

文章编号: 0465-7942(2008)03-0069-10

青藏高原的散射辐射特征

乔艳丽¹, 古松^{1,4}, 唐艳鸿², 杜明远³, 赵亮⁴, 李英年⁴, 张晓春¹, 江莎¹, 高玉葆¹

(1. 南开大学 生命科学学院, 天津 300071; 2. 日本国立环境研究所, 东京 3050053;
3. 日本国立农业环境技术研究所, 东京 3058604; 4. 中国科学院 西北高原生物研究所, 西宁 810001)

摘要: 利用大量连续观测数据阐明了青藏高原散射辐射的时间变化特征, 揭示了晴空指数(R_s/R_0)与散射辐射的关系, 以及不同晴空指数条件下散射辐射随太阳高度角的变化. 散射辐射日最高值出现在午后, 年最高值出现在4月份. 日晴空指数小于0.3时, 太阳辐射基本以散射辐射形式到达地面, 日晴空指数大于0.3时, 散射辐射占总辐射的比例随晴空指数的增加而呈线性递减. 日晴空指数达到0.45左右时, 散射辐射占大气外界太阳辐射日总量的比例最高. 散射辐射随太阳高度角的升高呈指数递增, 但晴空指数在0.3~0.7范围内时, 散射辐射随太阳高度角的变化最为明显.

关键词: 总辐射; 散射辐射; 太阳高度角; 晴空指数

中图分类号: Q142.4

文献标识码: A

0 引言

太阳辐射是地球表层能量的主要来源, 是促进地球上的水、大气、生物活动和变化的主要动力, 是天气和气候形成的基础. 太阳辐射在穿越大气层时, 由于受到大气中空气分子、云以及气溶胶粒子等的吸收、反射和散射作用, 使到达地面的太阳辐射有了明显的减弱. 到达地面的太阳辐射是由直接辐射和散射辐射两部分组成. 以平行光的形式到达地面的太阳辐射称直接辐射, 经过大气散射后到达地面的太阳辐射为散射辐射. 散射辐射是到达地面太阳辐射中的重要组成部分, 它除受太阳高度角影响之外, 对大气中云、气溶胶、水汽含量以及地表状况等因子的变化异常敏感. Klein^[1](1977年)指出, 在北半球冬季的晴天, 到达阳坡的太阳辐射是相同坡度阴坡的3倍, 而在阴天时到达阴坡与阳坡的太阳辐射几乎相等. 散射辐射随着云量、气溶胶粒子的增加亦有增加的趋势^[2~4]. 此外, 散射辐射的变化与植物的光合作用又有着密切的关系, 从而影响生态系统的碳源状况^[5~10]. 尤其是自工业革命以来, 日趋严重的大气污染, 大气成分含量的改变, 气溶胶粒子增加等环境问题的出现对散射辐射带来了很大的影响, 已经引起国内外学者的高度重视. 国外对散射辐射研究的报道较多^[11~14]. 而我国对散射辐射的研究大多为短期或不连续观测^[4, 15, 16, 17].

青藏高原被誉为“世界第三极”, 总面积为2 500 000 km², 平均海拔高度在4 000 m以上^[18]. 青藏高原独特的地理地貌对我国乃至亚洲和世界气候都有着重要的影响^[19~22]. 其气候的特殊性首先体现在太阳辐射上, 青藏高原年均接受太阳总辐射量高达7 527.6 MJm⁻²^[23], 远高于同纬度低海拔地区^[24~25]. 研究青藏高原的辐射状况对于进一步研究区域气候乃至亚洲气候尤为重要. 但由于地理条件和观测仪器所限, 对散射辐射的研究大多属于短期观测, 翁笃鸣^[26](1984)对双湖地区夏季散射辐射进行过观测, 到目前为止, 很少见到长期连续观测散射辐射的研究报道^[27]. 研究表明, 云是影响散射辐射的重要因子之一, 由于高原上海拔高, 辐射强, 易发生对流, 云的生消十分迅速, 对于目测云带来很大的困难, 而且易受人为因素影响, 误差较大^[28], 此外, 定时观测亦不能真正反应一天中云的实际变化状况. Liu和Jordan^[29]1960年指出晴空指数(即到达地面的太阳辐射(R_s)与大气外界太阳辐射(R_0)的比值(R_s/R_0))是描述天空中云量变化较理

收稿日期: 2007-10-15

基金项目: 日本环境厅全球环境研究基金(S-1); 中科院百人计划(0429091211)

作者简介: 乔艳丽(1981-), 女, 河北保定人, 硕士研究生.

想的参数. 特别是随着观测辐射仪器水平的提高与普及, 全球太阳辐射观测数据迅速增加, 为计算晴空指数提供了基本保证. 这相对于以往利用目测云的数据讨论散射辐射更加具体化. 青藏高原 60% 以上的面积是高寒草甸, 从下垫面性质上考虑, 研究高原上高寒草甸地区的散射辐射特征具有很好的代表性. 该研究利用自动观测系统对高寒草甸接收的太阳总辐射和直接辐射进行连续监测, 利用观测数据计算 R_s/R_0 , 根据 R_s/R_0 的大小把天空状况划分为不同的等级进行整理分析. 本文旨在揭示青藏高原高寒草甸生态系统散射辐射的时间变化特征, 并阐明其影响因子, 探讨晴空指数与散射辐射的关系, 为全面揭示青藏高原的散射辐射状况提供理论依据.

1 试验地概况与研究方法

1.1 试验地概况

观测设置在青藏高原东北隅的中国科学院海北生态系统定位站(位于 $101^{\circ}18'E$, $37^{\circ}36'N$; 海拔 3 250 m, 简称海北站), 植被为青藏高原典型高寒草甸. 该地位于亚洲大陆腹地, 具明显的高原大陆性气候, 夏季风影响微弱. 受高海拔条件的制约, 冷暖二季明显, 干湿季分明; 年均太阳辐射为 $6\ 000\ \text{MJm}^{-2}$. 年平均气温 $-1.7\ ^{\circ}\text{C}$, 最热月 7 月平均气温为 $9.8\ ^{\circ}\text{C}$, 最冷月 1 月平均气温为 $-15.1\ ^{\circ}\text{C}$. 年均降水量为 580 mm, 植物生长季(5~9 月)的降水量占全年的 80%, 10 月至翌年 4 月长达 7 个月时间的降水仅占年降水量的 20%. 无绝对无霜期, 相对无霜期 20 d 左右, 冷季寒冷、干燥和漫长, 暖季凉爽、湿润和短暂.

1.2 数据的获取与处理

本实验利用同步自动跟踪辐射仪(CH-2; Kipp&Zonen Inc., Holland)测定太阳直接辐射和总辐射, 风速测定采用三杯风速计(034A-L and 014A; Campbell Scientific Inc. CSI), 温湿度计(HMP45C; CSI)测定相对湿度, 数据记录间隔为 1 min, 每 15 min 输出一次平均值. 仪器水平安装在视野开阔的草甸上. 利用数据采集仪(CR10; CSI)记录输出数据. 降水量使用翻斗式雨量计(TE525MM; CSI)测定, 并安装在距地面 70 cm 的高度上. 本文所用数据为 2004 年全年数据.

测定直接辐射的进光筒与太阳入射光线平行, 即辐射仪接收面垂直于太阳光线方向观测. 因此利用下式把直接辐射观测值换算为水平面上的辐射值.

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t$$

其中 h : 太阳高度角; φ : 地理纬度; δ : 赤纬; t : 时角.

则到达水平面的太阳直接辐射(R_b)为:

$$R_b = R_b' \sin h$$

R_b' 为直接辐射的观测值.

因此, 散射辐射(R_d)为总辐射(R_s)与直接辐射(R_b)之差, 即

$$R_d = R_s - R_b$$

2 结果与分析

2.1 晴空指数对散射辐射的影响

近年, 随着太阳辐射实测数据的增多, 很多研究采用晴空指数(R_s/R_0)来描述天空状况^[4, 29, 30], 而散射辐射主要受天空状况的影响, 为了描述不同天空状况下的散射辐射变化, 本文参考 Lam 等人^[31](1996)划分方法并结合高原特点, 利用日晴空指数(即到达地面的太阳总辐射与大气外界太阳辐射总量的比值)把天空状况划分为 $R_s/R_0 > 0.7$ (晴天)、 $0.3 < R_s/R_0 < 0.7$ (多云)和 $R_s/R_0 < 0.3$ (阴天).

青藏高原明显的季节变化使冬夏两季太阳辐射具有显著的差异. 本研究分别选取冬夏两季日 $R_s/R_0 > 0.7$ 和 $0.3 < R_s/R_0 < 0.7$ 的天气进行比较(图 1), 夏季为 6, 7, 8 月; 冬季为 12, 1, 2 月. 其中 $R_s/R_0 > 0.7$

的天气,冬季 17 d,夏季 18 d; $0.3 < R_s/R_o < 0.7$ 的天气,冬季 14 d,夏季 16 d。 $R_s/R_o > 0.7$ 时,无论冬季还是夏季,总辐射和直接辐射日变化均成倒 U 型,最高值出现在地方时 12 点左右(文中均为地方时),直接辐射接近总辐射,散射辐射的日变幅很小,午后的散射辐射略高于午前,散射辐射占总辐射的比例(R_d/R_s)较低,冬季和夏季 R_d/R_s 的平均值分别为 0.22 和 0.20。而 $0.3 < R_s/R_o < 0.7$ 时,直接辐射明显降低,散射辐射日变幅增大,且最高值明显出现在午后。散射辐射占总辐射的比例亦明显增加,冬季和夏季 R_d/R_s 的平均值分别为 0.50 和 0.43。无论晴天还是多云天气,冬季的 R_d/R_s 均较夏季稍高。

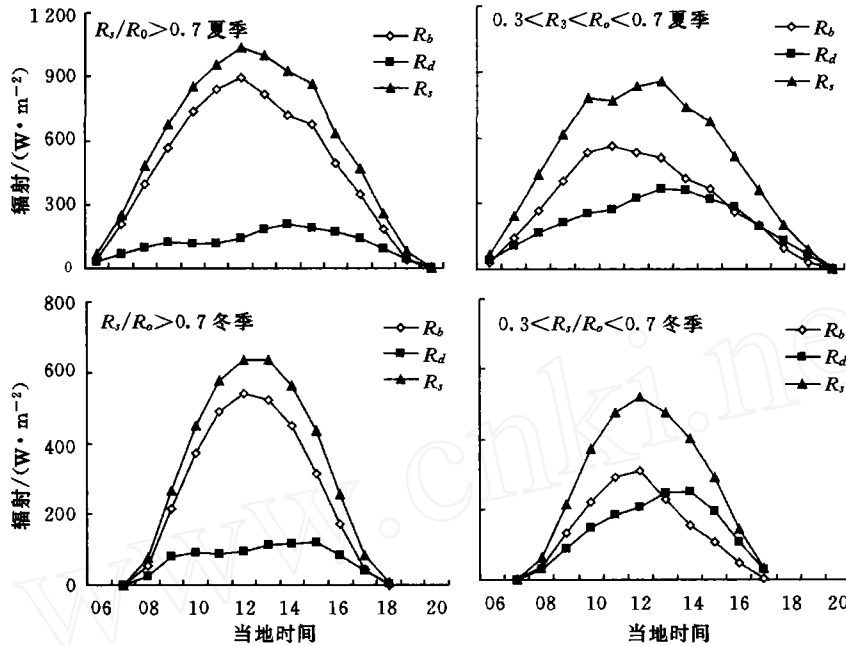


图 1 不同晴空指数条件下($R_s/R_o > 0.7$ 与 $0.3 < R_s/R_o < 0.7$)冬季和夏季总辐射(R_s)、直接辐射(R_b)、散射辐射(R_d)的日变化

Fig. 1 The diurnal variation of solar radiation (R_s), direct radiation (R_b) and diffuse radiation (R_d) for different daily clearness index ($R_s/R_o > 0.7$ and $0.3 < R_s/R_o < 0.7$) in winter and summer

夏季, $R_s/R_o > 0.7$ 的总辐射和直接辐射最高值分别比冬季高出将近一倍,然而散射辐射日总量的差异并不是很明显,夏季与冬季散射辐射的日总量平均值分别是 $6.2 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$, $3.1 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 。相反, $0.3 < R_s/R_o < 0.7$ 时,夏季与冬季的散射辐射相差很大,夏季明显高于冬季,夏季与冬季散射辐射日总量平均值分别为 $11.2 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$, $5.4 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ 。

2.2 散射辐射的时间变化

2.2.1 散射辐射的日变化:以 1、4、7、10 月的观测统计值分别代表一年中冬季、春季、夏季、秋季四个不同季节的辐射变化状况。为了便于比较,只选择日 $R_s/R_o > 0.7$ 的数据进行分析(其中 1 月 7 d、4 月 18 d、7 月 8 d、10 月 13 d)(图 2)。从图中可以看出,在不同季节中,总辐射日变化趋势基本相同,最高值出现在 12 点左右(图 2a)。总辐射年最高值出现在夏季,最低值出现在冬季。4 月和 7 月的总辐射明显高于 1 月和 10 月。各季节散射辐射的日最高值均出现在午后(1 月、7 月和 10 月尤为明显),而且一年中 4 月份的散射辐射明显高于其它季节(图 2b)。从图 2c 可以看出, R_d/R_s 具有明显的日变化特征,正午最低,早晚偏高,即 R_d/R_s 随着太阳高度角的升高而降低。在清晨和傍晚太阳高度角较低时,夏季的 R_d/R_s 值明显低于冬季。然而正午前后,夏、秋和冬季的 R_d/R_s 值并无显著差异,但春季(4 月)的 R_d/R_s 值却明显高于其它三个季节。从统计结果来看,1、4、7、10 四个月 R_d/R_s 的平均值分别为 0.23、0.34、0.17 和 0.19,4 月份的值最高,而 7 月份的值最低。从图中可以看出,虽然 7 月太阳总辐射高于 4 月,但散射辐射值却明显低于 4 月份。

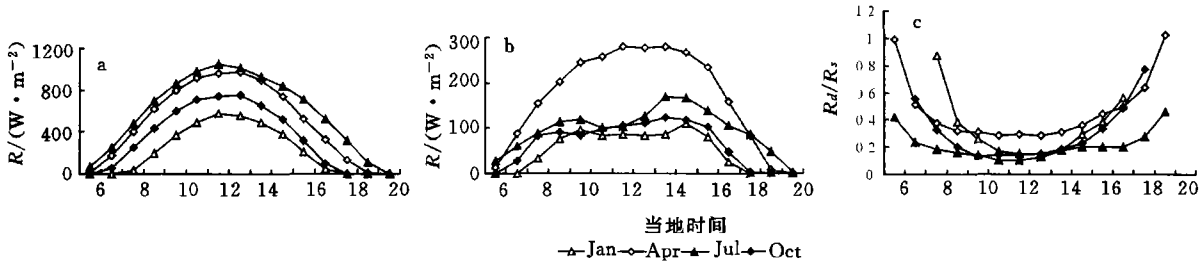


图 2 不同季节日 R_s/R_0 大于 0.7 时总辐射(R_s)和散射辐射(R_d)以及 R_d/R_s 的日变化

Fig. 2 Diurnal variation of solar radiation (R_s) and diffuse radiation (R_d) and R_d/R_s in different seasons

2.2.2 散射辐射的年变化: 散射辐射的年变化如图 3 所示, 一年中散射辐射从 1 月份开始增加, 到 4 月份散射辐射达到最高值, 月平均散射辐射总量可达 331.0 MJm^{-2} , 约占全月总辐射的 45%。此后, 散射辐射逐渐下降, 其最低值出现在 11 月, 月平均散射辐射总量约为 91.7 MJm^{-2} , 只占全月总辐射的 23%。年平均散射辐射总量约占总辐射的 40%。

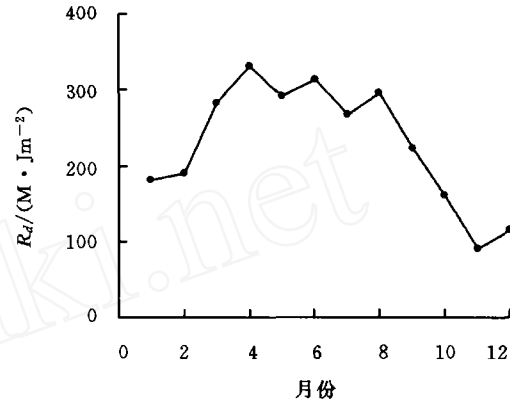


图 3 散射辐射(R_d)年变化

Fig. 3 The annual variation of diffuse radiation (R_d)

2.3 散射辐射与晴空指数的关系

天空状况对到达地面的太阳总辐射和散射辐射有很大影响. 通常情况下, 晴朗少云时, 日 R_s/R_0 增大, 散射辐射较弱, 因此日 R_d/R_s 较小. 反之, 当阴天或天空多云时, 日 R_s/R_0 降低, 而日 R_d/R_s 增加(图 4a). 从图中可以看出, 当 R_s/R_0 接近或小于 0.3 时, R_d/R_s 几乎等于 1, 即到达地面的太阳辐射基本上为散射辐射; 当 R_s/R_0 大于 0.8 时, R_d/R_s 非常小. 当 R_s/R_0 在 0.3 和 0.8 之间变化时, R_d/R_s 随着 R_s/R_0 的增加而呈直线递减(图中实线为拟合曲线).

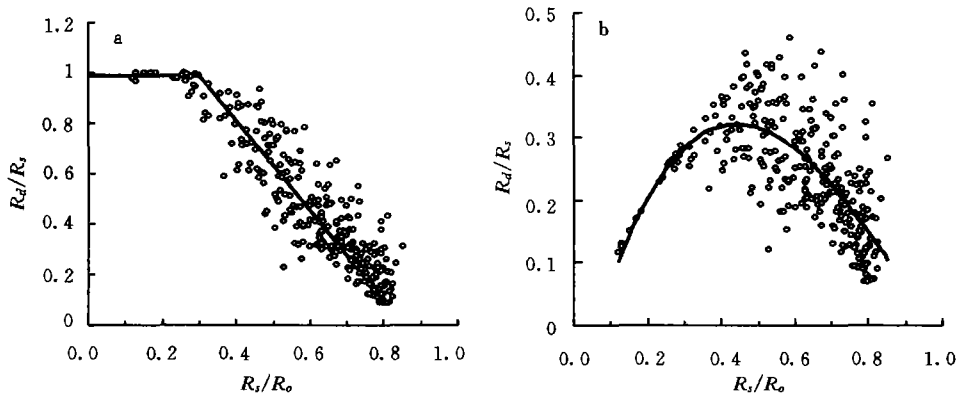


图 4 a: 日晴空指数(R_s/R_0)随散射辐射与总辐射日总量比值(R_d/R_s)的变化

b: 日晴空指数(R_s/R_0)随散射辐射与大气外界太阳辐射日总量比值(R_d/R_0)的变化

Fig. 4 a: The relationship between daily R_s/R_0 and R_d/R_s

b: The relationship between daily R_s/R_0 and R_d/R_0

散射辐射与大气外界太阳辐射的比值(R_d/R_0)表示大气对散射辐射的贡献(相对于大气外界太阳辐射而言), R_d/R_0 与 R_s/R_0 的关系如图 4b 所示, 实线为拟合曲线. 根据统计结果, 高原上日 $R_s/R_0 < 0.3$ 时, 日 R_d/R_0 随着日 R_s/R_0 的增加基本呈直线增加, 并且, 直线斜率基本为 1, 即 R_d/R_0 基本等于 R_s/R_0 . 当日 R_s/R_0 从 0.3 增加到 0.45 左右时, R_d/R_0 曲线呈缓慢增加趋势, R_d/R_0 达到最大值, 然后, 开始变的较离

散. 此后, 随着日 R_s/R_0 的增大, R_d/R_0 开始减小.

2.4 散射辐射与太阳高度角的关系

散射辐射的变化除了受晴空指数影响之外, 也与太阳高度角有关. 通常, 太阳高度角增大时, 到达近地面的散射辐射也相应地增强. 相反, 太阳高度角较低时, 散射辐射也弱. 但在不同的晴空指数条件下, 散射辐射随太阳高度角变化的速率不同. 为了更好的讨论在不同晴空指数时散射辐射与太阳高度角的关系, 在上述划分 R_s/R_0 的基础上, 把 $0.3 < R_s/R_0 < 0.7$ 的天空状况又划分为 $0.5 < R_s/R_0 < 0.7$ 和 $0.3 < R_s/R_0 < 0.5$ 两个等级, 共为四个范围, 分别为: $R_s/R_0 > 0.7$; $0.5 < R_s/R_0 < 0.7$; $0.3 < R_s/R_0 < 0.5$ 与 $R_s/R_0 < 0.3$. 图 5 给出了上述不同晴空指数条件下散射辐射随太阳高度角的变化曲线(由于观测数据较多, 为清晰起见, 图中只给出了拟合曲线), 由图可知, 当 $R_s/R_0 > 0.7$ 时, 散射辐射随着太阳高度角的升高而增加较缓慢, 当晴空指数在 $0.3 \sim 0.7$ 范围变化时, 散射辐射随太阳高度角的升高而增加较快, R_s/R_0 在 $0.5 \sim 0.7$ 范围变化时, 散射辐射随太阳高度角的变化最大. 然而, 当 $R_s/R_0 < 0.3$ 时, 散射辐射随着太阳高度角的升高而增加的速率反而降低. 即在相同太阳高度角时, 晴空指数在 $0.3 \sim 0.7$ 时散射辐射明显高于 $R_s/R_0 > 0.7$ 或 $R_s/R_0 < 0.3$ 时的散射辐射.

3 讨 论

散射辐射主要受太阳高度角和大气透明度的影响. 通常, 散射辐射随着太阳高度角的增高而增加. 而大气透明度主要受云、水汽和气溶胶的影响, 对散射辐射的影响比较复杂, 并不是简单的增加与降低关系.

3.1 散射辐射的时间变化

一天中, 由于总辐射随太阳高度角的升高而增大. 因此, 散射辐射随太阳高度角的升高也呈增加趋势, 晴天时散射辐射日变化的最高值通常出现在太阳高度角最高的正午左右^[17, 26, 34]. 而本研究中的晴天散射辐射日最高值均出现在地方时 13~15 点左右(图 1 和图 2b), 比上述报道结果出现的时间延后. 这是由于高原的特殊环境造成的, 高原上空大气较洁净, 正午前后太阳高度角虽然达到最高值, 散射辐射并未出现最高值. 但在午后, 往往高原上对流运动增强^[35], 常常形成对流云, 是导致午后散射辐射增加的主要原因, 尤其夏季最为明显. 此外, 通过对流把底层的水汽、尘埃等输送到高层大气中, 也可增加散射辐射. 从图 5 可以得知, 即使在相同的太阳高度角时, R_s/R_0 在 $0.5 \sim 0.7$ 范围内散射辐射值最高.

一年中, 总辐射、直接辐射月最高值均出现在夏季, 最低值出现在冬季(图 2). 散射辐射低值出现在太阳总辐射较弱的季节, 较弱的太阳辐射导致了较低的散射辐射. 然而, 散射辐射月最高值出现在 4 月, 达 330.1 MJm^{-2} . 而塔克拉玛干沙漠的满西异井散射辐射 4 月的散射辐射约为 370 MJm^{-2} ^[16], 比海北站的散射辐射要高, 这主要和两地不同的下垫面有关系: 海北站地面的枯草相对沙漠能较好的阻止沙尘的飞扬; 塔克拉玛干沙漠中午过后温度升高快, 湍流易把沙尘带入空气中, 使空气中气溶胶粒子增多, 从而导致散射辐射增加. 青藏高原上 R_d/R_s 年平均值约为 40%, 比全国 R_d/R_s 平均值(46%)低, 我国东部地区平均为 49%^[32], 贵州地区可达 63%^[33].

高原上散射辐射的年最高值出现在 4 月, 这与很多报道的结果相同^[16, 34, 36]. 其原因是由于 4 月降水较

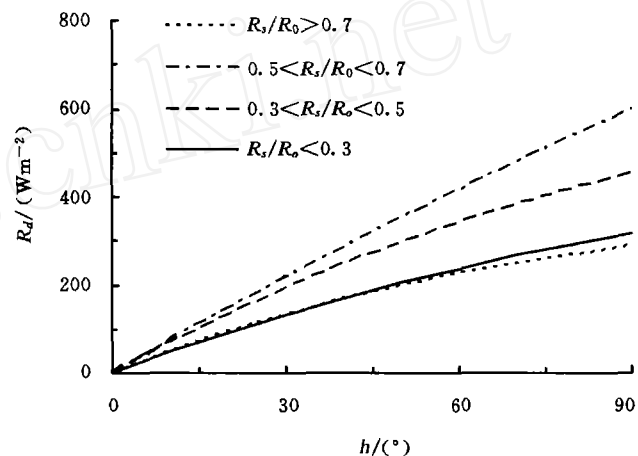


图 5 不同晴空指数 (R_s/R_0) 下散射辐射 (R_d) 与太阳高度角 (h) 的关系

Fig. 5 The relationship between diffuse radiation (R_d) and solar elevation (h) in different R_s/R_0 conditions

少,土壤水分低,辐射较强(图 2a),空气干燥(图 6b),风速较大(图 6a),并且地面植被尚未返青.虽然土壤水分、风速等因子对散射辐射没有直接的影响,但地面的浮尘易被输送到空中,使大气中的尘埃含量增加. 俎瑞平等^[38]曾指出较大的风速可吹起干燥地表的沙尘,并且风速与大气中的输沙量成正相关关系.这与韩永翔等^[39](2004)报道青藏高原沙尘的时间分布特征相一致,加之较强的对流,大气中的尘埃含量比其它季节多,导致 4 月份散射辐射高于其它季节.5 月份虽然风速较大,太阳辐射比 4 月份强,但是由于降水开始增加(图 6b),土壤含水量高^[40],植被开始返青,地面的浮尘不易进入大气,所以散射辐射比 4 月低.虽然 6 月份太阳辐射最强,然而从 6 月份开始植被覆盖度迅速增加^[41],此外,高原上的降水主要集中在 5 月~9 月的生长季,空气相对湿度较高(图 6b),土壤也保持较高含水量,植被状况较好,而相对丰沛的降水对大气中的气溶胶粒子又起到较好的清除作用^[4].因此高寒草甸的散射辐射年变化受气候、植被等状况的综合影响.

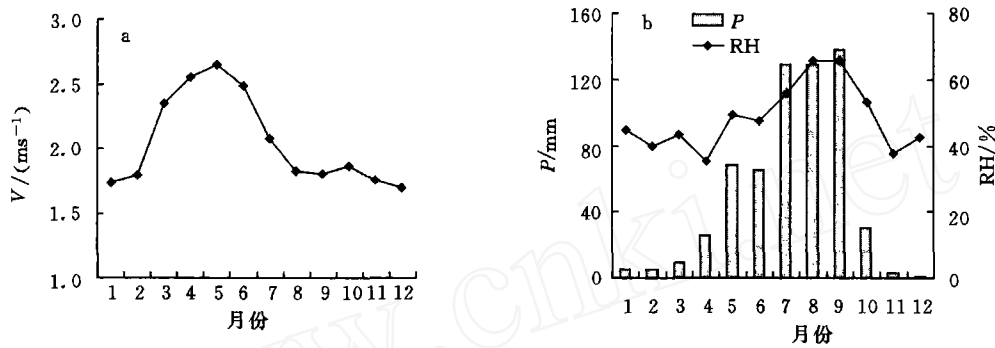


图 6 风速(V)、降水(P)和空气相对湿度(RH)的年变化

Fig. 6 The annual variation in wind speed (V), precipitation (P) and relative humidity (RH)

3.2 影响散射辐射的因子

3.2.1 晴空指数:云体中的水滴、冰晶是影响散射辐射的直接因子^[17].关于这方面的研究报道已经很多,但是由于目前云的观测主要是定时目测,而且高原上的云瞬息万变,很难准确地对其进行量化.而晴空指数能够很好地反映云的变化状况^[42],是定量探讨天空状况对散射辐射影响的理想参数.高原上空大气中尘埃较少,太阳辐射穿过地球大气的路径也较短,因此晴朗少云的天气,晴空指数较高,高原上的散射辐射比同纬度低海拔地区要低.然而高原上温度变化剧烈,特别是在植物生长季节的 5~9 月之间,空气中水汽含量较高,午后容易形成热对流,为云的形成提供了条件,尤其是青藏高原东北部地区云量夏季最多,春季次之,秋冬季最少^[43].

日 $R_s/R_o > 0.7$ 时,5~9 月到达地面的太阳总辐射非常接近于理想大气总辐射(R_i)(图 7a)(理想大气总辐射计算参照王炳忠文献^[44]).到达地面的太阳总辐射占理想大气辐射的比例(R_o/R_i)高达 90.6%,日总量仅相差 3.1 MJm^{-2} .日总量差值即是高原上空气溶胶粒子、水汽以及云对辐射的吸收、反射和散射等造成的.由于二者差值较小,说明在日 $R_s/R_o > 0.7$ 时大气中气溶胶粒子、水汽以及云对太阳辐射的减弱较少.然而在相同季节, $0.3 < R_s/R_o < 0.7$ 时, R_s 要比 R_i 低的多, R_o/R_i 仅为 72.1%,尤其以午后更为明显(图 7b),说明在生长季节云和水汽变化对 R_s/R_o 的影响尤为明显,是影响高寒草甸生态系统散射辐射变化的主导因子.

从图 5 结果可以看出,高原上散射辐射高值出现在 R_s/R_o 为 0.3~0.7 的范围内.根据统计结果,晴空指数在 0.45 左右时,散射辐射占大气外界太阳辐射的比例达到最大(图 4b).这是由于晴空指数小于 0.3 时,大气对太阳总辐射的减弱也非常明显,导致散射辐射也相应减弱.而晴空指数大于 0.7 时,大气中的气溶胶粒子和水汽含量比较少,对太阳辐射的散射作用减小,从而使散射辐射降低,该结论与 Lam(1996)在香港地区观测的结果相似.当晴空指数小于 0.3 时,到达地面的太阳辐射基本为散射辐射,这一点从图 4a 的结果也可以看出,即 $R_d/R_s = 1$.该结果与 Lam^[31](1996)报道的结果有相同趋势,只是高原上的值为 0.3,

比 Lam^[31]的结果(0.15)略高. 另外,在晴空指数为 0.3~0.8 之间时, R_d/R_s 随晴空指数的增加而直线递减(图 4a),这与 Zhang^[47](2004)报道上海,南京,杭州地区的结果类似. 该结果对利用遥感技术测定高原辐射状况具有重要参考价值,因为在遥感测量中,散射辐射和总辐射之比是定量描述大气状况的有效途径^[45].

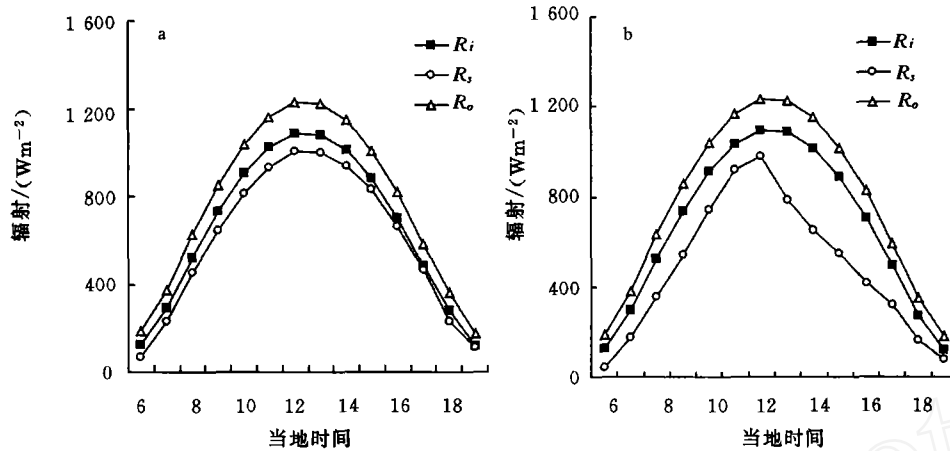


图 7 生长季(5~9月)不同日晴空指数的大气外界辐射(R_o)、地面总辐射(R_s)和理想大气总辐射(R_i)的日变化(a: $R_s/R_o > 0.7$; b: $0.3 < R_s/R_o < 0.7$)

Fig. 7 The diurnal variation in R_o , R_s , R_i in different weather conditions during growing season (a: $R_s/R_o > 0.7$; b: $0.3 < R_s/R_o < 0.7$)

3.2.2 太阳高度角与大气质量: 散射辐射随太阳高度角的增加而增大(图 5),该结论与 Paltridge^[46](1976)、翁笃鸣^[26](1984)、李韧^[17](2004)等的报道结果相一致. 然而,本研究考虑了不同天空状况下散射辐射随太阳高度角的变化. 不同的晴空指数,散射辐射随太阳高度角变化的速率有很大差异(图 5). 由图可知,在相同太阳高度角情况下,晴空指数在 0.3~0.7 时,散射辐射值较高,当晴空指数小于 0.3 或大于 0.7 时,散射辐射值较低,这与图 4b 的结果相一致,即晴空指数在 0.45 左右时散射辐射值最大. 相同太阳高度角,不同曲线之间的差值即为晴空指数对散射辐射的影响,而其差值随着太阳高度角的升高而增大. 说明随着太阳高度角的升高,散射辐射对晴空指数的变化较敏感. 值得注意的是,对于晴空指数小于 0.3 和大于 0.7 这两种完全不同的天气情况,其散射辐射随太阳高度角的变化曲线比较相近,可能是晴空指数对太阳高度角的变化不敏感,此时,散射辐射随太阳高度角的升高而增加,主要是由于太阳总辐射值增加而使散射辐射相应增加的结果. 此外,在高原上,太阳辐射穿越的地球大气质量较小(本研究仅相当于海平面大气质量的 2/3),因此,在晴空指数大于 0.7 时,高原上散射辐射随太阳高度角的变化比低海拔地区缓慢,翁笃鸣^[26,47](1984)的研究结果也证实了这一特征.

大气质量与太阳高度角在理论上存在一定的关系,根据 El-Shazly^[48](1997)计算公式,并考虑试验地的实际海拔高度影响,图 8b 表明,随着太阳高度角的升高大气质量呈递减规律. 在大气质量小于 4 的范围内,大气质量随太阳高度角的变化较快($15^\circ \sim 75^\circ$). 而当大气质量大于 4 时,大气质量随太阳高度角的变化较缓慢.

晴朗少云时,大气质量越大,对太阳辐射的吸收、反射和散射就越严重,到达地面的太阳辐射就越少,而散射辐射占太阳总辐射的比例就会增加(图 2c). 然而,对于多云天气而言,由于大气中云和气溶胶粒子的作用,使大气质量对散射辐射的影响变得较为复杂. 图 8a 给出了不同天空状况下散射辐射与大气质量关系的拟合曲线(晴空指数分别为 $R_s/R_o < 0.3$; $0.3 < R_s/R_o < 0.5$; $0.5 < R_s/R_o < 0.7$; $R_s/R_o > 0.7$). 散射辐射随着大气质量的增加而降低,这与李韧等人^[17](2004)报道敦煌晴天的结果有相同趋势. 然而,由于本研究考虑了不同晴空指数以及海拔高度对大气质量的影响,所以散射辐射随大气质量的变化比敦煌地区快. 对于不同的天空状况而言,散射辐射与大气质量的关系略有差异(图 8a). 结果表明,在大气质量小于 4 的范围内, $0.3 < R_s/R_o < 0.7$ 时,晴空指数越大,散射辐射相对于大气质量的变化越迅速,这是由于云和气

溶胶粒子对散射辐射的影响. 而对于 $R_s/R_o > 0.7$ 和 $R_s/R_o < 0.3$ 的情况, 由于云和气溶胶粒子过少和过多, 散射辐射对于大气质量的变化相对较缓慢. 总体而言, 高原上散射辐射的变化主要集中在大气质量小于 4 的范围内, 且随大气质量的增加而迅速降低, 当大气质量超过 4 时, 散射辐射变化就比较小了.

4 小 结

本研究初步揭示了青藏高原高寒草甸生态系统的散射辐射特征, 同时探讨了散射辐射与晴空指数的关系. 由于太阳辐射对生态系统的光合作用非常重要, 该研究为进一步探讨高原的辐射状况对高寒草甸生态系统碳收支提供了重要参考依据, 同时亦为利用遥感技术和数学模型研究高原地区的辐射状况提供了理论基础. 通过本研究可得出以下结论:

- (1) 青藏高原高寒草甸生态系统的散射辐射日最高值出现在午后, 比低海拔地区滞后; 散射辐射的年最高值出现在 4 月.
- (2) 晴空指数的变化对散射辐射有较大影响. 当日晴空指数在 0.45 左右时, 散射辐射占大气外界太阳辐射总量的比例最高, 即对散射辐射的贡献最大, 晴空指数过高或过低的情况下散射辐射反而减弱. 日晴空指数大于 0.3 时, 散射辐射占总辐射总量的比例随晴空指数的增加而线性降低.
- (3) 散射辐射随太阳高度角升高而增大, 但在不同的晴空指数下其增加速率不同, 晴空指数在 0.3~0.7 范围时散射辐射随太阳高度角的变化较快.

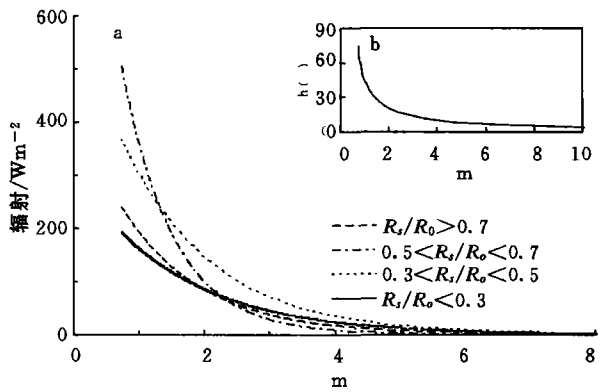


图 8 a: 不同晴空指数(R_s/R_o)下散射辐射(R_d)与大气质量(m)的关系
 b: 大气质量(m)与太阳高度角(h)的关系
 Fig. 8 a: The relationship between diffuse radiation (R_d) and air mass (m) in different R_s/R_o conditions
 b: The relationship between air mass (m) and solar elevation (h)

参 考 文 献

- 1 Klein S A. Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces[J]. Solar Energy, 1977, 19: 325-329.
- 2 Suraqui S, Tabor H, Klein W H, et al. Solar radiation changes at Mt. St. Katherine after fortyyears[J]. Solar Energy, 1974, 16: 155-158.
- 3 Abakumova G M, Feigelson E M, Russak V. Evaluation of long-term changes in radiation, cloudiness and surface temperature on the territory of the former Soviet Union[J]. Journal of Climate, 1996, 9: 1 319-1 327.
- 4 Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M. Analysis of 40 year records of solar radiation data in Shanghai, Nanjing and Hangzhou in Eastern China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2004, 78: 217-227.
- 5 Hollinger D Y, Kelliher F M, Byers J N. Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere[J]. Ecology, 1994, 75: 134-150.
- 6 Hollinger D Y, Kelliher F M, Schulze E D. Forest-atmosphere carbon dioxide exchange in eastern Siberia[J]. Agric For Meteorol, 1998, 90: 291-306.
- 7 De Pury D G G, Farguher G D. Simple scaling of photosynthesis from leaves to canopies without the errors of big-leaf models[J]. Plant Cell and Environment, 1997, 20: 537-557.
- 8 Michael L R derick, Graham D Farquhar, Sandra L Berry, et al. On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation[J]. Oecologia, 2001, 129: 21-30.
- 9 Yamasoe M, Von Randow C, Manzi A, et al. Effect of smoke on the transmissivity of photosynthetically active radiation inside the canopy[J]. Atmos Chem Phys Discuss, 2005, 5: 5 909-5 934.
- 10 Laurent Misson, Melissa Lunden, Megan Mckay, et al. Atmospheric aerosol light scattering and surface wetness in-

- fluence the diurnal pattern of net ecosystem exchange in a semi-arid ponderosa pine plantation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 129: 69—83.
- 11 Jan Asle Olseth, Arvid Skartveit. High latitude global and diffuse radiation estimated from METEOSAT data[C]. Presented at the 2nd European Conference on Applied Climatology, Austria: [s. n.], 1998: 19—23.
- 12 Michael L R derick. Estimating the diffuse component from daily and monthly measurements of global radiation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 95: 169—185.
- 13 Coops N C, Waring R H, Moncrieff J B. Estimating mean monthly incident solar radiation on horizontal and inclined-slopes from mean monthly temperatures extremes[J]. *Int J Biometeorol*, 2000, 44: 204—211.
- 14 Iziomon M G, Aro T O. On the annual and monthly mean diurnal variations of diffuse solar radiation at a meteorological station in west Africa[J]. *Meteorol Atmos Phys*, 1999, 69: 223—230.
- 15 王尧奇, 顾林康, 王文华, 等. 中国西部干旱地区晴天散射辐射与大气质量的关系[J]. *高原气象*, 1989, 8(2): 174—180.
- 16 何清, 徐俊荣. 塔克拉玛干沙漠散射辐射观测研究[J]. *干旱区地理*, 1996, 19(4): 38—44.
- 17 李韧, 季国良, 杨文, 等. 敦煌地区晴空散射辐射影响因子的统计特征[J]. *高原气象*, 2004, 23(1): 116—122.
- 18 Zheng Du. Mountain geocology and sustainable development of the Tibetan Plateau[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- 19 Fujinami H, Yasunari T. The seasonal and intraseasonal variability of diurnal cloud activity over the Tibetan Plateau[J]. *J Meteor Soc Jpn*, 2001, 79(6): 1 207—1 227.
- 20 Bollasina M, Benedict S. The role of the Himalayas and the Tibetan Plateau with the Asian monsoon system[J]. *Bulletin of the American Meteorological*, 2004, 7: 1 001—1 004.
- 21 Lau K M, Kim M K, Kim K M. Asian summer monsoon anomalies induced by aerosol direct forcing: the role of the Tibetan Plateau[J]. *Climate Dynamics*, 2006, 26: 855—864.
- 22 余锦华, 建军. 华北汛期降水与青藏高原地表温度的相关分析探讨[J]. *水文*, 2006(1): 12—23.
- 23 徐玲玲, 张宪洲, 石培礼, 等. 青藏高原高寒草甸生态系统净二氧化碳交换量特征[J]. *生态学报*, 2005, 25(8): 1 948—1 952.
- 24 周晋, 晏刚, 吴业正. 北京地区的太阳辐射分析. *太阳能学报*[J]. 2005, 26(5): 712—716.
- 25 王建源, 冯建设, 袁爱民. 山东省太阳辐射的计算及分布. *气象科技*[J]. 2006, 34(1): 98—101.
- 26 翁笃鸣, 张文宗. 青藏高原夏季的散射辐射. *南京气象学院学报*[J]. 1984, 1: 28—35.
- 27 李韧, 季国良, 杨文. 五道梁地区总辐射的年际变化. *高原气象*[J]. 2005, 24(2): 173—177.
- 28 蒋海安. 用相同观测方法提高云量观测质量. *陕西气象*[J], 2004, 4: 5.
- 29 Liu B Y H, Jordan R C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation[J]. *Solar Energy*, 1960(4): 1—19.
- 30 Tian Y Q, Davies-Colley R J, Gong P, et al. Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 109: 67—74.
- 31 Joseph C Lam, Danny H W Li. Correlation between global solar radiation and its direct and diffuse components[J]. *Building and Environment*, 1996, 31: 527—535.
- 32 祝昌汉. 我国散射辐射的计算方法及其分布[J]. *太阳能学报*, 1984, 5(3): 242—249.
- 33 于俊伟. 贵阳市光资源特征[J]. *贵州气象*, 1999, 23: 46—49.
- 34 傅炳珊, 陈渭民, 马丽. 利用 MODTRAN 3 计算我国太阳直接辐射和散射辐射[J]. *南京气象学院学报*, 2001, 24(1): 51—58.
- 35 朱国富, 陈受钧. 1995 夏季青藏高原上及其邻域的对流活动[J]. *高原气象*, 1999, 18: 9—19.
- 36 李锡福, 唐红玉, 汪青春. 西宁地区太阳辐射能特征分析[J]. *青海科技*, 2000, 7(4): 27—32.
- 37 方小敏, 韩永翔, 马金辉, 等. 青藏高原沙尘特征与高原黄土堆积——以 2003—03—04 拉萨沙尘天气过程为例[J]. *科学通报*, 2004, 49(11): 1 084—1 090.
- 38 俎瑞平, 张克存, 屈建军. 塔克拉玛干沙漠风沙活动强度特征[J]. *地理研究*, 2005, 24(5): 699—707.
- 39 韩永翔, 奚晓霞, 宋连春, 等. 青藏高原沙尘及其可能的气候意义[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(5): 588—592.
- 40 Song Gu, Yanhong Tang, Xiaoyong Cui. Energy exchange between the atmosphere and a meadow ecosystem on the

- Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 129: 175–185.
- 41 师生波, 贲桂英, 韩发, 等. 青藏高原地区矮嵩草草甸植物群落生长分析[J]. *生态学报*, 2001, 21(6): 871–876.
- 42 Black J N. The distribution of solar radiation over the earth's surface[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 1956, 7(2): 165–189.
- 43 陈少勇, 董安祥, 王丽萍, 等. 祁连山区夏季总云量的气候变化与异常研究[J]. *南京气象学院学报*, 2005, 28(5): 617–625.
- 44 王炳忠. 太阳辐射在理想大气中的衰减[J]. *太阳能学报*, 1982, 3(4): 374–379.
- 45 王喜世, 朱永豪. 辐照度法在大气监测中的应用研究[J]. *量子电子学报*, 2001, 18(2): 188–192.
- 46 Paltridge G W, Platt C M R. *Radiative processes in meteorology and climatology*[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing company, 1977.
- 47 翁笃鸣. *中国辐射气候*[M]. 北京: 气象出版社, 1997.
- 48 El-Shazy S M. A study of atmospheric transparency over qena/upper Egypt[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1997, 94: 259–273.

Characteristics of Diffuse Radiation on the Qinghai-Tibetan Plateau

Qiao Yanli¹, Gu Song^{1,4}, Tang Yanghong², Du Mingyuan³, Zhao Liang⁴,
Li Yingnian⁴, Zhang Xiaochun¹, Jiang Sha¹, Gao Yubao¹

(1. *College of Life Sciences, Nankai University, Tianjin, 300071, China;*

2. *National Institute for Environmental Studies, Tokyo 3050053, Japan;*

3. *National Institute for Agro-Environmental Sciences, Tokyo 3058604, Japan;*

4. *Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China*)

Abstract: We revealed the temporal variation in diffuse radiation (R_d), and examined the effect of clearness index (R_s/R_o) on R_d on the Qinghai-Tibetan Plateau using the data observed in 2004. The daily maximum R_d appeared in afternoon due to the relatively strong convection, and the annual maximum value was found in April. When R_d/R_s is less than 0.3, the solar radiation (R_s) almost equals R_d , while the R_d/R_s decreased linearly with the increase in R_d/R_s when R_d/R_s is greater than 0.3. The ratio of R_d to extraterrestrial solar radiation (R_o) (R_d/R_o) reached its peak value when the R_d/R_s was around 0.45. R_d increased exponentially with the increase in solar elevation, while the increase in R_d with solar elevation was rapid when the R_d/R_s ranged from 0.3 to 0.7.

Key words: solar radiation; diffuse radiation; solar elevation; clearness index