

程定宇,刘新春,钟玉婷,等.吐哈盆地太阳辐射及影响因素[J].中国沙漠,2026,46(3):22-31.

吐哈盆地太阳辐射及影响因素

程定宇^{1,2},刘新春²,钟玉婷²,买买提艾力·买买提依明²,高佳程²

(1.新疆大学 生态与环境学院,新疆 乌鲁木齐 830046; 2.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所 中国气象局阿克苏达拉大气本底野外科学试验基地/新疆沙漠气象与沙尘暴重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 基于吐哈盆地1994—2023年太阳辐射与其他气象要素观测数据及2000—2023年PM₁₀浓度数据集,采用线性倾向估计和皮尔逊相关分析法,系统研究了多时间尺度太阳辐射变化特征及其影响因素。结果表明:(1)近30 a吐鲁番与哈密站太阳辐射年均值分别为5 449.87 MJ·m⁻²和6 146.68 MJ·m⁻²,存在显著空间异质性,两地分别呈现下降(2.91 MJ·m⁻²·a⁻¹)和上升(4.45 MJ·m⁻²·a⁻¹)趋势,太阳辐射量极值及出现时间不同,辐射日变化呈单峰型且峰值集中于正午时段。(2)两地气温显著上升(0.09 °C·a⁻¹和0.05 °C·a⁻¹),年均总云量相对稳定,PM₁₀浓度持续下降(0.11 μg·m⁻³·a⁻¹和0.57 μg·m⁻³·a⁻¹)。 (3)太阳辐射季节变化(夏季>春季>秋季>冬季)与塔克拉玛干沙漠等地一致,但日峰值时空分异受太阳高度角年周期变化与地形海拔梯度共同调控。(4)PM₁₀颗粒物通过散射与吸收作用削弱地表太阳辐射,其中吐鲁番站邻近沙尘源以及特殊地理环境影响,PM₁₀浓度持续偏高,是太阳辐射下降的主要因素,哈密站PM₁₀浓度下降快,对其太阳辐射上升贡献显著。

关键词: 吐哈盆地; 太阳辐射; 气象要素; PM₁₀

文章编号: 1000-694X(2026)03-022-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00112

中图分类号: P422

文献标志码: A

0 引言

太阳辐射作为地球能量收支的核心驱动因子,不仅调控着光合作用、地表散蒸等生物地球化学循环过程,更是太阳能资源开发与利用的直接来源^[1],其时空分布特征及变化机制深刻影响着区域气候演变、生态系统稳定性及可再生能源开发潜力^[2-3]。在全球变暖背景下,太阳辐射的动态响应与反馈机制已成为气候系统研究的重点领域^[4],尤其在干旱半干旱区,复杂下垫面条件与极端气候特征的协同作用,使得太阳辐射的时空异质性更为显著,其波动可能加剧地表能量收支失衡,进而触发连锁气候效应^[5-6]。因此,深入解析此类区域太阳辐射的多尺度变化特征及其驱动机制,对完善陆-气相互作用模型、优化能源布局及制定生态保护策略具有重要科学意义。

近年来,国际上围绕多种时间尺度和多样气候

环境的太阳辐射特征展开了众多研究^[7-9],以提高对太阳辐射变化及其影响的理解。国内特殊地形区域的辐射强迫效应也受到广泛关注。对帕米尔高原的研究^[10-11]表明,由于受跨境沙尘传输影响,散射辐射日曝辐量在沙尘事件中可激增2倍,凸显高原地形对气溶胶辐射强迫的放大效应;对塔克拉玛干沙漠的观测^[12-13]表明,沙尘暴期间总辐射日峰值衰减40%~60%,而散射辐射增幅达180%,揭示了气溶胶与辐射相互作用的非线性响应机制;对河西走廊的研究^[14-16]进一步验证了干旱盆地辐射受纬度与海拔协同调控,且沙尘高发期(春季)辐射衰减效应显著。青藏高原的多尺度观测数据研究揭示了辐射动态的驱动机制,对优化高原太阳能资源开发与气候变化应对策略具有重要意义^[17-18]。对内蒙古地区的研究^[19-20]表明,影响辐射量变化的主要气象因子是云量,低云量的增加会导致辐射量减少。

收稿日期:2025-04-16; 改回日期:2025-07-11

资助项目:中国气象局气象能力提升联合研究专项(24NLTSZ006);第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk110202);新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022D01A364, 2022D01A161);伊吾县节能减排降碳专项(YW202407);新疆气象局创新发展专项(ZD202306);中国气象科学研究院科技发展基金项目(2021KJ034)

作者简介:程定宇(2000—),男,重庆万州人,硕士研究生,主要从事太阳辐射研究。E-mail: 450587014@qq.com

通信作者:钟玉婷(E-mail: zhongyt@idm.cn)

对四川盆地的研究^[21-22]表明,盆地辐射削弱以低云量为主导因素,而高原东缘则与相对湿度关联密切。

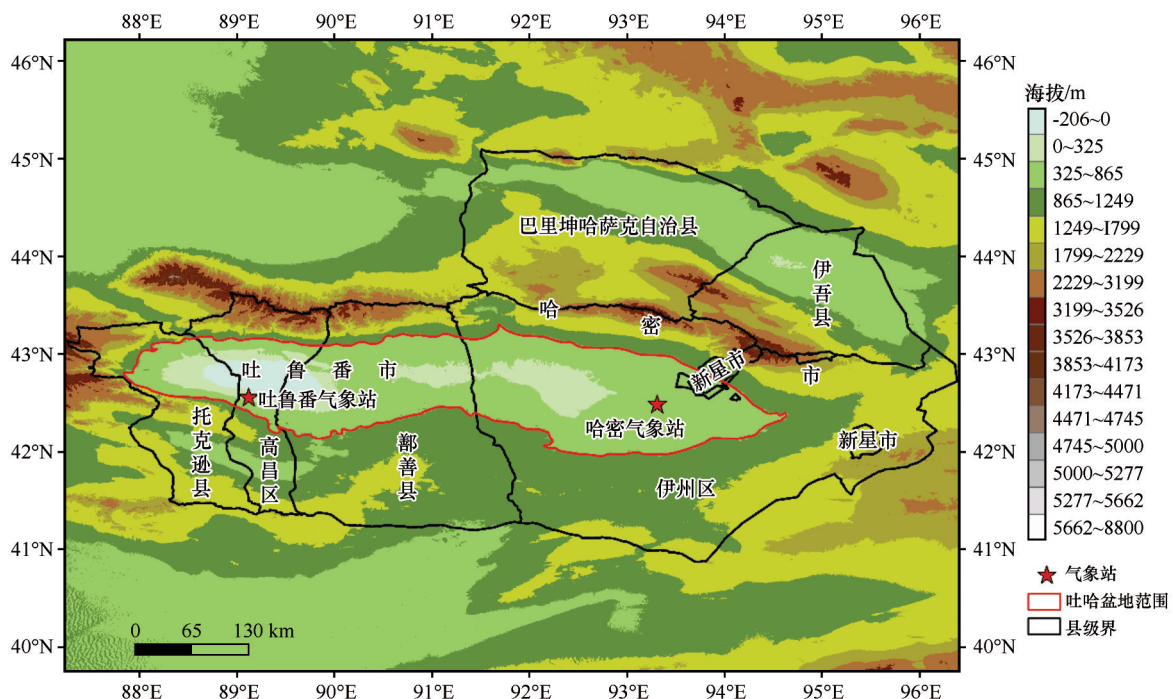
干旱半干旱区盆地较内陆其他地区有着更为极端的气候条件和复杂的陆面过程,且太阳辐射的波动会对长期气候变化产生显著影响^[23],故研究其太阳辐射收支对理解和预测该区域的气候变化至关重要。前人对准噶尔盆地^[24-26]、塔里木盆地^[27-29]、柴达木盆地^[30-33]等地区的太阳辐射进行了大量研究,丰富了国内对干旱半干旱区盆地太阳辐射特征的认识。针对西北干旱区,申彦波等^[34]利用吐鲁番太阳能试验站实测数据,指出散射比和太阳高度角是影响斜面总辐射及其年变化的关键因素;刘羽等^[35]通过对新疆地区辐射反演发现,东疆太阳直射辐射最强,且月际波动受纬度影响较大;魏哲花等^[36]利用哈密近20 a的观测数据,揭示了该地太阳辐射时空分布特征,其年际变化较大并表现出显著的季节性特征。然而,吐哈盆地作为中国西北地区重要的太阳能资源富集地^[37],缺乏该地长期太阳辐射特征的系统研究。吐哈盆地主要由干旱荒漠和绿洲农业构成^[38],区域气候极度干旱且持续增温^[39-40],尤其是吐鲁番站位于跨境气溶胶输送的关

键节点,并且常年风沙频繁导致PM₁₀浓度较高^[41-42],这些特征可能会影响该地太阳辐射特征,还会对区域以至全球的能量平衡和气候反馈机制产生影响。因此,本文利用吐鲁番站和哈密站逐小时太阳辐射和其他气象要素数据以及PM₁₀数据集,对多时间尺度太阳辐射变化特征进行分析,旨在揭示盆地太阳辐射特征及空间差异,探究影响太阳辐射的气象和环境因素,以期对干旱区气溶胶与气候相互作用研究提供新的观测证据,并为“双碳”目标下的新能源开发提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

吐哈盆地位于新疆维吾尔自治区东部(图1),四周环山呈东西向分布,总面积约5.35万km²,盆地主要由丘陵、沙漠、平原、戈壁等景观构成,对太阳辐射具有较高的反射率。该地区为典型的温带大陆性干旱荒漠气候,年均气温9.8~12.1℃,极端高温为47.8℃,最低至-32℃,年降水量均不超过43mm且温差大、蒸发强^[43-44],故对该地区生态系统和大气环境造成显著影响。



注:基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号:GS(2024)0650号)制作,底图边界无修改

图1 吐鲁番气象站和哈密气象站地理位置示意图

Fig.1 Geographical location of Turpan meteorological station and Hami meteorological station

1.2 数据和方法

1.2.1 数据来源

基于1994—2023年气象站吐鲁番站(42°56'N、89°12'E,海拔37.2 m)和哈密站(42°49'N、93°31'E,海拔738.8 m)的逐小时太阳辐射及其他气象要素观测数据,对吐哈盆地的辐射气候特征进行分析。同时整合中国高分辨率高质量近地表空气污染物数据集(China High Air Pollutants, CHAP)2000—2023年吐哈盆地格点化PM₁₀浓度数据,通过分析两地PM₁₀浓度时空变化规律,解析其对太阳辐射传输过程及气象要素的影响机制。尽管PM₁₀浓度数据与太阳辐射数据存在6年的非重合期(1994—1999年),但该数据集是目前国内权威且分辨率较高的PM₁₀数据源,能够保证分析结果的可靠性。

1.2.2 线性倾向估计

线性倾向估计是分析太阳辐射趋势的常用方法, y_i 为太阳辐射量(MJ·m⁻²),是随时间 x_i 变化的函数^[45]。

$$y_i = a + bx_i \quad (1)$$

式中: a 代表截距; b 代表斜率,反映了太阳辐射量的变化趋势。当 $b>0$ 时,表示随着时间的推移,太阳辐射量总体呈上升趋势;而当 $b<0$ 时,太阳辐射量总体呈下降趋势。

1.2.3 皮尔逊相关系数

通过计算两组变量之间的相关系数,可以评估太阳辐射与不同因素之间的相关性。具体来说,对于两组因素 X 和 Y ,使用相关系数 r 来量化它们之间的关系^[46]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

式中: X_i 和 Y_i 分别表示第 i 个样本的 X 和 Y 的观测值; \bar{X} 和 \bar{Y} 分别表示为 X 和 Y 的样本均值; N 为样本总数;相关系数 r 的值介于-1.0~1.0,当 r 值越接近1.0,表示正相关性越强;当 r 值越接近-1.0,表示负相关性越强;若 $r=0$,则意味着两个变量之间没有相关性。

2 结果与分析

2.1 1994—2023年吐哈盆地太阳辐射变化特征

2.1.1 年际变化

1994—2023年,吐鲁番站和哈密站太阳辐射年

均值分别为5 449.87 MJ·m⁻²和6 146.68 MJ·m⁻²,呈现出显著的东西向空间分布差异(图2)。就变化趋势而言,两站太阳辐射变化趋势相反,吐鲁番以2.91 MJ·m⁻²·a⁻¹速率下降,而哈密以4.45 MJ·m⁻²·a⁻¹速率上升。吐鲁番站和哈密站太阳年辐射最大值分别出现在2019年(6 140.84 MJ·m⁻²)和2004年(7 464.95 MJ·m⁻²),最小值分别出现在2018年(3 797.73 MJ·m⁻²)和1996年(5 297.11 MJ·m⁻²)。从季节尺度上看,吐鲁番站和哈密站辐射峰值均出现在夏季,分别为2 058.46 MJ·m⁻²和2 177.14 MJ·m⁻²;谷值均出现在冬季,分别为588.75 MJ·m⁻²和780.45 MJ·m⁻²,表现出了典型的干旱区特征。从整体上看,区域太阳辐射量存在显著差异,这与区域海拔差距、气象要素及颗粒物浓度有关。

2.1.2 逐月曝辐量及日变化

吐鲁番站和哈密站太阳辐射呈现明显的月变化特征(图3),太阳辐射量月均值分别为454.16 MJ·m⁻²和512.22 MJ·m⁻²。两地太阳辐射量年内分布都表现为1—5月逐渐增大,5—8月保持较高水平,8—12月逐渐减小。吐鲁番站和哈密站最大月均值分别出现在6月(718.87 MJ·m⁻²)和5月(786.32 MJ·m⁻²),最小月均值都出现在12月,分别为144.16 MJ·m⁻²和205.64 MJ·m⁻²。不同月份的太阳辐射通量曲线均呈单峰型,且各月日峰值均集中在12:00—13:00。其中,吐鲁番站和哈密站各月日均值分别为81.39~416.09 W·m⁻²和109.22~418.63 W·m⁻²,最大日峰值出现在6月和5月(800.68 W·m⁻²和849.52 W·m⁻²),最小日峰值均出现在12月(237.02 W·m⁻²和345.44 W·m⁻²)。

2.2 1994—2023年吐哈盆地气象要素变化特征

1994—2023年,吐鲁番站年均气温(16.14 °C)明显高于哈密站(10.97 °C),两站年均气温都呈上升趋势,上升速率分别为0.09 °C·a⁻¹和0.05 °C·a⁻¹,均高于西北地区的增温速率(0.03 °C·a⁻¹)^[47],并通过了 $\alpha=0.01$ 显著性检验(图4)。两站年均气温最大值分别出现在2017年(18.10 °C)和2022年(12.32 °C),最小值均出现在1996年(14.26 °C和9.62 °C)。吐鲁番站与哈密站年均总云量相对稳定,两地总云量最大值都出现在2017年,而最小值都出现在2020年。以上数据表明,吐鲁番站和哈密站的气温变化趋势与全国变化趋势呈现一致性。

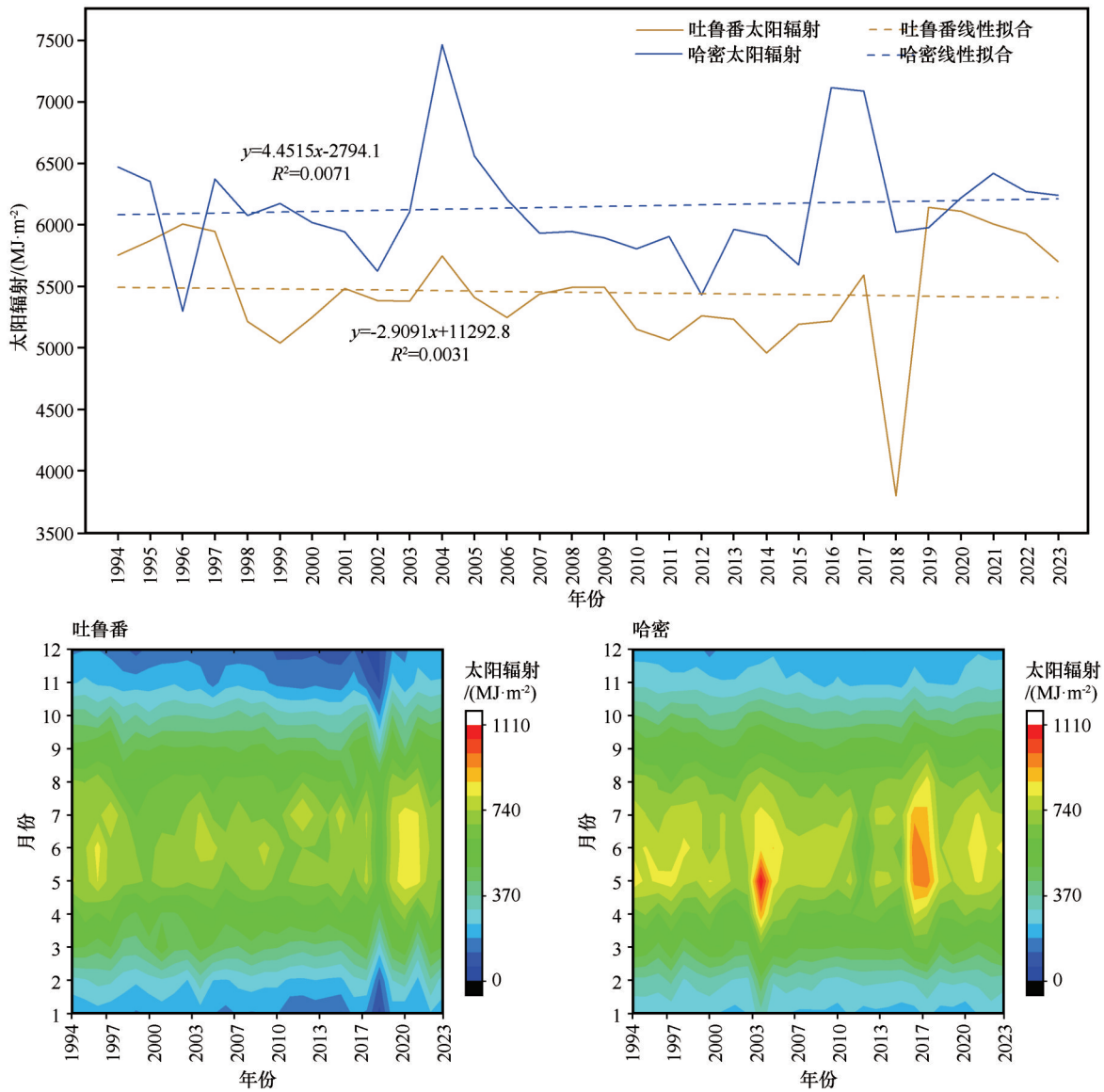


图2 1994—2023年吐鲁番站与哈密站太阳辐射年际和月际变化特征

Fig.2 Interannual and monthly variations of solar radiation at Turpan and Hami stations (1994-2023)

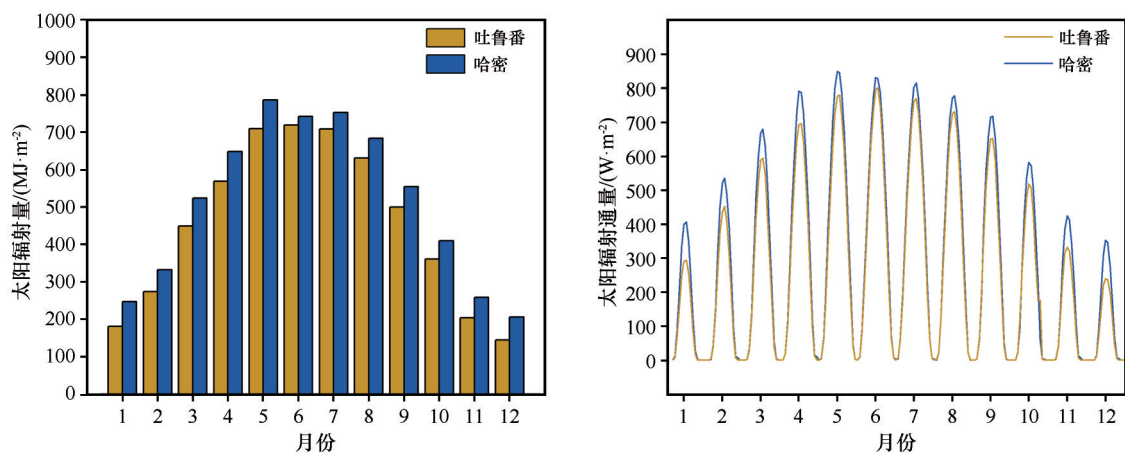


图3 1994—2023年吐鲁番站与哈密站多年太阳辐射月均值及日变化特征

Fig.3 Multi-year average monthly solar radiation and diurnal variation at Turpan and Hami stations (1994-2023)

哈密站降水较为充沛,总云量也较高;而吐鲁番站海拔较低,降水稀少,致使该地区气温显著高于哈密站。

1994—2023年,吐鲁番站和哈密站气温季节性变化显著(图5),两站月平均气温最大值均出现在7

月(33.49 °C和27.55 °C),最小值均出现在1月(-6.61 °C和-10.21 °C)。吐鲁番站和哈密站月平均总云量分别为41.05%和44.33%,月平均总云量最大值出现在6月和7月(51.71%和51.18%),最小值均出现在10月(27.74%和31.40%)。

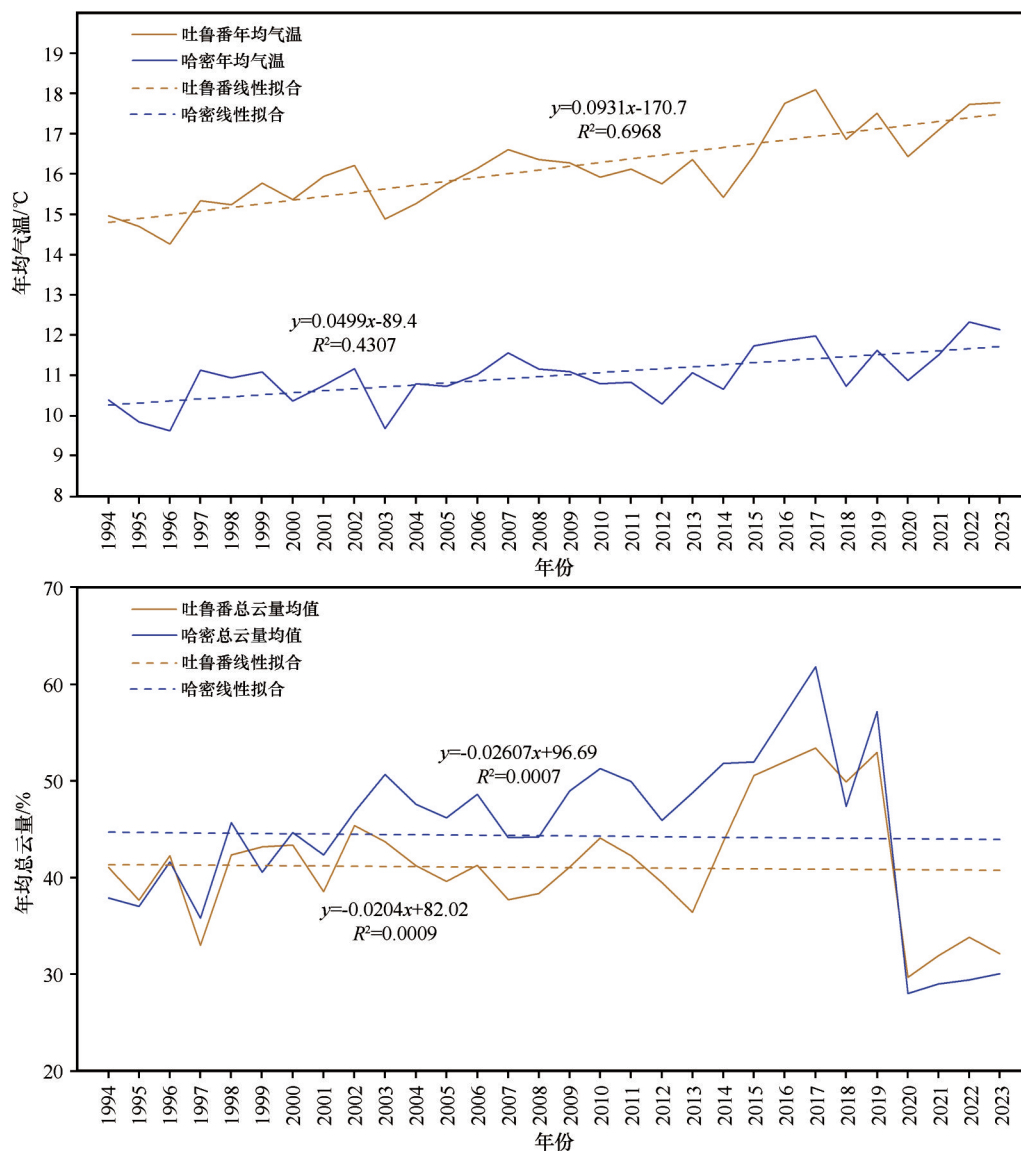


图4 1994—2023年吐鲁番站与哈密站气象要素年际变化特征

Fig.4 Interannual variation characteristics of meteorological elements at Turpan and Hami stations (1994–2023)

2.3 2000—2023年吐哈盆地PM₁₀浓度变化特征

2000—2023年,吐鲁番站和哈密站PM₁₀年均浓度分别为177.0 μg·m⁻³和148.7 μg·m⁻³,均超过国家二级标准(70 μg·m⁻³),并且都表现为下降趋势,下降速率分别为0.11 μg·m⁻³·a⁻¹和0.57 μg·m⁻³·a⁻¹(图6)。两地PM₁₀年均浓度最大值分别出现在2016年(207.0 μg·m⁻³)和2001年(170.1 μg·m⁻³),最小值分

别出现在2020年(151.9 μg·m⁻³)和2022年(86.2 μg·m⁻³)。就不同月份PM₁₀浓度变化看来,PM₁₀月平均浓度高值都出现在1—4月,5—8月逐渐下降,9—10月保持相对稳定,11月后逐步回升。吐鲁番站和哈密站PM₁₀月平均浓度最大值都出现在4月(269.9 μg·m⁻³和223.9 μg·m⁻³),最小值分别出现在7月(131.2 μg·m⁻³)和8月(114.3 μg·m⁻³)。从时空变化特征来看,吐鲁番站PM₁₀年平均浓度在2000—

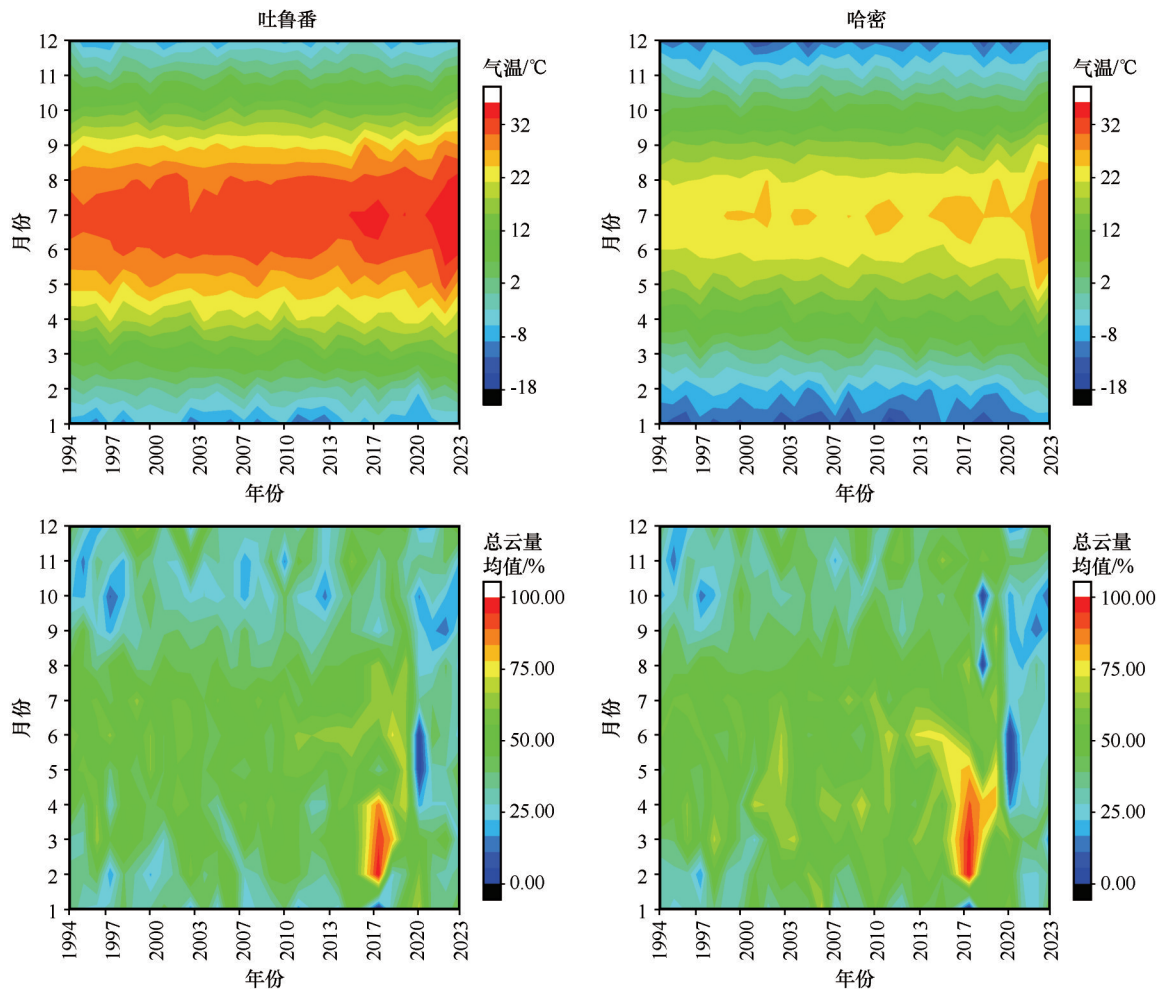


图5 1994—2023年吐鲁番站与哈密站气象要素月际变化特征

Fig.5 Monthly variation characteristics of meteorological elements at Turpan and Hami stations (1994–2023)

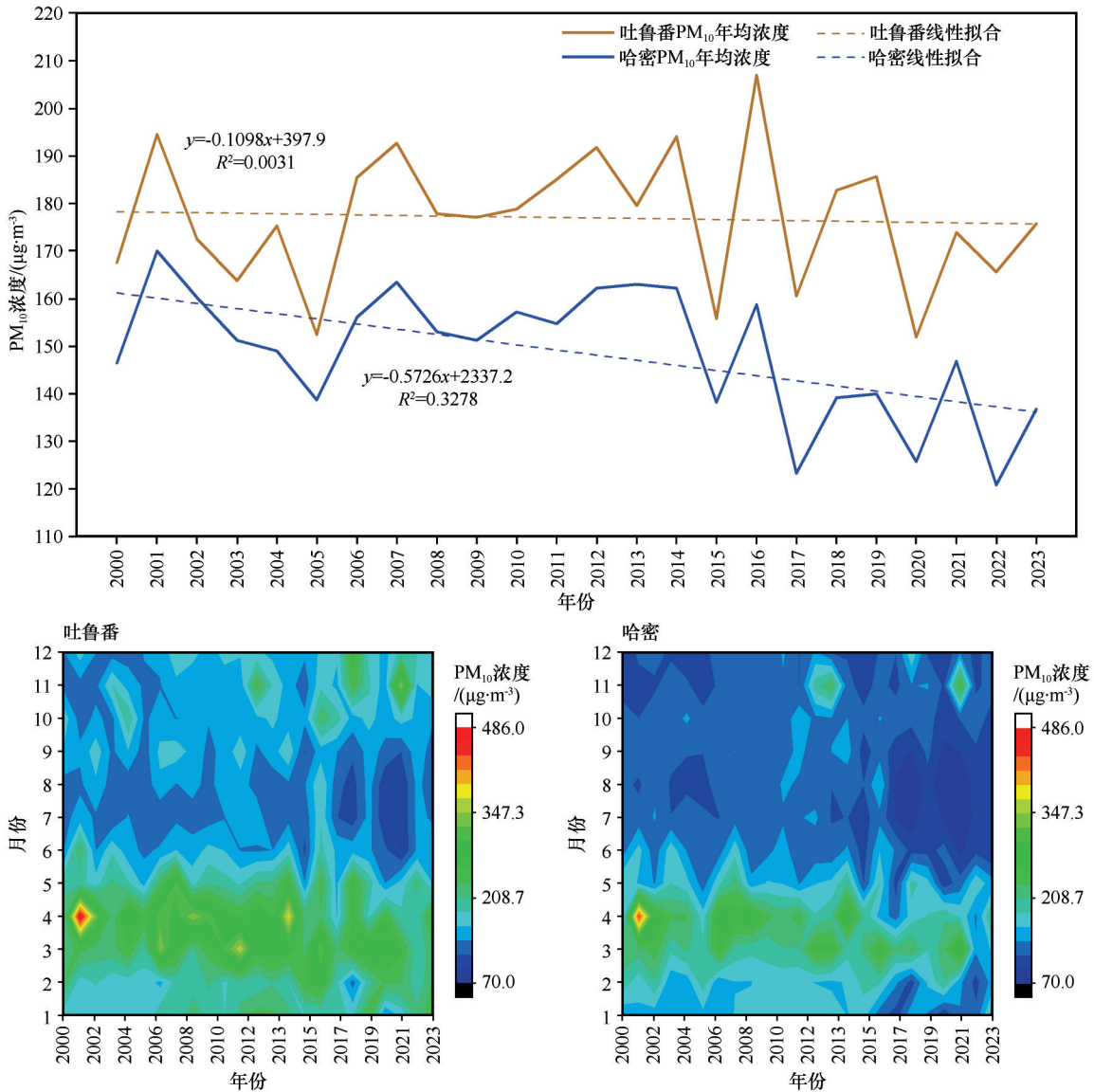
2016年呈波动上升趋势,之后 PM_{10} 浓度逐渐下降,主要归因于中亚气溶胶跨境输送的减少以及区域生态屏障工程的实施^[48],而哈密站由于地处沙尘传输通道边缘区,受跨区域沙尘传输影响较小,故 PM_{10} 浓度呈持续下降趋势。从年内空间分布看,吐鲁番地区 PM_{10} 年均浓度显著高于哈密地区,且两地 PM_{10} 浓度在春季较高,是由于春季为沙尘天气高发期,吐哈盆地 PM_{10} 浓度显著升高。

3 讨论

吐鲁番站与哈密站的太阳辐射年均值存在显著空间分异特征($5\ 446.77\ MJ\cdot m^{-2}$ 和 $6\ 148.36\ MJ\cdot m^{-2}$),年际波动主要受区域环境因素影响。具体而言,吐鲁番站2018年太阳辐射量最低($3\ 797.73\ MJ\cdot m^{-2}$)与第四季度 PM_{10} 浓度较历年均值升高36.39%密切相关,气溶胶的散射与吸收效应显著削弱地表太阳辐射通量;同时,该年2—4月总云量较大,云层覆

盖增多进一步加剧辐射衰减。哈密站2004年太阳辐射量最高($7\ 464.95\ MJ\cdot m^{-2}$)则源于4月气温异常升高(较历年均值升高16.55%)与8月、12月较低 PM_{10} 浓度共同作用,故晴朗干燥天气较多,更有利于太阳辐射穿透。

在气温方面,吐鲁番站因其低海拔、封闭盆地地形加剧地表热量累积,年均气温达 $16.14\ ^\circ C$,较哈密站($10.97\ ^\circ C$)高47.13%,这种高温主要受地形和全球变暖背景驱动,尽管两地气温显著上升,但太阳辐射变化趋势相反,表明气温并非两地辐射变化的直接驱动力。总云量方面,吐鲁番站和哈密站年均总云量相对稳定,与太阳辐射的趋势分异无直接关联。 PM_{10} 浓度方面,吐鲁番站毗邻塔克拉玛干沙漠和库木塔格沙漠,吐鲁番盆地(最低点艾丁湖 $-154\ m$)与周边沙漠形成的洼地+沙漠的组合,加剧了干热山谷风的形成,促进沙尘在盆地的堆积,从而导致气溶胶辐射强迫效应高于同等浓度平原区。

图6 2000—2023年吐鲁番站与哈密站PM₁₀浓度年际和月际变化特征Fig.6 Interannual and monthly variations of PM₁₀ concentrations at Turpan and Hami stations (2000–2023)

此外,吐鲁番地区年均降水量仅13.98 mm,不利于颗粒物湿沉降,故PM₁₀年均浓度达177.0 µg·m⁻³,而哈密站地形开阔受跨境气溶胶传输影响较小,且降水相对丰富,因此其PM₁₀年均浓度(148.7 µg·m⁻³)相对较低且下降趋势更明显。吐鲁番站相对较高的PM₁₀浓度对太阳辐射构成了持续、显著的削弱,导致其太阳辐射呈下降趋势,而哈密站PM₁₀浓度下降速率较快,有效改善了大气透明度,是其太阳辐射上升的重要因素。综合两地PM₁₀浓度水平及变化趋势的显著差异,再结合PM₁₀颗粒物对太阳短波辐射的直接削弱作用(散射和吸收),得出PM₁₀浓度是导致两地太阳辐射变化趋势相反的核心驱动因素。

与国内其他地区相比,吐鲁番站和哈密站太阳辐射季节变化表现为夏季>春季>秋季>冬季,与巴丹吉林沙漠拐子湖、塔克拉玛干沙漠、克拉美丽等地^[49-54]基本一致。就日变化幅度而言(表1),吐鲁番站和哈密站太阳辐射最大日峰值比克拉美丽、巴丹吉林沙漠拐子湖低,哈密站略高于塔克拉玛干沙漠塔中;吐鲁番站最小日峰值小于哈密站、克拉美丽、巴丹吉林沙漠拐子湖以及塔克拉玛干沙漠塔中。

与国外地区相比,吐鲁番与哈密站太阳辐射强度显著低于撒哈拉沙漠腹地的阿德拉尔市(夏季约1 000 W·m⁻²)和地中海沿岸的雅典(7月900~1 000 W·m⁻²)^[55-56]。这种区域辐射差异主要由纬度差导致,阿德拉尔市(27°53'N)与雅典(37°58'N)较吐鲁

表1 不同地区太阳辐射日峰值(单位: $W \cdot m^{-2}$)
Table 1 Peak values of diurnal solar radiation variations in different regions(unit: $W \cdot m^{-2}$)

月份	吐鲁番	哈密	克拉美丽	巴丹吉林沙漠拐子湖	塔克拉玛干沙漠塔中
5	—	849.52	905.7	858.8	—
6	800.68	—	—	—	—
7	—	—	—	—	822.4
12	237.0	345.4	316.6	386.5	449.2

番站($42^{\circ}93'N$)和哈密站($43^{\circ}25'N$)更靠近低纬度区域,较大的太阳高度角使地表接收的太阳辐射通量偏高,并且雅典通过欧盟气溶胶减排政策显著改善了大气透明度,从而在相近纬度下获得更高辐射通量。韩国的研究进一步量化了 PM_{10} 的辐射衰减效应,当 PM_{10} 浓度大于 $150 \mu g \cdot m^{-3}$ 时,会导致太阳辐射衰减 $10\% \sim 25\%$ ^[57],这与东亚地区气溶胶辐射强迫模型的模拟结果高度吻合。

综上所述,干旱半干旱区太阳辐射季节变化主要受太阳高度角年变化控制,地形海拔差异会导致气候变化进而使太阳辐射日峰值出现空间分异,而 PM_{10} 浓度作为关键环境变量,对太阳辐射起到明显削弱作用。

4 结论

1994—2023年,吐鲁番站和哈密站太阳辐射年均值差异显著,分别为 $5\,449.87 MJ \cdot m^{-2}$ 和 $6\,146.68 MJ \cdot m^{-2}$,二者分别表现为下降($2.91 MJ \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)和上升($4.45 MJ \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)趋势。太阳辐射量最大月均值出现在6月和5月($718.87 MJ \cdot m^{-2}$ 和 $786.32 MJ \cdot m^{-2}$),最小值均出现在12月($144.16 MJ \cdot m^{-2}$ 和 $205.64 MJ \cdot m^{-2}$)。不同月份太阳辐射日变化曲线均呈单峰型,各月日峰值均集中出现在12:00—13:00,最大日峰值出现在6月和5月($800.68 W \cdot m^{-2}$ 和 $849.52 W \cdot m^{-2}$),最小日峰值均出现在12月($237.02 W \cdot m^{-2}$ 和 $345.44 W \cdot m^{-2}$)。

1994—2023年,吐鲁番站和哈密站年均气温分别为 $16.14^{\circ}C$ 和 $10.97^{\circ}C$,均呈上升趋势($0.09^{\circ}C \cdot a^{-1}$ 和 $0.05^{\circ}C \cdot a^{-1}$);年均总云量相对稳定; PM_{10} 年均浓度分别为 $177.0 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $148.7 \mu g \cdot m^{-3}$,均呈下降趋势($0.11 \mu g \cdot m^{-3} \cdot a^{-1}$ 和 $0.57 \mu g \cdot m^{-3} \cdot a^{-1}$)。两地气温及 PM_{10} 浓度变化与全国变化趋势相同。

吐鲁番站和哈密站太阳辐射季节变化表现为

夏季>春季>秋季>冬季,与巴丹吉林沙漠拐子湖、塔克拉玛干沙漠、克拉美丽等地基本一致,表明干旱半干旱区太阳辐射季节性变化主要受太阳高度角年变化控制,而地形海拔差异将导致太阳辐射日峰值出现空间分异。

PM_{10} 颗粒物通过散射和吸收太阳辐射,直接显著削弱到达地表的太阳辐射强度。吐鲁番站受地理位置和气候条件影响, PM_{10} 浓度持续偏高且下降缓慢,是其太阳辐射呈下降趋势的主要因素,哈密站 PM_{10} 浓度较低且下降速率较快,有利于其太阳辐射呈现上升趋势。两地 PM_{10} 浓度水平及变化速率的显著差异是其太阳辐射变化趋势相反的核心驱动因素。

参考文献:

- [1] 王凌钰. 太阳辐射时空动态分布及未来太阳辐射变化趋势研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
- [2] 吴霞, 姜志伟, 蒙荣, 等. 河套平原太阳辐射变化特征及其与气象要素的相互影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 41-53.
- [3] 范灵悦, 马晓燕, 赵剑琦. 近几十年青藏高原与华北地区地表太阳辐射变化特征及其影响因素的对比分析[J]. 气象科学, 2024(2): 254-266.
- [4] 吴建国, 王思雨, 巩倩, 等. 太阳能利用工程对生态系统、生物多样性及环境的影响与应对[J]. 环境科学研究, 2024, 37(5): 1055-1070.
- [5] 王科, 黄晶. 国内外太阳能资源评估方法研究现状和展望[J]. 气候变化研究进展, 2023, 19(2): 160-172.
- [6] 曹华, 杨丽莉. 太阳能与光伏发电产业的研究[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(增刊2): 243-246.
- [7] Prieto J I, García D. Global solar radiation models: a critical review from the point of view of homogeneity and case study[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 155: 111856.
- [8] Zhang G, Band S S, Jun C, et al. Solar radiation estimation in different climates with meteorological variables using Bayesian model averaging and new soft computing models[J]. Energy Reports, 2021, 7: 8973-8996.
- [9] Dogan T R, Beşli N, Aktacı M A, et al. Seasonal effects of atmospheric particulate matter on performance of different types of photovoltaic modules in Sanliurfa, Turkey[J]. Atmospheric Pollution Research, 2020, 11(12): 2173-2181.
- [10] 雅森江·库尔班, 王豫, 买买提艾力·买买提依明, 等. 中国帕米尔高原太阳辐射演变规律[J]. 太阳能学报, 2023, 44(10): 237-244.
- [11] 王国胜, 何清, 邢红艳, 等. 东帕米尔高原地表辐射收支及地表反照率特征[J]. 高原气象, 2023, 42(3): 619-631.
- [12] 金莉莉, 何清, 李振杰, 等. 塔克拉玛干沙漠不同下垫面太阳总辐射比较[J]. 中国沙漠, 2014, 34(2): 498-506.

- [13] 顾玮,古丽·加帕尔,尹瀚民,等.新疆南疆地区太阳能资源时空分布特征及区划研究[J].干旱区地理,2021,44(6):1665-1675.
- [14] 武丹.甘肃河西地区太阳能资源空间分布特征[J].农技服务,2019,36(9):91-93.
- [15] 王博,李玲萍,夏权,等.河西走廊太阳辐射时空分布特征及太阳能资源评估研究[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(6):147-153.
- [16] 曾雁,曾万寿.酒泉市1958-2016年太阳总辐射变化特征研究[J].中国农学通报,2019,35(11):115-120.
- [17] 王世婷,章妮,陈克龙,等.温性荒漠草原生长季光伏电站地表能量交换特征[J].中国沙漠,2024,44(6):249-257.
- [18] 拉瓜登顿,措加旺姆,王倩,等.西藏太阳光谱全年变化特征[J].光谱学与光谱分析,2024,44(2):460-466.
- [19] 吴霞.黄河流域内蒙古段太阳辐射估算及时空变化特征分析[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.
- [20] 郝玉珠,李兴华,胡亚男,等.内蒙古57年太阳能资源变化规律及影响因子[J].太阳能学报,2021,42(9):145-151.
- [21] 陈中钰,吕结.近44年四川太阳辐射时空变化特征[J].高原山地气象研究,2018,38(3):56-60.
- [22] 熊燕琳,周筠珺.四川地区地面太阳总辐射时空分布及气象影响因素研究[J].太阳能学报,2020,41(12):162-171.
- [23] 孙昭萱.干旱、半干旱区陆面过程气候特征及其对比分析[D].兰州:兰州大学,2010.
- [24] 魏文寿,何清,刘明哲,等.准噶尔盆地的气候变化与荒漠环境研究[J].中国沙漠,2003,23(2):3-7.
- [25] 赵强.准噶尔盆地沙漠增温效应下绿洲热量资源分异规律的研究[D].石河子:石河子大学,2006.
- [26] 邓小进,井长青,郭文章,等.准噶尔盆地地表反照率时空变化特征及其影响因素分析[J].干旱区研究,2021,38(2):314-326.
- [27] 陈霞,魏文寿,刘明哲.塔里木盆地沙尘气溶胶对短波辐射的影响:以塔中为例[J].中国沙漠,2008,28(5):920-926.
- [28] 杨帆,王顺胜,何清,等.塔克拉玛干沙漠腹地地表辐射与能量平衡[J].中国沙漠,2016,36(5):1408-1418.
- [29] 苗馨月,王克林,卢亚男,等.塔里木盆地太阳能资源分布及可利用量分析[J].石油石化节能,2023,13(5):9-14.
- [30] 冯鑫媛,龙清怡,王海霞.西北地区太阳总辐射的气候学计算及分布特征[J].安徽农业科学,2011,39(2):981-983.
- [31] 祁栋林,李晓东,郭彩萍,等.1980~2010年青藏高原柴达木盆地太阳辐射变化特征研究[J].安徽农业科学,2013,41(10):4484-4488.
- [32] 郭晓宇,肖建设,郑玲,等.基于遥感和GIS的柴达木盆地太阳能估算方法研究[J].中国农学通报,2014,30(29):287-293.
- [33] 李林,申红艳,李红梅,等.柴达木盆地气候变化的区域显著性及其成因研究[J].自然资源学报,2015,30(4):641-650.
- [34] 申彦波,常蕊,杜江,等.吐鲁番可利用太阳能资源分析[J].高原气象,2015,34(2):470-477.
- [35] 刘羽,张显峰,Jonathan Li,等.基于多传感器数据的新疆太阳辐射估算及其时空分布特征分析[J].干旱区资源与环境,2015,29(3):161-165.
- [36] 魏哲花,冯广麟.哈密市太阳能资源评估[J].气候变化研究快报,2019,8(2):168-174.
- [37] 刘佳,何清,刘蕊,等.新疆太阳辐射特征及其太阳能资源状况[J].干旱气象,2008,26(4):61-66.
- [38] 傅楷翔,贾国栋,余新晓,等.基于改进遥感生态指数的吐鲁番-哈密生态环境质量评价及驱动机制分析[J].生态学报,2024,44(9):3911-3923.
- [39] 阿米娜·帕塔尔.吐鲁番市气候特点以及对农业生态的影响[J].新农业,2019(21):24-25.
- [40] 高国文.基于时间序列的哈密市水资源面积分布和气候变化特征[J].陕西水利,2020(12):42-44.
- [41] 于志翔.基于MODIS数据的新疆大气气溶胶光学厚度时空变化分析[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(2):128-136.
- [42] 杨婕.中国胡焕庸线以西地区沙尘气溶胶时空变化特征及其健康效应研究[D].南京:南京信息工程大学,2022.
- [43] 张耀文,吕婷.吐鲁番市1952-2013年气温变化特征研究[J].安徽农学通报,2018,24(23):120-121.
- [44] 陈跃萍,武胜利,赵昕,等.近60a哈密市极端气温时空变化特征[J].干旱区地理,2023,46(6):868-879.
- [45] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007.
- [46] Asuero A G, Sayago A, González A G. The correlation coefficient: an overview[J]. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 2006, 36(1):41-59.
- [47] 李明,孙洪泉,苏志诚.中国西北气候干湿变化研究进展[J].地理研究,2021,40(4):1180-1194.
- [48] Li J, He Q, Wang Y, et al. Three-dimensional structure and transport properties of dust aerosols in Central Asia: new insights from CALIOP observations, 2007-2022 [J]. Remote Sensing, 2024, 16(12):2049.
- [49] 杨凤娟,亢燕铭,刘琼,等.新疆地面太阳辐射及其CERES/SSF卫星资料适用性研究[J].干旱区研究,2019,36(6):1401-1410.
- [50] 张乐乐,高黎明,赵林,等.基于ITPCAS数据的青藏高原太阳总辐射时空变化特征[J].太阳能学报,2019,40(9):2521-2529.
- [51] 杨阳,杨帆,买买提艾力·买买提依明,等.塔克拉玛干沙漠塔中与巴丹吉林沙漠拐子湖地表辐射特征对比[J].中国沙漠,2018,38(5):1068-1077.
- [52] 高佳程,王豫,阿吉古丽·沙依提,等.古尔班通古特沙漠地表辐射收支特征[J].中国沙漠,2021,41(1):47-58.
- [53] 周洒洒.塔克拉玛干沙漠北缘太阳辐射变化及沙尘影响研究[D].乌鲁木齐:新疆师范大学,2021.
- [54] 赵文娜.西藏羊八井地区地表太阳总辐射和长波辐射的时间变化特征分析[D].拉萨:西藏大学,2022.
- [55] Marif Y, Chiba Y, Belhadj M M, et al. A clear sky irradiation assessment using a modified Algerian solar atlas model in Adrar city[J]. Energy Reports, 2018, 4:84-90.
- [56] Kambezidis H D. The solar radiation climate of Athens: variations and tendencies in the period 1992-2017, the brightening

era[J].Solar Energy, 2018, 173:328–347.
[57] Son J, Jeong S, Park H, et al. The effect of particulate matter on

solar photovoltaic power generation over the Republic of Korea
[J].Environmental Research Letters, 2020, 15(8):084004.

Characteristics of solar radiation and influencing factors in the Turpan-Hami Basin

Cheng Dingyu^{1,2}, Liu Xinchun², Zhong Yuting², Mamtali·Mamtimin², Gao Jiacheng²

(1. College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. China Meteorological Administration Field Scientific Experiment Base of Akdala Atmospheric Background / Xinjiang Key Laboratory of Desert Meteorology and Sandstorm, Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

Abstract: Based on solar radiation and meteorological observation data (1994–2023) and PM₁₀ concentration data (2000–2023) from the Turpan-Hami Basin, this study systematically investigated the characteristics of multi-time-scale solar radiation variations and their influencing factors using linear trend estimation and Pearson correlation analysis. The results indicate that: (1) Over the past 30 years, the mean annual solar radiation at Turpan and Hami stations was 5 449.87 MJ·m⁻² and 6 146.68 MJ·m⁻², respectively, exhibiting significant spatial heterogeneity. Turpan station showed a significant downward trend (2.91 MJ·m⁻²·a⁻¹), while Hami station exhibited a significant upward trend (4.45 MJ·m⁻²·a⁻¹). The occurrence timing and magnitudes of solar radiation extremes differed between the stations. Diurnally, solar radiation displayed a unimodal pattern with peak intensity concentrated around noon. (2) Both stations experienced significant warming trends (0.09 °C·a⁻¹ and 0.05 °C·a⁻¹, respectively), while annual mean total cloud cover remained relatively stable (both approximately 44.33%). PM₁₀ concentrations demonstrated significant declining trends (-0.11 μg·m⁻³·a⁻¹ and -0.57 μg·m⁻³·a⁻¹, respectively). (3) The seasonal pattern of solar radiation (summer > spring > autumn > winter) aligned with observations from other arid regions like the Taklimakan Desert. However, the spatiotemporal differentiation of daily peak radiation was jointly regulated by the annual cycle of solar elevation angle and topographic altitude gradients. (4) PM₁₀ particles attenuated surface solar radiation through scattering and absorption processes. The persistently high PM₁₀ concentration near Turpan station, influenced by its proximity to dust sources and specific geographic setting, was the primary factor driving its declining solar radiation trend. Conversely, the faster reduction in PM₁₀ concentration at Hami station significantly contributed to its observed increase in solar radiation.

Key words: Turpan-Hami Basin; solar radiation; meteorological elements; PM₁₀