果也存在系统误差。这也验证了已有的辐射参数对 ET_{0-PM} 计算的影响及 Angstrom 公式参数本地化研究[15-26]的必要性。特别是本研究的结果与胡庆芳等[18]基于 Angstrom 公式参数对 ET_{0-PM} 的影响及 FAO 建议值适用性评价研究在区域上具有基本一致结果,即基于 FAO 建议的 Angstrom 公式参数($a_s=0.25$,$b_s=0.50$)估算 R_{s-c},在中国北方农业区具有较好的适用性,而在中国南方地区的地区适用性较差,而对应基于估算的 R_{s-c} 计算的 ET_{0-c} 在北方地区与实际值一致性较好,在南方地区则偏大。但是,在青藏高原区,二者的研究结果却相反,本研究的结果是 FAO 的建议值在该区的适用性较好,而胡庆芳等[18]的研究结果是 FAO 的建议值在该区的适用性不强或较差。可能是二者的分区尺度、数据尺度及数据质量差异引起的,但具体原因则有待进一步探讨。所以,在现有研究基础上[15-26],还要继续探索和验证 Angstrom 公式适用于我国各农业管理区的本地化参数,基于不同的时空尺度和精度要求,形成相应的标准或规范才是其进一步推广应用的关键。

4.3.2 数据处理方式对结果的影响

本研究通过站点逐月日均值的多年均值来讨论 R_{s-c} 对 ET_{0-PM} 的影响,这一数据处理方式反映了稳定气候条件下的 R_s 和 ET_{0-PM} 变化。即无论是 R_{s-c}、R_{s-o} 的结果,还是 ET_{0-c}、ET_{0-o} 的结果,年内均值变化的增加趋势(图 2、5)6 月开始在 F、G、H、I 区均出现了减缓的现象,看似不符合 R_s 和 ET_0 的年内基本理论规律,但考察中国的气候条件可知,6 月开始,中国南方大范围进入"梅雨"季节,持续的阴雨天气导致了地表接收的太阳辐射减少。所以,R_{s-c} 对 R_{s-o}、ET_{0-c} 对 ET_{0-o} 整体上才表现出了相对稳定的差异,在应用中即可对 R_{s-c}、ET_{0-c} 引入一个校正常数或者回归校正模型,使其结果更接近观测结果。同时,从本研究的结果分析可知,ET_{0-c} 对 ET_{0-o} 的差异相比 R_{s-c} 对 R_{s-o} 更稳定,所以在计算 ET_0 的研究应用中,建议对 ET_{0-c} 建立校正关系进行结果的校正,而不是校正 R_{s-c} 后再计算 ET_{0-PM}。但是,对数据时间序列的平均处理也弱化了短期气候/天气变化的影响,且区域性的站点平均值未考虑站点海拔等潜在影响因素的变化,基于稳定差异关系校正的结果也可能只是区域的气候平均值。

4.3.3 数据质量对结果的影响

从本研究前后的结果比较来看,基于全国尺度的结果要比基于各区的结果要好,且时空变化也比较稳定,可能的原因在于数据站点在各区的分布不均。从相关性分析结果可以看出,站点密度较高且空间分布较均匀的农业区,其结果表现相对较好且稳定,说明了区域站点密度及空间分布的均一性对本研究的结果具有一定的影响,较少的站点分布可能存在区域代表性不足的问题,这一问题则是后续值得探讨的方向。此外,本研究参考 FAO 计算 ET_{0-PM} 的案例,选择观测时间尺度累计大于等于15 年的站点数据取多年平均值,但是,因为站点建设时间的不一致以及迁站、设备更新、观测任务的变化,各站点获取的数据时间尺度并不一致,这可能是本研究数据处理的缺陷,也是研究结果误差一个主要来源,因此,还需要统一数据的时间尺度进一步验证。

4.3.4 R_s 对 ET_{0-PM} 的影响

图 8 是 112 个站点所有月份 R_{s-c} 和 R_{s-o} 相对差值与对应的 ET_{0-c} 和 ET_{0-o} 相对差值的关系。从图可知,ET_{0-PM} 相对差值随 R_s 相对差值的增大而增大,且呈明显的 3 次方程曲线关系,R^2 接近 0.9,但是,受回归系数的影响,ET_{0-PM} 相对差值对 R_s 相对差值变化的反应却较平缓。本研究中 R_s 的相对差值主要集中在 -2.0 ~ 3.0 MJ/(m²·d)之间,而 ET_{0-PM} 相对差值却只有 -0.15 ~ 0.5 mm/d,进一步说明了 R_s

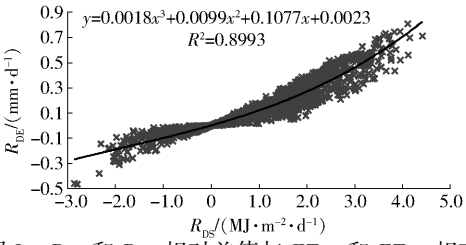


图 8　R_{s-c}和 R_{s-o}相对差值与 ET_{0-c}和 ET_{0-o}相对差值的关系

Fig. 8　Relationship between relative difference of R_{s-c}, R_{s-o} and relative difference of ET_{0-c}, ET_{0-o}

对 ET_{0-PM}影响可能并不大，在精度要求不高的情况下，中国范围内的大部分站点可以直接使用 R_{s-c}计算 ET_{0-PM}。然而，从图 8 拟合的方程曲线可以看出，随着 R_s相对差值的不断增大，ET_{0-PM}相对差值增加的值也有上升的趋势，因此，R_s对 ET_{0-PM}的影响可能存在一个范围，有必要进一步讨论具有不同误差等级的 R_{s-c}对 ET_{0-PM}的影响程度，在实践中，根据不同等级的 ET_{0-PM}误差要求，选择对应误差等级的 R_{s-c}，以节约成本。

5　结论

（1）R_{s-c}和 R_{s-o}的时空差异分析表明，二者的年内变化趋势在各区都表现一致，但是二者的相关性及差异性分析却表明，只有个别区域在特定季节具有较好的相关性，其他季节、其他区域则相关性不显著。单从 R_{s-c}和 R_{s-o}时空差异的角度，在中国九大农业区 R_{s-c}不能替代 R_{s-o}。

（2）基于 R_{s-c}和 R_{s-o}分别计算的 ET_{0-c}和 ET_{0-o}相关性及时空差异性分析表明，整体上 ET_{0-c}和 ET_{0-o}时空差异比较小，使用 R_{s-c}替代 R_{s-o}计算具有一定的可行性，只有个别区域在特定季节可能误差偏大。具体而言，在全国范围内的冬季、西北各区一年四季、华北及东北各区春、秋、冬季，以及华南地区秋、冬季的 ET_{0-c}和 ET_{0-o}差异均较小，可以用 ET_{0-c}替代 ET_{0-o}指导农业生产，各地区其他时段的 ET_{0-c}和 ET_{0-o}差异则略大，其中长江流域的差异最显著，使用 ET_{0-c}替代 ET_{0-o}需要进行必要的修正。

（3）由中国地区典型的季风气候特点及农业生产制度可知，长江流域以北地区的春季一般容易发生旱灾，灌溉工程的设计和灌溉作业以参考冬季和春季的参考作物需水量为主，而本研究的结果恰好表明 ET_{0-c}和 ET_{0-o}在冬春季的北方地区差异性最小，所以，实践中，在其他要素都是观测值的条件下，在中国北方主要灌溉需求地区的冬、春季，基于 PM 公式大规模计算 ET_{0-PM}在缺少辐射观测数据的条件下可使用 FAO 56 建议的通过 Angstrom 公式及其参数计算获得太阳辐射值。而在夏季“伏旱”期间，无论是北方还是南方，输入 R_{s-c}计算的 ET_{0-c}比输入 R_{s-o}计算的 ET_{0-o}偏大，在高精度的节水农业应用中，有必要研究相应的校正模型进行 ET_{0-c}的校准。

参　考　文　献

[1] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements—FAO irrigation and drainage paper 56[M]. Rome: FAO, 1998.

[2] ALLEN R G, PRUITT W O, WRIGHT J L, et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET_0 by the FAO56 Penman－Monteith method [J]. Agricultural Water Management, 2006, 81(1－2): 1－22.

[3] CAI J, LIU Y, LEI T, et al. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman－Monteith equation using daily weather forecast messages [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 145(1－2): 22－35.

[4] WANG K, DICKINSON R E. A review of global terrestrial evapotranspiration: observation, modeling, climatology, and climatic variability[J]. Reviews of Geophysics, 2012, 50(2):2011RG000373.

[5] 崔伟敏, 宋妮, 申孝军, 等. 不同气候区参考作物需水量计算方法对比研究 [J]. 节水灌溉, 2018(8): 75－80.
CUI Weimin, SONG Ni, SHEN Xiaojun, et al. Comparative analysis of different reference evapotranspiration methods for different climatic zones of China [J]. Water Saving Irrigation, 2018(8): 75－80. (in Chinese)

[6] ANTONOPOULOS V Z, ANTONOPOULOS A V. Daily reference evapotranspiration estimates by artificial neural networks technique and empirical equations using limited input climate variables [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 132: 86－96.

[7] GOCIC M, PETKOVIĆ D, SHAMSHIRBAND S, et al. Comparative analysis of reference evapotranspiration equations modelling by extreme learning machine [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127:56－63.

[8] 张昊, 郝春雷, 董喆, 等. 燕山北部丘陵温热区 ET_0 估算方法比较及修正[J]. 节水灌溉, 2018(8): 81－84,89.
ZHANG Hao, HAO Chunlei, DONG Zhe, et al. Comparison and revision of ET_0 estimation methods for the hilly and warm area in the North of Yanshan mountain[J]. Water Saving Irrigation, 2018(8): 81－84,89. (in Chinese)

[9] BEVEN K. Sensitivity analysis of the Penman－Monteith actual evapotranspiration estimates [J]. Journal of Hydrology, 1979, 44(3－4): 169－190.

[10] IRMAK S, PAYERO J O, MARTIN D L, et al. Sensitivity analyses and sensitivity coefficients of standardized daily ASCE－Penman－Monteith equation [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006, 132(6): 564－578.

[11] DEBNATH S, ADAMALA S, RAGHUWANSHI N S. Sensitivity analysis of FAO - 56 Penman - Monteith method for different agro-ecological regions of India[J]. Environmental Processes, 2015, 2(4): 689 - 704.

[12] AHMAD N F A, ASKARI M, HARUN S, et al. Sensitivity analysis of a FAO Penman - Monteith for potential evapotranspiration to climate change [J]. Jurnal Teknologi, 2017, 79(7): 21 - 30.

[13] BAKHTIARI B, LIAGHAT A M. Seasonal sensitivity analysis for climatic variables of ASCE - Penman - Monteith model in a semi-arid climate [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2011, 13:1135 - 1145.

[14] 张瑞美, 彭世彰, 徐俊增, 等. 不同 e_a 计算方法对 Penman - Monteith 公式的影响 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006,34 (6): 660 - 663.
ZHANG Ruimei, PENG Shizhang, XU Junzeng, et al. Influence of e_a on calculation of reference crop evapotranspiration with Penman - Monteith formula[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2006, 34(6): 660 - 663. (in Chinese)

[15] 袁宏伟, 袁先江, 汤广民, 等. 淮北平原 Angstrom 公式参数校正及太阳总辐射时空特征分析 [J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(5): 64 - 70.
YUAN Hongwei, YUAN Xianjiang, TANG Guangmin, et al. Correction of parameters in Angstrom formula and analysis of total solar radiation characteristics in Huaibei plain[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(5): 64 - 70. (in Chinese)

[16] 曹雯, 许莹, 段春锋. 安徽省太阳总辐射参数化模型的适用性研究 [J]. 中国农学通报, 2014, 30(26): 207 - 212.
CAO Wen, XU Ying, DUAN Chunfeng. Research on applicability of solar radiation parametric model in Anhui Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(26): 207 - 212. (in Chinese)

[17] 李曼曼, 梅旭荣, 钟秀丽, 等. 云南省 Ångström - Prescott 辐射模型的参数化研究 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 100 - 105.
LI Manman, MEI Xurong, ZHONG Xiuli, et al. Parameterization of Ångström - Prescott radiation model in Yunnan Province [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 100 - 105. (in Chinese)

[18] 胡庆芳, 杨大文, 王银堂, 等. Angstrom 公式参数对 ET_0 的影响及 FAO 建议值适用性评价 [J]. 水科学进展, 2010, 21(5): 644 - 652.
HU Qingfang, YANG Dawen, WANG Yintang, et al. Effects of Angstrom coefficients on ET_0 estimation and the applicability of FAO recommended coefficient values in China[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(5): 644 - 652. (in Chinese)

[19] LIU X, MEI X, LI Y, et al. Variation in reference crop evapotranspiration caused by the Ångström - Prescott coefficient: locally calibrated versus the FAO recommended [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(7): 1137 - 1145.

[20] 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 [J]. 干旱区研究, 2008, 25(1): 53 - 58.
ZHAO Jun, LI Wangping, LI Fei. Climatological calculation and analysis of global solar radiation in the Loess Plateau [J]. Arid Zone Research, 2008, 25(1): 53 - 58. (in Chinese)

[21] YIN Y, WU S, ZHENG D, et al. Radiation calibration of FAO56 Penman - Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(1): 77 - 84.

[22] 彭世彰, 徐俊增, 丁加丽, 等. a_s 和 b_s 取值对参考作物蒸发蒸腾量计算结果的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(3): 5 - 8.
PENG Shizhang, XU Junzeng, DING Jiali, et al. Influence of a_s and b_s values on determination of reference crop evapotranspiration by Penman - Monteith formula[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(3): 5 - 8. (in Chinese)

[23] 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 [J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(4): 516 - 521.
JU Xiaohui, TU Qipu, LI Qingxiang. Discussion on the climatological calculation of solar radiation[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2005, 28(4): 516 - 521. (in Chinese)

[24] 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 [J]. 资源科学, 2003, 25(6): 66 - 70.
DU Yaodong, MAO Huiqing, LIU Aijun, et al. The climatological calculation and distributive character of global solar radiation in Guangdong Province[J]. Resources Science, 2003, 25(6): 66 - 70. (in Chinese)

[25] 祝昌汉. 再论总辐射的气候学计算方法(二) [J]. 南京气象学院学报, 1982(2):196 - 206.
ZHU Changhan. A further discussion on the climatiological calculating method of total radiation(Ⅱ)[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1982(2): 196 - 206. (in Chinese)

[26] 祝昌汉. 再论总辐射的气候学计算方法(一) [J]. 南京气象学院学报, 1982(1): 15 - 24.
ZHU Changhan. A further discussion on method of calculating total radiation in climatiological study[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1982(1): 15 - 24. (in Chinese)