

¹塔克拉玛干沙漠不同下垫面太阳总辐射比较研究

金莉莉¹, 何清^{1,2,3}, 李振杰⁴, 买买提艾力·买买提依明^{1,2,3}

1. 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏 南京 210044

2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002

3. 塔克拉玛干沙漠大气环境观测试验站, 新疆 塔中 841000

4. 云南省临沧市气象局, 云南 临沧 677099

摘要

本文运用统计学方法, 分析并比较了塔克拉玛干沙漠绿洲沙漠过渡带与沙漠腹地总辐射的气候学特征。研究表明: 沙漠腹地(塔中)总辐射年总量高于沙漠过渡带(肖塘)和胡杨林过渡带(哈德), 年总量分别为 $6515.0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $5666.4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $5774.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。春、夏、秋、冬四季变化幅度, 塔中高于肖塘和哈德, 肖塘与哈德相近; 三个观测点均为夏季最大、冬季最小、春季高于秋季。塔中月总量最大值出现时间(6月)早于肖塘和哈德(7月), 最小值均在12月; 塔中月总量最大值比肖塘和哈德分别高 $99.4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $81.9 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。平均日变化早晚小、正午12:00最大; 沙尘暴天气下总辐射被明显削弱, 日变化波动大。肖塘、哈德和塔中沙尘暴日的峰值分别减少40.3%、56.2%和53.0%; 日总量分别减少41.6%、57.8%和61.2%。沙尘暴日的后续天气仍受到沙尘的明显衰减, 只有当整个沙尘天气过程结束其日变化曲线才恢复平缓。沙尘天气日, 小时平均值 $>500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的总辐射明显被削弱, 主要向低值区集中, 分布在高值区的概率减少。总辐射随太阳高度角的变化相一致, 相同太阳高度角下晴天总辐射高于沙尘天。

关键词: 总辐射; 沙尘; 概率分布; 塔克拉玛干沙漠腹地; 不同下垫面

1 引言

太阳辐射是地球表面能量的主要来源, 是气候系统中各种物理过程和生命活动的基本动力^[1]。太阳辐射为植物冠层的碳吸收及它们的蒸腾作用提供能量, 在主要程度上它也决定农作物表面的热平衡和植物冠层、家畜表面、土壤和空气的温度, 它是控制作物、牧草、森林和家畜生长的主要环境因素^[2]。由于太阳总辐射数据的测量是比较稀少的, 因而有很多总辐射估算模型的研究, 例如国外的Supit和Kappel开发了一个估算日太阳总辐射的模型, 用来输入到欧洲作物生长监测系统里^[3]。对于太阳总辐射的估算, 主要是基于日照时数估算的,

如1924年由Ångström提供的 $\frac{H}{H_{cl}} = a + (1-a) \frac{S}{S_0}$ 公式进行计算, 他首次提出了总辐射与少云天总辐射的比值和日照时数与天文日变化(如昼长)呈线性关系^[4], 但这个公式是从月平均数据中得到的, 不能运用于日数据, 而且为了利用日照数据估算总辐射, Ångström的模型需

要有典型晴天的总辐射数据才行, 为此, 这一局限由Prescott开发的 $\frac{H}{H_0} = a + b \frac{S}{S_0}$ 模型克

服了, 这就是著名的Ångström-Prescott模型^[4], 且这一模型被广泛应用, 此外还有Garg-Garg的双线性模型(1982年, $\frac{G}{E_0} = \left(X + Y \left(\frac{S}{S_0} \right) + ZW_w \right)$, 考虑了日照时数和水汽)和Sivkov模型(1964

年, $G = 4.9(S)^{1.31} + 10.550(\sin \gamma_{noon})^{2.1}$, 考虑了日照时数和大气光学质量), 根据云量估

算的, 如Kasten模型(1983年)^[5], 此外还有根据空气温度、降水和相对湿度估算的^[6]。其

该稿已被《中国沙漠》录用, 待发表。

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306066); 国家自然科学基金项目(41175140, 41175017); 中国沙漠气象科学研究基金(SQJ2010007)联合资助。

中, 利用日照时数估算太阳总辐射方面的研究, 国外已经有很多, 如Almorox等^[6]利用西班牙16个气象站日照时数得到了估算模型, 他指出虽然三阶模型比其他模型好, 但由于线性模型具有更简单和广泛的应用, 所以线性模型更好; El-Metwally^[7]利用埃及6个站的月平均日最高、最低气温和云量资料得到一个估算日照时数的简单的非线性模型, 进而估算了太阳总辐射, 他指出此模型比Ångström-Prescott的线性模型和Garg-Garg双线方程的模拟效果好。近几年, 用卫星数据估算到达地面太阳总辐射的模式被推进, 如Ceballos和Perez等用不同的方法利用卫星数据得到了太阳总辐射^[8-9]。在国外研究的基础上, 我国的研究者也在总辐射的估算方面做了大量的工作, 如李明财等^[10]根据1961~2010年环渤海地区4个辐射站太阳总辐射资料和56个台站日照百分率资料, 研究了环渤海地区太阳总辐射的时空分布及变化特征, 得出太阳总辐射5月最高, 4~8月是太阳能资源最丰富时期等结论。杨羨敏等^[11]利用黄河流域及其周边164个站点日照百分率观测资料, 估算了1960~2000年黄河流域太阳辐射, 得出黄河流域年太阳总辐射主要表现为由东南向西北增加的趋势。此外, 李占清和翁笃鸣^[12]根据对丘陵山地地形参数(平均坡向、坡度和地形遮蔽角)的数值模拟结果, 应用试验观测资料, 较详细地讨论了山地总辐射的理论计算模式。国内外对太阳总辐射的研究已经很多, 且许多研究表明, 到达地球表面的太阳总辐射在过去50年已明显减少, 全球每年平均减少 $0.51 \pm 0.05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 相当于每10年减少2.7%, 这主要是气溶胶和其他污染物质的增加改变了大气的光学性质所致^[13]。影响到达地面太阳总辐射的因子很多, 主要有纬度、海拔高度、气溶胶等, 关于这方面的研究, Li ren等^[14]利用22个辐射站的资料估算了116个站点太阳总辐射值, 指出影响青藏高原太阳总辐射的因素主要为当地纬度和海拔高度。何清等^[15]指出云量、云状和沙尘对塔克拉玛干沙漠腹地的总辐射削弱明显。

目前利用观测资料分析总辐射特征的研究较少, 尤其对于塔克拉玛干沙漠腹地长时间序列辐射观测第一手资料更是稀少。关于塔克拉玛干沙漠腹地辐射方面的研究也有一些, 如李江风利用沙漠腹地的满西一井和塔中大气环境观测试验站等多年气象观测新资料, 以及各种实地观测试验揭示了沙漠地区的太阳辐射、辐射平衡和热量分布平衡规律^[16-17]。胡列群等^[18]、李帅等^[19]对塔克拉玛干沙漠地表辐射收支及云和沙尘对其的影响进行了研究, 得出云和沙尘对总辐射的强迫作用最大等结论。何清等^[20-23]对沙漠腹地的紫外辐射进行了分析, 得出沙尘对UV和UV-B的衰减很大的结论。观测资料分析表明, 沙漠腹地地面长波辐射、大气长波辐射值较大, 为我国有效辐射年总量最高的地区之一^[24]。李帅等^[25]研究表明沙漠腹地净辐射比同一季节中纬度裸地低, 极大值一般出现在12:00, 天空大多为云覆盖时, 白天净辐射值最高、夜间最低。虽李帅等^[15]已经分析过塔克拉玛干沙漠腹地的总辐射, 但本文与前人研究的不同之处在于, 对比分析了绿洲-沙漠过渡带与沙漠腹地总辐射变化特征, 除了分析年变化、季节变化、日变化特征, 还统计了沙尘天气下总辐射的概率分布, 分析了沙尘天气下太阳高度角与总辐射的关系。

2 研究区概况及数据采集

塔克拉玛干沙漠是我国最大的沙漠, 气候最干旱、植被最少、沙丘类型最复杂、沙丘流动性最大、流动性沙漠面积占沙漠总面积最大、流沙层最厚、沙粒粒径最细^[26], 是我国沙尘暴的主要起源地之一^[27-29]。本文采用了塔克拉玛干沙漠大气环境观测试验站、肖塘沙漠过渡带陆气相互作用观测站和哈德胡杨林过渡带生态气象监测站(以下简称塔中站、肖塘站和哈德站)2010年12月~2011年12月的总辐射观测资料, 对比分析了塔克拉玛干沙漠不同下垫面到达地表太阳总辐射的变化特征及影响因子。这三个观测点的辐射仪均由荷兰Kipp&Zonen公司生产, 其中塔中的仪器型号为CM21, 肖塘和哈德的仪器型号为CNR-1。塔中是VAISALA QML201型数据采集器, 采集频率为10s一次, 输出数据包括10s, 1min和1hour; 肖塘和哈德所用数据采集器为CR1000, 采集频率为1s, 输出数据分别为1s, 1min, 30min和1hour。这三个观测点采集器时钟统一使用塔中真太阳时, 与北京时间相差2小时25分24秒。塔中观测试验点(38° 58' N, 83° 39' E, 1099 m)位于塔里木盆地中央, 深入塔

克拉玛干沙漠腹地 200 km; 肖塘站地处塔克拉玛干沙漠北部边缘、与塔里木河相距约 40 km, 是典型的沙漠腹地-荒漠-绿洲过渡带, 观测试验点 ($40^{\circ} 48' N, 84^{\circ} 18' E, 933 m$) 位于距离沙漠公路肖塘 1 号井 1000 m 的沙漠中, 地处古河床的南岸, 北距胡杨林约 2 km, 是沙漠与荒漠的交汇处^[44]; 哈德观测试验点 ($40^{\circ} 46' N, 83^{\circ} 42' E, 945 m$) 位于沙漠北缘荒漠向绿洲的过渡区, 下垫面为平坦的风蚀裸露古河床, 属于塔里木河南冲积-淤积平原, 气象站往北 2 km 为胡杨林, 东距肖塘站 50 km (见图 1)。

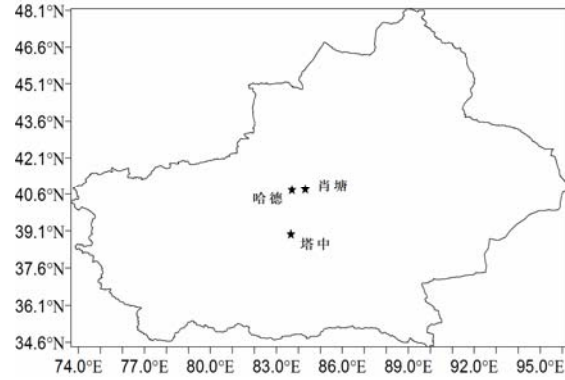
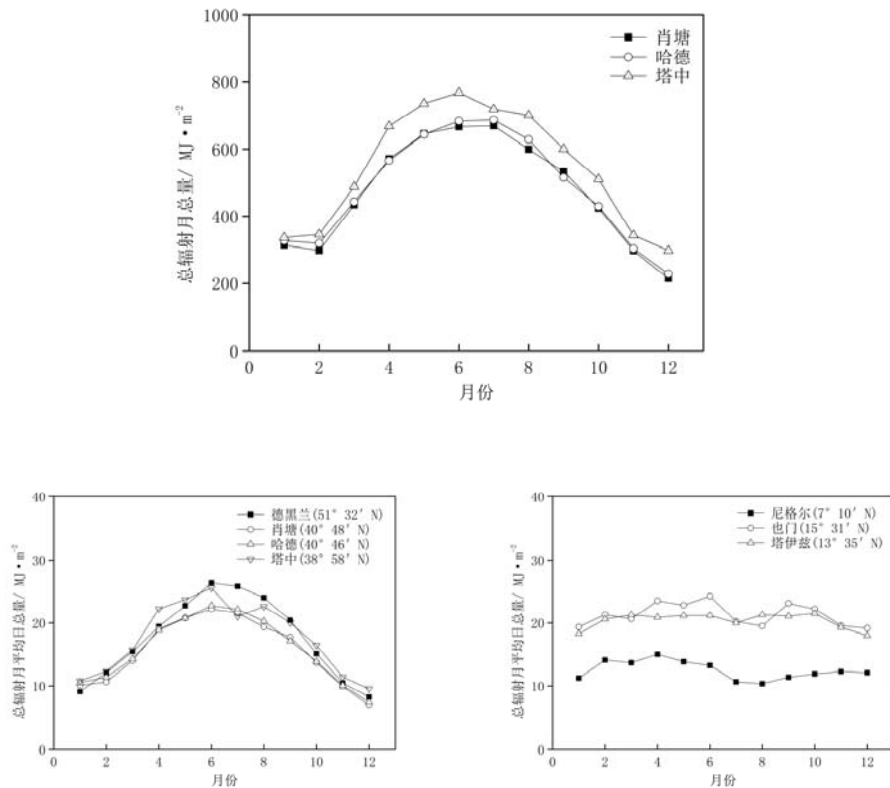


图 1 塔中、肖塘、哈德地理位置示意图

Fig.1 The location of Tazhong, Xiaotang and Hade site

3 总辐射基本变化特征

3.1 年内变化



注: 图 2 下德黑兰、尼日尔、也门和塔伊兹总辐射月平均日总量数据来自文献[31-33]。

图 2 总辐射的年内变化特征 (上: 月总量年变化; 下: 月平均日总量年变化)

Fig.2 The annual variation of global radiation (Above: annual variation of total monthly global

radiation; Below: monthly average daily global radiation)

塔中、肖塘和哈德总辐射年总量分别为 $6515.0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $5666.4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $5774.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。从图 2（上）可见，沙漠腹地和沙漠过渡带总辐射年变化位相基本相同，月总量最大值塔中在 6 月，为 $768.7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ，肖塘和哈德最大值在 7 月，分别为 $669.3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $686.8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ；月总量最小值均在 12 月，塔中为 $297.6 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、肖塘为 $214.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、哈德为 $228.1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。塔中总辐射月总量与王慧等^[34]研究的黑河地区沙漠下垫面一致，也是 6 月大（ $762.7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ）、12 月小（ $289.8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ）；肖塘、哈德与黑河地区鼎新绿洲的情况一样，7 月大（ $737.3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ）、12 月小（ $279.8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ），但量值都没有鼎新的大，王慧等的这一结论与江灏等^[35]研究的黑河绿洲区一致。而广东的太阳总辐射，徐闻和雷州为双峰型，7 月和 5 月为两个高值，6 月为一相对低值，全省其他地区都表现为单峰型，7 月最大，2 月最小^[36]。塔中、肖塘和哈德总辐射夏季值分别约为冬季值的 2.24 倍、2.34 倍和 2.29 倍，其中塔中、肖塘和哈德 7 月总辐射的月总量均低于张掖绿洲地区的 $737.28 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[37]，高于陇中黄土高原的 $616.06 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[38]。此外，塔中 7 月总辐射与 6 月份相比偏低，这除了与太阳高度角有关外，还与风沙引起的浮尘、扬沙、沙尘暴天气有关，6、7 月份的平均能见度分别为 15.7 km 和 13.1 km。从图 2（下）可以看出，低纬度总辐射年变化、季节变化不明显，而中纬度具有明显的年变化和季节变化特征。塔克拉玛干沙漠总辐射月平均日总量均为 6 月最大（ $22.2 \sim 25.6 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ）、12 月最小（ $6.9 \sim 9.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ），年平均为 $15.5 \sim 17.6 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ，即在 $8.2 \pm 1.3 \sim 23.9 \pm 1.7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间，其值在埃及、叙利亚、沙特阿拉伯、土耳其也是 6 月最大、12 月最小，其中埃及约在 $12 \pm 3 \sim 25 \pm 3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间，土耳其在 $6 \sim 27 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间^[33, 39-41]。

3.2 季节变化

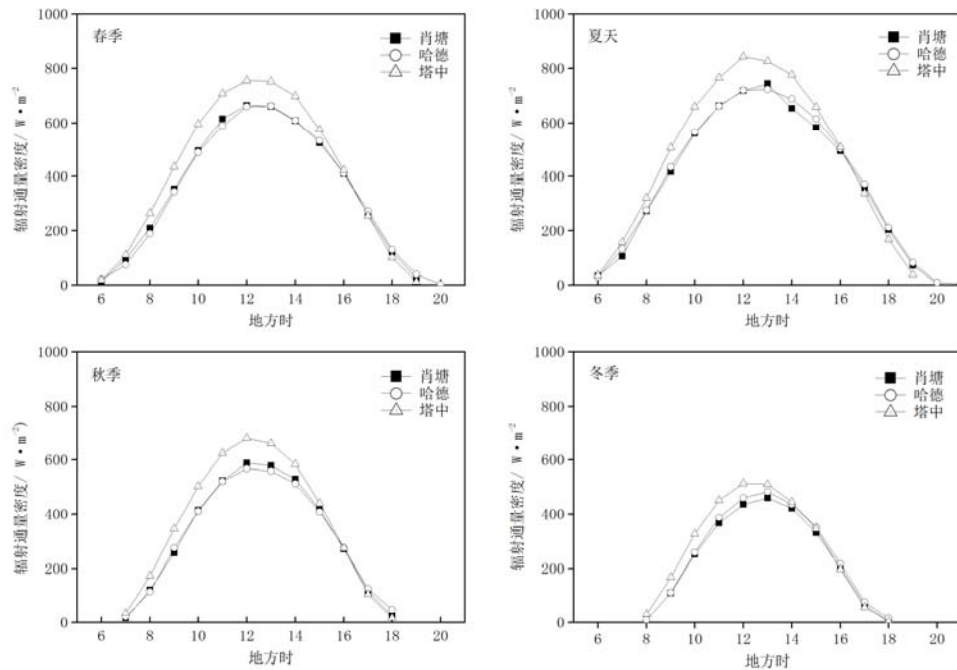


图 3 总辐射季节平均日变化

Fig.3 Seasonal mean diurnal variations of global radiation

图 3 为 2010 年 12 月~2011 年 11 月四季的日变化特征，其中冬季为 12~2 月，春季为 3~5 月，夏季为 6~8 月，秋季为 9~11 月。从图 3 可以看出，塔中、肖塘和哈德总辐射季

节变化特征明显。总体而言,三个观测点均是夏季最大、冬季最小、春季大于秋季,这与太阳高度角在一年中的变化相适应。塔中春、夏、秋、冬四季总辐射日峰值高于肖塘和哈德,且日峰值均出现在 12:00 或 13:00。春、夏、秋、冬季塔中日峰值分别为 $756.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $843.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $678.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $513.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;肖塘分别为 $665.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $744.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $587.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $459.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;哈德分别为 $663.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $725.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $567.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $482.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。黑河地区鼎新戈壁分别为 $759 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $828 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $664 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $521 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ [34],青藏高原改则和狮泉河站在春季和夏季,平均日变化极值均超过了 $900 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,冬季两地极值均不到 $650 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,秋季两地极值均略大于冬季,超过 $700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ [42]。可见:青藏高原改则和狮泉河站总辐射四季日峰值高于塔中和黑河地区鼎新戈壁,这与改则和狮泉河站海拔较高(分别为 4414.9 m 和 4278 m)、纬度较塔中和鼎新戈壁低有关;塔中总辐射日峰值与黑河地区鼎新戈壁相差不多,这与两地海拔高度相差较小,自然环境差别较小有关。

3.3 日变化

2011 年春季,我国共出现 7 次沙尘天气过程,其中沙尘暴 4 次,强沙尘暴 2 次。3 月 12—14 日、4 月 24—26 日、4 月 28—30 日、5 月 10—12 日为沙尘暴天气过程,其中 4 月 28—30 日、5 月 10—12 日为强沙尘暴过程 [43]。为了直观地看出沙尘天气对总辐射日变化的影响,我们挑选了 2011 年春季一次非常典型的沙尘暴天气过程,此次沙尘暴过程发生在我国北方,具有风速高、强度大、范围广的特点,是一次锋面后部大风型沙尘暴过程 [44]。三个观测点的天气情况分别为:肖塘和哈德站 4 月 27~28 日晴天,4 月 29 日 5:35~13:49 沙尘暴,剩下的时间为沙尘天气;塔中站 4 月 27 日~28 日 20:13 为晴天,28 日 20:13~23:38 为扬沙,28 日 23:38~29 日 15:42 为沙尘暴,29 日 15:42~17:54 为扬沙,17:54~20:00 为沙尘暴,20:00~21:17 为扬沙,21:17~5 月 1 日 11:47 为浮尘,11:47~15:55 为扬沙,5 月 1 日 15:55~19:20 为浮尘,19:20~20:42 为扬沙,20:42~21:24 为沙尘暴,21:24~22:17 为扬沙,22:17~5 月 2 日 17:35 为浮尘。

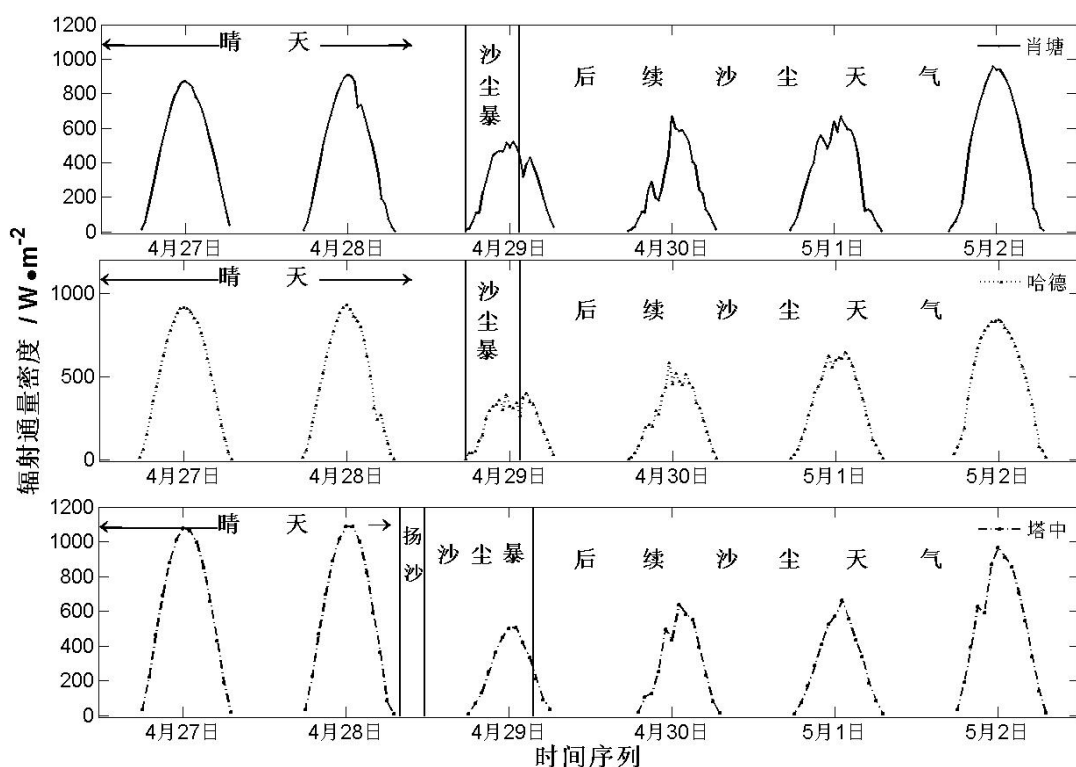
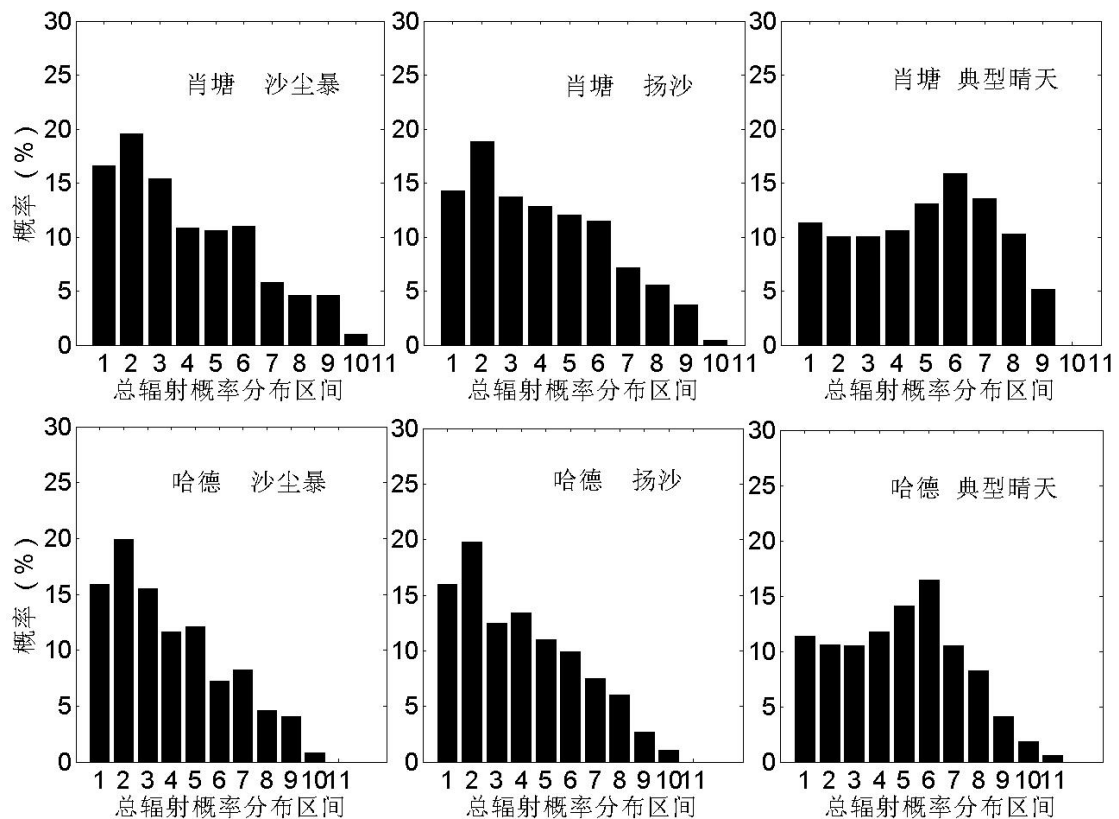


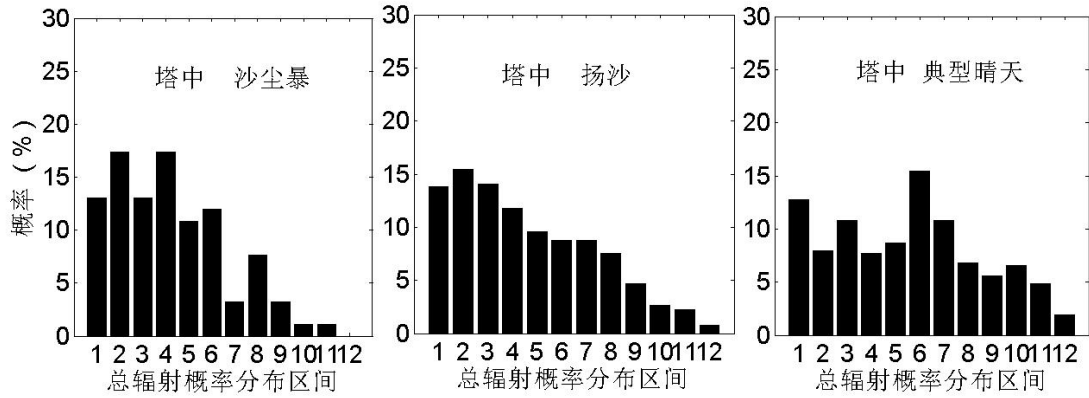
图4 沙尘暴发生前后总辐射日变化

Fig.4 Daily diurnal variations of global radiation in and beyond sand and dust storm day

由图4可见,4月29日出现沙尘暴,27~28日为沙尘暴发生前,30日~5月1日为沙尘暴后续期,2日为沙尘暴结束期。晴天总辐射主要受太阳高度角的影响,自日出开始总辐射随太阳高度角的增大而迅速升高,在当地时间12:00达到最大,之后又迅速下降,呈对称的倒“U”型分布(如27日),肖塘、哈德和塔中27日的日峰值分别为 $869.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $914.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $1076 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;日总量分别为 $24.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $26.3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $30.9 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。沙尘暴出现前(天空有高云出现,但低云量为0),肖塘和哈德在正午之后总辐射日变化曲线出现微弱的波动,即午后总辐射值被削弱。刘新春等^[45]研究指出,沙尘天气过程中不同粒径沙尘气溶胶质量浓度变化具有晴天<浮尘天气<扬沙天气<沙尘暴天气的规律。由于塔中地处沙漠腹地,沙尘天气过程对塔中的影响要到29日才出现,这从图中的日变化曲线可以看出,29日14:00之前肖塘和哈德发生了沙尘暴,塔中则全天都发生,可见这天的总辐射受到沙尘削弱最明显,肖塘、哈德和塔中的日峰值分别只有 $519.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $400.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $506.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,分别衰减了40.3%、56.2%和53.0%;日总量分别为 $14.3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $11.1 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $12.0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$;分别衰减了41.6%、57.8%和61.2%。30日和5月1日为沙尘暴过程的后续期,总辐射受到沙尘的削弱仍然很明显,虽然为沙尘暴的后续期,但空中仍漂浮着大量的沙尘颗粒物,故对总辐射的衰减仍然较大。随着此次沙尘暴过程的减弱,到了2日,肖塘和哈德日变化曲线趋于平滑,由于塔中结束的时间比肖塘和哈德晚,故在2日午后其日变化曲线才趋于平缓。

4 概率分布





注：图中横坐标 1 代表 $1 \sim 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，2 代表 $100 \sim 200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，以此类推，12 代表 $1100 \sim 1200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

图 5 典型晴天、扬沙和沙尘暴天气下总辐射概率统计图

Fig.5 The probability of global radiation in clear day, blowing sand day, sand and dust storm day

为从概率统计意义上说明典型晴天和沙尘天的总辐射分布情况，本文利用肖塘（由于哈德没有地面观测记录，故由肖塘站的记录代表）和塔中地面气象观测及辐射资料，对肖塘、哈德和塔中典型晴天、扬沙和沙尘暴天气下对应时次的总辐射进行统计。将低云量为 0 成，总辐射日变化呈标准倒“U”型的天气作为晴天；将地面观测中记录有扬沙（该日无沙尘暴或降雨）现象的日期作为扬沙天；将地面观测中记录有沙尘暴（该日无降雨）现象的日期作为沙尘暴天。统计标准为：保证某天气现象发生时次有对应的辐射值，仅有天气现象发生但没有对应辐射值的时次不进行统计，晴天、扬沙和沙尘暴天气统计的样本数，塔中分别为 1080 个、888 个、168 个；肖塘晴天和哈德晴天分别为 744 个和 864 个；肖塘和哈德扬沙、沙尘暴天分别为 672 个和 432 个，其概率分布如图 5。

三种天气下总辐射的概率分布存在显著不同。扬沙和沙尘暴天气 $> 500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的总辐射明显被削弱，其主要向低值区集中，即晴天—扬沙—沙尘暴，随着空中沙尘量的增加总辐射值在低值区的分布概率增加，高值区的分布概率减少，可见沙尘对总辐射有明显的削弱作用。由于肖塘在夏季没能挑出典型晴天，故统计图上反映出典型晴天最大可能概率只有 $900 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。晴天、扬沙和沙尘暴天气下，肖塘 $< 500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的总辐射概率分别为 55.1%、71.6% 和 73%；哈德分别为 58.2%、72.7% 和 75.1%；塔中分别为 48%、64.6% 和 71.7%。而晴天、扬沙和沙尘暴天气下，肖塘 $> 600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的总辐射概率分别为 29.0%、16.9% 和 16%；哈德分别为 25.3%、17.3% 和 17.7%；塔中分别为 36.6%、26.6% 和 16.3%。同时还可看出，相对于沙尘天气，晴天总辐射在各区间的分布较均匀；沙尘对 $> 500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的总辐射衰减，肖塘比塔中和哈德明显。沙尘天气，哈德和肖塘低值区 ($< 300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) 的概率高于塔中，而高值区 ($> 700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) 的概率低于塔中。由于年沙尘暴日数较少，另有部分发生于夜间的沙尘暴日不予考虑，这样沙尘暴日的样本数较扬沙和典型晴天明显少。加之每次沙尘暴强度有较大差别，一天中各时次总辐射也不相同，因此图 5 只是从概率意义上尝试比较说明不同天气下各量值的分布趋势等规律。

5 与太阳高度角的关系

太阳高度角的计算公式如下^[46]：

$$h = \arcsin(\sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega) \quad (1)$$

其中， φ 为当地纬度； δ 为太阳赤纬角； ω 为太阳时角。

当地太阳时角计算公式为:

$$\omega = (12 - t) \times 15^\circ + (120^\circ - \lambda) \quad (2)$$

其中, t 为北京时间; λ 为当地经度。

太阳赤纬 δ 计算公式为:

$$\delta = [0.006918 - 0.399912 \cos \theta + 0.070257 \sin \theta - 0.006758 \cos 2\theta + 0.000907 \sin 2\theta - 0.002697 \cos 3\theta + 0.001480 \sin 3\theta] \times 180 / \pi \quad (3)$$

其中, $\theta = 360 \times d_n / 365$, deg; d_n 为日序 (例如 2011 年 1 月 1 日为 0, 1 月 2 日为 1, 1 月 3 日为 2, …… , 12 月 31 日为 364)。

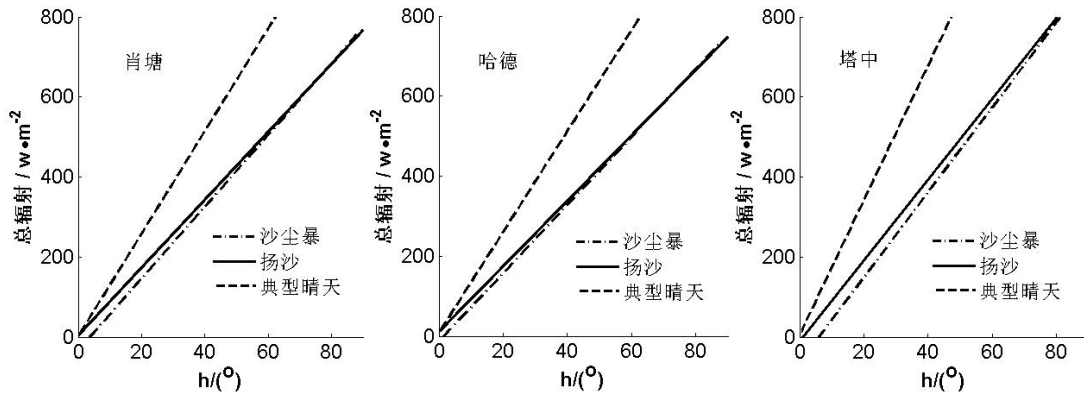


图 6 不同天气下总辐射与太阳高度角的关系

Fig. 6 Relationship between global radiation and solar zenith angle under clear day and dust day

总辐射主要受太阳高度角、大气分子、云和气溶胶的影响,为了更好地认识沙尘天气下太阳高度角与太阳总辐射的关系,我们计算了肖塘、哈德和塔中 2011 年太阳高度角,并与总辐射进行了一次函数线性拟合,图 6 给出了三个观测点的拟合曲线。总辐射随太阳高度角的增大而增加,典型晴天和沙尘天气总辐射与太阳高度角的拟合曲线为一元一次方程,其中典型晴天下的拟合效果最好。晴天和沙尘天气总辐射随太阳高度角的变化有很大差异,晴天总辐射随太阳高度角的变化速率最快,沙尘暴天气最慢。沙漠腹地沙尘天气日数多于绿洲沙漠过渡带,在这里从沙尘暴与太阳高度角的拟合曲线上也反映出来了,在太阳高度角 $< 20^\circ$ 时,塔中沙尘暴天气总辐射随太阳高度角的变化速率最慢,这是由于沙尘天气,太阳辐射穿越的地球大气质量较大。扬沙和沙尘暴天气,总辐射随太阳高度角的变化曲线比较相近,可能是沙尘使得太阳辐射对太阳高度角的变化不敏感。在相同的太阳高度角下,晴天总辐射最大,沙尘暴天最小,沙尘对太阳辐射有衰减。

6 结论

(1) 塔克拉玛干沙漠腹地总辐射年总量高于沙漠过渡带和胡杨林过渡带。月平均日总量沙漠腹地 6 月最大、12 月最小,与埃及、叙利亚、沙特阿拉伯、土耳其及黑河沙漠地区一致;沙漠过渡带和胡杨林过渡带则是 7 月最大、12 月最小,与黑河鼎新绿洲一致。

(2) 沙漠腹地、沙漠过渡带和胡杨林过渡带总辐射的年变化明显,均为夏季大、冬季小、春季高于秋季,夏季约为冬季的 2.3 倍左右,且这三个观测点 7 月总辐射低于张掖绿洲,高于陇中黄土高原。而在低纬度地区,如尼格尔、也门和塔伊兹总辐射的年变化不明显。

(3) 总辐射四季日峰值,沙漠腹地高于沙漠过渡带和胡杨林过渡带,青藏高原改则和狮泉河高于沙漠腹地及黑河鼎新戈壁,而沙漠腹地与黑河鼎新戈壁相差不大。平均日变化呈现

出早晚小、正午 12:00 最大的特点。沙尘暴天气总辐射则被明显削弱，日变化波动大。

(4) 沙漠腹地、沙漠过渡带和胡杨林过渡带总辐射在沙尘天气受到明显削弱，在一个连续的强沙尘暴及其前后，总辐射呈现出剧烈的波动。总辐射主要向低值区集中，高值区的分布概率减少。太阳总辐射受太阳高度角和沙尘影响明显，总辐射随太阳高度角的变化相一致，相同太阳高度角下晴天总辐射高于沙尘天。

参考文献

- [1] 杨兴国, 马鹏里, 王润元, 等. 陇中黄土高原夏季地表辐射特征分析[J]. 中国沙漠, 2005, 25(1): 55-62.
- [2] Stanhill G, Cohen S. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107: 255-278.
- [3] Supit I, Van Kappel RR. A simple method to estimate global radiation[J]. Solar Energy, 1998, 63: 147-160.
- [4] Yorukoglu M, Celik AN. A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47: 2441-2450.
- [5] Iziomon MG, Mayer H. Assessment of some global solar radiation parameterizations[J]. Journal of Atmosphere and Solar-Terrestrial Physics, 2002, 64: 1631-1643.
- [6] Almorox J, Hontoria C. Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain[J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45: 1529-1535.
- [7] El-Metwally M. Sunshine and global solar radiation estimation at different sites in Egypt[J]. Journal of Atmosphere and Solar-Terrestrial Physics, 2005, 67: 1331-1342.
- [8] Ceballos JR, De A, Moura GB. Solar radiation assessment using Meteosat 4-VIS imagery[J]. Solar Energy, 1997, 60: 209-219.
- [9] Perez R, Seals R, Zelenka A. Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data[J]. Solar Energy, 1997, 60: 89-96.
- [10] 李明财, 熊明明, 杨艳娟, 等. 环渤海地区 1961—2010 年太阳总辐射时空变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(2): 119-123.
- [11] 杨溪敏, 曾燕, 邱新法, 等. 1960—2000 年黄河流域太阳总辐射气候变化规律研究[J]. 应用气象学报, 2005, 16(2): 243-248.
- [12] 李占清, 翁笃鸣. 丘陵山地总辐射的计算模式[J]. 气象学报, 1988, 46(4): 461-468.
- [13] Stanhill G, Cohen S. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107: 255-278.
- [14] Li R, Zhao L, Ding YJ, et al. A study of the effect of global radiation and other factors on seasonal maximum frozen depth in the Tibetan Plateau[J]. Power Engineering and Automation Conference (PEAM), 2001, 3(8-9): 243-253.
- [15] 何清, 缪启龙, 李帅, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地总辐射变化特征及影响因子分析[J]. 中国沙漠, 2008, 28(5): 896-902.
- [16] 李江风. 塔克拉玛干沙漠及其周边山区天气气候[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [17] 李江风. 《沙漠气候》[M]. 气象出版社, 2002 年 6 月.
- [18] 胡列群, 袁玉江. 塔克拉玛干沙漠辐射平衡研究[J]. 干旱区地理, 1996, 3(19): 16-23.
- [19] 李帅, 胡列群, 何清, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地地表辐射收支特征研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(4): 1035-1044.
- [20] 何清, 金莉莉, 杨兴华. 沙漠腹地紫外辐射特征及影响因子分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2011, 5(5): 7-14.
- [21] 何清, 金莉莉, 李帅, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地太阳紫外辐射特征[J]. 资源科学, 2010, 32(8): 1462-1470.
- [22] 何清, 金莉莉, 艾力·买买提明, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地太阳紫外 UV-B 辐射的观测与分析[J]. 中国沙漠, 2010, 30(3): 640-647.
- [23] 何清, 金莉莉, 杨兴华, 等. 塔中紫外辐射与气象要素的关系[J]. 干旱区研究, 2011, 28(6): 901-912.

-
- [24] 何清, 缪启龙, 李帅, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地的长波辐射变化特征[J]. 高原气象, 2009, 28(3):642-646.
- [25] 李帅, 何清, 周立平, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地净辐射变化特征[J]. 干旱区研究, 2009, 26(5):644-648.
- [26] 李江风. 塔克拉玛干沙漠及其周边山区天气气候[M]. 北京:科学出版社, 2002.
- [27] 丁国栋, 赵延宁, 马玉明. 沙漠学概论[M]. 北京:中国林业出版社, 2002:119-123.
- [28] He Qing, Zhao Jingfeng, Nagashima Hideki. The distribution of Sandstorms in Taklimakan Desert [J]. Journal of Arid Land Studies, 1996, 5:185-193.
- [29] 何清, 赵景峰. 塔里木盆地浮尘时空分布及对环境的影响研究[J]. 中国沙漠, 1997, (2):119-126.
- [30] 杨兴华, 李红军, 何清, 等. 塔克拉玛干沙漠荒漠过渡带春季风沙活动特征—以肖塘为例[J]. 中国沙漠, 2012, 32(4):915-920.
- [31] Hashjin T.T., Ghobadim B. Estimation of Mean Monthly and Hourly Global Solar Radiation on Surfaces Tracking The Sun Case Study:Tehran[C]. 2012 Second Iranian Conference on renewable energy and distributed generation. 2012:172-177.
- [32] Akpabio L.E., Etuk S.E. Relationship Between Global Solar Radiation and Sunshine Duration for Onne, Nigeria[J]. Turk J Phys, 2003, 27:161-167.
- [33] El-Sebaai A.A., Trabea A.A. Estimation of Global Solar Radiation on Horizontal Surfaces Over Egypt[J]. Egypt. J. Solids, 2005, 28(1):163-175.
- [34] 王慧, 胡泽勇, 李栋梁, 等. 黑河地区鼎新戈壁与绿洲和沙漠下垫面地表辐射平衡气候学特征的对比分析[J]. 冰川冻土, 2009, 31(3):464-473.
- [35] 江灏, 季国良, 吕兰芝. HEIFE 绿洲区的太阳紫外辐射[J]. 高原气象, 1994, 13(3):346-352.
- [36] 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.
- [37] 季国良, 邹基玲. 干旱地区绿洲和沙漠辐射收支的季节变化[J]. 高原气象, 1994, 13(3):323-329.
- [38] 杨兴国, 马鹏里, 王润元, 等. 陇中黄土高原夏季地表辐射特征分析. 中国沙漠, 2005, 25(1):55-62.
- [39] Al-Mohamad Ali. Global, direct and diffuse solar-radiation in Syria[J]. Applied Energy, 2004, 79(2):191-200.
- [40] El-Sebaai A.A., Al-Hazmi F.S., Al-Ghamdi A.A. et al. Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia[J]. Applied Energy, 2010, 87(2):568-576.
- [41] Toğrul I.T., Onat E. A study for estimating solar radiation in Elazığ using geographical and meteorological data[J]. Energy Conversion and Management, 1999, 40(4):1577-1584.
- [42] 巩远发, 段廷扬, 陈隆勋, 等. 1997/1998 年青藏高原西部地区辐射平衡各分量变化特征[J]. 气象学报, 2005, 63(2):225-235.
- [43] 段海霞, 赵建华, 李耀辉. 2011 年春季中国北方沙尘天气过程及其成因[J]. 中国沙漠, 2013, 33(1):179-186.
- [44] 尹宪志, 任余龙, 马旭洁, 等. 2011 年 4 月 28—29 日中国北方强沙尘暴发生机制位涡分析[J]. 中国沙漠, 2013, 33(1):195-204.
- [45] 刘新春, 钟玉婷, 何清, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地沙尘气溶胶质量浓度垂直分布特征[J]. 中国沙漠, 2012, 32(4):1045-1052.
- [46] 杨婧, 刘志璋, 孟斌, 等. 基于 MATLAB 的太阳辐射资料计算[J]. 能源工程, 2011, (1):34-38.