

赵萌初,李清泉,沈新勇,等,2021.1984—2017 年 ISCCP-FH 辐射资料在青藏高原地区的适用性评估[J].气象,47(1):11-23.
Zhao M C, Li Q Q, Shen X Y, et al, 2021. Applicability assessment of ISCCP-FH radiation product over the Tibetan Plateau during 1984—2017[J]. Meteor Mon, 47(1): 11-23 (in Chinese).

1984—2017 年 ISCCP-FH 辐射资料在 青藏高原地区的适用性评估^{*}

赵萌初^{1,2} 李清泉^{1,2} 沈新勇^{1,3} 王庆元⁴

- 1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合
实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044
2 国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081
3 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519082
4 天津市气象局, 天津 300074

提 要:长序列卫星辐射资料的缺乏一直是制约青藏高原(以下简称高原)辐射长期变化研究的重要原因之一。对国际上最新提供的 1984—2017 年 ISCCP-FH(以下简称 FH)长序列卫星辐射资料中的大气顶逸出长波辐射(OLR)、到达地面短波辐射(SWD)、地面向上长波辐射(LWU)、到达地面长波辐射(LWD)进行分析,评估了 FH 辐射资料在全天气条件下的青藏高原地区的适用性。结果表明:与观测相比, FH 资料的 4 种辐射通量气候平均值误差均小于 5%, 其中 OLR 和 SWD 的偏差较小, LWU 的偏差最大。FH 资料能正确反映高原各辐射通量的冬季增强趋势, OLR 和 LWD 在各季节的长期变化趋势均与观测一致, LWU 则呈现虚假的减弱趋势。总体来说,在高原地区, FH 资料的地面短波辐射通量比长波辐射通量适用性好。进一步对长波辐射偏差原因分析显示,气温偏差会增强 LWD 的气候态和长期趋势,而地温偏差对 LWU 的作用与之相反。辐射模型、云和水汽的差异导致最终 FH 资料中的 LWD 气候态和长期趋势较观测略偏弱, FH 资料的计算方案在一定程度上修正了地温偏差造成的 LWU 偏弱。研究结果将为使用 FH 辐射资料提供参考依据。

关键词:青藏高原, 卫星资料, ISCCP-FH, 辐射通量, 长期变化

中图分类号: P405

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.01.002

Applicability Assessment of ISCCP-FH Radiation Product over the Tibetan Plateau During 1984—2017

ZHAO Mengchu^{1,2} LI Qingquan^{1,2} SHEN Xinyong^{1,3} WANG Qingyuan⁴

- 1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of
Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters,
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044
2 Laboratory for Climate Studies, National Climate Centre, CMA, Beijing 100081
3 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082
4 Tianjin Meteorological Service, Tianjin 300074

Abstract: The shortage of long-term satellite radiation products has restricted the study of radiation spatio-temporal variation over the Tibetan Plateau (TP). This paper presents evaluation of the state-of-the-art

^{*} 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20100304)、国家“第二次青藏高原综合科学考察研究”(2019QZKK0208)、国家自然科学基金重大项目(41790471)、国家重点研发计划(2016YFA0602200)和国家自然科学基金项目(41975054、41930967)共同资助

2020 年 2 月 3 日收稿; 2020 年 10 月 20 日收修定稿

第一作者:赵萌初,主要从事气候变化的研究. E-mail:736890225@qq.com

通讯作者:沈新勇,主要从事中尺度气象学和气候动力学研究. E-mail:shenxy@nuist.edu.cn

satellite products called ISCCP-FH (hereinafter to be referred as FH) over the TP. The all-sky OLR, downward shortwave radiation (SWD), upward longwave radiation (LWU) and downward longwave radiation (LWD) during 1984–2017 were compared with observation. The results indicate that the deviations of radiation flux climatology are within 5%, slight error exists in OLR and SWD while large bias is found in LWU. FH radiation fluxes are properly increasing in winter, the trends of OLR and LWD are consistent with observations in all four seasons but LWU weakens falsely. The FH shortwave radiation is generally better than longwave over the TP. The longwave radiation errors can be attributed to that air temperature error would overestimate LWD climatology and trend, and the influence of surface temperature on LWU is opposite. The radiation model, cloud and moisture differences may result in appreciable underestimation of LWD, while the calculation process of FH partly corrects the underestimation of LWU. This study would provide some references for the future use of FH products.

Key words: Tibetan Plateau, satellite product, ISCCP-FH, radiation flux, long-term variation

引 言

青藏高原平均海拔高度超过 4 km, 占我国陆地面积的四分之一, 是世界上海拔最高的高原, 被称为“世界屋脊”“第三极”。高原位于东西风带间, 海拔高度变化快, 水汽状况受季风影响强, 高原动力和热力作用将对中国东北、美洲等地气候造成影响(段安民等, 2018; 师锐和何光碧, 2018; 张镇宏等, 2019), 辐射加热在高原热力作用中起至关重要的作用(叶笃正和高由禧, 1979; Wu et al, 1997; Wang et al, 2008)。对高原辐射的研究将有利于进一步认识高原气候变化。

为了定量研究高原辐射, 早期的研究主要通过高原试验直接测量地面辐射, 但这种方法存在几个缺点, 一是站点数量少, 难以全面分析高原辐射空间分布, 且无法获取大气顶辐射特征; 二是持续时间短, 不能对辐射量长期变化进行分析(季国良等, 1995; 马伟强等, 2004)。此外周允华(1984)、翁笃鸣等(1988)和 Wang et al(2009)也利用常规气象要素和经验公式计算辐射量, 进而分析辐射长期变化特征。与前一种方法类似, 该方法也存在区域的局限性, 目前高原观测站点大部分位于高原中东部, 高原西部很难获得长期观测资料。

卫星观测的发展, 为研究高原辐射变化提供了新研究途径(蒋兴文和李跃清, 2010; 王艺等, 2016; 于涵等, 2018; 王美蓉等, 2019)。国际卫星云项目(International Satellite Cloud Climatology Project, ISCCP)自 1983 年起收集并分析卫星观测辐射数据并推断全球范围云的性质和分布, 进而衍生出 ISCCP-F 系列、GEWEX-SRB 等卫星反演辐射资料

(Rossow and Schiffer, 1991; Zhang et al, 2004; 2006; Cox et al, 2006)。目前这几套主流卫星辐射资料在高原地区的适用性均弱于平原地区, GEWEX-SRB 资料在计算过程中对海拔高度影响的忽视, 导致到达地面短波辐射相对于观测资料的低估; 而 ISCCP-FD (以下简称 FD) 资料使用的 TOVS 数据在高原地区大气温度的误差, 造成 FD 资料向下长波辐射的低估(Yang et al, 2006a; 2010; Wang et al, 2012)。2000 年开始, 云和地球辐射能量系统(Cloud and the Earth's Radiant Energy System, CERES)项目通过搭载在 Terra/Aqua/NOAA-20 卫星上的六种仪器直接观测大气顶的地球反射短波辐射和射出长波辐射, 并通过其他项目(如中分辨率成像光谱仪, MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)观测的云量、地面温度以及地表比辐射率等气象要素反演地表辐射通量(Wielicki et al, 1996; Kato et al, 2018)。CERES 资料相比于前面两套资料在数据观测和处理上有很大进步, 但在表征地表净辐射时仍存在较大误差, 其误差来源于计算地面辐射时气象数据版本的更替; 和观测站点相比, 其到达地面短波辐射产品在全球范围总体决定系数为 0.69, 但在高原地区仅为 0.35(Gui et al, 2010a; 2010b; Jia et al, 2018)。这说明在利用卫星辐射资料分析高原地区辐射特征前, 需要同时对资料空间分布和时间演变的可靠性进行评估。

2019 年末, NASA 完成了对 ISCCP-FH (以下简称 FH) 资料的延长处理, 使其成为目前时间跨度最长的卫星辐射资料, 相比于 2009 年结束的 GEWEX-SRB 资料和 2000 年开始的 CERES 资料, 34 年的时间长度为研究大气顶及地面辐射特征的长期变化提供了新的方案。FH 资料延长到 2017 年的同

时,采用新的辐射传输模型,改进大气吸收短波辐射的参数化方案,提高了模式垂直分辨率(43 层),改进了与长波辐射关系密切的水汽过程,更新了输入模型的气象要素数据源,并大幅提高输出数据分辨率(Schmidt et al, 2006; Young et al, 2018)。目前, FH 资料算法和输入数据的改进能否改善其在高原地区的适用性尚未得知。本次研究将 1984—2017 年 FH 资料与基于观测数据计算的长时间序列辐射量进行对比,从气候态、长期趋势和时间演变三个方面,对 FH 资料的长、短波辐射通量在高原地区的适用性进行评估,并进一步探讨误差来源,为未来采用 FH 资料开展各种研究和应用提供参考依据。

1 资料和方法

1.1 资料

观测资料采用中国气象局提供的 1984—2017 年高原地区常规气象站逐月观测数据,参照 Duan et al(2011)方法选取 70 个数据可靠的站点,站点分布如图 1 所示。用到的气象要素有气温、地温、水汽压、日照百分率以及采用太阳辐射综合观测模型(Hybrid)研制的到达地面短波辐射(Yang et al, 2001)。

本文采用了 1984—2017 年 FH 卫星辐射资料的全天气状况下逸出长波辐射(OLR)、到达地面的短波辐射(SWD)、到达地面的长波辐射(LWD)、地面向上长波辐射(LWU),以及 ISCCP-H 系列气温(SAT)、地温(ST)和地表发射率数据。FH 资料采

用 ISCCP-H 系列 10 km 分辨率辐照度、云和地面气象要素数据(FD 资料分辨率为 30 km)、MACv2 气溶胶数据集和 nnHIRS 大气温湿数据集(FD 资料分别为 MACv1 和 TOVS),基于 NASA 的 GCM 模式 E 版本辐射传输模型计算辐射通量(FD 资料为 D 版本),水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ (FD 资料为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$)。此外,NOAA 的 OLR 数据被用来检验 FH 资料的 OLR 准确性。

1.2 方法

为了检验评估 FH 卫星辐射资料,本文首先采用 Crawford 和 Duchon 模型(简称 CD99 模型),根据高原台站观测数据计算 LWD(Crawford and Duchon, 1999)。这个计算方法被广泛使用,且已有研究证明 CD99 模型适用于包括高原在内的高海拔地区(Yang et al, 2006b; Lhomme et al, 2007),计算方法如下:

$$LWD = \epsilon_a \sigma T_a^4 \quad (1)$$

$$\epsilon_a = clf + (1 - clf) \left[1.24 \left(\frac{e}{T_a} \right)^{0.14286} \right] \quad (2)$$

$$clf = 0.7223 - 0.8636n/N + 0.1413(n/N)^2 \quad (3)$$

式中: $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$, 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, ϵ_a 为大气发射率, e 为水汽压(单位: hPa), T_a 为 SAT(单位: K), clf 代表云反射作用, n 为实际日照时数(单位: h), N 为最大可能日照时数(单位: h), n/N 代表日照百分率。

LWU 包含了地面发射长波辐射以及小部分地面反射的 LWD, 采用以下公式计算:

$$LWU = \epsilon_s \sigma T_s^4 + (1 - \epsilon_s) LWD \quad (4)$$

式中: T_s 代表 ST(单位: K), ϵ_s 为地表发射率。已有研究表明,高原中东部 ϵ_s 大约为 0.96 (Gao et al, 1998), 因此本文在计算台站观测 LWU 时, ϵ_s 取固定值 0.96。

分别采用一元线性回归和皮尔逊相关系数 R 计算比较资料线性趋势和时间演变的相关性, 平均偏差(MBE)和决定系数 R^2 被用来定量 FH 资料的偏差大小。为统一比较卫星和站点观测数据, 采用双线性插值将 FH 和 NOAA-OLR 资料插值到高原地区的 70 个观测站点。

2 FH 资料气候态和长期趋势的检验

高原气候具有一定的区域差异, 该现象在观测站点集中的高原中东部(CE-TP)也存在。在研究

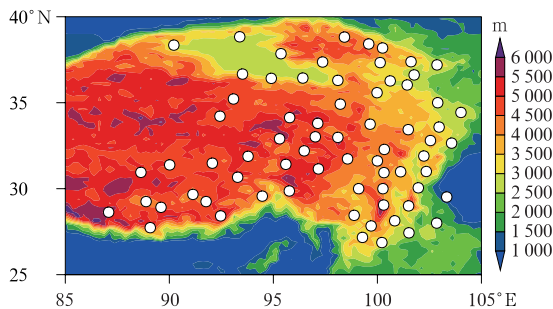


图 1 高原地区 70 个气象观测站分布
(填色为高原地形高度, 白色点为站点分布)

Fig. 1 Distribution of 70 meteorological observation stations over the TP
(colored: height of terrain elevation, white point: location of station)

CE-TP 的辐射及大气热源等特征时,通常将其分为南北两部分进行讨论(谢志昂和段安民,2017;除多等,2018;于涵等,2018)。通过对四种观测辐射通量 EOF 分析也发现,EOF 第一模态表现为全区一致,第二模态以 33°N 为界呈南北反相变化(图略)。那么,FH 资料在高原南部和北部的适用性是否存在区域差异?为验证本文中以高原全部站点平均的辐射通量特征进行 FH 资料评估的合理性,我们还以 33°N 为分界分别计算了高原南部(STP)和北部(NTP)站点平均的辐射通量气候态和长期趋势。

高原地区多年平均的年平均和季节平均辐射通量以及温度如图 2 所示,FH 资料中的 OLR 在不同季节均弱于观测,其中夏季偏差较小(约为 $2\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$),春季偏差最大(约为 $8\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$)。FH 中的 SWD 在冬季与观测较为接近,偏差在 $5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 之内,但夏季 FH 和观测之间的误差超过 $15\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。SWD 虽然和太阳辐射关系密切,但受大气状况影响也十分明显,观测中 SWD 年循环并非稳定的先增强、后减弱,而是在 3 月和 5 月大幅增强,7 月强度甚至强于 6 月;FH 中的 SWD 从 1 月开始逐渐增加,并于 5 月达

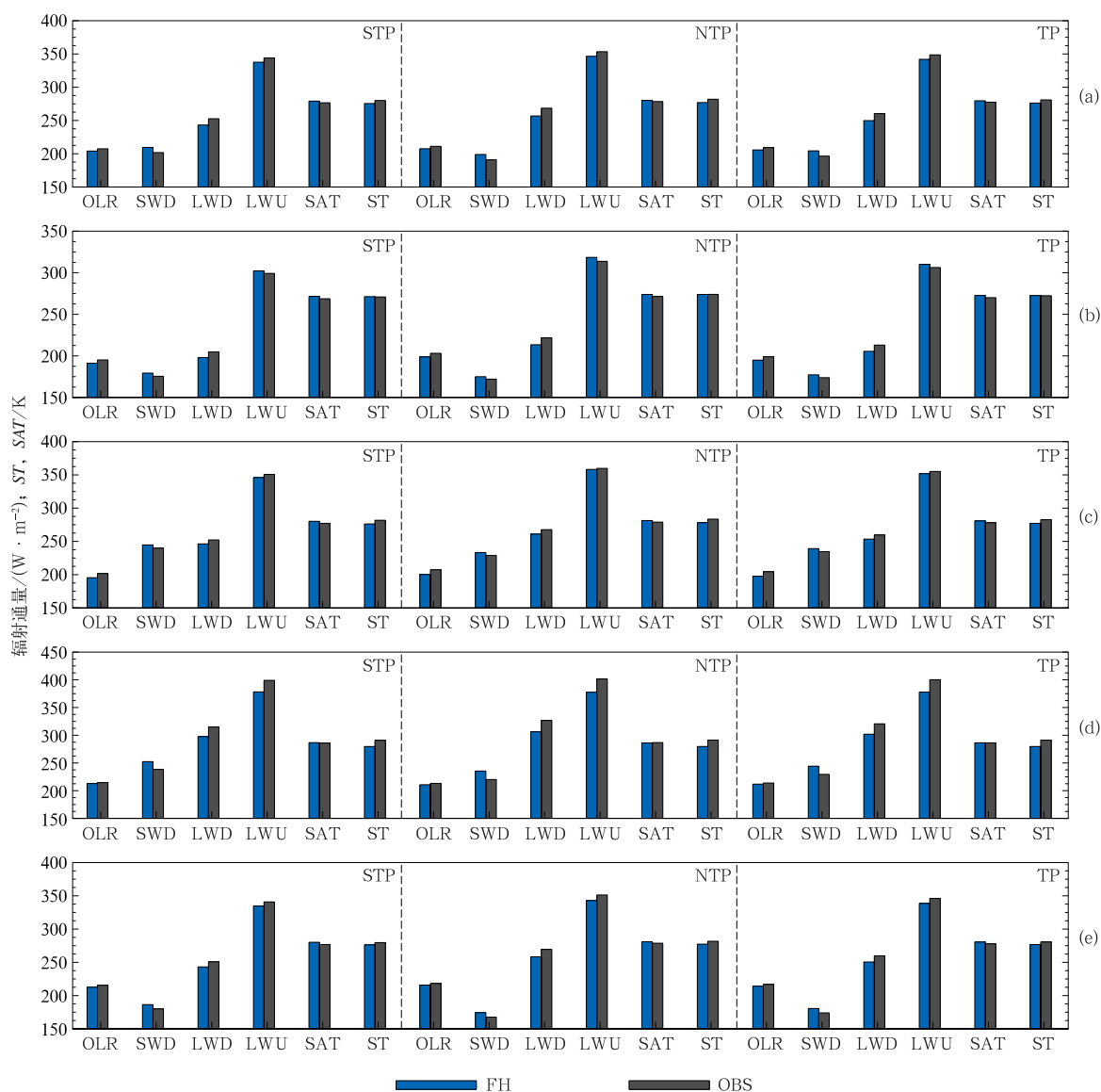


图 2 1984—2017 年高原南部(STP)、高原北部(NTP)和高原整体(TP)年平均(a)和冬季(b)、春季(c)、夏季(d)、秋季(e)平均的 FH 与观测(OBS)资料辐射通量以及 ST 和 SAT

Fig. 2 Annual and seasonal means of the FH and observed radiation fluxes ST and SAT over the STP, NTP and TP during 1984—2017

(a) annual, (b) winter, (c) spring, (d) summer, (e) autumn

到最大,此后逐渐减弱(图略),这可能与 FH 资料计算短波辐射过程中对云量的逐月变化的估计不足有关。FH 中的长波辐射通量及其对应的气温和地温与观测资料有一定差别(图 2):LWD 存在较大季节差异,夏季辐射强度可达到冬季的 1.5 倍,FH 资料低估了高原地区 LWD,且误差也随着辐射强度增强而增大,夏季误差约为 $15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;两套资料 LWU 的季节变化与 LWD 相似,但 FH 资料在冬季存在 $6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的高估,在夏季存在 $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的低估。图 2 中可以发现 FH 资料 LWU 偏差与地温偏差十分相似,均为冬季高估而夏季低估,尤其是夏季 FH 资料低估了大约 11 K 的地温。理论上 LWD 与气温关系密切,但是 FH 资料逐月气候态气温均高于观测,LWD 气候态低于观测。从四个季节看,FH

的 OLR 在不同季节的偏差都较小,最大偏差出现在春季($-6.65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$),其他三种辐射通量的夏季偏差最大。除夏季外其他季节 FH 的各辐射通量 MBE 均不超过 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,并以冬、春季误差最小。总体来说,FH 资料的四种辐射通量 MBE 相对于其气候态基本上都在 5% 以内,虽然 FH 资料最大地温偏差超过 11 K,由于计算 LWU 时采用了开尔文温标,温度的最大 MBE 百分比仍小于 4%。因此,FH 资料辐射通量气候态的误差范围较小。

FH 资料是目前唯一从 1984 年开始并延续到现在的卫星辐射资料,其重要优势之一就是便于研究高原辐射长期变化趋势,因此我们对 FH 资料高原地区长期趋势进行了评估。图 3 比较了高原地区平均的 FH 与观测资料不同季节线性趋势。FH 资料

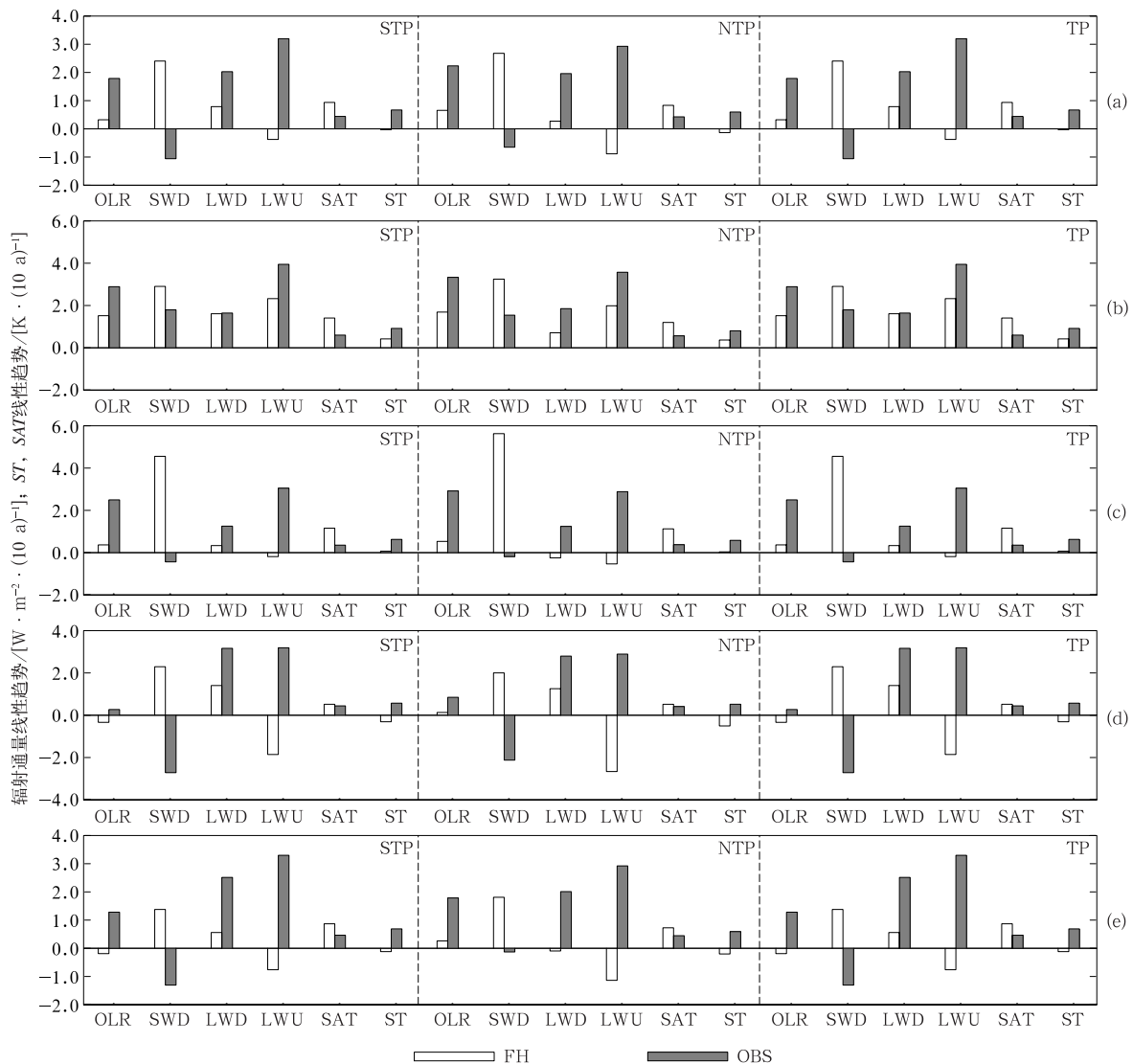


图 3 同图 2,但为 FH 和观测(OBS)资料辐射通量线性趋势以及 ST 和 SAT 的线性趋势

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for linear trends of the annual and seasonal mean radiation fluxes, ST and SAT

能正确反映冬季高原辐射通量和气温的增强,OLR 和长波辐射的冬季趋势低于观测约 $0.6 \sim 1.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,SWD 和气温较观测偏强。其他季节 FH 资料的趋势与观测有较大差别: FH 的 OLR 增加趋势仅有冬季显著 [$1.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$],但观测的 OLR 在秋、冬季均显著增加,趋势分别为 3.10 和 $1.53 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$;观测的 SWD 在夏季显著减弱,冬季增强,其他季节呈不显著的减弱趋势,而 FH 的 SWD 在各个季节明显增强,春季趋势达到 $5.01 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$;基于观测的地面长波辐射在不同季节均显著增强,但 FH 的 LWD 增加趋势不显著,LWU 仅在冬季显著增强,其他季节存在不同程度的减弱趋势。FH 中的 LWU 不变或减弱的趋势显然是存在明显误差的,研究表明在全球加速变暖背景下高原也有显著的增暖趋势(丁一汇和张莉,2008;段安民等,2016),这在图 3 观测气温和地温的显著增强中也有所体现。FH 资料使用的 nnHIRS 气温与观测表现为一致增暖,因此其对 LWD 长期趋势的表现较好,但 FH 的地温在高原地区存在明显的趋势误差,年平均、夏季和秋季线性趋势减弱,且夏季减弱趋势达到 $-0.4 \text{ K} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,这可能导致了 FH 中的 LWU 趋势计算错误。此外,即使 FH 的气温增暖比观测强,FH 中的 LWD 增强依然明显弱于观测。

由图 2 和图 3 可见,尽管 FH 资料对高原南、北部辐射通量气候态的高(低)估的量值有一定差异,但 FH 与观测资料的强弱关系未发生改变。部分辐射通量的长期趋势在高原南北部有不同,如观测中的秋季 SWD 在 STP 减弱明显,在 NTP 趋势几乎为 0;FH 资料的秋季 LWD 在 STP 增加,在 NTP 略微减弱。但与气候态类似,FH 资料对同一辐射通量长期趋势的估算在高原南、北部同时偏高或偏低(图 3)。上述结果表明 FH 资料对高原辐射通量气候态和长期趋势的高(低)估情况在高原南北部一致,但偏差的大小有不同。

为进一步探究 FH 资料对高原不同区域辐射通量长期趋势的计算偏差,本文还给出了 1984—2017 年高原地区观测和 FH 资料辐射通量线性趋势的空间分布(图 4),填色为 FH 资料辐射通量线性趋势,圆点内为观测辐射通量线性趋势。OLR 的观测量在高原全区呈增长趋势,FH 资料能正确表现出 OLR 在高原东南部增强较北部快的现象,但强度整体弱于观测。春到秋季高原中部 OLR 趋势存在较

大差异,FH 资料趋势微弱,但观测量的增长明显。观测的春季 SWD 为南部减弱北部增强,而夏、秋季与春季相反,在高原北部增强南部减弱。FH 资料正确反映了秋、冬季高原地区 SWD 长期趋势的空间分布,但未表现出春、夏季高原中部 SWD 的减弱趋势。FH 资料的 LWD 表现为高原主体增强且四周减弱,这与观测基本吻合,但高原东南角观测 LWD 在各季节增速均超过 $4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,而 FH 资料在这一区域为减弱趋势。与上文分析结果相似,FH 在整个高原地区均存在对 LWD 线性趋势的低估,尤其是观测中夏、秋季高原北部 LWD 增长较快,但 FH 资料趋势微弱或有负增长。冬季 FH 资料的 LWU 趋势与观测一致,但其他季节仅有高原南北侧 3000 m 海拔附近有正确的线性趋势。

总体来说,FH 资料能正确表现各辐射通量年循环及各季节平均气候态。在 1984—2017 年长期趋势方面,FH 中的 SWD 最好,OLR 和 LWD 次之,LWU 出现明显误差。FH 资料的地面长波辐射误差的可能原因是其计算时采用的温度数据集存在偏差,本文在第 4 节对误差的来源和量值做详细分析。

3 FH 资料时间演变的检验

本节对高原地区去线性趋势后 FH 资料时间演变的可靠性进行评估。图 5 对比了不同季节 FH 和观测资料的 OLR 和 SWD,两套资料 OLR 在各个季节均呈 1:1 分布。春、夏季,FH 的 SWD 在部分站点略大于观测,总体分布较 OLR 略离散,但基本也沿对角线分布。FH 资料年平均 OLR 和观测变化不同步,相关系数仅有 0.02;除年平均外其他季节与观测变化较为一致,相关系数均通过 0.01 显著性水平检验(表 1)。FH 资料年平均和春季 SWD 与观测相关性不显著,但其他季节相关系数均超过 0.5,冬、春季 FH 的 SWD 在 2000 年附近有明显增强,但观测中没有这一现象(图略)。FH 与观测的 OLR 和 SWD 高原地区相关系数的空间分布见图 7,相关性存在明显季节差异,年平均辐射通量的相关性普遍较差,而夏、秋季几乎所有站点相关性能通过 0.01 显著性水平检验。FH 与观测 OLR 的相关系数从高原东南部向北递减,说明 FH 资料对高原北部 OLR 变化的表现不足;高原中部部分站点的冬、春季 SWD 的相关系数未能通过显著性水平检验,但也均为正相关。

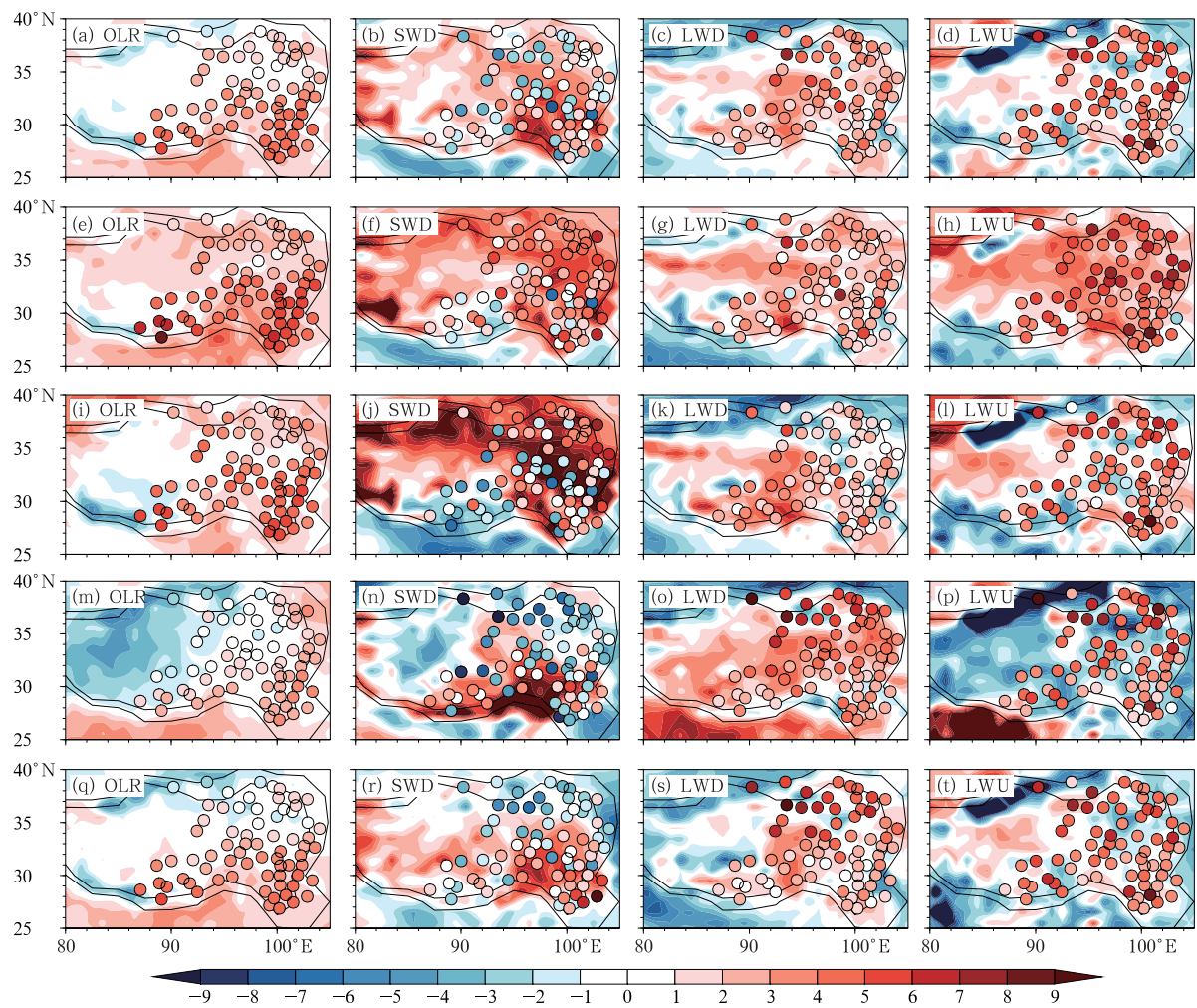


图 4 1984—2017 年高原地区年平均(a~d)、冬季(e~h)、春季(i~l)、夏季(m~p)和秋季(q~t)平均观测(圆点)和 FH 资料(填色)辐射通量线性趋势的空间分布[单位: $W \cdot M^{-2} \cdot (10 a)^{-1}$]
(由外到内黑色实线分别代表高原 1800 和 3000 m 海拔高度)

Fig. 4 Spatial distribution of the linear trends of annual (a—d) and winter (e—h), spring (i—l), summer (m—p), autumn (q—t) mean radiation fluxes of observation (dots) and FH (colored) over the TP during 1984—2017 [unit: $W \cdot m^{-2} \cdot (10 a)^{-1}$]
(Black solid lines from the outside to the inside represent the 1800 and 3000 m elevations, respectively)

表 1 1984—2017 年高原地区平均的去趋势 FH 与观测辐射通量、ST 和 SAT 的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of detrended radiation fluxes, ST and SAT between FH product and observation						
	OLR	SWD	LWD	LWU	SAT	ST
年	0.02	0.19	0	0.51**	0.46**	0.44**
冬	0.45**	0.61**	0.35**	0.76**	0.60**	0.68**
春	0.37**	0.21	−0.05	0.49**	0.52**	0.46**
夏	0.57**	0.57**	0.31*	0.50**	0.53**	0.47**
秋	0.32*	0.62**	0.25	0.44**	0.28	0.46**

注: * 和 ** 分别代表通过 0.1 和 0.05 显著性水平检验。
Note: * and ** indicate that the correlation coefficients have passed the significance tests at 0.1 and 0.05 levels, respectively.

FD 资料的地面长波辐射在高原地区存在偏差 (Yang et al,2010),这种误差在 FH 资料中似乎未

被完全改善。FH 与观测资料长波辐射和温度的散点图(图6)离散更加明显,FH 资料整体弱于观测,

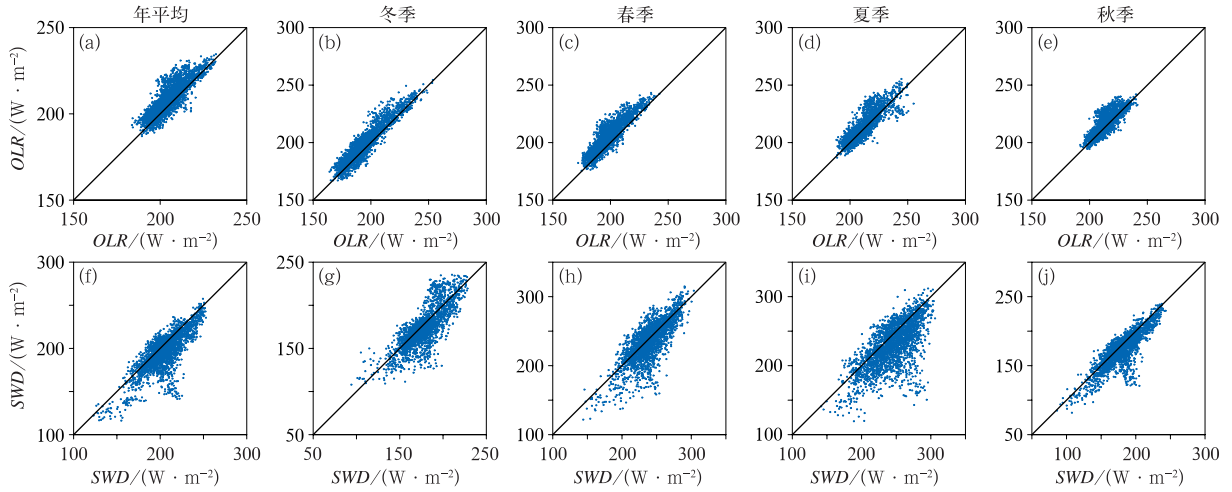


图 5 高原地区年平均(a,f)、冬季(b,g)、春季(c,h)、夏季(d,i)、秋季(e,j)平均的观测与 FH 资料辐射通量时间序列散点图
(a~e) OLR, (f~j) SWD

(横坐标代表 FH 资料, 纵坐标代表观测资料)

Fig. 5 Scattering plots of annual (a, f) and winter (b, g), spring (c, h), summer (d, i), autumn (e, j)

between observed and FH OLR and SWD

(a—e) OLR, (f—j) SWD

(Abscissa and ordinate represent FH product and observation, respectively)

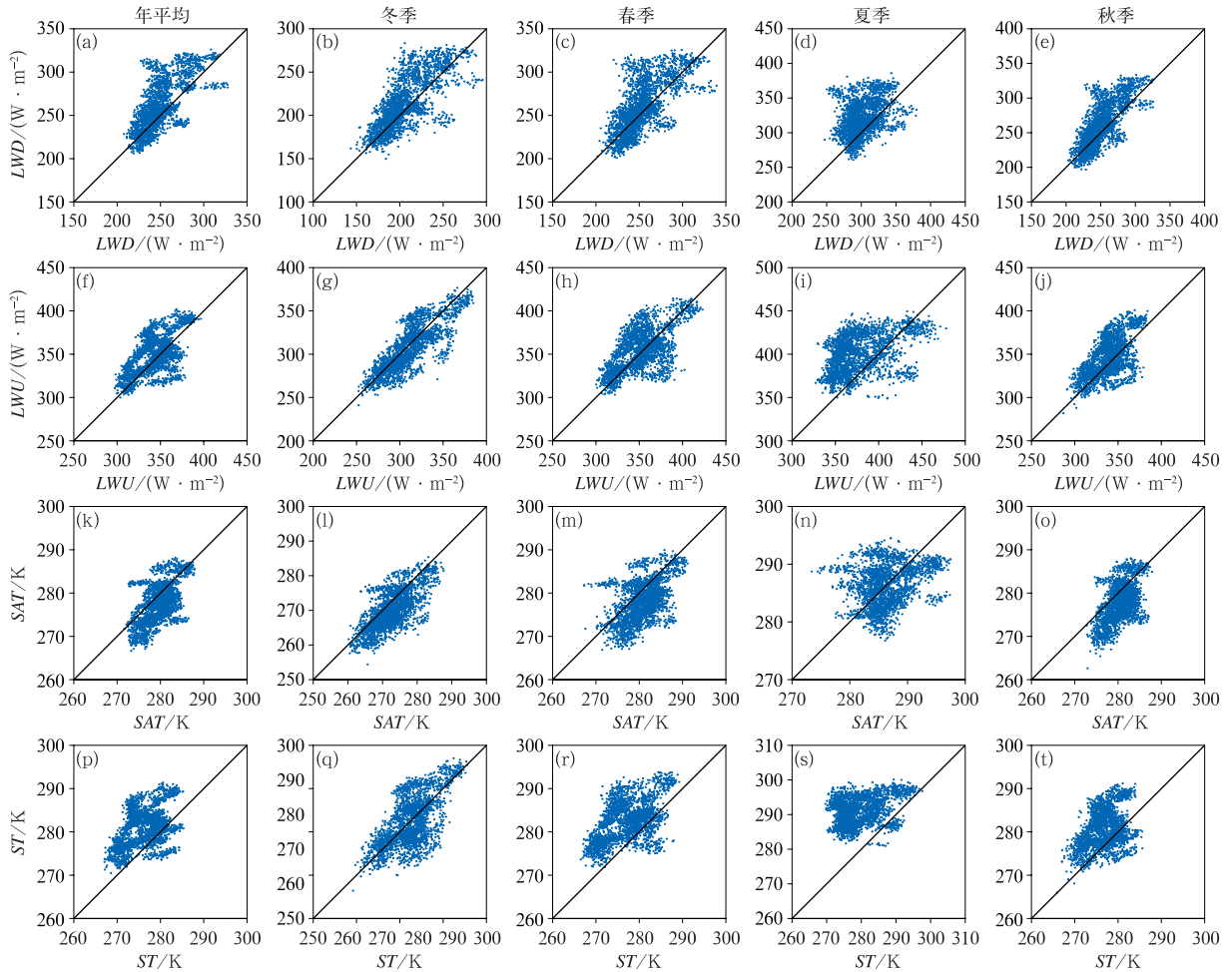


图 6 同图 5, 但为平均的观测与 FH 资料辐射通量及 ST 和 SAT

(a~e) LWD, (f~j) LWU, (k~o) SAT, (p~t) ST

Fig. 6 Same as Fig. 5, but between observed and FH for (a—e) LWD, (f—j) LWU, (k—o) SAT and (p—t) ST

部分变量如年平均和夏季 LWU 以及夏季地温明显偏离了 1:1 线。从 FH 与观测资料相关系数的空间分布(图 7)也可以看出,与 OLR 相比,FH 中的 LWD 误差更加明显。在高原南部,冬季 FH 中的 LWD 与 3~10 个站点无显著相关,其他季节两套资料的相关系数超过 -0.4 ;FH 对高原北部 LWD 时间演变的表现冬季最好、春季最差,两套资料相关性还表现为从高原东部向西部减弱的空间分布。上文分析表明 FH 中的 LWU 气候态和趋势存在误差,但从相关性来看 FH 的 LWU 的时间演变可靠,各季节与观测在高原全区均为正相关,相关性最差的年平均 LWU 也有超过半数站点显著性通过 0.01 显著性水平检验。两种资料的高原北部 LWU 相关

性略差,春夏季约有 10 个站点相关系数不显著。

从 FH 和观测资料的去趋势地面长波辐射和温度时间序列间相关系数(表 1)看出:FH 的 LWD 与观测相关性在年平均和春季约为 0,其他季节相关系数最大值也仅有 0.35,时间演变差别较大。FH 中的 LWD 和气温从 1984 年起,有高一低一高的年代际变化,这恰好与观测反位相(图略),说明 FH 资料 LWD 的年代际变化存在明显偏差。两套资料各季节 LWU 的相关系数均通过 0.01 显著性水平检验,时间序列变化基本吻合。将资料间地面长波辐射相关系数与温度相关系数对比(表 1),我们发现两套资料的地温显著相关,与地温紧密联系的 LWU 也显著相关。但是这种温度与辐射间的对应关

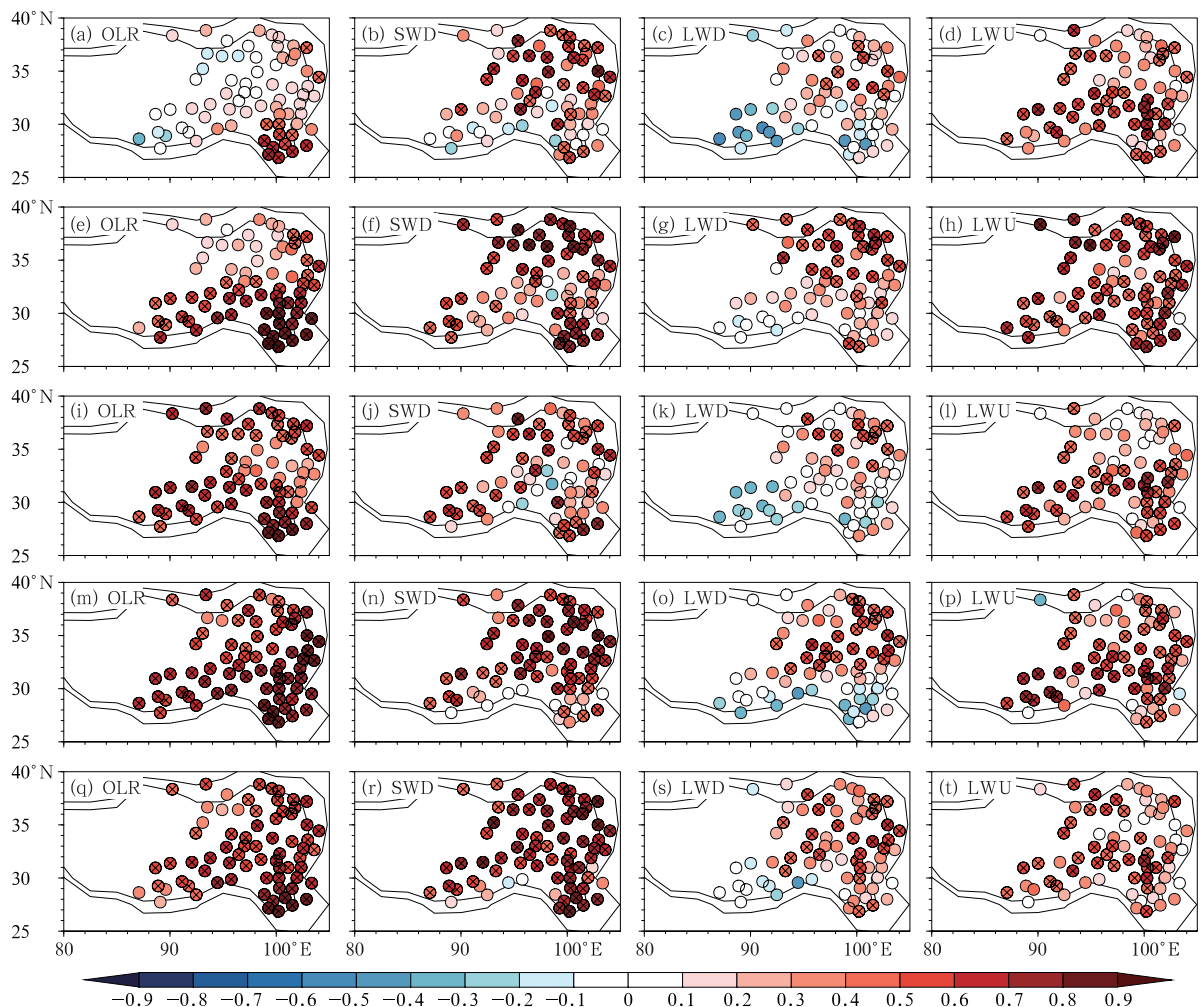


图 7 同图 4,但为 FH 与观测资料辐射通量相关系数

(“×”代表该站点的辐射通量相关系数通过 0.01 显著性水平检验)

Fig. 7 Same as Fig. 4, but for correlation coefficients of annual and seasonal-mean radiation fluxes between FH and observation

(The “×” symbol indicates that the correlation coefficient of radiation fluxes has passed the significance test at 0.01 level)

系在气温和 LWD 之间存在差异,虽然 FH 和观测的气温也有较强的相关,但资料间 LWD 相关性却很差。这说明除温度外,可能有其他因素造成了 LWD 和 LWU 时间演变的明显偏差。上文也表明 FH 中的地面长波辐射气候平均值和长期趋势也有较大误差,因此有必要对误差来源进行深入讨论。

4 FH 资料长波辐射误差来源分析

长波辐射通量计算的准确性取决于输入数据和辐射模型的质量。在无法直接获取 FH 资料长波辐射模型的情况下,本文采用 CD99 模型(Crawford and Duchon,1999),将 FH 资料的温度和地表发射率数据代入 CD99 模型中计算,并比较计算结果、观测和原 FH 资料中的辐射通量,深入分析长波辐射误差来源。误差来源可以分为三类:温度、地表发射率和其他(包括计算模型及大气中云和水汽状况)。具体计算方法如下:方案 1(S1)是仅使用 FH 资料的温度数据,其他均使用观测数据计算长波辐射;方案 2(S2)是使用 FH 资料的地表发射率数据,其他均使用观测数据计算 LWU;方案 3(S3)是使用 FH

资料的地温和地表发射率数据计算 LWU。S1 与观测之间的差异代表了 FH 温度数据对长波辐射的影响;S2 与观测的差别代表了不同地表发射率对 LWU 的影响;FH 资料和 S1 和 S3 的差异分别代表不同计算模型和云、水汽差异对 LWD 和 LWU 的影响。

首先检验 FH 资料温度数据对长波辐射的影响。当使用 FH 资料温度数据计算长波辐射时,LWD 的夏季气候态与观测一致,其他季节较观测偏高 $6\sim 10\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$;LWU 的冬季气候态与观测一致,其他季节偏低明显,春、秋季偏差分别为 -25.67 和 $-18.35\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,夏季偏差达到 $-56.7\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,偏差约为观测气候值的 14% (表 2)。图 8a 中 S1 的线性趋势在冬、春季是观测的两倍,在夏、秋季也高于观测,说明 FH 资料气温的使用会使 LWD 线性趋势偏高 $1\sim 2\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 。与原 FH 资料相似,S1 计算的 LWU 趋势除冬季外均与观测相反,这说明 FH 资料地温趋势偏差是造成 LWU 趋势错误的重要原因。决定系数 R^2 用来表征不同温度数据集对长波辐射时间演变的影响(表 3),当更换 FH 温度数据后,S1 与观测 LWD 的 R^2 各季节

表 2 1984—2017 年高原地区平均的 FH 与 S1、S2 数据相对于观测的平均偏差 MBE(单位: $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

Table 2 MBE of FH, S1, S2 radiation flux relative to observation over the TP during 1984—2017 (unit: $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

	LWD			LWU			
	OBS	FH	S1	OBS	FH	S1	S2
年	260.35	-10.76	6.45	348.63	-6.79	-23.46	4.12
冬	212.99	-7.52	7.87	306.30	3.81	0.46	3.51
春	259.75	-6.30	9.53	355.17	-3.26	-25.67	4.32
夏	320.63	-18.95	-0.19	400.21	-22.43	-56.72	5.06
秋	259.83	-9.49	8.97	345.93	-7.51	-18.35	4.25

注:OBS 代表观测辐射通量的气候平均值。
Note: OBS represents the climatological mean of observation.

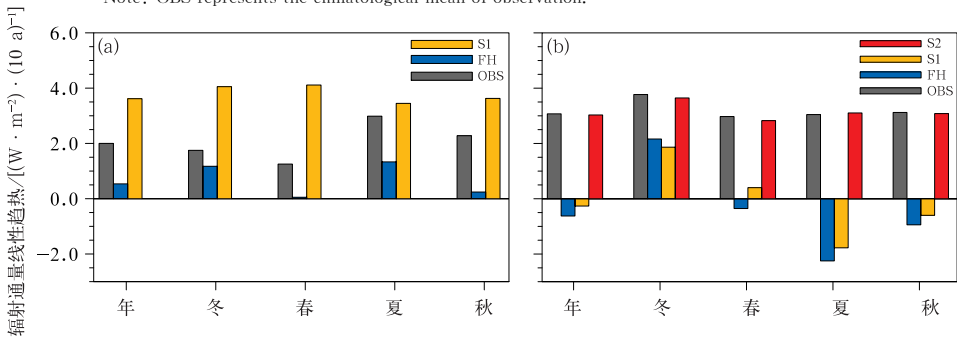


图 8 1984—2017 年高原地区年平均和季节平均的观测、FH、S1 和 S2 的辐射通量线性趋势 (a)LWD, (b)LWU

Fig. 8 Linear trends of annual and seasonal mean radiation fluxes of observation, FH, S1 and S2 over the TP during 1984—2017 (a) LWD, (b) LWU

表 3 1984—2017 年高原地区平均的 FH 与 S1、S2 数据相对于观测资料的决定系数 R^2

Table 3 Determination coefficients of FH, S1 and S2 relative to observation over the TP during 1984—2017

	LWD		LWU		
	FH	S1	FH	S1	S2
年	0	0.06	0.28	0.23	0.99
冬	0.13	0.28	0.58	0.50	0.99
春	0	0.06	0.24	0.23	0.99
夏	0.08	0.23	0.28	0.31	1.00
秋	0.06	0.24	0.20	0.22	1.00

均较低, LWU 的 R^2 较高, 但最高也仅为 50% (冬季), 表明温度数据集仍是造成辐射资料时间演变偏差的重要因素。

对于地表发射率造成的误差, S2 仅替换 FH 地表发射率, 其他使用观测数据计算 LWU, 与采取固定地表发射率方案计算的观测 LWU 相比, FH 地表辐射率方案气候态略高出 $3.5 \sim 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 偏差百分率低于 2%。从图 8b 中也可以发现地表发射率对趋势的影响很小, 可以忽略不计。S2 与观测 LWU 的 R^2 也接近 100%, 说明 FH 资料地表辐射率几乎不会影响 LWU 的准确性(表 3)。

从 FH 与 S1 和 S3 的各季节长波辐射平均偏差发现(表 4), FH 资料算法和水汽的误差会导致计算的 LWD 偏低 $17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右; FH 地温数据的使用会导致 LWU 偏低 $20 \sim 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 但 FH 资料计算方案修正了其中 $6 \sim 30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的偏差。FH 资料 LWD 线性趋势小于 S1(图 8), 表明算法和水汽的偏差会导致计算的 LWD 趋势偏低 $3 \sim 6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 但由于卫星资料气温的显著增强, 最终 FH 资料中的 LWD 增长速度慢于观测。此外, FH 与 S1 和 S3 的决定系数 R^2 基本都在 0.7 以上(表 4), 说明算法和水汽的偏差未对长波辐射通量的时间演变造成明显影响。

表 4 1984—2017 年高原地区平均的 FH 资料相对于 S1 的 LWD、S3 的 LWU 平均偏差和决定系数 R^2

Table 4 MBE and determination coefficient of FH product relative to LWD of S1 and LWU of S3 over the TP during 1984—2017

	LWD		LWU	
	MBE/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	R^2	MBE/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	R^2
年	-17.17	0.71	12.75	0.93
冬	-15.39	0.78	-0.15	0.95
春	-15.83	0.69	18.36	0.87
夏	-18.67	0.58	29.93	0.78
秋	-18.46	0.73	6.92	0.95

5 结论与讨论

本文从气候态、长期趋势和时间演变三个方面对目前唯一一套 34 年的长序列辐射资料 ISCCP-FH 在我国青藏高原地区适用性进行了全面评估, 并深入探讨长波辐射通量存在明显偏差的原因, 定量分析了不同误差来源对长波辐射的影响程度。主要结论如下:

(1) 从不同季节气候态来看, FH 资料各辐射通量与观测之间的误差随辐射强度增加而增大, 但误差均在 5% 以内。FH 资料低估了 $1 \sim 8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的高原地区 OLR, 对 SWD 的高估在 $5 \sim 20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 地面长波辐射气候态偏差较大, 夏季对 LWD 和 LWU 的低估达到 $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。FH 资料未能完全反映 SWD 月际变化, 对高原地区大气短波辐射过程的表现不足是产生偏差的可能原因。

(2) FH 资料各辐射通量线性趋势的可靠性存在明显差异, 同一辐射通量趋势的季节差异也较显著。FH 资料能正确反映高原冬季各辐射通量的增强趋势; 其 OLR 和 LWD 在各季节线性趋势均和观测一致; 春、夏、秋季 SWD 和 LWU 的趋势与观测完全相反; 在高原持续增暖的情况下 LWU 的减弱趋势存在明显错误。FH 资料三种长波辐射趋势在高原全区总体偏弱。FH 资料正确反映了各季节 OLR、LWD 和秋、冬季 SWD 的线性趋势空间分布, 但未表现出春、夏季高原中部 SWD 的减弱趋势; 除冬季外其他季节 FH 的 LWU 在高原东部减弱, 与观测偏差较大。

(3) 对去线性趋势后 FH 资料辐射通量时间演变的分析发现, FH 中的 LWU 与观测在不同季节均有较强相关性, OLR 和 SWD 也能反映冬、夏季高原地区辐射变化特征。虽 FH 的 LWD 与观测有一致气候态和趋势, 但其与观测数据的时间演变相关性较差, 尤其是在年代际变化方面与观测反位相。FH 资料能基本反映高原全区 SWD 和 LWU 的时间演变, FH 与观测 OLR 在高原主体的相关性强于高原四周, LWD 的误差在海拔快速增加的高原南坡最为明显。

(4) 温度偏差不是造成 FH 资料地面长波辐射误差的唯一原因。FH 气温数据会造成 LWD 的气候平均值相对于观测偏高 $6 \sim 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、线性趋势偏高 $1 \sim 2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$; 算法和水汽的作

用将导致 LWD 相对于观测气候态偏低 $15 \sim 19 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 线性趋势偏低 $2 \sim 4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 此外算法和水汽的误差对 LWD 时间演变的影响大于气温。FH 地表发射率相对于固定地表发射率方案会高估 LWU $3 \sim 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 但不会影响 LWU 的长期趋势和时间演变可靠性, FH 地温数据的使用会导致 LWU 偏低 $20 \sim 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 但 FH 资料计算方案对偏差有一定修正作用。

目前对高原辐射长期变化特征的研究仍然欠缺, 各辐射资料之间的不一致和长序列资料的匮乏是阻碍研究的重要原因, 随着 ISCCP-H 系列长序列卫星资料的出现, 一定程度上有助于相关研究的推进。本文的分析表明多方面原因造成了 FH 资料在高原地区的偏差, 因此在使用该资料时选择合适季节或变量会得到更加可靠的结果。除此之外, 仍有一些问题尚未明确, 例如除了本文评估的四种辐射通量外, 大气顶逸出短波辐射和地面反射短波辐射这两个变量很难获得长期观测资料进行评估, 这将导致 FH 资料大气顶和地面辐射平衡存在不确定性; 在明确误差来源后, 是否能对资料偏差订正, 改善其在高原地区适用性也有待尝试。

参考文献

- 陈多, 洛桑曲珍, 林志强, 等, 2018. 近 30 年青藏高原雪深时空变化特征分析[J]. 气象, 44(2): 233-243. Chu D, Luosang Q Z, Lin Z Q, et al, 2018. Spatio-temporal variation of snow depth on Tibetan Plateau over the last 30 years[J]. Meteor Mon, 44(2): 233-243(in Chinese).
- 丁一汇, 张莉, 2008. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较[J]. 大气科学, 32(4): 794-805. Ding Y H, Zhang L, 2008. Inter-comparison of the time for climate abrupt change between the Tibetan Plateau and other regions in China[J]. Chin J Atmos Sci, 32(4): 794-805(in Chinese).
- 段安民, 肖志祥, 王子谦, 2018. 青藏高原冬春积雪和地表热源影响亚洲夏季风的研究进展[J]. 大气科学, 42(4): 755-766. Duan A M, Xiao Z X, Wang Z Q, 2018. Impacts of the Tibetan Plateau winter/spring snow depth and surface heat source on Asian summer monsoon: a review[J]. Chin J Atmos Sci, 42(4): 755-766(in Chinese).
- 段安民, 肖志祥, 吴国雄, 2016. 1979—2014 年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征[J]. 气候变化研究进展, 12(5): 374-381. Duan A M, Xiao Z X, Wu G X, 2016. Characteristics of climate change over the Tibetan Plateau under the global warming during 1979—2014[J]. Climate Change Res, 12(5): 374-381(in Chinese).
- 季国良, 江灏, 吕兰芝, 1995. 青藏高原的长波辐射特征[J]. 高原气象, 14(4): 451-458. Ji G L, Jiang H, Lv L Z, 1995. Characteristics of longwave radiation over the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 14(4): 451-458(in Chinese).
- 蒋兴文, 李跃清, 2010. 青藏高原地表辐射的气候特征[J]. 资源科学, 32(10): 1932-1942. Jiang X W, Li Y Q, 2010. Climatological characteristics of surface radiation over the Tibetan Plateau[J]. Resour Sci, 32(10): 1932-1942(in Chinese).
- 马伟强, 马耀明, 胡泽勇, 等, 2004. 藏北高原地面辐射收支的初步分析[J]. 高原气象, 23(3): 348-352. Ma W Q, Ma Y M, Hu Z Y, et al, 2004. Analyses on surface radiation budget in northern Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteor, 23(3): 348-352(in Chinese).
- 师锐, 何光碧, 2018. 移出高原后长生命史高原低涡在不同移动路径下的大尺度环流特征及差异[J]. 气象, 44(2): 213-221. Shi R, He G B, 2018. Comparison analysis of circulation features of different moving tracks of long-life-cycle plateau vortexes moving out of the plateau[J]. Meteor Mon, 44(2): 213-221(in Chinese).
- 王美蓉, 郭栋, 钟珊珊, 2019. 多源资料在青藏高原大气热源计算中的适用性分析[J]. 气象, 45(12): 1718-1726. Wang M R, Guo D, Zhong S S, 2019. Comparison of the multi-source datasets in calculation of the atmospheric heat sources over the Tibetan Plateau[J]. Meteor Mon, 45(12): 1718-1726(in Chinese).
- 王艺, 伯玥, 王澄海, 2016. 青藏高原中东部云量变化与气温的不对称升高[J]. 高原气象, 35(4): 908-919. Wang Y, Bo Y, Wang C H, 2016. Relations of cloud amount to asymmetric diurnal temperature change in central and eastern Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 35(4): 908-919(in Chinese).
- 翁笃鸣, 孙治安, 史兵, 1988. 中国地表净辐射的气候学研究[J]. 南京气象学院学报, 11(2): 132-143. Weng D M, Sun Z A, Shi B, 1988. A climatological study of the surface net radiation over China[J]. J Nanjing Inst Meteor, 11(2): 132-143(in Chinese).
- 谢志昂, 段安民, 2017. 盛夏青藏高原热源与菲律宾海对流活动的联系[J]. 大气科学, 41(4): 811-830. Xie Z A, Duan A M, 2017. Relationship between the Tibetan Plateau heat source and convection over the Philippine Sea[J]. Chin J Atmos Sci, 41(4): 811-830(in Chinese).
- 叶笃正, 高由禧, 1979. 青藏高原气象学[M]. 北京: 科学出版社. Yeh T C, Gao Y X, 1979. Meteorology of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 于涵, 张杰, 刘诗梦, 2018. 基于 CERES 卫星资料的青藏高原有效辐射变化规律[J]. 高原气象, 37(1): 106-122. Yu H, Zhang J, Liu S M, 2018. The variation of effective radiation in Qinghai-Tibetan Plateau based on the CERES satellite data[J]. Plateau Meteor, 37(1): 106-122(in Chinese).
- 张镇宏, 蔡景就, 乔云亭, 等, 2019. 青藏高原夏季大气视热源与中国东部降水的关系的年代际变化[J]. 大气科学, 43(5): 990-1004. Zhang Z H, Cai J J, Qiao Y T, et al, 2019. Interdecadal change in the relation between atmospheric apparent heat sources over Tibetan Plateau and precipitation in Eastern China in summer[J]. Chin J Atmos Sci, 43(5): 990-1004(in Chinese).
- 周允华, 1984. 青藏高原地面长波辐射经验计算方法[J]. 地理学报, 51(2): 148-162. Zhou Y H, 1984. An empirical method for

- estimating surface long-wave radiation exchanges in the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Acta Geogr Sin*, 51(2):148-162(in Chinese).
- Cox S J, Stackhouse Jr P W, Gupta S K, et al, 2006. The NASA/GEWEX surface radiation budget project: overview and analysis [C]//The 12th Conference on Atmospheric Radiation Madison, Wisconsin, USA: NASA.
- Crawford T M, Duchon C E, 1999. An improved parameterization for estimating effective atmospheric emissivity for use in calculating daytime downwelling longwave radiation[J]. *J Appl Meteor*, 38(4):474-480.
- Duan A M, Li F, Wang M R, et al, 2011. Persistent weakening trend in the spring sensible heat source over the Tibetan Plateau and its impact on the Asian summer monsoon[J]. *J Climate*, 24(21):5671-5682.
- Gao G, Zhang L Y, Weng D M, 1998. Qinghai-Xizang surface long-wave radiation parameterization with its climatic calculation[J]. *Acta Meteor Sin*, 12(2):190-198.
- Gui S, Liang S L, Li L, 2010a. Evaluation of satellite-estimated surface longwave radiation using ground-based observations[J]. *J Geophys Res Atmos*, 115(D18):D18214.
- Gui S, Liang S L, Wang K C, et al, 2010b. Assessment of three satellite-estimated land surface downwelling shortwave irradiance data sets[J]. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 7(4):776-780.
- Jia A L, Liang S L, Jiang B, et al, 2018. Comprehensive assessment of global surface net radiation products and uncertainty analysis [J]. *J Geophys Res Atmos*, 123(4):1970-1989.
- Kato S, Rose F G, Rutan D A, et al, 2018. Surface irradiances of edition 4.0 clouds and the earth's radiant energy system (CERES) energy balanced and filled (EBAF) data product[J]. *J Climate*, 31(11):4501-4527.
- Lhomme J P, Vacher J J, Rocheteau A, 2007. Estimating downward long-wave radiation on the Andean Altiplano[J]. *Agr For Meteor*, 145(3/4):139-148.
- Rossow W B, Schiffer R A, 1991. ISCCP cloud data products[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 72(1):2-20.
- Schmidt G A, Ruedy R, Hansen J E, et al, 2006. Present-day atmospheric simulations using GISS ModelE: comparison to in situ, satellite, and reanalysis data[J]. *J Climate*, 19(2):153-192.
- Wang B, Bao Q, Hoskins B, et al, 2008. Tibetan Plateau warming and precipitation changes in East Asia[J]. *Geophys Res Lett*, 35(14):L14702.
- Wang M R, Zhou S W, Duan A M, 2012. Trend in the atmospheric heat source over the central and eastern Tibetan Plateau during recent decades: comparison of observations and reanalysis data [J]. *Chin Sci Bull*, 57(5):548-557.
- Wang W H, Liang S L, Augustine J A, 2009. Estimating high spatial resolution clear-sky land surface upwelling longwave radiation from MODIS data[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 47(5):1559-1570.
- Wielicki B A, Barkstrom B R, Harrison E F, et al, 1996. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): an earth observing system experiment[J]. *Bull Am Meteorol Soc*, 77(5):853-868.
- Wu G X, Li W P, Guo H, et al, 1997. Sensible heat driven air-pump over the Tibetan Plateau and its impacts on the Asian summer monsoon[M]//Ye D Z. Collections on the Memory of Zhao Jiuzhang. Beijing: Science Press:116-126.
- Yang K, Huang G W, Tamai N, 2001. A hybrid model for estimating global solar radiation[J]. *Solar Energy*, 70(1):13-22.
- Yang K, Koike T, Stackhouse P, et al, 2006a. An assessment of satellite surface radiation products for highlands with Tibet instrumental data[J]. *Geophys Res Lett*, 33(22):L22403.
- Yang K, Koike T, Ye B S, 2006b. Improving estimation of hourly, daily, and monthly solar radiation by importing global data sets [J]. *Agr For Meteor*, 137(1/2):43-55.
- Yang K, He J, Tang W J, et al, 2010. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: observation and modeling in the Tibetan Plateau[J]. *Agric For Meteor*, 150(1):38-46.
- Young A H, Knapp K R, Inamdar A, et al, 2018. The international satellite climate climatology project H-series climate data record product[J]. *Earth System Science Data*, 10(1):583-593.
- Zhang Y C, Rossow W B, Lacis A A, et al, 2004. Calculation of radiative fluxes from the surface to top of atmosphere based on ISCCP and other global data sets: refinements of the radiative transfer model and the input data[J]. *J Geophys Res Atmos*, 109(D19):D19105.
- Zhang Y C, Rossow W B, Stackhouse Jr P W, 2006. Comparison of different global information sources used in surface radiative flux calculation: radiative properties of the near-surface atmosphere[J]. *J Geophys Res Atmos*, 111(D13):D13106.