温秀秀,张峰,师庆东,等.塔克拉玛干沙漠腹地逐日太阳总辐射模拟计算——以达理雅博依绿洲为例[J].沙漠与绿洲气象,2018,12(6): 16-21.

doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2018.06.003

塔克拉玛干沙漠腹地逐日太阳总辐射模拟 计算——以达理雅博依绿洲为例

温秀秀1,张 峰1*,师庆东1,金莉莉2

(1.新疆大学新疆绿洲生态教育部重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830046;2.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 塔克拉玛干沙漠大气环境观测试验站,新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要:基于塔克拉玛干沙漠腹地面积最大的天然孤立绿洲达理雅博依2015年1月— 2016年2月太阳总辐射观测资料,运用H.L.Penman经验公式模拟计算了该地区2015年逐日总辐射累计量,模拟值与实测值的误差分析显示:本气候学方法成功模拟了沙漠腹地总辐射的年内变 化趋势。使用模拟值估算得到达理雅博依绿洲2015年太阳总辐射累计量约为5 332.23 MJ·m²。 又以相同方法模拟了塔中气象站2015年3—5月总辐射变化,结果较达理雅博依的模拟更接近实 测值,说明本模拟在塔克拉玛干沙漠腹地不同地点结果有效。

关键词:太阳总辐射;塔克拉玛干沙漠;达理雅博依绿洲

中图分类号:P422.1 文献标识码:A 文章编号:1002-0799(2018)06-0016-06

太阳总辐射是地表各种物理过程的最主要能 源¹¹。探讨到达地面的太阳总辐射的变化,不仅有助 于了解某一区域大气组成的变化¹²,揭示大气运动 规律,为探索该地区的气候资源特征¹³提供科学依 据,而且对于合理利用太阳能资源,保护生态环境等 具有现实意义。塔里木盆地是我国第一大内陆盆 地¹⁴,北起天山、南至昆仑山、东到罗布泊、西抵帕米 尔高原¹⁶。位于盆地中心的塔克拉玛干沙漠是我国 最大的沙漠,也是世界第二大流动沙漠。由于交通所 限,沙漠腹地地面实测太阳辐射资料,尤其是长周期 资料¹⁶十分有限,为相关研究带来了不便,而实地观 测工作又面临着诸如数据缺失或不连贯等问题。因 此,相关基于气候学公式的总辐射模拟显得十分必 要。多年来,国内学者对不同区域太阳总辐射的模拟

收稿日期:2017-12-08;修回日期:2018-02-08

基金项目:国家自然科学基金新疆联合基金项目<克里雅河山区水库 建成对尾闾达理雅博依绿洲季节性洪水生态效应的影响> (U1178303);国家自然科学基金(41605008)资助。

作者简介:温秀秀(1991-),女,硕士研究生,主要从事沙丘地貌类型 研究。<u>E-mail:wenxiu_dkz@163.com</u>

通讯作者:张峰(1973-),男,副教授,主要从事干旱区环境演化方面的研究。E-mail: Zhang-f-eng@sohu.com

成果 [1-3,6-13]。 左大康等 [11] 根据我国 26 个日射站 (1957年7月—1960年底)的实测资料,绘制了中国 年、月总辐射分布图。祝昌汉[12,13]根据75个日射站 的资料(1957—1977年)确定了一个比较适合我国 的总辐射气候学计算方法。亦有学者对新疆的太阳 辐射进行了科学探讨:刘绍民等14根据新疆9个月 日射站(1961—1990年)的资料分南疆、北疆两大区 域按月给出区域统一的气候学计算公式,最后验证 了它们的计算效果。陈志华等四利用1961—2000年 间新疆地区的日照及地面太阳辐射观测资料,详细 分析了近 40 a 来新疆地区地面太阳辐射的分布和 时空变化趋势。何清等15利用 2006—2007 年塔中大 气环境观测站直接探测的总辐射资料,对流动沙漠 区近地层总辐射的变化特征及影响因子进行了分 析,证明了云量,沙尘对总辐射影响较为显著。金莉 莉1%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(肖塘、哈德)与沙漠腹地(塔 中)总辐射的气候学特征,研究得出塔中 2011 年太 阳总辐射年总量为 6515.0 MJ·m⁻²,高于绿洲—沙漠 过渡带,但专门针对于沙漠腹地绿洲的观测以及对

计算和分布特征做了大量研究,并取得了阶段性的

观测结果的数值模拟研究工作尚少。

本文根据 H.L.Penman 经验公式^[17],以塔克拉玛 干沙漠腹地最大天然绿洲,达理雅博依为研究区,应 用实测太阳总辐射逐日累计量与逐日天文辐射的比 值和日照百分率的月平均值等资料来进行回归分 析^[11],模拟推算出 2015 年 1 月 1 日—2016 年 2 月 29 日的逐日总辐射累计量,并检验了计算结果的精 度。

1 研究区概况

达理雅博依绿洲(图 1)是塔克拉玛干沙漠腹地 面积最大的天然孤立绿洲,现存面积约 324 km²^[18], 距沙漠东端约 530 km,南至于田县 250 km,北至塔 里木河 280 km^[19],地形西南向东北倾斜,地貌为由 河流切割形成的岛状沙丘^[20](流动沙丘)与灌丛沙丘 镶嵌在扇形绿洲内部。绿洲内主要有柽柳(Tamarix ramosissima)、胡杨 (Populus euphratica)、芦苇 (Phragmites australis)等植物。



图1 达理雅博依绿洲的地理位置

2 数据与方法

2.1 数据来源

2015 年 1 月 9 日在克里雅河尾闾的达理雅博 依天然绿洲(海拔约 1 200 m)建立了首个气象站 (38°22′ N、81°52′ E)(图 2)。辐射观测点开阔平坦, 无树荫遮挡,人为影响很小。使用江苏省无线电科学 研究所产 FS-S6 热电总辐射传感器进行观测,灵敏 度 7~14 μ V(W·m⁻²);响应时间 \leq 60 s;余弦响应误 差 \leq 6%;方位响应误差 \leq 4%。总辐射仪安装于一 体式辐射支架,高度 1.5 m,方向正南。于 2015 年 1月9日开始对太阳辐射进行定点连续观测,记录时间为2015年1月1日—2016年2月29日每日的00:00—24:00。



图 2 野外观测仪器设备

2.2 研究方法

对于太阳总辐射的模拟计算,H.L. 彭门(H.L. Penman)^m提出以下形式的经验公式,此后该方法被 普遍采用:

Q=S₀(a+bs)。(1) 式中:Q是到达地表的太阳总辐射,s是日照百分率 (%),S₀是起始参量——逐日天文辐射量^[21],a、b是 经验系数。之所以选用该公式,是因为对缺乏观测资 料的地区而言,其各参数容易获得和便于计算,并且 翁笃鸣^[22]、祝昌汉^[12,13]等也验证了其模拟计算总辐射 的合理性。

2.2.1 逐日天文辐射量计算

天文辐射 S₀ 是指完全由地球天文位置,如日地 距离、太阳高度、白昼长度等决定的到达大气顶界的 太阳辐射^[23]。逐日天文辐射总量 S₀(MJ·m⁻²·d⁻¹)计算 公式^[21]为:

$$S_{0} = \frac{\Pi_{0}}{\pi \rho} (\omega_{0} \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \sin\omega_{0})_{\circ}$$
(2)

式中:T 是一天的时间 (s); l₀ 是太阳常数,取值 1367 W·m⁻²; φ 是地理纬度(弧度);

*ω*₀ 是时角^[24](弧度);**1**/*ρ*² 是日地距离订正系数 (又称地球轨道偏心率订正因子),*δ* 是太阳赤纬(弧 度),可采用傅里叶级数形式的计算公式^[26]:

 $1/\rho^2 = 1.000 \ 110 + 0.034 \ 221\cos\theta_0 + 0.001 \ 280\sin\theta_0 + 0.000 \ 719\cos2\theta_0 + 0.000 \ 077\sin2\theta_0,$ (3)

 $\delta = (180/\pi) \cdot (0.006 \ 918 \ -0.399 \ 912 \ \cos\theta_0 \ + \\ 0.070 \ 257 \sin\theta_0 \ -0.006 \ 758 \ \cos2\theta_0 \ + 0.000 \ 907 \sin2\theta_0 \ -$

(4)

(5)

$0.002 697 \cos 3\theta_0 + 0.000 14$	$18 \sin 3\theta_0$,
---------------------------------------	-----------------------

 ω_0 =arccos(-tan ϕ tan δ) $_{\circ}$

式中: θ_0 是以地球公转角度(弧度)表示的日序数, $\theta_0=2\pi$ (d_n-1)/365; d_n 是自1月1日计起的全年各日 序号。

2.2.2 日照百分率

日照百分率 s(%)计算公式:

$$s=\frac{n}{N}$$
 (6)

式中:n 是逐日实际日照时数(h),世界气象组 织(WMO)将太阳直接辐射≥120 W·m⁻²±10%定为 日照阈值(算为有日照);N 是可照时数(h),即日出 和日没间的时间间隔,为 N=2ω₀/15。

经计算可知达理雅博依绿洲的平均日照百分率 为 **76.27%**。

2.2.3 误差检验

用达理雅博依绿洲 2015 年总辐射实测数据对 其模拟结果进行了检验。方法包括:平均偏差(mean bias error,MBE,MJ·m⁻²·d⁻¹)、平均绝对偏差(mean absolute bias error,MABE,MJ·m⁻²·d⁻¹)、均方根偏差 (root mean square error,RMSE,MJ·m⁻²·d⁻¹)以及平 均绝对误差(mean absolute percentage error,MAPE, %),计算公式^[26-28]分别为:

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (R_{M} - R_{S}), \qquad (7)$$

$$MABE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |R_{M} - R_{S}|, \qquad (8)$$

RMSE=
$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (R_{M} - R_{S})^{2}}$$
, (9)

MAPE=
$$\frac{100}{n} \sum_{i=1}^{n} |R_{M} - R_{s}| / \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} R_{s}$$
 (10)

式中:**R_M、R_s分别表示模拟结果和实测结果;n为模** 拟选取样本次数。

3 模拟计算与结果

在总辐射的计算中,先后解出了公式(1)中的各 分量,包括:天文辐射 S₀(图 3)、日照百分率 s(%)为 76.27%、经验参数 a 与 b。

3.1 经验系数 a、b

在各分量的求解过程中,用实测某月平均日太 阳总辐射与对应月份的平均日天文辐射的比值跟日 照百分率月平均值进行回归分析^[14,29],即可拟合出 a、b 系数。本文引用和清华等^[23]利用中国 54 个站点 1961—2009 年的资料建立的西部地区 a、b 系数;翁 笃鸣^[23]根据我国 1958—1960 的日射资料计算出的 西北地区 a、b 系数。本次采用这 2 组系数以及实测 资料拟合系数 a=0.3385,b=0.2152(表 1),结合研究 区的年平均日照百分率,利用公式(1)分别模拟计算 出达理雅博依绿洲 2015 年逐日太阳总辐射(图 3), 并与实测资料进行对比分析以及误差检验。



图 3 达理雅博依绿洲 2015 年 1 月 1 日—2016 年 2 月 29 日太阳总辐射日累计量变化

3.2 误差检验的精度评价

对实测值与模拟值的平均偏差(MBE)、平均绝 对偏差(MABE)、均方根偏差(RMSE)以及平均绝对 误差(MAPE)进行计算,结果见表1。

表1 太阳总辐射逐日模拟值与实测值的 误差检验结果

地区	起始值	系数 a	系数 b	MBE	MABE	RMSE	MA PE /%	相对误 差/%
西部地 区 ^[19]	天文辐射	0.185	0.595	3.69	4.17	5.61	29.54	-26.12
西北地 区 ^[18]	天文辐射	0.344	0.39	3.76	4.22	5.66	29.87	-26.64
塔中	天文辐射	0.1368	0.8139	0.01	4.11	5.23	19.89	-0.06
达理雅 博依	天文辐射	0.3385	0.2152	-0.11	2.97	3.89	21.02	0.77

本次模拟值与实测值的误差检验结果 MBE 值 略小于 0 (表 1),表明模拟值略小于实测值;另据 MABE、RMSE、MAPE 和相对误差值分析,本次误差 检验值较小,精度较高,说明采用达理雅博依绿洲 实测资料拟合的系数 a、b,对该区域总辐射进行的 模拟较为准确。

由于通常情况下,a、b 系数会有年际、月际等时 间尺度的变化,因此需以各月多年实测太阳总辐射 的平均值、对应月份日照百分率平均值,代入公式 (1),对各时间段的a、b 系数进行调整。当实测资料 因某种原因缺失时,可引用对应时段的a、b 系数进 行响应模拟。

H.L.Penman 经验公式虽然能成功模拟塔克拉

玛干沙漠腹地太阳总辐射的年内变化趋势,但由于 各季节不同的云量、沙尘等影响因子会改变日照时 数和强度,进而导致地面总辐射的变化。因此,适用 于沙漠腹地总辐射时空变化特征的气候学经验公式 的精确建立,还需根据气象因子进一步对经验系数 做相应修订得出。

4 分析与讨论

4.1 模拟结果分析

使用达理雅博依天然绿洲实测资料拟合 a、b 系 数模拟的结果(图 3)表明:该模拟方法虽对其他季 节模拟效果相对较好,但春季(3—5月)的模拟值较 实测值显著偏高。其他季节沙漠腹地天气状况较春 季好,晴天居多,二者偏差不大。其中或有因塔克拉 玛干沙漠春季风沙活动较为频繁,空气中某些颗粒 (水汽、尘埃等)的变化对太阳光产生一定的吸收和 散射^[11],从而削弱了太阳直射到地面的辐射强度。 据中国气象数据网塔中气象站数据:1999—2007 年 塔克拉玛干春季共发生沙尘暴 58 次,累计时长 191.35 h,平均每年春季约发生 6.44 次,持续时间 21.26 h,比同年度其他季节高出许多,也与此判断吻 合。此外,测定值也有可能因观测过程等问题而偏低。

4.2 与塔中 3—5 月模拟结果的对比

以同样方法模拟了塔中观测站 2015 年春季 (3—5月)太阳总辐射,误差检验(表1)显示:平均偏 差 MBE 与相对误差仅为 0.01 和-0.06%。与 2015 年 春季达理雅博依相比,模拟精度更高。二者实测值 变化相仿,均呈上升趋势(图 4),显示总体受纬度因 素控制,但达理雅博依绿洲实测值明显小于塔中 (图 4)。由于在纬度条件相似的情况下,小气候效应 等的不同应难造成持续且较高的差异,导致该差异 具体原因仍需进一步探明,或与仪器及观测过程有 关,而本模拟正可对此类问题的修正提供方法。



4.3 2015年达理雅博依绿洲总辐射累计量的估算

由于仪器数据传输和记录故障,达理雅博依绿 洲 2015 年 08 月 21 日—10 月 13 日、2015 年 11 年 2 日—11 月 16 日、2016 年 2 月 21 日—2 月 22 日记 录缺失。本文根据达理雅博依绿洲实测总辐射数据 模拟推算出 2015 年 1 月 1 日—2015 年 12 月 31 日 研究区总辐射累计量为 5 332.23 MJ·m⁻²(表 2)。由 于达理雅博依绿洲目前尚无年总辐射累计值,本模 拟为该地区增添了新的数据。

表2 总辐射曝辐量的月累计量

月份	该月实测值 统计天数/d	该月实测值 累计量 Q₁/(MJ⋅m ⁻²)	该月模拟值 统计天数/d	该月模拟值 累计量 Q₂/(MJ⋅m ⁻²)			
2015/01	22	221.64	31	253.68			
2015/02	28	308.58	28	301.79			
2015/03	31	416.74	31	443.58			
2015/04	30	433.98	30	530.29			
2015/05	31	589.08	31	619.18			
2015/06	30	679.17	30	628.07			
2015/07	31	705.39	31	634.63			
2015/08	20	334.62	31	576.36			
2015/09	-	-	30	468.13			
2015/10	18	246.41	31	374.48			
2015/11	15	155.56	30	270.11			
2015/12	31	255.77	31	231.93			
2016/01	31	257.86	31	253.59			
2016/02	27	264.09	29	313.85			
2015 年总辐射模拟值 5 332.23MJ·m ⁻²							

5 结论

H.L.Penman 经验公式在使用塔克拉玛干沙漠 腹地实测资料来模拟 2015 年 1 月—2016 年 2 月达 理雅博依天然绿洲的太阳总辐射效果较好,据该模 拟方法可估算达理雅博依绿洲 2015 年太阳总辐射 累计量约为 5 332.23 MJ·m⁻²。同样方法对塔中气象 站 2015 年 3—5 月总辐射的模拟结果更为精确。本 模拟在塔克拉玛干沙漠腹地不同地点结果均有效。 达理雅博依实测值整体低于塔中,小气候效应应可 排除,仪器及观测方面的原因仍需进一步查明。

致谢:中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所刘新春副 研究员提供了协助,特表感谢!

参考文献:

[1] 王炳忠,张富国,李立贤.我国太阳能资源及其计算[J].

太阳能学报,1980,1(1):1-9.

- [2] 陈志华,石广玉,车慧正.近 40 年来新疆地区太阳辐射状况研究[J].干旱区地理,2005,28(6):734-739.
- [3] 周秉荣,颜亮东,校瑞香.三江源地区太阳辐射与日照时 空分布特征[J].资源科学,2012,34(11):2074-2079.
- [4] 姐瑞平,高前兆,钱鞠,等.2000 年来塔里木盆地南缘绿 洲环境演变[J].中国沙漠,2001,2(21):122-128.
- [5] 朱震达. 塔里木盆地沙漠的自然特征 [J]. 地理知识, 1960,11(4):152-156.
- [6] 李韧,季国良,杨文.五道梁地区总辐射的年际变化[J].高 原气象,2005,24(2):173-177.
- [7] 刘玲,刘建栋,邬定荣,等.云南山地太阳总辐射的分布式 模拟[J].气象与环境科学,2014,37(1):13-19.
- [8] 杜家铭,李国毅.韶关地区太阳能资源分析与评估[J].气 象与环境科学,2017,40(2):72-77.
- [9] 王璁,李梦洁,单新兰,等.宁夏起伏地形下太阳总辐射分 布式模拟[J].干旱气象,2012,30(1):8-14.
- [10] 朱学玲,李红卫.洛阳地区太阳能资源分析与评估[J].气 象与环境科学,2015,38(1):67-72.
- [11] 左大康,王懿贤,陈建绥.中国地区太阳总辐射的空间分 布特征[J].气象学报,1963,33(1):78-96.
- [12] 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,1982,5 (1): 15-24.
- [13] 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,1982,5(2): 196-206.
- [14] 刘绍民,李银芳.新疆月太阳总辐射气候学计算方法的 研究[J].干旱区地理,1997,20(3):75-81.
- [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,2008,5(28):896-902.

- [16] 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,2014,2(34):498-506.
- [17] H.I.penman.Natural evaporation from open water, bare soil and grass[J]..Proc.Roy.Soc.193A, 1948, 120–145.
- [18] 田裕钊. 克里雅河下游三角洲的吐加依-标志生态退化 的一种自然综合体[J].中国沙漠,1988,8(2):11-24.
- [19] 倪频融.达里雅博依绿洲的历史、现状及其演变前景[J]. 干旱区研究,1993,10(4):12-18.
- [20] 朱震达,陆锦华,江伟铮.塔克拉玛干大沙漠克里雅河下游地区风沙地貌的形成发育与环境变化趋势的初步研究[J].中国沙漠,1988,8(2):1-10.
- [21] 陆渝蓉,高国栋.物理气候学[M].北京:气象出版社, 1987.
- [22] 翁笃鸣.试论总辐射的气候学计算方法[J].气象学报, 1964,34(3):304-315.
- [23] 和清华,谢云.我国太阳总辐射气候学计算方法研究[J]. 自然资源学报,2010,25(2):308-319.
- [24] 高国栋,缪启龙,王安宇,等.气候学教程[M].北京:气象 出版社,1996.
- [25] 翁笃鸣.中国辐射气候[M].北京:气象出版社,1997.
- [26] 李玉海,狄勉祖.太阳辐射浅说[M].北京:农业出版社, 1978.
- [27] 杨勤,梁旭,赵光平,等.宁夏太阳辐射逐日、月、年总量的变化特征[J].干旱区研究,2009,26(3):413-423.
- [28] 童成立,张文菊,汤阳,等.逐日太阳辐射的模拟计算[J]. 中国农业气象,2005,26(3):165-169.
- [29] 张运林,秦伯强,陈伟民,等.太湖无锡地区太阳总辐射的气候学计算及特征分析 [J].应用气象学报,2003,14 (3):339-347.

Estimate of Solar Radiation in the Taklimakan Desert Hinterland: A Case Study in the Daliyaboyi Oasis

WEN Xiuxiu¹, ZHANG Feng¹, SHI Qingdong¹, JIN Lili²

(1. Key laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;
2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Taklimakan Desert Atmosphere and Environment Observing and Experimental Station, Urumqi 830002, China)

Abstract The study of solar radiation, including its characteristics and variation, is of great significance for exploring regional ecology system formation and evolution. The Taklimakan Desert, the largest mobile desert in China, is located at the center of the Tarim Basin. Oasis study in this desert is important for understanding the ecosystem process in arid land. However, for traffic problems, the desert's meteorology data, especially solar radiation data (long period), are very scare, which brings difficulties related to discussing the oasis ecosystem process further. In this work, Daliyaboyi, the largest isolated pristine oasis in the Taklimakan Desert hinterland, was taken as a case study to simulate solar radiation. The daily total solar radiation of the Daliyaboyi Oasis cumulants in 2015 was simulated based on H .L. Penman's method, $Q=S_0$ (a+bs). The results show that we selected the method for the climatological empirical formula successfully to estimate the annual variation trend of the total radiation. The calculation shows that the simulated total annual global radiation of the Daliyaboyi Oasis in 2015 was 5 332.23 MJ·m⁻². We also simulated the total radiation of the Tazhong meteorological station from March to May in 2015 using the same method. Its result is closer to the instrument measured value than the Daliyaboyi Oasis. The comparison of the simulation between the Daliyaboyi and the Tazhong shows that in the Taklimakan Desert hinterland, our method may also successfully estimate according to the specific location.

Key words solar radiation; the Taklimakan Desert; the Daliyaboyi Oasis