

申彦波, 王传辉, 陈运. 中国东北三省地面太阳辐射变化及其对气温变化的影响 [J]. 地理科学, 2023, 43(11): 2045-2052. [Shen Yanbo, Wang Chuanhui, Chen Yun. Variation of surface solar radiation and its influence on temperature change in three provinces of Northeast China. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(11): 2045-2052.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2023.11.017

中国东北三省地面太阳辐射变化及其对气温变化的影响

申彦波^{1,2}, 王传辉³, 陈运^{1,2}

(1. 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081; 2. 中国气象科学研究院 & 中再巨灾风险管理股份有限公司气象风险与保险联合开放实验室, 北京 100081; 3. 安徽省公共气象服务中心, 安徽 合肥 230031)

摘要: 利用东北三省逐月地面太阳辐射及气温资料, 分析了地面太阳辐射长期变化趋势, 进一步基于大气系统热量平衡理论, 定量分析了太阳辐射变化对气温的影响。结果表明: 1970—2019 年, 东北三省地面太阳辐射经历了先减小后增加的变化趋势; 1970—1989 年, 地面太阳辐射显著减少, 削弱了最高气温的增加趋势, 而在 1993—2019 年地面太阳辐射增加提高了最高气温的增加趋势; 地面太阳辐射变化通过改变最高气温的变化改变了平均气温和气温日较差, 在 1970—1989 年削弱了平均气温的增加趋势, 减小了气温日较差; 在 1993—2019 年增加了平均气温的增加趋势, 加大了气温日较差。

关键词: 太阳辐射; 气温; 气温日较差; 东北三省

中图分类号: P422.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2023)11-2045-08

IPCC 第五次评估报告指出, 工业革命以来全球气候显著变暖^[1]。有研究表明, 1900—2017 年, 全球陆地平均气温升高趋势为 $(1.00 \pm 0.06)^\circ\text{C}/100\text{a}$ ^[2], 1900 年以来中国气温升高幅度要高于这一数值^[3]。中国东北地区作为对全球气候变暖响应最为显著的地区备受学者们关注^[4]。从目前最新的研究进展上看, 未来 20 a 全球将继续变暖约 $0.42 \sim 1.19^\circ\text{C}$ ^[5]。气候变暖不仅对风速、降水等产生重要影响^[6-7], 还对农业、林业等具体的产业产生直接影响^[8-9]。

影响温度变化的因素有很多, 在以往研究中多是从大气环流角度对温度变化成因进行分析^[10-11]。太阳作为地球能量的根本来源, 地面太阳辐射变化对气温的变化势必产生一定影响^[12-13]。一直以来, 中国东北地区太阳能资源丰富且较稳定^[14]。近年来, 受气溶胶、云量等因素变化影响, 中国东北地区地面太阳辐射产生明显的年代际变化^[15-17]。有研究表明, 地面太阳辐射变化对气温变化有较大影响, 尤

其是对最高气温的影响较为直接^[12-13]。目前中国东北地区地面太阳辐射变化对平均气温变化具体有多大影响, 对最低气温、最高气温以及气温日较差变化影响的研究还较为少见。为此, 本研究基于地面太阳辐射月总量数据以及月平均气温、最高气温、最低气温、气温日较差数据, 揭示地面太阳辐射是通过怎样的途径影响气温变化, 并定量分析其影响程度。

1 资料与方法

基于中国气象局国家气象信息中心提供的中国东北地区均一化逐月总辐射 (Surface Solar Radiation, 以下简称 SSR。此处总辐射指向下短波辐射), 该套资料可有效避免非自然因素对结论的干扰^[18-19], 此外还使用了最高气温 (Maximum Temperature, 简称 $T_{\max}$)、最低气温 (Minimum Temperature, 简称 $T_{\min}$)、平均气温 (Mean Temperature, 简称 T_m)

收稿日期: 2022-07-01; 修订日期: 2022-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42075188)、气象风险与保险联合开放实验室开放基金项目 (2023F014) 资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (42075188), the Open Grants of the Joint Open Lab on Meteorological Risk and Insurance (2023F014).]

作者简介: 申彦波 (1978—), 男, 河南南阳人, 博士, 研究员, 主要从事太阳能资源评估预报及气候变化研究。E-mail: shenyb@cma.gov.cn

通信作者: 王传辉。E-mail: wang_chh@aliyun.com

以及气温日较差(Daily Temperature Range, 简称 DTR), 综合考虑资料长度和站点数量因素选取了东北 3 省 8 个气象观测站点数据(站点分布见图 1), 数据时段为 1970—2019 年。1970—2019 年, 气温数据无缺测, 辐射数据由于观测仪器故障及数据采集软件异常等因素导致数据存在一定数量的缺测^[20], 缺测情况见表 1。在缺测数据填补时, 首先计算缺测站点与其他各站辐射数据的相关系数, 选取相关系数最大的站点利用比值法进行填补^[21]。

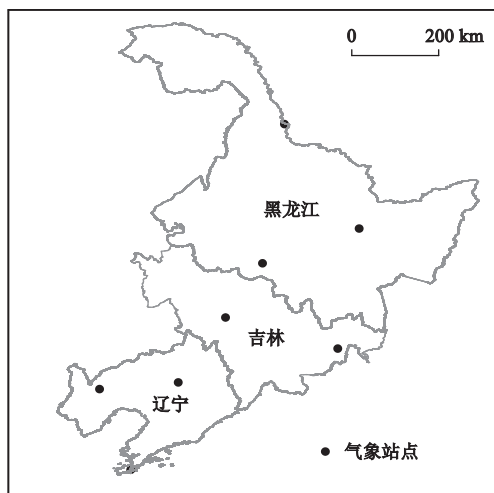


图 1 中国东北三省同时具备辐射和气温要素观测的气象站点分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations with simultaneous radiation and temperature observation in three provinces of Northeast China

中国气象局在 1990—1992 年调整太阳辐射观测网并且陆续对地面辐射观测站观测仪器进行了换型, 已有的研究表明, 中国地面太阳总辐射在 1990 年前后存在着先“变暗”后“变亮”的变化特点^[13], 由于不确定 1990 年前后是否是辐射观测仪器换型导致总辐射观测数据出现的差异, 为此, 本研究在进行总辐射和总辐射对气温影响分析时, 将分析时间段分为 1970—1989 年和 1993—2019 年 2 个阶段。本研究中对变化趋势进行显著性检验使用的是 T 检验。

2 地面太阳辐射变化及其对气温的影响

2.1 年平均太阳辐射及气温变化

对中国东北三省 SSR 求取年总量, 对 T_m 、 T_{min} 、 T_{max} 和 DTR 求取年平均值, 各变量存在明显年际变化(图 2), 同时在 1970—1989 年和 1992—2019 年存在不同变化趋势。由图 2 可以看出, 1970—2019 年 SSR 最低值出现在 1985 年, 为 4758.34 MJ/m², 最大值出现在 2018 年, 为 5284.49 MJ/m², 虽然使用的资料及起始时间存在差异, 本研究的认识与谢今范等^[16]对 SSR 近 50 a 整体变化认识较为一致。表 2 给出了 1970—1989 年和 1993—2019 年 2 个阶段各要素变化趋势和相对变化量。在 1970—1989 年 SSR 平均每 10 a 减少 216.49 MJ/m², 减少趋势通过 0.05 显著性水平的检验, 平均每 10 a 减少 4.33%。在 1992—2019 年 SSR 平均每 10 a 增加 37.54 MJ/m², 未能通过 0.05 显著性水平的检验, 平均每 10 a 增加 0.75%。该变化趋势整体与中国整体太阳辐射变化趋势相一致^[17]。

1970—2019 年 T_m 在波动中增加, 其中在 1970—1989 年, 变化趋势为 0.39°C/10a, 在 1993—2019 年, 变化趋势为 0.07°C/10a, 变化趋势均未通过 0.05 显著性水平检验。在 SSR 显著减少的 1970—1989 年, T_{min} 以 0.54°C/10a 增加, 通过 0.05 显著性水平检验, T_{max} 平均每 10 a 仅增加 0.16°C, 远小于 T_{min} 的变化趋势, 增加趋势不显著。在 SSR 显著增加的 1993—2019 年, T_{min} 变化趋势仅为 0.02°C/10a, T_{max} 的变化趋势为 0.11°C/10a, 高于 T_{min} 的增加趋势。受最高、最低气温变化趋势的影响, T_m 在 2 个阶段变化趋势均居于 T_{min} 和 T_{max} 之间, DTR 在 1970—1989 年变化趋势为 -0.37°C/10a, 在 1993—2019 年变化趋势为 0.10°C/10a。

Ye 等^[22]认为太阳辐射对地面气温, 尤其是对气温日较差产生明显影响。申彦波等^[12]在中国东南地区地面太阳辐射变化对气温变化影响分析时提出, 由于最高气温往往出现在白天, 地面太阳辐射变化是引起最高气温变化的重要原因, 而最低气温变化

表 1 东北三省气象站点辐射数据缺测数量统计

Table 1 Statistics of missing measured quantity of radiation data at meteorological stations in three provinces of Northeast China

站点名称	黑河	佳木斯	哈尔滨	长春	延吉	朝阳	沈阳	大连
缺测月数	0	17	0	14	3	4	1	6

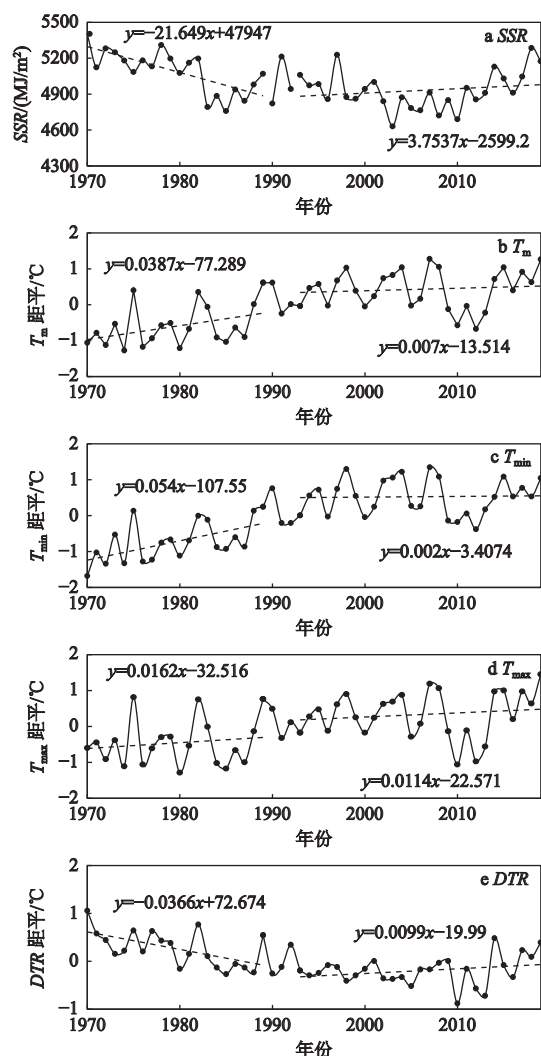


图2 1970—2019年东北三省总辐射(a)、平均气温距平(b)、最低气温距平(c)、最高气温距平(d)和气温日较差距平(e)年际变化

Fig.2 Interannual changes of surface solar radiation (a), mean temperature anomaly (b), minimum temperature anomaly (c), maximum temperature anomaly (d) and daily temperature range anomaly (e) in three provinces of Northeast China from 1970 to 2019

不受太阳辐射变化的直接影响。在基于大气系统热量平衡理论^[23]基础上,参考申彦波等^[12]研究做出如下假设:① $T_{\max}$ 变化主要由太阳辐射和其他因素(如向上短波辐射,向上、向下长波辐射,湍流加热,水汽凝结加热等)共同引起;② $T_{\min}$ 变化主要由其他因素引起,与 SSR 无关;③ 其他因素对 $T_{\max}$ 影响与其对 $T_{\min}$ 影响的比值为 r 。在这一基础上,结合表2中 $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$ 的实际变化趋势,1970—1989年太阳辐射变化使 $T_{\max}$ 发生变化量应为 $0.16-0.54r$,1993—2019年太阳辐射变化使 $T_{\max}$ 发生的变化量应为 $0.11-0.02r$ 。根据两个时期太阳辐射实际变化

表2 东北三省 SSR、 T_m 、 $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$ 和 DTR 在 1970—1989 年和 1993—2019 年平均变化率及相对变化

Table 2 Average change rates and relative changes of SSR, T_m , $T_{\min}$, $T_{\max}$ and DTR in three provinces of Northeast China during 1970—1989 and 1993—2019

变量	时期		相对变化
	1970—1989年	1993—2019年	
SSR/(%/10a)	-4.33	0.75	5.08
T_m /(°C/10a)	0.39	0.07	0.32
$T_{\min}$ /(°C/10a)	0.54	0.02	0.52
$T_{\max}$ /(°C/10a)	0.16	0.11	0.05
DTR/(°C/10a)	-0.37	0.10	0.47

注: SSR: 总辐射; T_m : 平均气温; $T_{\min}$: 最低气温; $T_{\max}$: 最高气温; DTR: 气温日较差。

趋势,可近似得到:

$$\frac{0.16-0.54r}{0.11-0.02r} = \frac{-4.33\%}{0.75\%}$$

解得 $r \approx 1.21$, 即其他因素对 $T_{\max}$ 影响是其对 $T_{\min}$ 影响的 1.21 倍。由此可以得出,1970—1989 年,由于 SSR 下降引起 $T_{\max}$ 变化趋势约为 $-0.49^\circ\text{C}/10\text{a}$,而在 1993—2019 年,由于 SSR 增加而引起 $T_{\max}$ 变化趋势约为 $0.09^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。

1970—1989 年 T_m 变化趋势为 $0.39^\circ\text{C}/10\text{a}$, 同时期 $T_{\min}$ 变化趋势为 $0.54^\circ\text{C}/10\text{a}$, 而其他因素引起 $T_{\max}$ 变化趋势为 $0.65^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。可见,在此期间虽然 SSR 减少没能改变 T_m 增加趋势,但明显使 T_m 增加趋势放缓。在 1993—2019 年期间 $T_{\min}$ 增加趋势仅为 $0.02^\circ\text{C}/10\text{a}$, 由其他因素引起 $T_{\max}$ 增加趋势仅为 $0.02^\circ\text{C}/10\text{a}$, 但由于 SSR 增加作用, $T_{\max}$ 在 1993—2019 年增幅达到 $0.11^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。可见,在此期间,SSR 增加一定程度上提高了 $T_{\max}$ 增加趋势,使 T_m 变化趋势明显高于 $T_{\min}$, 达到 $0.07^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。

SSR 通过单纯影响 $T_{\max}$ 进而明显改变了 DTR 的变化。1970—1989 年,其他因素使 $T_{\max}$ 变化趋势约为 $0.65^\circ\text{C}/10\text{a}$, 该情况下, DTR 变化趋势约为 $0.11^\circ\text{C}/10\text{a}$, 由于 SSR 减弱作用,使得 DTR 变化趋势由正转负,约为 $-0.37^\circ\text{C}/10\text{a}$, 可见,SSR 减少明显减小了 DTR 变化趋势。1993—2019 年,由其他因素导致 $T_{\max}$ 变化趋势约为 $0.02^\circ\text{C}/10\text{a}$, 在此情况下, DTR 变化趋势约为 $0^\circ\text{C}/10\text{a}$, 但受到 SSR 增加的影响,使得 DTR 变化趋势约为 $0.10^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。

2.2 季节平均太阳辐射及气温变化

利用太阳辐射月总量及月平均气温、月平均最低和最高气温以及月平均气温日较差计算得到春季

(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)和冬季(12月和1—2月)量值,计算各量值在1970—1989年和1993—2019年变化趋势及相对变化(表3)。

在春季,SSR在1970—1989年变化趋势为 $-3.57\%/10a$,减少趋势通过0.05显著性水平检验,在四季中最接近年平均变化趋势,该时段内 T_{min} 变化趋势为 $0.60^{\circ}C/10a$,但 T_{max} 受SSR减少趋势影响,其变化趋势明显小于 T_{min} ,仅为 $0.39^{\circ}C/10a$, T_m 受 T_{min} 和 T_{max} 共同影响,其变化趋势为 $0.51^{\circ}C/10a$,变化幅度介于 T_{min} 和 T_{max} 之间。由于受SSR减少影响, T_{max} 变化幅度小于 T_{min} 变化幅度,致使DTR呈现减少趋势,平均每10a减少 $0.21^{\circ}C$ 。在1993—2019年期间SSR增加趋势为 $0.82\%/10a$,受其影响, T_{max} 增加趋势明显高于 T_{min} ,同时 T_m 增加趋势明显高于 T_{min} ,而DTR表现为增加趋势,为 $0.14^{\circ}C/10a$ 。

四季中,SSR在1970—1989年期间均表现为减少趋势,其中夏季减少幅度最大,为 $-6.34\%/10a$,通过0.05显著性水平检验,虽然与陶苏林等^[24]分析时段存在差异,但整体趋势是一致的。 T_m 与 T_{min} 均表现为增加趋势,其中冬季和春季增加趋势通过了0.05显著性水平检验,与以往对东北地区气温相关研究结论相一致^[25]。在SSR对 T_{max} 影响方面,冬季与春季相一致,虽然SSR未能改变 T_{max} 变化趋势,但都使 T_{max} 增加趋势减小。在夏季和秋季,受SSR影响, T_{max} 与 T_{min} 变化趋势相反,表现为减少趋势。

在SSR影响下, T_m 变化趋势均小于 T_{min} ,而DTR均表现为减小趋势。在1993—2019年期间除夏季外SSR均表现为增加趋势,其中冬季增加幅度最大,为 $3.02\%/10a$,通过0.05显著性水平检验。 T_{min} 除冬季为减少趋势外,其他季节均表现为增加趋势。在春、夏和秋季,受SSR影响, T_{max} 增加趋势均高于 T_{min} ,而冬季SSR则使 T_{max} 减少趋势小于 T_{min} 。在SSR影响下,春、夏和秋季 T_m 增加趋势大于 T_{min} ,而冬季 T_m 减少趋势小于 T_{min} 。DTR变化趋势与SSR表现为一致的增加趋势。

2.3 太阳辐射与气温变化的空间分布

前文分析了东北三省区域平均变化趋势,但SSR及气温变化存在一定区域差异^[15, 26-27]。图3分别给出了1970—1989年和1993—2019年,中国东北三省SSR、 T_m 、 T_{min} 、 T_{max} 和DTR平均变化率空间分布,表4给出了各个站点SSR、 T_m 、 T_{min} 、 T_{max} 和DTR变化趋势具体数值及相对变化。从SSR变化趋势上可以看到,各站SSR在东北三省变化趋势较为一致。1970—1989年,除哈尔滨站外,其他各站均表现不同程度减少趋势,其中沈阳站减少趋势最明显,变化趋势为 $9.08\%/10a$,该阶段 T_{min} 均表现增加趋势,其中有5个站点通过0.05显著性水平检验。受SSR减少影响, T_{max} 增加幅度明显低于 T_{min} ,增加趋势均未通过显著性检验,其中佳木斯、长春和延吉为弱的减少趋势。 T_m 虽然均为增加趋势,但仅有

表3 东北三省8个台站平均四季SSR、 T_m 、 T_{min} 、 T_{max} 和DTR在1970—1989年和1993—2019年平均变化率

Table 3 Average change rates of SSR, T_m , T_{min} , T_{max} and DTR of eight stations in three provinces of Northeast China during 1970—1989 and 1993—2019

	春季			夏季		
	1970—1989年	1993—2019年	相对变化	1970—1989年	1993—2019年	相对变化
SSR/(%/10a)	-3.57	0.82	4.38	-6.34	-0.38	5.96
T_m /($^{\circ}C/10a$)	0.51	0.32	0.19	0.19	0.11	0.08
T_{min} /($^{\circ}C/10a$)	0.60	0.24	0.36	0.38	0.15	0.23
T_{max} /($^{\circ}C/10a$)	0.39	0.37	0.02	-0.07	0.16	0.23
DTR/($^{\circ}C/10a$)	-0.21	0.14	0.35	-0.45	0.01	0.46
	秋季			冬季		
	1970—1989年	1993—2019年	相对变化	1970—1989年	1993—2019年	相对变化
SSR/(%/10a)	-2.81	1.10	3.91	-3.34	3.02	6.37
T_m /($^{\circ}C/10a$)	0.06	0.10	0.04	0.80	-0.23	1.03
T_{min} /($^{\circ}C/10a$)	0.18	0.01	0.17	0.96	-0.32	1.28
T_{max} /($^{\circ}C/10a$)	-0.15	0.18	0.33	0.48	-0.24	0.72
DTR/($^{\circ}C/10a$)	-0.33	0.17	0.50	-0.48	0.07	0.55

注:变量含义见表2。

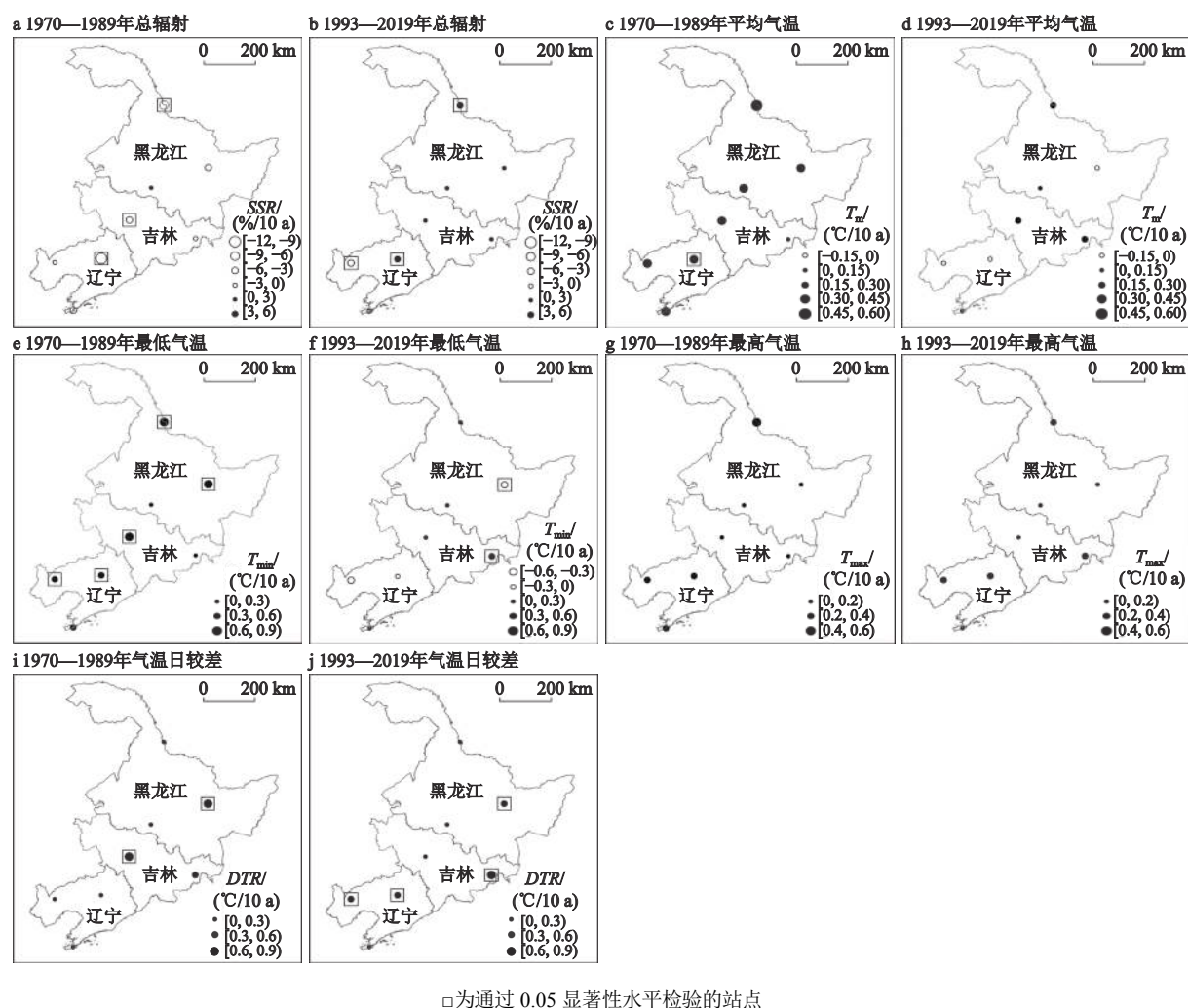


图3 1970—1989年和1993—2019年中国东北三省总辐射(a、b)、平均气温(c、d)、最低气温(e、f)、最高气温(g、h)和气温日较差(i、j)平均变化率空间分布

Fig.3 Spatial distribution of average change rates of surface solar radiation (a, b), mean temperature (c, d), minimum temperature (e, f), maximum temperature (g, h) and daily temperature range (i, j) in three provinces of Northeast China during 1970—1989 and 1993—2019

沈阳一个站点通过0.05显著性水平。由于 $T_{\max}$ 变化趋势小于 $T_{\min}$,在1970—1989年间, DTR 呈现不同程度减小。

在1993—2019年,各个站点 SSR 变化趋势转为以增加趋势为主,其中沈阳和黑河增加趋势通过0.05显著性水平检验,仅有朝阳和大连表现为减少趋势。在这一时间段内, $T_{\min}$ 中有5个站点为增加趋势,3个站点为减少趋势,从具体数值上看,变化幅度相对较小。在 SSR 变化趋势作用下,除延吉站外,其他各站 $T_{\max}$ 均表现为增加趋势,其增加幅度较 $T_{\min}$ 偏大。 $T_{\min}$ 增加的站点,其 T_m 增加幅度更大, $T_{\min}$ 减少的站点, T_m 减少幅度更小。受 SSR 增加影响,8个站点 DTR 变化趋势中有3个表现为显著增

加趋势。

3 结论与讨论

本研究在对东北三省地面太阳辐射分析基础上,基于大气系统热量平衡理论,定量分析了太阳辐射变化对气温影响,得到以下认识:

1)1970—2019年,东北三省地面太阳辐射经历了先减小后增加的变化趋势,1970—1989年减少趋势显著, SSR 平均每10 a减少216.49 MJ/m²,占多年平均值的4.33%;1993—2019年平均每10 a增加37.54 MJ/m²,占多年平均值的0.75%。

2)最高气温变化直接受地面太阳辐射变化的影响,在1970—1989年区域平均情况下,地面太阳

表 4 中国东北三省 8 个台站 SSR 、 T_m 、 T_{min} 、 T_{max} 和 DTR 在 1970—1989 年和 1993—2019 年的平均变化率Table 4 Average change rates of SSR , T_m , T_{min} , T_{max} and DTR of 8 stations in three provinces of Northeast China in 1970—1989 and 1993—2019

	黑河			佳木斯		
	1970—1989年	1993—2019年	相对变化	1970—1989年	1993—2019年	相对变化
SSR /(%/10a)	-6.45	3.08	9.53	-5.03	2.32	7.35
T_m /(°C/10a)	0.57	0.17	0.40	0.44	-0.08	0.51
T_{min} /(°C/10a)	0.74	0.19	0.55	0.82	-0.37	1.19
T_{max} /(°C/10a)	0.46	0.34	0.12	-0.03	0.07	0.10
DTR /(°C/10a)	-0.26	0.14	0.40	-0.84	0.46	1.30
	哈尔滨			长春		
	1970—1989年	1993—2019年	相对变化	1970—1989年	1993—2019年	相对变化
SSR /(%/10a)	1.43	0.17	-1.26	-5.83	2.00	7.83
T_m /(°C/10a)	0.39	0.03	0.35	0.38	0.16	0.21
T_{min} /(°C/10a)	0.27	0.24	0.03	0.76	0.03	0.73
T_{max} /(°C/10a)	0.06	0.05	0.01	-0.01	0.18	0.19
DTR /(°C/10a)	-0.20	-0.18	0.02	-0.77	0.16	0.94
	延吉			朝阳		
	1970—1989年	1993—2019年	相对变化	1970—1989年	1993—2019年	相对变化
SSR /(%/10a)	-2.13	0.54	2.67	-2.25	-4.88	-2.63
T_m /(°C/10a)	0.13	0.16	0.03	0.40	-0.02	0.42
T_{min} /(°C/10a)	0.29	0.52	0.23	0.46	-0.32	0.78
T_{max} /(°C/10a)	-0.02	-0.34	0.32	0.22	0.21	0.01
DTR /(°C/10a)	-0.31	-0.86	0.55	-0.22	0.55	0.76
	沈阳			大连		
	1970—1989年	1993—2019年	相对变化	1970—1989年	1993—2019年	相对变化
SSR /(%/10a)	-9.08	5.91	14.99	-5.83	-2.06	3.78
T_m /(°C/10a)	0.43	-0.01	0.44	0.37	0.13	0.24
T_{min} /(°C/10a)	0.55	-0.30	0.85	0.42	0.16	0.26
T_{max} /(°C/10a)	0.30	0.27	0.04	0.31	0.13	0.19
DTR /(°C/10a)	-0.24	0.57	0.81	-0.08	-0.04	0.04

注:变量含义见表2。

辐射减小削弱了最高气温增加趋势,使最高气温增加趋势降低 $0.49^{\circ}\text{C}/10\text{a}$; 1993—2019 年地面太阳辐射增加增强了最高气温增加趋势,增加幅度约为 $0.09^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

3)地面太阳辐射变化通过改变最高气温变化改变了平均气温和气温日较差变化趋势,1970—1989 年削弱了平均气温增加趋势,减小了气温日较差;1993—2019 年增加了平均气温增加趋势,加大了气温日较差。

本研究仅利用东北三省 8 个气象观测站点地面太阳辐射数据进行分析,站点数量较少,其算术平均值虽然能够大体代表东北三省地面太阳辐射整体状况,但站点稀疏势必对分析造成一定影响。目

前一些研究通过太阳辐射数据与其他气象观测要素建立关系,进而扩展辐射数据数量^[16,28],但其结果与真实值之间存在一定的偏差。对于站点稀疏的地区,卫星遥感数据是一个不错的补充,但其反演结果同样存在较大的偏差,且不同地区偏差不同,为其应用增加了难度。

参考文献(References):

- [1] Hartmann D L, Tank A M G K, Rusticucci M et al. Observations: Atmosphere and surface[M]//Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Yun X, Huang B Y, Cheng J Y et al. A new merge of global

- surface temperature datasets since the start of 20th century[J]. *Earth SystSci Data*, 2019, 11: 1629-1643.
- [3] 严中伟, 丁一汇, 翟盘茂, 等. 近百年中国气候变暖趋势之再评估[J]. *气象学报*, 2020, 78(3): 370-378. [Yan Zhongwei, Ding Yihui, Zhai Panmao et al. Re-assessing climatic warming in China since the last century. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020, 78(3): 370-378.]
- [4] 梁珑腾, 马龙, 刘廷玺, 等. 1951—2014年中国北方地区季节气温突变与变暖停滞年份的时空变异性[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(12): 2149-2166. [Liang Longteng, Ma Long, Liu Tingxi et al. The seasonal spatiotemporal variation of the temperature mutation and warming hiatus over northern China during 1951—2014. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(12): 2149-2166.]
- [5] 赵宗慈, 罗勇, 黄健斌. 未来20年全球继续变暖吗?[J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16(5): 652-656. [Zhao Zongci, Luo Yong, Huang Jianbin. Will global warming continue in the next 20 years? *Climate Change Research*, 2020, 16(5): 652-656.]
- [6] 王晓欣, 姜大膀, 郎咸梅. CMIP5多模式预估的1.5℃升温背景下中国气温和降水变化[J]. *大气科学*, 2019, 43(5): 1158-1170. [Wang Xiaoxin, Jiang Dabang, Lang Xianmei. Temperature and precipitation changes over China under a 1.5℃ global warming scenario based on CMIP5 models. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2019, 43(5): 1158-1170.]
- [7] 丁一汇, 李霄, 李巧萍. 气候变暖背景下中国地面风速变化研究进展[J]. *应用气象学报*, 2020, 31(1): 1-12. [Ding Yihui, Li Xiao, Li Qiaoping. Advances of surface wind speed changes over China under global warming. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2020, 31(1): 1-12.]
- [8] 王秀芬, 王春艳, 尤飞. 1961—2014年东北三省水稻生长季极端高温事件分析[J]. *灾害学*, 2019, 34(2): 97-102. [Wang Xiufen, Wang Chunyan, You Fei. Extreme high temperature events in growth season in three provinces of Northeast China from 1961 to 2014. *Journal of Catastrophology*, 2019, 34(2): 97-102.]
- [9] 赵学鹏, 白学平, 李俊霞, 等. 气候变暖背景下不同海拔长白落叶松对气候变化的响应[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(3): 637-647. [Zhao Xuepeng, Bai Xueping, Li Junxia et al. Response of *Larixolgensis* at different elevations to climate change in the context of climate warming. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(3): 637-647.]
- [10] 杨柳妮, 武炳义. 东亚冬季气温的年代际变化及其可能成因分析[J]. *科学通报*, 2013, 58(26): 2728-2736. [Yang Liuni, Wu Bingyi. Interdecadal variations of the East Asian winter surface air temperature and possible causes. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(26): 2728-2736.]
- [11] 郑然, 刘嘉慧敏, 马振峰. 西南地区冬季气温年代际变化及可能成因分析[J]. *热带气象学报*, 2019, 35(3): 390-397. [Zheng Ran, Liu Jiahumin, Ma Zhenfeng. Interdecadal variation and possible causes of winter temperature in southwest China. *Journal of Tropical Meteorology*, 2019, 35(3): 390-397.]
- [12] 申彦波, 王标. 近50年中国东南地区地面太阳辐射变化对气温变化的影响[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(6): 1457-1465. [Shen Yanbo, Wang Biao. Effect of surface solar radiation variations on temperature in South-East China during recent 50 years.. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(6): 1457-1465.]
- [13] 杨溯, 石广玉, 王标, 等. 全球“变暗”和“变亮”时期我国地面温度变化研究[J]. *高原气象*, 2013, 32(4): 993-999. [Yang Su, Shi Guangyu, Wang Biao et al. Characteristics of surface temperature in China during global 'dimming' and 'brightening' periods. *Plateau Meteorology*, 2013, 32(4): 993-999.]
- [14] 胡琦, 潘学标, 李秋月, 等. 气候变化背景下东北地区太阳能资源多时间尺度空间分布与变化特征[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(10): 2647-2652. [Hu Qi, Pan Xuebiao, Li Qiuyue et al. Multi-time scale and spatial distribution and variation characteristics of solar energy resources in Northeast China in context of climate change. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2016, 37(10): 2647-2652.]
- [15] 马金玉, 罗勇, 申彦波, 等. 近50年中国太阳总辐射长期变化趋势[J]. *中国科学:地球科学*, 2012, 42(10): 1597-1608. [Ma Jinyu, Luo Yong, Shen Yanbo et al. Regional long-term trend of ground solar radiation in China over the past 50 years. *Science China: Earth Sciences*, 2012, 42(10): 1597-1608.]
- [16] 谢今范, 张婷, 张梦远, 等. 近50 a东北地区地面太阳辐射变化及原因分析[J]. *太阳能学报*, 2012, 33(12): 2127-2134. [Xie Jinfan, Zhang Ting, Zhang Mengyuan et al. Change and reason analysis of ground solar radiation in Northeast China over recent 50 years. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2012, 33(12): 2127-2134.]
- [17] 杨溯, 石广玉, 王标, 等. 1961—2009年我国地面太阳辐射变化特征及云对其影响的研究[J]. *大气科学*, 2013, 37(5): 963-970. [Yang Su, Shi Guangyu, Wang Biao et al. Trends in surface solar radiation (SSR) and the effect of clouds on SSR during 1961—2009 in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 37(5): 963-970.]
- [18] Yang Su, Wang X L, Wild M. Homogenization and trend analysis of the 1958—2016 in situ surface solar radiation records in China[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(11): 4529-4541.
- [19] Wang Y W, Yang S, Arturo S et al. A revisit of direct and diffuse solar radiation in China based on homogeneous surface observations: Climatology, trends and their probable causes[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2020, 124. <https://doi.org/10.1029/2020JD032634>.
- [20] 李峰, 季承荔, 莫月琴, 等. 我国地面辐射基准站观测数据完整性和合理性检查评价[J]. *高原气象*, 2013, 32(4): 1203-1213. [Li Feng, Ji Chengli, Mo Yueqin et al. Examination and evaluation of integrality and rationality of China basic radiation station data. *Plateau Meteorology*, 2013, 32(4): 1203-1213.]
- [21] 杨溯, 李庆祥. 中国降水量序列均一性分析方法及数据集更新完善[J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(4): 276-281. [Yang Su, Li Qingxiang. Improvement in homogeneity analysis method and update of China precipitation data. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis*, 2014, 10(4): 276-281.]
- [22] Ye J, Li F, Sun G et al. Solar dimming and its impact on estimating

- solar radiation from diurnal temperature range in China, 1961 — 2007[J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2010, 101: 137-142.
- [23] 周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. 高等大气物理学[M]. 北京: 气象出版社, 1991. [Zhou Xiuji, Tao Shanchang, Yao Keya. *Advanced Atmospheric Physics*. Beijing: China Meteorological Press, 1991.]
- [24] 陶苏林, 戚易明, 申双和, 等. 中国1981—2014年太阳总辐射的时空变化[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(11): 143-147. [Tao Sulin, Qi Yiming, Shen Shuanghe et al. The spatial and temporal variation of solar radiation over China from 1981 to 2014. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(11): 143-147.]
- [25] 董满宇, 吴正方. 近50年来东北地区气温变化时空特征分析[J]. *资源科学*, 2008, 30(7): 1093-1099. [Dong Manyu, Wu Zhengfang. Analysis of temporal and spatial characteristics of temperature change over the last 50 years in Northeast China. *Resources Science*, 2008, 30(7): 1093-1099.]
- [26] 郭志梅, 缪启龙, 李雄. 中国北方地区近50年来气温变化特征的研究[J]. *地理科学*, 2005, 25(4): 448-454. [Guo Zhimei, Miao Qilong, Li Xiong. Variation characteristics of temperature over Northern China in recent 50 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(4): 448-454.]
- [27] 马金玉, 梁宏, 罗勇, 等. 中国近50年太阳直接辐射和散射辐射变化趋势特征[J]. *物理学报*, 2011, 60(6): 853-866. [Ma Jinyu, Liang Hong, Luo Yong et al. Variation trend of direct and diffuse radiation in China over recent 50 years. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(6): 853-866.]
- [28] 申彦波, 张顺谦, 郭鹏, 等. 基于SMARTS模式的太阳能资源计算——以四川省为例[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(2): 482-488. [Shen Yanbo, Zhang Shunqian, Guo Peng et al. Calculation for solar energy resource based on SMARTS model—As a case study in Sichuan Province. *Acta Energiac Solaris Sinica*, 2016, 37(2): 482-488.]

Variation of surface solar radiation and its influence on temperature change in three provinces of Northeast China

Shen Yanbo^{1,2}, Wang Chuanhui³, Chen Yun^{1,2}

(1. CMA Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081, China; 2. CAMS & China ReCRM-Joint Open Lab on Meteorological Risk and Insurance, Beijing 100081, China; 3. Anhui Public Meteorological Service Center, Hefei 230031, Anhui, China)

Abstract: As the fundamental source of energy for the earth, changes in surface solar radiation are bound to have a certain impact on temperature changes. This study used monthly surface solar radiation and temperature data from three provinces in the Northeast of China to analyze the long-term trend of surface solar radiation. Based on the heat balance theory of atmospheric system, the impact of solar radiation changes on temperature was quantitatively analyzed. The results showed that from 1970 to 2019, surface solar radiation in Northeast China experienced a trend of first decreasing and then increasing, with a significant decreasing trend from 1970 to 1989, and the average decrease of SSR was 216.49 MJ/m^2 every 10 years, accounting for 4.33% of the multi-year average. From 1993 to 2019, the average increase of SSR was 37.54 MJ/m^2 every 10 years, accounting for 0.75% of the multi-year average. The change in maximum temperature was directly influenced by changes in surface solar radiation. In the average situation of Northeast China from 1970 to 1989, the decrease in surface solar radiation weakened the increasing trend of maximum temperature, resulting in a decrease of 0.49°C every 10 years. From 1993 to 2019, the increase in surface solar radiation strengthened the increasing trend of maximum temperature in Northeast China, with an increase of approximately 0.09°C every 10 years. Further analysis revealed that changes in surface solar radiation altered the average temperature and diurnal temperature range by changing the maximum temperature. From 1970 to 1989, it weakened the increasing trend of average temperature in Northeast China and reduced the diurnal temperature range, while it strengthened them from 1993 to 2019.

Key words: solar radiation; temperature; daily temperature range; three provinces of Northeast China