

# 降水过程对巴丹吉林沙漠近地面太阳辐射的影响

王欣, 文军, 刘蓉, 田辉, 张堂堂

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 中国科学院寒旱区  
陆面过程与气候变化重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 利用在巴丹吉林沙漠开展的陆表能量水文过程野外综合试验太阳辐射及降水等观测资料, 分析了试验期间到达地表的太阳辐射的时间分布特征和影响局地大气透明度的因子。结果表明: 夏季降水不仅对浮尘天后的大气透明度有明显的改善作用, 而且在完全晴日间的降水也使日平均大气透明度增加约 9.0%, 进而对到达地表的太阳辐射产生较大影响, 而近地层的蒸散增强导致的空气湿度增加对局地大气透明度的影响可以忽略。因此, 在我国西北干旱区沙尘多发地带夏季降水事件后, 到达地表的太阳辐射能有明显增加的趋势。

**关键词:** 沙漠; 太阳辐射; 透过率; 降水

**中图分类号:** P422.1

**文献标识码:** A

## 引言

能源问题日益成为制约我国社会经济发展主要因素之一, 而作为清洁能源的太阳能已成为新能源开发的热点。我国西部蕴藏着十分丰富的太阳能资源, 我国第一个荒漠化并网型光伏电站已于腾格里沙漠南缘建成投产, 标志着我国对太阳能的利用开始进入了一个全新的发展时期。但是, 目前国内对于沙漠地区的太阳辐射研究多集中在太阳辐射的气候学统计分析和区域地表辐射平衡特征分析上。真正从太阳能资源利用的角度对水平面太阳辐射资源的评估工作尚不多<sup>[1]</sup>, 所以分析太阳能资源丰富的西北荒漠区地表太阳辐射分布特征及其影响因子有重要的研究意义。

我国西北地区沙漠总面积约为 71 万 km<sup>2</sup>, 约占我国陆地总面积的 7.0% 以上, 这一地区蕴藏着极其丰富的太阳能资源, 而其中以我国第三大沙漠——巴丹吉林沙漠地区的环境地理特征最为独特, 高大沙山与湖泊交错发育的地貌为世界罕见<sup>[2-4]</sup>, 分析其太阳辐射的影响因子对于进一步探索西北沙漠太阳辐射分布特征有着重要意义。

晴空大气透明度是衡量大气对太阳辐射透明程度的重要因子, 其主要由空气分子、大气气溶胶和水

汽等因子共同控制。鉴于沙漠地区的特殊自然条件, 沙尘气溶胶不同于城镇气溶胶的特点<sup>[5]</sup>, 在沙漠地区沙尘气溶胶对直接太阳辐射的衰减仅次于大气的散射和吸收作用<sup>[6-7]</sup>。沙尘天气下气溶胶对太阳辐射的衰减要远大于其他因素造成的衰减<sup>[8-11]</sup>, 而降水对沙尘气溶胶粒子的清除过程直接影响沙尘粒子的空间分布和长距离输送<sup>[12]</sup>。因此局地降水对沙尘气溶胶的清除机制对沙漠地区到达地面的太阳辐射有着直接影响。本文探索巴丹吉林沙漠腹地夏季太阳辐射的基本特征和降水过程对局地大气透明度的影响, 分析降水前后大气透明度和到达地面太阳辐射的变化特征, 为我国西部巴丹吉林沙漠地区太阳能资源的开发和利用提供参考。

## 1 研究区域及试验介绍

### 1.1 研究区域简介

巴丹吉林沙漠主要位于我国内蒙古自治区阿拉善右旗北部地区, 面积约为 4.7 万 km<sup>2</sup>, 是我国第三大沙漠。巴丹吉林沙漠腹地分布有密集的高大沙山, 一般高约 200~300 m, 最高的达 500 m, 多年平均降雨量由东南向西北减少, 东南部为 100 mm 左右, 西北部不足 40 mm, 年平均气温 1~8 °C, 7 月份

收稿日期: 2011-06-29; 改回日期: 2011-09-16

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-328)和国家自然科学基金资助项目(40775022)共同资助

作者简介: 王欣(1984-), 男, 在读博士, 从事陆面过程和人文气象研究. xinwang@lzb.ac.cn

最高气温可达 37 ~ 41 °C。巴丹吉林沙漠腹地分布有湖泊约 144 个,总面积超过 23 km<sup>2</sup>,湖泊分布主要分为南北 2 区,在沙漠的东南边缘主要是面积不足 0.2 km<sup>2</sup>、深度不到 2 m 的小型浅湖,而北部沙漠腹地则分布着一些面积大且较深的湖泊<sup>[13]</sup>。

## 1.2 试验及资料介绍

2008 年 5 月 30 日至 8 月 30 日在巴丹吉林沙漠开展了陆表能量水文过程野外综合试验,试验观测地点位于巴丹吉林沙漠最大湖泊——诺尔图湖(水域面积约 1.5 km<sup>2</sup>)附近的平坦的沙丘顶部。试验期间主要架设了 COMPELL 公司生产的涡动相关系统和新型 DYNAMAX 自动气象观测站,观测项目主要包括常规气象要素观测、各辐射分量观测和土壤水热传输要素等陆表能量水分过程变量的观测。其中辐射观测主要利用荷兰 Kipp&Zonen 公司生产的 CNR-1 型辐射仪和 LI200S 型光合有效辐射探测仪。主要利用 CNR-1 型辐射仪观测的向下太阳短波总辐射通量密度和自动气象站记录的降水量,观测太阳总辐射的光谱范围是 0.3 ~ 2.8,精度为 5 W · m<sup>-2</sup>,观测降水量精度为 0.25 mm。此外,我们还人工记录了试验期间昼间的天气和云状况。

## 2 采用的方法

根据布格—朗伯定律(Bouguer-lamber),当波长为  $\lambda$  的辐射  $I$  通过  $dm$  厚度的气层时,其衰减量为:

$$dI_{\lambda} = -\alpha_{\lambda} I_{\lambda} dm \quad (1)$$

其中, $I_{\lambda}$ ——波长为  $\lambda$  的光辐射强度, $\alpha_{\lambda}$ ——大气消光系数。则对于全色光积分有:

$$S_m = \int_0^{\infty} S_{\lambda} p_{\lambda}^m d\lambda \quad (2)$$

其中, $S_{\lambda}$ ——波长为  $\lambda$  的入射辐射通量密度(W · m<sup>-2</sup>), $S_m$ ——波长为  $\lambda$  出射辐射通量密度(W · m<sup>-2</sup>),对全波段相对于整层大气写为:

$$p^m = \frac{S}{\sinh \cdot S_0} \quad (3)$$

其中, $p$ ——全波段透明度系数, $S_0$ ——太阳常数取 1 367 W · m<sup>-2</sup>, $S$ ——水平面上的辐射通量密度(W

· m<sup>-2</sup>), $h$ ——某时刻当地的太阳高度角(度), $m$ ——大气质量数(无量纲数),需要对其进行海拔高度订正,计算公式为:

$$m' = m_0((288 - 0.0065 h)/288)^{5.25} \quad (4)$$

$$m_0 = [1229 + (614 \sinh)^2]^{\frac{1}{2}} - 614 \sinh \quad (5)$$

$m_0$ ——海平面上的大气质量数, $m'$ ——订正后的大气质量数。由于 CNR-1 四分量辐射观测仪接收的短波总辐射中还包含了大气的散射辐射,为简化研究假定晴朗无云条件下直接辐射和散射辐射之间存在以下线性关系<sup>[14-15]</sup>:

$$p_d = 0.271 - 0.294 p \quad (6)$$

其中  $p_d$  为大气散射辐射透明度系数,故在天空无云状况下(3)式可改写为:

$$p^{m'} = \frac{S_{ob} - \sin h \cdot S_0(0.271 - 0.294 p)}{\sin h \cdot S_0} \quad (7)$$

此外由于不适当地将比尔—布格—朗伯定律定理论应用于全色光,随着大气质量数  $m'$  的加大,太阳光谱成分中短波成分减少,因而使大气对积分辐射的透明度随大气光学厚度加大<sup>[16]</sup>。国内外许多研究表明,无论大气质量多少,都必需把透明度系数订正到给定的大气质量。当  $m' = 2$  时,大气透明度系数  $P_2$  的订正算法为<sup>[16]</sup>:

$$P_2 = \left[ \frac{\frac{m'}{2} p^{m'}}{1 - (1 - \frac{m'}{2}) p^{m'}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

本文将利用(7)式和(8)式计算巴丹吉林沙漠腹地的晴空大气透明度,较为详细的分析巴丹吉林沙漠大气透明度时间分布特征,并对其在降水时间前后的变化状况进行分析讨论。

## 3 结果分析

### 3.1 夏季月平均太阳辐射日变化

到达地面的太阳辐射通量密度与光谱分布是由大气气体分子、云和气溶胶粒子的消光过程等大气内部因子以及太阳高度角等外部因子共同作用的结

果<sup>[17]</sup>。在辐射传输路径上,由于大气中的气体吸收,分子、气溶胶和云散射等作用,使得到达地面的太阳辐射量减少<sup>[18]</sup>。图1为试验期间到达地表的太阳总辐射能的月平均日变化过程,结果表明6月到达地表的辐射通量密度大于7月和8月的值,其平均峰值可达 $881.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,于午后和傍晚与7月和8月的值趋于一致。除太阳高度角的影响外,6月的天气条件以晴好为主,风速较春季小,正午太阳高度角达到最大,之后到达地面的辐射通量密度值却有明显的陡降过程。Han等<sup>[19]</sup>基于大量的沙尘气溶胶空间垂直分布特征观测,提出了一种起沙机制模型,即在晴朗无风的天气背景下,干热对流的联合亦可将沙漠地表的沙尘粒子扬升到大气边界层顶。此机制产生的热对流对边界层沙尘气溶胶的浓度分布有着重要影响,进而削弱到达地面的太阳辐射。

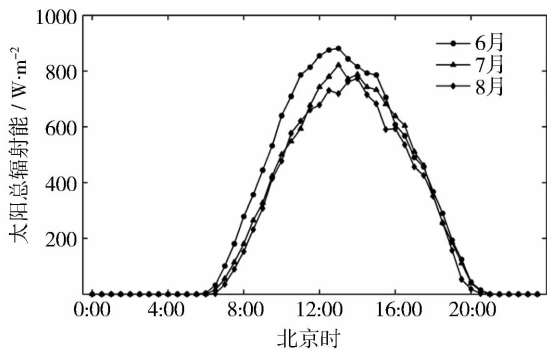


图1 中国西部巴丹吉林沙漠地区到达地面太阳辐射月平均日变化

Fig. 1 Monthly mean diurnal variation of surface global solar radiation in Badain - Jaran Desert of western China

### 3.2 完全晴空太阳总辐射能与透明度日平均分布特征

在晴朗天气条件下,太阳高度角是影响到达地表太阳辐射的首要因素,而大气透明度可作为大气中水汽和气溶胶粒子对太阳直接辐射削弱程度的表征因子。从2008年6月9日至8月18日,我们选择了7个完全晴朗无云日,统计分析夏季到达地面的太阳辐射的平均状态。图2表明,辐射通量密度在晴天状态下,巴丹吉林沙漠腹地太阳辐射日分布状态呈现正弦型变化趋势。图3为晴天大气透明度的平均日变化和均方差分布,最大均方差仅为0.045,透明度呈现出总体稳定的分布特征,并呈现出早晚较大而午间小分布型,若根据西弗科夫研究的大气透明度分类统计标准划分,则沙漠腹地诺尔图

的大气透明度在晴朗无云的天气条件下,具有较高透明度,属于干洁大气。其最小平均大气透明度和最大标准差值均为出现在北京时14:30,透明度分布特征与胡列群等<sup>[16]</sup>研究新疆塔克拉玛干沙漠外缘的库车、满西2个地区夏季大气透明度日变化情况类似。造成这种分布型的原因主要是午后沙漠的热对流增加了大气中沙尘的含量,使边界层气溶胶光学厚度增大,大气透明度减小。而均方差的极大值则体现了午后干热对流产生的随机性。

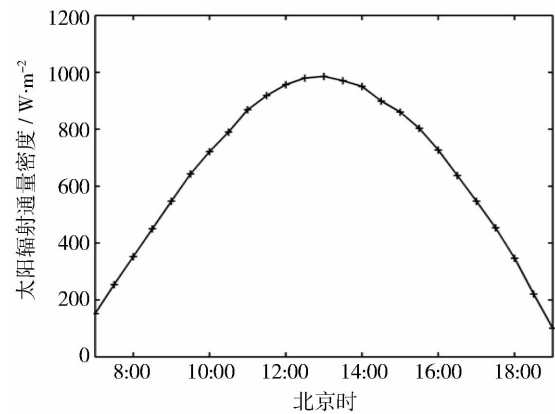


图2 中国西部巴丹吉林沙漠地区完全晴天太阳辐射平均的日变化

Fig. 2 Mean diurnal variation of global solar radiation under cloudless weather condition in Badain - Jaran Desert of western China

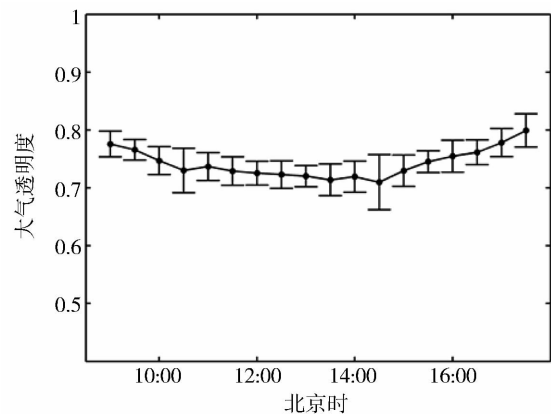


图3 中国西部巴丹吉林沙漠地区完全晴天大气透明度平均日变化与均方差分布

Fig. 3 Mean diurnal variation of atmospheric transparency and mean square deviation under cloudless weather condition

此外,由于诺尔图湖的存在,在午后水温增高和净辐射较大的时刻,蒸发较为剧烈,使近地层空气湿

度增加,可能进一步降低了局地的大气透明度,此种情况将在下一节进一步讨论。而 16:00 时后大气透明度迅速增加,由于此时较高的气温,无水汽凝结过程的条件下,除了热对流强度减弱,沙尘气溶胶的沉降过程与沙尘气溶胶对地表气温的反馈作用亦不可忽视。但目前已有的研究结果表明,沙尘气溶胶与气候变化间的作用机制极为复杂,对局地气候的影响仍然有很大的不确定性<sup>[20]</sup>。

### 3.3 大气透明度的日际变化

在整个试验期内,完全无云晴日数只占总天数不足 9.0%,而其余除阴天和降水日外,均为晴日,即一天之中某一时刻有云遮挡,但不同高度和性质的云具有不同的物理和光学性质,它们对太阳辐射

的影响很不相同,为了简化,我们采取的方法是剔除式(7)无解与解  $<0.5$  时的大气透明度,再统计计算日平均值。由于本文大气透明度系数是相对于全波段太阳短波辐射而言,并非针对某一波段或直接针对大气窗区,所以为克服 Forbes 效应采取了基于大气质量数为 2 的订正,但仍存在误差,而统计平均的结果更具有代表性。表 1 为整个试验期的日平均大气透明度分类统计情况,整个试验期间,日均透明度大于完全晴天平均透明度的有 11 d,而最主要的分量集中在  $0.68 < P < 0.74$  之间,大气透明度属于较为清洁大气。此外,日平均大气透明度的量值主要取决于当日或前日的天气状况,如浮尘、扬沙与降水等气象条件的影响。

表 1 中国西部巴丹吉林沙漠地区不同大气透明度天数的分类统计  
( $P$  为大气透明度日平均值)

Tab.1 The days statistics of daily mean atmospheric transparency value with different range in Badain - Jaran Desert of western China

大气透明度范围	阴或雨天	$P \leq 0.62$	$0.62 < P < 0.68$	$0.68 < P < 0.74$	$P \geq 0.74$
天数/d	24	10	15	22	11

### 3.4 雨后晴空大气透明度特征

在巴丹吉林沙漠,天气状况以晴为主,而沙尘气溶胶的浓度是影响到达地表太阳辐射的重要因素。沙尘气溶胶在空气中的传输有 2 个重要的汇,即干沉降和湿沉降。湿沉降包括 2 个物理过程,分别是云内清除,主要是通过布朗扩散、湍流扩散等使沙尘气溶胶向云滴附着,云下清除主要是由降水的拖曳作用沉降沙尘气溶胶粒子。降水过程对局地大气中的沙尘气溶胶有显著的去除效果,是影响沙尘气溶胶沉降的主要过程<sup>[21]</sup>。但其相关的微物理机制还未完全明确<sup>[22]</sup>,故本文基于降水前后大气透明度变化,定性说明湿沉降对到达地表太阳辐射的影响。由于降水次数非常有限,缺乏统计分析需要的样本数,故仅进行 2 次降水后的透明度个例分析。首先是 7 月 13 日早间至中午累计降水 2.54 mm,7 月 14 日为完全无云晴天,其平均大气透明度为 0.83,其值不仅远大于 7 月 12 日浮尘天的 0.60,且也大于完全无云晴天平均大气透明度 0.74。

由于大气透明度计算公式由布格——朗伯定律导出,计算气层对太阳直接辐射的衰减效果,而在阴雨天或云量较高时,晴天大气透明度计算公式并不适用于降水日的大气透明度的计算,所以只分析中

间有降水过程的 2 个晴日间大气透明度的变化。8 月 14 日平均大气透明度值为 0.73,而 8 月 16 日则高达 0.78。季国良等<sup>[23]</sup>分析黑河流域中沙漠地区大气透明度,认为夏末晴好天气条件下的大气透明度为 0.72 左右,与本文的结果相近。2 个晴天间的 8 月 15 日北京时 12~17 时累计降水为 10.67 mm,图 4 显示了 2 个完全晴日 8 月 14 日和 16 日大气透明度的日变化状态,表明除日平均大气透明度的差异外,16 日午后并未出现透明度骤降的现象,除了气层本身较为清洁外,降水使表层土壤含水量较大,不利于起沙。王雪芹等<sup>[24]</sup>研究亦表明在一定风速状态下,沙漠地区表层土壤含水量是沙面处于相对稳定的重要因素。此外图 4 显示沙漠下垫面的 30 min 蒸散总量增加导致近地层水汽含量并未对大气透明度体现出明显的影响,所以即使试验地点靠近巴丹吉林沙漠最大的湖泊——诺尔图湖,湖泊蒸散导致近地层水汽含量的增加,依然无法对到达地表的太阳辐射产生明显的衰减作用。所以,除空气分子对太阳辐射的散射外,气溶胶粒子是削弱到达地表太阳辐射的主要影响因子,且在巴丹吉林沙漠,降水对大气沙尘气溶胶的清除过程有明显增加大气透明度,进而使到达地表太阳辐射能有增加的趋势。

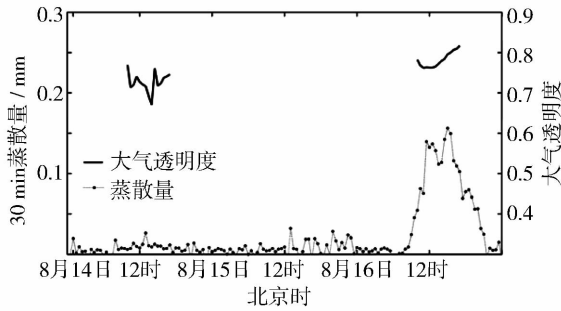


图4 中国西部巴丹吉林沙漠地区降水事件前后大气透明度和蒸散量的变化特征  
Fig. 4 Temporal distribution characteristics of atmospheric transparency and evapotranspiration before and after the rainfall events in Badain - Jaran Desert of western China

## 4 结 论

(1) 中国西部巴丹吉林沙漠地区夏季到达地表的太阳辐射以6月最大,主要是天气状况和太阳高度角共同作用的结果。

(2) 中国西部巴丹吉林沙漠地区夏季午后强烈的热对流引起的边界层沙尘气溶胶浓度的增加导致大气透明度在6月午后急剧下降,至北京时间16:00后又开始增大。

(3) 降水对沙尘气溶胶粒子的湿沉降过程有明显增大大气透明度的趋势,而降水事件后,巴丹吉林沙漠的强蒸散能力增加的近地层水汽含量并不能引起局地大气透明度的明显变化。所以,除太阳高度角外,巴丹吉林沙漠腹地影响夏季到达地表的太阳辐射的主要因子是沙尘气溶胶的浓度和降水事件。

### 参考文献:

- [1] 赵东,罗勇,高歌,等. 我国近50年来太阳直接辐射资源基本特征及其变化[J]. 太阳能学报,2009,30(7):947-952.
- [2] 王涛. 巴丹吉林沙漠形成演变的若干问题[J]. 中国沙漠,1990,10(1):29-40.
- [3] McKee E D. A Study of Global Sand Seas[M]. Washington: US Government Printing Office,1979. 12-67.
- [4] 张伟民,王涛. 巴丹吉林沙漠高大沙山形成演化初步探讨[J]. 中国沙漠,25(2):281-286.
- [5] 辛金元,张文煜,袁九毅,等. 沙尘气溶胶对直接太阳辐射的衰减研究[J]. 中国沙漠,2003,23(3):311-315.
- [6] 沈钟平,张华. 影响地面太阳辐射及其谱分布的因子分析[J]. 太阳能学报,2009,30(10):1389-1394.
- [7] 孔丹,何清,张瑞军,等. 塔克拉玛干沙漠腹地春季一次沙尘暴沙尘气溶胶的辐射特征[J]. 干旱气象,2008,26(2):36-40,62.
- [8] 邓祖琴,韩永翔,白虎志,等. 沙漠地区沙尘气溶胶含量变化的原因分析[J]. 中国环境科学,2009,29(12):1233-1238.
- [9] 李初,季国良. 敦煌地区大气气溶胶的辐射效应[J]. 太阳能学报,2004,25(3):320-324.
- [10] 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.
- [11] 王娜,张镭. 沙尘气溶胶辐射特性及其观测方法初步评述[J]. 干旱气象,2007,25(4):61-66.
- [12] 黄美元,王自发. 东亚地区黄沙长距离输送模式设计[J]. 大气科学,1998,22(4):625-637.
- [13] 刘健刚. 巴丹吉林沙漠湖泊和地下水补给机制[J]. 水资源保护,2010,26(2):18-23.
- [14] Liu B Y, Jordan R C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation[J]. Solar Energy, 1960(4):1-19.
- [15] 何洪林,于贵瑞,牛栋. 复杂地形条件下的太阳资源辐射计算方法研究[J]. 资源科学,2003,25(1):78-85.
- [16] 胡列群,吉海燕. 新疆区域大气透明度研究[J]. 中国沙漠,2008,28(2):332-337.
- [17] 余予,夏祥鳌,陈洪斌,等. 晴空大气太阳短波辐射观测与模式比较[J]. 太阳能学报,2007,28(3):233-240.
- [18] 季国良. 青藏高原主体的大气透明度特征[J]. 高原气象,1985,4(4):22-129.
- [19] Han Y, Dai X, Fang X, et al. Dust aerosol: A possible accelerant for an increasingly arid climate in North China[J]. Journal of Arid Environments, 2008,72(8):1476-1489.
- [20] 赵伟,刘红年,吴润. 中国春季沙尘气溶胶的辐射效应及对气候影响的研究[J]. 南京大学学报,2008,44(6):598-607.
- [21] 赵海波,郑楚光. 降水过程中气溶胶湿沉降的数值模拟[J]. 环境科学学报,2005,25(12):1590-1596.
- [22] 王超,王健捷,赵琳娜,等. 沙尘模式中湿沉降过程的参数化及模拟试验[J]. 中国沙漠,2005,25(6):845-852.
- [23] 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):322-329.
- [24] 王雪芹,王涛,蒋进,等. 古尔班通古特沙漠南部沙面稳定性研究[J]. 中国科学(D辑),2004,34(8):763-768.

## Analysis of Rainfall Influence on Solar Radiation near Land Surface in the Badain – Jaran Desert

WANG Xin, WEN Jun, LIU Rong, TIAN Hui, ZHANG Tangtang

(Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Cold and Arid Regions  
Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** By utilizing the global solar radiation data and precipitation observations collected in a land – atmosphere interaction field experiment in the Badain – Jaran Desert, we explored the influencing factors of local atmospheric transmittance derived from monthly mean diurnal variation of horizontal global solar radiation during the whole experiment. The results show that atmospheric transmittance was enlarged by the summer precipitation with wet removal of dust aerosol, and mean atmospheric transmittance in clear days was also increased by about 9.0% after rainfall event, which particularly affected the global solar radiation reaching to the land surface. Moreover comparative analysis of atmospheric transmittance before and after rainfall event show that the augment of moisture transfer from the surface caused by evapotranspiration after rainfall event has no significant effect on atmospheric transmittance. Therefore, the summer rainfall can lead to direct increase for atmospheric transmittance, and so solar radiation on the land surface in desert of western China would increase.

**Key words:** desert; solar radiation; transmittance; rainfall



(上接第 426 页)

## Characteristics of Extreme Drought Event Occurred from 1941 to 1943 in North China and Its Influence

DONG Anxiang, LI Yaohui, LIU Yuanpu

(Institute of Arid Meteorology, CMA, Key Open Laboratory of Arid Climatic Change  
and Disaster Reduction of CMA, Key Laboratory of Arid climatic Change and Reducing  
Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** The characteristics of the extreme drought event occurred from 1941 to 1943 in North China and its influence were analyzed in this paper. Results show that this drought event was the second extremely arid events during the Republic of China period, and He'nan Province was the center of this event. It occurred on interdecadal relatively warm period and persisted long time. This drought event influenced so many provinces, and disaster was so serious with locust occurrence. It made population suffer severe losses and food prices soaring as well as ecological environment deterioration.

**Key words:** North China; He'nan Province; extreme drought event; characteristic; influence