

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20150360

# 元江干热河谷太阳辐射各分量及反照率变化特征

费学海<sup>1,2</sup> 张一平<sup>1</sup> 宋清海<sup>1</sup> 李培广<sup>1,3</sup> 刘运通<sup>1</sup> 金艳强<sup>1,2</sup> 李敬<sup>1,2</sup>  
林友兴<sup>1,2</sup> 张树斌<sup>1,2,3</sup>

(1 中国科学院热带森林生态学重点实验室 2 中国科学院大学 3 中国科学院西双版纳热带植物园元江干热河谷生态站)

**摘要:**为了探讨干热河谷太阳辐射的特征,本文利用元江干热河谷稀树灌草丛通量塔上连续2年(2013年5月至2015年4月)辐射数据,对元江干热河谷稀树灌草丛植被林冠上太阳辐射(总辐射( $Q$ )、反射辐射( $Q_{\alpha}$ )、有效辐射( $I$ )、净辐射( $R_n$ ))的日变化、季节和年变化特征进行分析,探讨了反照率( $\alpha$ )和 $I$ 变化特征及其原因。结果表明:该区域 $Q$ 、 $Q_{\alpha}$ 、 $I$ 、 $R_n$ 的年均辐射值分别为6 210.2、807.9、1 822.9、3 578.7 MJ/(m<sup>2</sup>·a)。雨季各辐射总量占年总量比例分别为52.9%、56.3%、39.1%、59.2%,除雨季 $I$ 占全年的比例小于干季外,其他3个辐射分量占全年的比例均是干季<雨季。 $\alpha$ 由于受雨季叶面积指数(LAI)增大和林冠郁闭度增加的影响,其季节变化特征表现为干季<雨季,这是生态系统为缓解该区域尖锐的水热矛盾而长期进化的结果。 $Q_{\alpha}$ 、 $I$ 和 $R_n$ 年分配率分别为13.0%、29.8%、56.9%,其中 $Q_{\alpha}$ 和 $R_n$ 分配率的季节变化均表现为干季<雨季,而 $I$ 的分配率特征与 $Q_{\alpha}$ 和 $R_n$ 的相反。干季 $I$ 分配率的增加降低了地面和林冠温度,减少了生态系统水分流失,削弱了研究区域干季时水分的胁迫效应,避免了森林植被因水力结构破坏而引发的碳饥饿所导致的死亡,有利于元江干热河谷稀树灌草丛植被在干季生存和维持该生态系统平衡。由于元江干热河谷 $Q$ 和 $R_n$ 都较大且该地区降雨少,故人类活动及气候变化更容易影响该地区的生态系统平衡。

**关键词:**太阳辐射;反照率;干热河谷植被

**中图分类号:**S716;S161.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1522(2016)03-0001-10

FEI Xue-hai<sup>1,2</sup>; ZHANG Yi-ping<sup>1</sup>; SONG Qing-hai<sup>1</sup>; LI Pei-guang<sup>1,3</sup>; LIU Yun-tong<sup>1</sup>; JIN Yan-qiang<sup>1,2</sup>; LI Jing<sup>1,2</sup>; LIN You-xing<sup>1,2</sup>; ZHANG Shu-bin<sup>1,2,3</sup>. **Characteristics of solar radiation distribution and albedo in Yuanjiang dry-hot valley, Southwest China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2016)**38**(3) 1-10 [Ch, 33 ref.]

- 1 Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan, 666303, P. R. China;  
2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, P. R. China;  
3 Yuanjiang Research Station for Savanna Ecosystems, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Yuanjiang, Yunan, 653300, P. R. China.

Based on the continuous observation data of solar radiation (SR) through two years (from May 2013 to April 2015) in a dry-hot valley in southwest China's Yuanjiang, daily, seasonal and annual variations of SR components above the canopy of open shrubland were addressed. Meantime, values of SR components, e. g., total global radiation ( $Q$ ), reflective radiation ( $Q_{\alpha}$ ), effective radiation ( $I$ ) and net radiation ( $R_n$ ) related to global radiation and variations of albedo ( $\alpha$ ) as well as its driving factor were investigated. The results showed that yearly average of  $Q$ ,  $Q_{\alpha}$ ,  $I$  and  $R_n$  were 6 210.2, 807.9, 1 822.9, 3 578.7 MJ/(m<sup>2</sup>·yr), respectively, and the ratios of  $Q$ ,  $Q_{\alpha}$ ,  $I$ ,  $R_n$  in rainy season to yearly average value were 52.9%, 56.3%, 39.1%, 59.2% separately. Except for the seasonal variations of  $I$

收稿日期: 2015-10-12 修回日期: 2015-12-16

**基金项目:**国家自然科学基金与云南省联合项目(U1202234)、国家基金重大项目(31290221)、国家基金青年项目(41405143)、碳专项(XDA05020303;XDA05050206)和中国科学院“一三五”专项(方向一;XTBG-F01)。

**第一作者:**费学海,博士生。主要研究方向:生态系统能量交换与碳-水通量。Email:feixuehai@xtbg.ac.cn 地址:650033 云南省昆明市学府路88号中国科学院西双版纳热带植物园。

**责任作者:**张一平,博士,研究员。主要研究方向:全球变化。Email:yipingzh@xtbg.ac.cn 地址:同上。

**本刊网址:**http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

appearing higher value in rainy season than that in dry season,  $Q$ ,  $Q_\alpha$  and  $R_n$  in rainy season were higher than those in dry season. Albedo ( $\alpha$ ) in dry season was lower than that in rainy season because of the increasing leaf area index (LAI) and canopy closure extent in rainy season, and this is also the result of long-term evolution ecological strategy of local ecosystem to reduce evapotranspiration (ET) and increase net primary production. The annual distribution ratios of  $Q_\alpha$ ,  $I$  and  $R_n$  were 13.0%, 29.8% and 56.9% separately. The seasonal variations in the distribution ratios of  $Q_\alpha$  and  $R_n$  were both higher in rainy season than those in dry season; however, the distribution ratios of  $I$  showed an opposite seasonal variations pattern. The increasing distribution ratios of  $I$  in dry season decreased land surface and canopy temperatures, reduced ET of ecosystem, weakened drought stress of ecosystem in dry season and avoided vegetation death due to the damage of hydraulic architecture inducing carbohydrate starvation, which is beneficial to vegetation survival in dry season and maintain the ecosystem balance in Yuanjiang dry-hot valley. As  $Q$  and  $R_n$  of Yuanjiang hot-dry valley vegetation were higher and considering the precipitation in this region was just about 700 mm, thus human activities and climate change are more likely to affect this ecosystem balance.

**Key words** solar radiation; albedo; hot-dry valley vegetation

太阳辐射是驱动土壤-植物-大气连续体 (soil-plant-atmosphere continuum) 中所有物质生物地球化学循环的基本动力,也是整个生物圈物质运动的基础和生态系统能量输入的源泉;太阳辐射影响近地层天气过程和大气环流,影响局地 and 流域乃至区域气候,也影响着生态系统的结构和功能以及地球上的一切生物。换句话说,地球表面的太阳辐射是我们这个地球上所有生物的基本能量源泉<sup>[1]</sup>。此外,太阳辐射的变化影响到地表温度、植物的光合作用、生态系统蒸散和人类的生产活动,并可能由此引发较为深远的气候效应<sup>[2]</sup>。故关于太阳辐射、辐射收支及其影响因素以及随时间变化特征等方面的研究极其重要。

太阳辐射的广泛定量研究始于 20 世纪 50 年代末期<sup>[3-4]</sup>,迄今涉及森林、农田、稀树草原、草地和荒漠等各类生态系统。鉴于半干旱区域(干旱指数 Aridity index,  $AI = 0.2 \sim 0.5$ )广袤的面积(全球半干旱区约 23.1 亿  $\text{hm}^2$ , 约占陆地面积的 17.7%)<sup>[5-6]</sup>和脆弱的生态环境,故国内外学者对其展开了广泛研究<sup>[1,5-10]</sup>,这些研究主要集中在干旱半干旱区辐射时空分布状况、辐射平衡及地表反照率变化等方面。干热河谷生态系统属于半干旱区生态系统,区域内年降雨量低、潜在蒸发量大、水热矛盾突出。我国的干热河谷生态系统主要分布在海南西北部、台湾南部、广东滨海低丘以及云贵川的部分盆地(如云南澜沧江、怒江、红河和元江等河流及其支流峡谷中均有分布)<sup>[11]</sup>,其中元江干热河谷的植被最具有代表性<sup>[11-12]</sup>。

元江干热河谷位于云南省中南部的元江县,这一地区干热河谷面积约有  $8 \times 10^5 \text{ hm}^2$ <sup>[13]</sup>。该区域

基本没有高大的乔木层,以扭黄茅 (*Heteropogon contortus*) 为优势种的草本构成大片草地植被,其竞争能力强、生长旺盛,而草地上散生着稀疏的灌丛和少量的乔木。吴征镒<sup>[11]</sup>、金振洲和欧晓昆等<sup>[12]</sup>认为这类植被是世界萨王纳植被的河谷残存者,具有重要的研究价值。然而国内对于干热河谷区的辐射状况及影响因素等方面的研究非常少,且元江干热河谷区域太阳辐射、辐射时间变化特征及其季节分配等问题尚不清楚;此外,太阳辐射特征能反映干热河谷生态系统结构和功能的相关信息,故研究该区域辐射状况具有一定理论价值和实际意义。

本研究利用元江干热河谷通量塔连续 2 年观测的辐射数据,分析了太阳辐射特征及其变化规律,对比了太阳辐射各分量的分配率,探讨该区域地表反照率季节变化特征及其原因。以期揭示干热河谷地区的辐射状况及变化规律,为该区域的太阳辐射状况提供基础数据,从而为干热河谷地区的可持续发展提供理论依据。

## 1 样地概况与研究方法

### 1.1 样地概况

研究地点位于中国科学院西双版纳热带植物园元江干热河谷生态站  $1 \text{ hm}^2$  永久样地旁,通量塔地理位置 ( $102^\circ 10' 43'' \text{ E}$ 、 $23^\circ 28' 18'' \text{ N}$ ),海拔 553 m,地形相对平坦,土壤类型为燥红土。据元江站气象监测资料,研究地的年平均气温为  $24.9^\circ \text{C}$ ,最冷月(1月)为  $16.5^\circ \text{C}$ ,最热月(5月)为  $29.9^\circ \text{C}$ ,每年  $35^\circ \text{C}$  以上的高温天气超过 100 天<sup>[14]</sup>;该地区受西南季风影响,干、湿季分明,11 月至翌年 4 月为干季,5—10 月为雨季,多年平均降水量为 711.8 mm,其中

80%以上的降水集中在雨季<sup>[15]</sup>。该区域降雨少,但太阳辐射强度高,小型蒸发皿年蒸发量高达2 408 mm<sup>[14]</sup>,干旱指数(AI)值约为0.3,属于典型的半干旱区域(AI=0.2~0.5)<sup>[5]</sup>。元江干热河谷植物的落叶期主要集中在雨季末期至干季初期,这与澳大利亚的萨王纳植被类似<sup>[16]</sup>,即使是干季落叶植物,其一半以上的叶片在最干旱月到来之前已基本脱落<sup>[17]</sup>。

研究区域的植被(稀树灌草丛植被)主要以小乔木、灌木和草本植物为主<sup>[17]</sup>,其中优势乔木为厚皮树(*Lannea coromandelica*)和心叶木(*Haldina cordifolia*);灌木主要优势种有红花柴(*Indigoferapulchella*)、虾子花(*Woodfordia fruticosa*)、三叶漆(*Terminthia paniculata*),霸王鞭(*Euphorbia royleana*)、迎春花(*Jasminum nudiflorum*)和鞍叶羊蹄甲(*Bauhinia brachycarpa*)等;草本优势种主要有扭黄茅(*Heteropogon contortus*)和孔颖草(*Bothriochloa pertusa*)。在长期进化过程中,为适应该区域高温少雨环境,该区域植被叶片一般较小、角质层较厚、叶表面有蜡质和较光滑等特性<sup>[17]</sup>。

## 1.2 研究方法

本研究辐射数据均源自安装在研究点通量塔林冠上方的辐射仪(CNR-1,荷兰KIPP&ZONE公司),辐射仪安装高度距地面约8.5 m,距林冠层约2.0 m高。该仪器由上下各1组(长波、短波各1个)辐射观测探头组成,可同时观测辐射各分量(包括总辐射( $Q$ )、反射辐射( $Q_\alpha$ )、地表长波辐射( $Q_{ULR}$ )和大气长波辐射( $Q_{DLR}$ ))。通过计算可以得到有效辐射( $I$ )和净辐射( $R_n$ )的值。辐射数据的采样频率为2 Hz,经数采记录处理后输出数据为30 min均值。本研究使用连续2年(2013年5月1日至2015年4月30日)的太阳辐射观测数据以探讨该区域太阳辐射日、季节和年变化特征,时间均为北京时间(BJT)。

## 1.3 数据处理与计算

由于野外观测会受到天气原因(如下雨)和供电等不可控因素影响,从而导致数据缺失,本研究采用欧洲通量网通用缺失数据插补方法——边际分布采样法(Marginal distribution sampling, MDS)<sup>[18-19]</sup>对缺失数据进行插补。本研究中,数据总量为140 160个(48组数据/天×365天/年×4组×2年),缺失数据为5 028个,数据缺失率为3.59%。

### 1.3.1 净辐射 $R_n$ 的计算

净辐射 $R_n$ 指的是单位时间内单位面积所吸收的总辐射减去反射辐射和有效辐射后的差值<sup>[20]</sup>。

净辐射 $R_n$ 表达式:

$$R_n = Q(1 - \alpha) - I \quad (1)$$

其中地面有效辐射 $I$ 可用下式计算:

$$I = Q_{ULR} - \delta Q_{DLR} \quad (2)$$

反照率 $\alpha$ 可用下式计算:

$$\alpha = Q_\alpha / Q \quad (3)$$

式中: $R_n$ 为净辐射, $Q$ 为总辐射, $Q_\alpha$ 为反射辐射(本研究中主要体现植被LAI的变化状况), $I$ 为有效辐射( $I$ 越大,这意味着太阳辐射中用于加热空气温度的比率越大), $Q_{ULR}$ 为地表向外发出的长波辐射, $\delta$ 为灰体系数(取 $\delta=0.95$ ), $Q_{DLR}$ 为大气逆辐射。

### 1.3.2 辐射分配率计算

辐射分配率指总辐射在 $R_n$ 、 $Q_\alpha$ 和 $I$ 之间分配的比率情况,即 $R_n$ 、 $Q_\alpha$ 和 $I$ 占 $Q$ 的百分比(%),辐射分配率季节变化一定程度上反映生态系统结构和功能的变化,可表示为:净辐射分配率= $R_n/Q \times 100$ ;反射辐射分配率= $Q_\alpha/Q \times 100$ ;有效辐射分配率= $I/Q \times 100$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 太阳辐射特征

#### 2.1.1 日变化特征

本研究分析了辐射各分量(总辐射( $Q$ )、反射辐射( $Q_\alpha$ )、地面有效辐射( $I$ )和净辐射( $R_n$ ))的季节和年均值的日变化(图1)。

太阳辐射各分量大小和变化趋势受太阳高度角的日变化、天气状况、地表植被以及土壤含水量等因素的相互影响。通过分析辐射各分量( $Q$ 、 $Q_\alpha$ 、 $I$ 、 $R_n$ )在干季(图1a)、雨季(图1b)和年(图1c)均值日变化可知:无论是干季、雨季、还是年尺度上,研究区域辐射各分量日变化趋势均呈单峰曲线分布;随着太阳高度角逐渐增大, $Q$ 、 $Q_\alpha$ 、 $I$ 、 $R_n$ 的辐射强度不断增强,其中 $Q$ 和 $R_n$ 的加速率较大; $Q$ 、 $Q_\alpha$ 和 $R_n$ 最大值出现在13:30左右,然后又随太阳高度角的减小而减小,但 $I$ 峰值一般出现在14:30,要比 $Q$ 、 $Q_\alpha$ 和 $R_n$ 最大值出现的时间滞后约1 h; $R_n$ 的变化趋势和 $Q$ 相近, $R_n$ 和 $Q$ 极值在干季、雨季、年均值日变化上出现的时间及其日变化趋势几乎一致; $Q$ 、 $Q_\alpha$ 、 $I$ 、 $R_n$ 干季日变化最大值分别为713.7、82.1、110.3、524.3 W/m<sup>2</sup>,雨季分别为692.3、92.5、66.3、536.6 W/m<sup>2</sup>,而 $Q$ 、 $Q_\alpha$ 、 $I$ 、 $R_n$ 年均日变化峰值分别为702.5、87.1、88.0、529.6 W/m<sup>2</sup>,可见 $Q$ 和 $I$ 日变化最大值季节变化趋势均表现为干季>年>雨季,而 $Q_\alpha$ 和 $R_n$ 则为干季<年<雨季;另外, $R_n$ 在夜间值为负,其由负值转为正值的时段为早上07:30—08:30之间,由正值转变为负值的时段为18:00—19:00间;在时间变化上, $I$ 的最小值总是出现在清晨日出前时分,此后随着太阳高度角的增加而迅速增大,在达到峰值后逐渐下降,日落后 $I$ 缓慢减小,至次日清晨日出前达

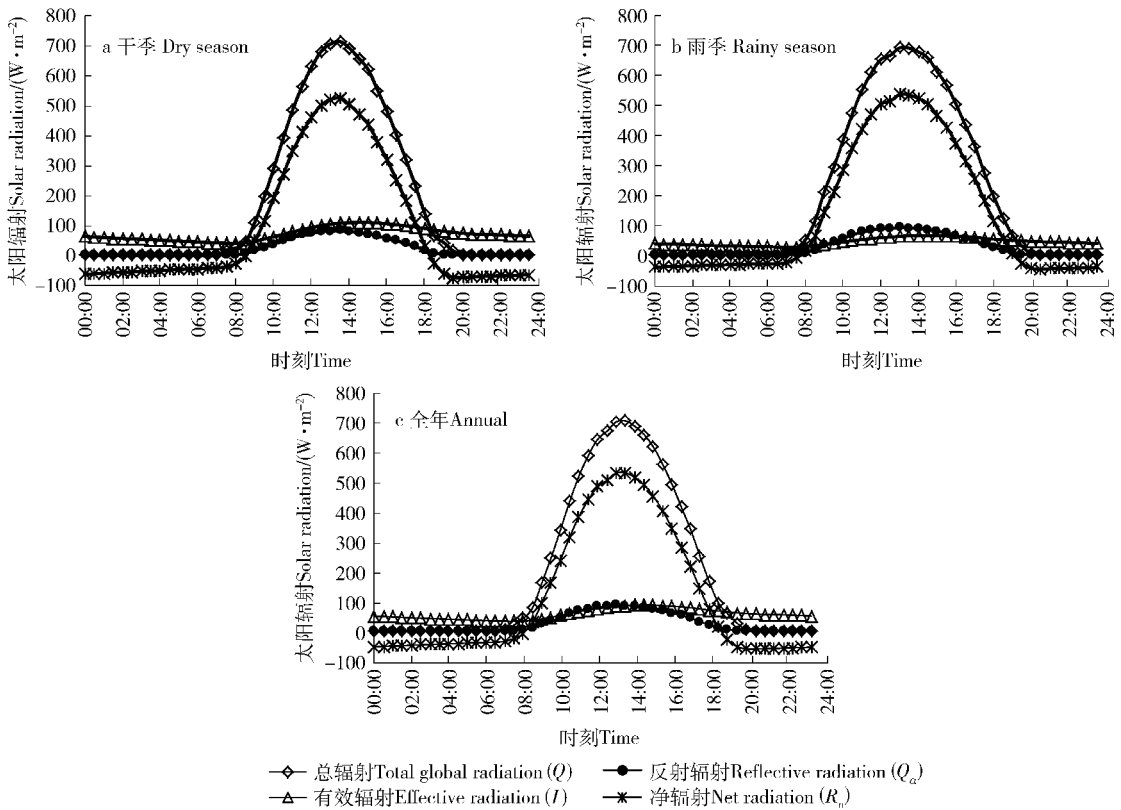


图 1 太阳辐射各分量季节、年均值日变化特征

Fig. 1 Daily variations of seasonal and annual mean values of solar radiation components

最小值,此外, $I$  昼间的变幅  $>$  夜间; $I$  在干、雨季和年均值的日变化全天均为正值,这说明无论是干季、雨季还是年尺度上,地表总是作为热源而向外释放热量,从而起到加热附近空气的效应。干季  $I$  最大值( $110.3\text{ W/m}^2$ )大约是雨季  $I$  最大值( $66.3\text{ W/m}^2$ )的 1.7 倍,这说明地表向附近空气传输能量的效应在干季更为明显。而  $Q_\alpha$  季节变化差异不大,表现为干季  $<$  年  $<$  雨季,这从侧面说明研究区域雨季的反照率  $\alpha$  反而比干季大;在干季, $I$  日变化总比  $Q_\alpha$  的大,而雨季时, $I$  日变化值却在 (09:00—16:30) 比  $Q_\alpha$  的小,这也说明  $Q_\alpha$  在雨季增大,即雨季反照率大于干季反照率。

2. 1. 2 月变化特征

由图 2 可知,元江干热河谷区域的  $Q$  和  $R_n$  月总量从 1—5 月逐渐增大,最大值均出现在 5 月 ( $Q$ 、 $R_n$  最大值分别为  $679.6$ 、 $412.1\text{ MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{月})$ ),然后逐渐变小,最小值均出现在 12 月 ( $Q$ 、 $R_n$  最小值分别为  $384.1$ 、 $160.8\text{ MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{月})$ ); $Q$  和  $R_n$  月总量整体表现为 3—9 月较大;而  $I$  月总量变化趋势整体表现为 6—10 月较小,其最大值出现在 3 月 ( $215.4\text{ MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{月})$ ),最小值出现在 8 月 ( $84.8\text{ MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{月})$ ),从 8 月开始, $I$  的值又逐渐增大;反射辐射  $Q_\alpha$  月总量变化趋势较平缓,其最大值出现在 6 月 ( $79.7$

$\text{MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{月})$ ),最小值出现在 12 月 ( $50.6\text{ MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{月})$ ),但总体趋势为 5—10 月较大。

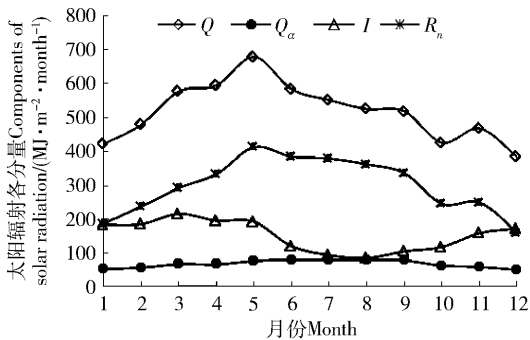


图 2 太阳辐射各分量月总量变化

Fig. 2 Variations of monthly sum variation of solar radiation components

2. 1. 3 季节和年总量变化特征

由研究时段内 (2013 年 5 月至 2015 年 4 月) 太阳辐射各分量干季、雨季、年总量均值变化 (图 3) 可知:元江干热河谷区域  $Q$ 、 $Q_\alpha$ 、 $I$ 、 $R_n$  年总量均值分别为  $6\,210.2$ 、 $807.8$ 、 $1\,822.89$ 、 $3\,578.70\text{ MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ;干季  $Q$ 、 $Q_\alpha$ 、 $I$ 、 $R_n$  的总量均值分别为  $2\,925.3$ 、 $353.2$ 、 $1\,110.1$ 、 $1\,459.5\text{ MJ}/\text{m}^2$ ,雨季  $Q$ 、 $Q_\alpha$ 、 $I$ 、 $R_n$  的总量均值分别为  $3\,284.9$ 、 $454.7$ 、 $712.8$ 、 $2\,119.2\text{ MJ}/\text{m}^2$ ;除有效辐射  $I$  的季节总量均值是干季  $>$  雨季外, $Q$ 、 $Q_\alpha$ 、 $R_n$  的季节总量均值均是干季  $<$  雨季。



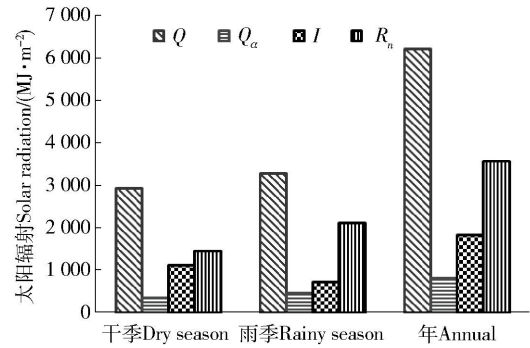


图3 太阳辐射各分量季节、年总量变化

Fig. 3 Variations of seasonal and annual sums of solar radiation components

2.2 太阳辐射分配率及地表反照率特征

2.2.1 太阳辐射各分量分配率特征

由图4可知：元江干热河谷稀树灌草丛植被5—10月(雨季)净辐射分配率大于11月至翌年4月(干季),其在12月最小(41.2%),但在8月最大(68.9%);而有效辐射分配率在12月最大(41.3%),而在8月最小(16.1%),可见两者极值出现的时间刚好相反;净辐射分配率变化规律为干季<雨季,而有效辐射分配率变化趋势刚好与之相反,其表现为干季>雨季(图4、表1);净辐射分配率在干、雨季和年尺度上均最高,分别为49.2%、64.5%、56.9%(表1),其次是有有效辐射分配率,其干、雨季和年尺度上分别为38.4%、21.6%、30.0%(表1);反射辐射分配率的干、雨季变化相对较小,但是总体上表现为干季<雨季(表1)。

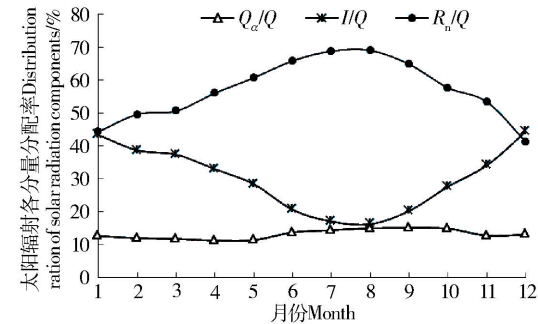


图4 太阳辐射各分量分配率的月变化

Fig. 4 Monthly variations of distribution ratios of solar radiation components

2.2.2 反照率的变化特征

2.2.2.1 日变化特征

由图5可见,无论是在干季、雨季,还是年尺度上,研究区域反照率整体呈早晚高、中午低的“U”型变化特征。从反照率年均值日变化曲线可知,元江干热河谷稀树灌草丛植被的反照率在天刚亮时由于太阳高度角最小,此时 $\alpha$ 最大(0.195),然后随着太

阳高度角的逐渐增大而渐渐减小,在下午14:00左右 $\alpha$ 达到谷值(0.124),然后又随太阳高度角的减小而逐渐增大,最后在日落前逐渐增加到0.151。

表1 太阳辐射各分量的季节和年分配率

Tab. 1 Seasonal and annual distribution ratios of solar radiation components

项目 Item	反射辐射 Reflective radiation ( $Q_{\alpha}$ )	有效辐射 Effective radiation ( $I$ )	净辐射 Net radiation ( $R_n$ )
干季 Dry season	12.1	37.9	49.2
雨季 Rainy season	13.8	21.7	64.5
年 Annual	13.0	29.8	56.9

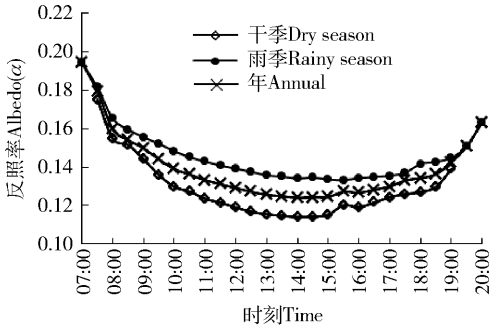


图5 反照率( $\alpha$ )的季节和年均日变化特征

Fig. 5 Diurnal variations of seasonal and annual mean values of albedo

2.2.2.2 月变化特征

由图6可知,元江干热河谷稀树灌草丛植被的年均反照率约为0.131,其从5月(雨季初期)起开始逐渐增大,在9月时达最大月均值(0.150),然后在10月(雨季末期)开始降低,到4月(干季末期)时反照率值最小(0.112)。整体上来说,研究区5—10月(雨季)反照率大于11月至翌年4月(干季)反照率。

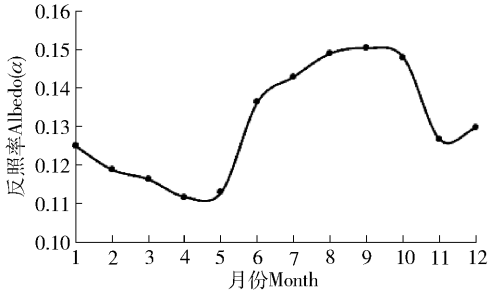


图6 反照率( $\alpha$ )月均值的变化特征

Fig. 6 Variations of monthly mean value of albedo

3 讨 论

3.1 太阳辐射特征

总辐射( $Q$ )指到达某一特定界面(地面、冠层表面)的太阳直接辐射和天空散射辐射的总和,而净

辐射( $R_n$ )代表的是  $Q$  中生态系统可利用的能量,他们除了受太阳高度角和地理位置的影响,还受天气状况(云、水汽)<sup>[2,21]</sup>、大气透明度<sup>[3]</sup>、地表植被结构和下垫面粗糙度等因素的影响。本研究中,无论是日变化还是季节变化,元江干热河谷稀树灌草丛生态系统  $Q$  和  $R_n$  极值出现的时间和变化趋势都较一致,  $Q$  和  $R_n$  的最大值均出现在 5 月,而最小值均出现在 12 月(图 2);在干季的 1—4 月时  $Q$  和  $R_n$  逐渐增大,而干季的 11—12 月时  $Q$  和  $R_n$  逐渐变小(图 2),他们的整体变化趋势为干季 < 雨季,这说明该区域总辐射在干季时主要受太阳高度角的影响,而在雨季(5—10 月)时,由于还受云雨天气影响,总辐射逐渐变小。综上可知,太阳自身活动规律(太阳高度角)是影响元江干热河谷稀树灌草丛生态系统干季  $Q$  和  $R_n$  总量的主要因素,但雨季时,除太阳自身活动规律外,天气状况(云、雨状况)是影响  $Q$  和  $R_n$  的另一主要因素。

$Q$  和  $R_n$  的季节分配情况均表现为雨季 > 干季(图 3)。雨季  $Q$  占全年总辐射的 52.9%,而哀牢山亚热带常绿阔叶林雨季总辐射(表 2)<sup>[22]</sup> 占其全年总量的 45.1%,其雨季总辐射比元江干热河谷低 1 090.3 MJ/m<sup>2</sup>;此外西双版纳热带季节雨林雨季总辐射占全年总辐射(表 2)的 48.7%<sup>[23]</sup>。可见哀牢山、版纳两地植被林冠上雨季  $Q$  < 干季  $Q$ ,而元江稀

树灌草丛林冠上雨季  $Q$  > 干季  $Q$ ,这可能主要是由于元江干热河谷雨季云雨天气较哀牢山和版纳地区少的原因所引起的(表 3 中日照时数)。而由元江、哀牢山和西双版纳 3 个地方  $Q$  和  $R_n$  值(表 2)可知,无论是年均  $Q$  和  $R_n$ ,还是雨季  $Q$  和  $R_n$ ,元江干热河谷稀树灌草丛均高于西双版纳热带季节雨林和哀牢山亚热带常绿阔叶林。而该区域降雨量(705 mm)几乎只有哀牢山地区(1 947 mm)的 2/5 和西双版纳(1 490 mm)的 1/2,可见元江干热河谷水热矛盾非常突出,但 3 个地点净辐射年分配率都很接近,分别为 56.9%、60.0%、62.5%,这或许反映出不同生态系统在光能利用策略上的趋同性。

元江干热河谷净辐射分配率季节变化为雨季(57.6% ~ 69.0%) > 干季(41.2% ~ 56.0%)(图 4),这主要受太阳自身活动及云雨天气的影响。雨季时太阳高度角较干季时大,总辐射增大,但净辐射增加的幅度更大(表 2),最终表现为雨季净辐射分配率大于干季。这和哀牢山和西双版纳地区雨季净辐射的分配率大于干季成因不同,这两地区在雨季时云雨天气较多,故雨季  $Q$  减小,从而导致雨季  $Q$  < 干季  $Q$ (表 2),但由于下垫面性质及其反照率的变化引起  $R_n$  减小幅度相对较小,从而最终导致这两地区植被林冠上雨季净辐射分配率 > 干季。

表 2 3 类不同植被总辐射和净辐射比较

Tab. 2 Comparison of total radiation and net radiation among three different types of vegetation

地点 Site	植被类型 Vegetation	干季 Dry season/ ( MJ·m <sup>-2</sup> )		雨季 Rainy season/ ( MJ·m <sup>-2</sup> )		年 Annual/ ( MJ·m <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )		参考文献 Reference
		<i>Q</i>	<i>R<sub>n</sub></i>	<i>Q</i>	<i>R<sub>n</sub></i>	<i>Q</i>	<i>R<sub>n</sub></i>	
元江 Yuanjiang	稀树灌草丛 Savanna Shrub & Grass	2 925. 3	1 459. 5	3 284. 9	2 119. 2	6 210. 2	3 578. 7	本研究 In this study
西双版纳 Xishuangbanna	热带季节雨林 Tropical seasonal rain forest	2 573. 3	1 460. 2	2 445. 5	1 551. 1	5 018. 8	3 011. 3	[ 23 ]
哀牢山 Ailaoshan	亚热带常绿阔叶林 Subtropical evergreen broad-leaved forest	2 678. 1	1 446. 6	2 194. 6	1 598. 8	4 872. 7	3 045. 4	[ 22 ]

3.2 元江干热河谷地区太阳辐射强度

研究表明,我国年均总辐射量大约为 5 648.6 MJ/(m<sup>2</sup>·a)<sup>[24]</sup>,元江干热河谷地区由于受太阳自身活动规律、西南季风、地理位置和云雨天气少的交互影响,该地区年均太阳总辐射为 6 210.2 MJ/(m<sup>2</sup>·a)(图 2),其基本处于云南省年均总辐射(3 620 ~ 6 682 MJ/(m<sup>2</sup>·a))<sup>[25]</sup> 较高区域,其高于华南地区 5 086.9 MJ/(m<sup>2</sup>·a)的年总辐射<sup>[26]</sup>,也高于河西走廊中部干旱区年总辐射(5 270.6 MJ/(m<sup>2</sup>·a))<sup>[9]</sup>。许建明等<sup>[27]</sup> 统计分析了我我国西北地区 1961—2007

年近半世纪太阳辐射,研究表明西北地区太阳总辐射  $Q$  的年均值为 5 823.1 MJ/(m<sup>2</sup>·a),这也低于元江干热河谷总辐射量。此外,对比分析不同研究点(表 3)太阳辐射可知,元江干热河谷稀树灌草丛生态系统的年均总辐射较高,仅低于青藏高原和黄土高原地区,却比北京小龙门暖温带落叶阔叶林的高 1 837.4 MJ/(m<sup>2</sup>·a);而元江干热河谷  $R_n$  却是最高,其比黄土高原区  $R_n$  高约 1 626 MJ/(m<sup>2</sup>·a),比总辐射最大的狮泉河净辐射高 1 714.1 MJ/(m<sup>2</sup>·a)。综上所述,元江干热河谷区年均总辐射较大,而年均

净辐射非常高,故在全球变化的大背景下,该区域太阳辐射变化更容易引起近地层及生态系统物质循环和能量流动(水循环、植物的光合)等的变化,从而加剧或放大人类活动和气候变化对生态系统所造成的影响。

青藏高原、黄土高原、元江干热河谷和河西走廊

年均总辐射量较其他几个研究点高(表3),这进一步证实了干旱半干旱区总辐射>湿润半湿润区;净辐射量代表总辐射量中生态系统可利用能量的多少,其受太阳自身活动规律、天气状况、下垫植被状况及其性质等方面因素的交互影响,由表3可知森林植被覆盖区净辐射量大于荒漠和戈壁区。

表3 我国各地太阳辐射状况  
Tab.3 Solar radiation in different regions of China

地点 Site	海拔 Altitude/ m	经度 Longitude	纬度 Latitude	植被/下垫面类型 Vegetation	年 Annual/(MJ·m <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )				日照时数 Sunshine duration/ h	年均 反照率 Mean annual albedo	文献 Reference
					<i>Q</i>	<i>Q<sub>α</sub></i>	<i>I</i>	<i>R<sub>n</sub></i>			
北京小龙门 Xiaolongmeng of Beijing	1 300	115°26′	39°58′	暖温带落叶阔叶林 Warm temperate deciduous broad-leaved forest	4 372.8	680.4	1 285.6	2 406.8	2 000	0.156	[28]
鹤山 Heshan	80	112°53′	22°40′	亚热带阔叶混交林 Subtropical broad-leaved mixed forest	4 515.2	514.7	1 259.7	2 740.7	1 798	0.114	[29]
鼎湖山 Dinghushan	240	112°34′	23°10′	亚热带针阔混交林 Subtropical coniferous and broad-leaved mixed forest	4 665.0	359.7	1 497.5	2 807.9	1 433	0.077	[30]
哀牢山 Ailaoshan	2 478	101°01′	24°32′	亚热带常绿阔叶林 Subtropical evergreen broad-leaved forest	4 872.7	462.4	1 339.0	3 045.4	1 543	0.095	[22]
西双版纳 Xishuangbanna	756	101°12′	21°57′	热带季节雨林 Tropical seasonal rain forest	5 018.8	569.1	1 439.4	3 010.3	1 828	0.113	[23]
河西走廊 Hexizoulang	1 457	100°16′	39°5′	戈壁+草+树 Gobi + grass + tress	5 270.6	974.5	3 102.5	1 193.6	3 085	0.185	[9]
元江 Yuanjiang	553	102°10′	23°28′	稀树灌草丛 Savanna shrub & grass	6 210.2	807.9	1 822.9	3 578.7	2 263	0.130	本研究 In this study
黄土高原区 Loess Plateau	1 960	104°08′	35°56′	黄土高原地貌 Loess plateau	6 442.3	1 503.8	2 989.4	1 952.8	2 498	0.233	[31]
改则 Gaize	4 415	84°48′	32°13′	青藏高原荒漠 Desert of Qinghai Tibet Plateau	7 737.5	2 266.6	3 691.7	1 776.1	3 160	0.293	[32]
狮泉河 Shiquanhe	4 278	80°05′	32°30′	青藏高原荒漠砂性土层 Sandy soil of desert Qinghai Tibet Plateau	7 871.7	2 106.7	3 900.4	1 864.6	3 545	0.268	[32]

注:按各地年均总辐射值升序排列,其中森林站点辐射都是按林冠上辐射统计。Notes: In ascending order according to the annual total global radiation values, and all of the solar radiation values of forest were recorded above the canopy.

3.3 反射辐射和反照率

反射辐射( $Q_{\alpha}$ )和反照率( $\alpha$ )主要受地表特征、下垫面植被状况、土壤类型和湿度等因素的交互影响<sup>[8,23]</sup>。元江干热河谷区 $Q$ 、 $Q_{\alpha}$ 和 $\alpha$ 日均值分别为17.01、2.21 MJ/(m<sup>2</sup>·d)和0.131(图3),而孙昭萱和张强<sup>[9]</sup>对河西走廊中部干旱区水分和辐射的研究结果显示,该地区 $Q$ 、 $Q_{\alpha}$ 和 $\alpha$ 日均值分别为14.44、2.67 MJ/(m<sup>2</sup>·d)和0.185(表3),可见元江

干热河谷反射辐射和反照率都小于后者,而元江干热河谷日均总辐射高于河西走廊中部干旱区,这种变化的原因主要是下垫面性质不同所引起的(表3);此外,青藏高原、黄土高原和荒漠戈壁区反照率大于森林植被覆盖区(表3),可见下垫面植被结构越复杂,反照率越小。

一般来说,在总辐射一定的情况下,下垫面植被粗糙度越高、植被结构越复杂和土壤含水量越高,则



反射辐射值越小,  $\alpha$  也随之变小。张一平等<sup>[23]</sup>对西双版纳热带季节雨林太阳辐射特征研究结果表明干季  $\alpha$  大于雨季  $\alpha$ ; 河西走廊中部干旱区地表反照率研究<sup>[9]</sup> 也表明  $\alpha$  随土壤含水量的增加而减小, 他们之间的相关系数高达 0.735, 在降雨比较集中的时段正好对应  $\alpha$  的谷值; 李德帅等<sup>[8]</sup>对陇中黄土高原半干旱草地  $\alpha$  的研究, 该区域年均  $\alpha$  为 0.21, 最大降水月(7月)对应最小  $\alpha$ (0.12), 说明该研究区域的  $\alpha$  也是随土壤含水率增加而减小; 此外, 研究者对北美半干旱草地连续 4 年(2004—2007 年) 2 个研究点能量交换和蒸散的研究表明, 2 个研究区域 NDVI 峰值(生长旺季)对应反照率的谷值, 即雨季反照率  $\alpha$  小于干季<sup>[33]</sup>。以上研究均表明雨季  $\alpha$  小于干季, 而在本研究中, 无论是干、雨季  $Q_a$  的日均值(分别为 1.95、2.47 MJ/(m<sup>2</sup>·d))(图 3), 亦或是干、雨季  $\alpha$  变化趋势(图 5、6)都表明  $Q_a$  和  $\alpha$  的雨季值都大于干季值。由此可见, 土壤含水量并不是影响元江干热河谷稀树灌草丛植被反照率的关键因素。那么, 该区域的植被是通过什么样的机制而引起雨季反照率增加的呢? 一方面, 元江干热河谷区从 5 月起开始进入雨季, 随着雨季的进入, 叶面积指数(LAI)开始逐渐增大, 郁闭度逐渐增大, 植被林冠层截留和反射的太阳总辐射随着 LAI 的增大而增大, 而穿透到林冠下的太阳辐射随 LAI 的增大而逐渐减小, 从而降低了土壤含水率对  $Q_a$  和  $\alpha$  的影响效应; 此外, 由于干旱半干旱区植物叶片结构的特殊性(为减少水分的蒸腾量, 叶片反射率高), 其反照率较土壤反照率大, 可见雨季反照率的增大主要是林冠层反射辐射增大而引起的。李麟辉等<sup>[22]</sup>对云南省哀牢山亚热带常绿阔叶林林冠太阳辐射进行研究, 该研究表明由于雨季生长茂盛, 冠层 LAI 大于干季, 造成雨季透射率小于干季, 所以最终引起干季的反照率小于雨季反照率。因此, 我们可以得出以下初步推论: 雨季 LAI 增加(冠层郁闭度增加)和该地区植被叶片抗旱的生理生态结构是影响元江干热河谷稀树灌草丛生态系统雨季  $\alpha$  增大的主要因素。

元江干热河谷稀树灌草丛雨季反照率的增加是生态系统为缓解该区域突出的水热矛盾而长期进化的结果。全球干旱半干旱区辐射总量日均值为 18 ~ 21 MJ/(m<sup>2</sup>·d)<sup>[6]</sup>, 元江干热河谷平均每天降雨量不到 2 mm, 但其总辐射量高达 17.01 MJ/(m<sup>2</sup>·d)(相当于 6.9 mm 蒸散量消耗的能量), 因此该区域水热矛盾突出。在植物生长季时, 辐射不是该区域植物光合的限制因子, 在某种程度上反而是植物光合的抑制因子。故如何减少蒸散所带走的水分、增加生态系统净初级生产力(NPP)和提高雨季(生长季)

水分利用效率成为该地区植物必须权衡的问题。Lal<sup>[5]</sup>对干旱半干旱生态系统研究也表明, 水分胁迫是影响干旱半干旱区生态系统生长季 NPP 的最显著因子。因此可以说, 元江干热河谷雨季反照率的增加是生态系统为减少蒸腾量、增加生产力、维持生态系统平衡而所采取的生态策略, 是生态系统为缓解该区域尖锐的水热矛盾而长期进化的结果。

### 3.4 有效辐射

有效辐射( $I$ )是指地面向上的长波辐射与大气向下的长波逆辐射之差, 其与地表温度、土壤含水量以及空气温、湿度有关<sup>[20]</sup>。一般来说, 地表温度越高、土壤含水量越低, 有效辐射波动就越大<sup>[22]</sup>, 温差波动也就会比较大, 地面和林冠温度降低的速度也就越快。干季有效辐射越大, 这在高温缺水地区就越有利于维持生态系统健康运行。元江干热河谷干季有效辐射无论是在白天还是在夜间均大于雨季(图 1), 干季均值(71.6 MJ/(m<sup>2</sup>·月)) > 雨季均值(44.8 MJ/(m<sup>2</sup>·月))(图 3); 而有效辐射分配率月变化结果(图 4)也显示 11 月至翌年 4 月(干季)有效辐射分配率大于 5—10 月(雨季), 特别是在 1 月和 12 月, 有效辐射值接近甚至超过净辐射值; 此外, 由有效辐射和净辐射季节和年分配率结果(表 1)可知: 元江干热河谷地区干季有效辐射分配率(37.9%) > 雨季(21.7%), 干季有效辐射分配率的增加和净辐射在干季分配率的减少, 这有利于降低生态系统蒸散(但这也造成元江干热河谷干季持续高温气候特征的原因之一)。综上可知: 元江干热河谷稀树灌草丛植被干季地表和林冠作为热源向外释放的热量比雨季大, 这有利于降低地表和林冠温度, 减少蒸散耗水量, 在元江干热河谷这样一个总辐射量较大而降雨量偏低的生态系统中, 干季较高的有效辐射有利于减少水分流失进而降低水分对生态系统的胁迫作用, 从而有利于生态系统的能量交换和物质循环, 对于维持生态系统平衡和该区域植被的生存具有重要的意义。

## 4 结 论

1) 元江干热河谷稀树灌草丛植被年均总辐射  $Q$  较大(6 210.2 MJ/(m<sup>2</sup>·a)), 高于全国平均水平(5 648.6 MJ/(m<sup>2</sup>·a)), 但低于黄土高原半干旱区(6 442.3 MJ/(m<sup>2</sup>·a))、青藏高原改则(7 737.5 MJ/(m<sup>2</sup>·a))地区总辐射量; 但年均净辐射  $R_n$  却非常高(3 578.7 MJ/(m<sup>2</sup>·a)), 远高于总辐射较高的黄土高原和青藏高原改则地区的净辐射(分别为 1 952.8、1 776.1 MJ/(m<sup>2</sup>·a));  $Q$  和  $R_n$  季节分配情况均表现为雨季 > 干季, 他们的最大值都出现在 5 月(分别



为 679.6、412.1 MJ/(m<sup>2</sup>·月)),最小值均出现在 12 月(分别为 384.1、160.8 MJ/(m<sup>2</sup>·月))。

2)元江干热河谷稀树灌草丛植被净辐射分配率表现为雨季 > 干季,最大值出现在 8 月(68.9%),最小值出现在 12 月(41.2%),而干季有效辐射分配率(37.9%)>雨季(21.7%)。干季有效辐射分配率增加减少了该生态系统干季时水分流失、降低了干季水分对生态系统胁迫效应、避免了林木因水力结构破坏引发的碳饥饿所导致的死亡,这对于维持干热河谷地区生态系统平衡和物种多样性具有重要意义。

3)与众多研究结果不一致的是元江干热河谷稀树灌草丛植被雨季的反照率反而较干季增加。其主要原因是雨季植物生长茂盛、LAI 增大及冠层郁闭度增加和该地区植物叶片抗旱的生理生态特性所引起的冠层反射辐射增大,是生态系统为缓解该区域水热矛盾的生态策略。

4)受地理位置和云雨天气的交互影响,干旱半干旱区总辐射大于湿润半湿润区总辐射。

5)下垫面植被结构越复杂,反照率越小(表 3)。具体表现为青藏高原、黄土高原和荒漠戈壁区反照率大于森林植被覆盖区,元江干热河谷稀树灌草丛植被反照率大于亚热带和热带植被反照率。

致谢 本研究得到中国科学院西双版纳热带植物园元江干热河谷生态站诸多支持,封乾元参与数据收集;此外,该研究得到国家自然科学基金与云南省联合项目(U1202234);国家基金重大项目(31290221);国家基金青年项目(41405143);碳专项(XDA05020303;XDA05050206)和中国科学院“一三五”专项(方向一:XTBG-F01)支持,在此表示感谢。

参 考 文 献

[ 1 ] WILD M F, GILGEN H, ROESCH A, et al. From dimming to brightening: decadal changes in solar radiation at Earth's surface [J]. Science,2005,308:847-850.

[ 2 ] 申彦波,赵宗慈,石广玉. 地面太阳辐射的变化、影响因子及其可能的气候效应最新研究进展 [J]. 地球科学进展,2008,23(9):915-924.

SHEN Y B, ZHAO Z C, SHI G Y. The progress in variation of surface solar radiation, factors and probable climatic effects [J]. Advances in Earth Science,2008,23(9):915-924.

[ 3 ] RAMANATHAN V, CRUTZEN P J, KIEHL J T, et al. Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. Science,2001,294:2119-2124.

[ 4 ] RODERICK M L, FARQUHAR G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years [J]. Science,2002,298:1410-1411.

[ 5 ] LAL R. Carbon sequestration in dryland ecosystems [J]. Environmental Management, 2004,33(4):528-544.

[ 6 ] ROTENBERG E, YAKIR D. Contribution of semi-arid forests to the climate system[J]. Science,2010,327:451-454.

[ 7 ] ALADOS I, FOYO-MORENO I, OLMO F J, et al. Relationship between net radiation and solar radiation for semi-arid shrub-land [J]. Agricultural and Forest Meteorology,2003,116(3-4):221-227.

[ 8 ] 李德帅,王金艳,王式功,等. 陇中黄土高原半干旱草地地表反照率的变化特征 [J]. 高原气象,2014,33(1):89-96.

LI D S, WANG J Y, WANG S G, et al. Change features of surface albedo of semi-arid grassland over the loess plateau of middle part gansu [J]. Plateau Meteorology,2014,33(1):89-96.

[ 9 ] 孙昭萱,张强. 河西走廊中部干旱区陆面水分和辐射特征研究 [J]. 高原气象,2010,29(6):1423-1430.

SUN Z X, ZHANG Q, Characteristics of land surface moisture and radiation in arid region in the middle of Hexi corridor [J]. Plateau Meteorology,2010,29(6):1423-1430.

[10] 张强,周毅. 敦煌绿洲夏季典型晴天地表辐射和能量平衡及小气候特征 [J]. 植物生态学报,2002,26(6):717-723.

ZHANG Q, ZHOU Y. The characteristics of budget of radiation and energy as well microclimate of Dunhuang oasis on a typical clear day in summer [J]. Acta Phytocologica Sinica,2002,26(6):717-723.

[11] 吴征镒,朱彦丞,姜汉侨,等. 云南植被 [M]. 北京:科学出版社,1987.

WU Z Y, ZHU Y C, JIANG H Q, et al. Vegetation of Yunnan [M]. Beijing:Science Press,1987.

[12] 金振洲,欧晓昆. 元江、怒江、金沙江、澜沧江干热河谷植被 [M]. 昆明:云南科技出版社,2000.

JIN Z Z, OU X K. Vegetation of Yuanjiang, Nujiang, Jinshajiang and Lancangjiang in dry-hot valley [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2000.

[13] 许再富,陶国达,禹平华,等. 元江干热河谷山地五百年来植被变迁探讨 [J]. 云南植物研究,1985,7(4):403-412.

XU Z F, TAO G D, YU P H, et al. An approach to the vegetational changes from Yuanjiang dry-hot valley of Yunnan in the last 500 years [J]. Acta Botanica Yunnanica,1985,7(4):403-412.

[14] 张树斌,张教林,曹坤芳. 干旱对干热河谷优势木本植物孢子花光能分配的影响 [J]. 云南大学学报,2014,36(5):774-780.

ZHANG S B, ZHANG J L, CAO K F. The effects of drought stress on light energy dissipation of *Woodfordia fruticosa*, a dominant woody species in Yuanjiang dry-hot valley, Southwest China [J]. Journal of Yunnan University,2014,36(5):774-780.

[15] 张一平,段泽新,窦军霞. 岷江上游干暖河谷与元江干热河谷的气候特征比较研究 [J]. 长江流域资源与环境,2005,14(1):76-82.

ZHANG Y P, DUAN Z X, DOU J X. Comparison of climate characteristics between a dry-warm valley in upper reaches of Min river and a dry-hot valley of Yuanjiang river [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2005,14(1):76-82.

[16] WILLIAMS R J, MYERS B A, MULLER W J, et al. Leaf phenology of woody species in a north Australian tropical savanna [J]. Ecology,1997,78(8):2542-2558.

[17] 张教林,郝广友,曹坤芳. 云南元江干热河谷木本植物的物候

- [J]. 武汉植物学研究,2009,27(1):76-82.
- ZHANG J L, HAO G Y, CAO K F. Phenology of woody species in Yuanjiang dry-hot valley in Yunnan Province [J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 2009, 27(1): 76-82.
- [18] PAPALE D, REICHSTEIN M, AUBINET M, et al. Towards a standardized processing of net ecosystem exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation [J]. Biogeosciences, 2006, 3(4): 571-583.
- [19] REICHSTEIN M, FALGE E, BALDOCCHI D, et al. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm [J]. Global Change Biology, 2005, 11(9): 1424-1439.
- [20] 贺庆棠. 中国森林气象学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- HE Q T. Forest meteorology in China [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2001.
- [21] PYRINA M, HATZIANASTASSIOU N, MATSOUKAS C, et al. Cloud effects on the solar and thermal radiation budgets of the Mediterranean basin [J]. Atmospheric Research, 2015, 152: 14-28.
- [22] 李麟辉, 张一平, 谭正洪, 等. 哀牢山亚热带常绿阔叶林与林外草地太阳辐射比较 [J]. 生态学杂志, 2011, 30(7): 1435-1440.
- LI L H, ZHANG Y P, TAN Z H, et al. Variation patterns of solar radiation above subtropical evergreen broadleaved forest and open area in Ailao Mountains [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(7): 1435-1440.
- [23] 张一平, 窦军霞, 于贵瑞, 等. 西双版纳热带季节雨林太阳辐射特征研究 [J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(5): 17-25.
- ZHANG Y P, DOU J X, YU G R, et al. Characteristics of solar radiation and its distribution above the canopy of tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(5): 17-25.
- [24] 吴其重, 王自发, 崔应杰. 我国近 20 年太阳辐射时空分布状况模式评估 [J]. 应用气象学报, 2010, 21(3): 343-351.
- WU Q C, WANG Z F, CUI Y J. Evaluating the solar radiation resources of China in recent 20 years by meteorological model [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(3): 343-351.
- [25] 陈宗瑜. 云南气候总论 [M]. 北京: 气象出版社, 2001: 47-51.
- CHEN Z Y. Climate in Yunnan [M]. Beijing: Meteorological Press, 2001: 47-51.
- [26] 鹿世瑾. 华南气候 [M]. 北京: 气象出版社, 1990.
- LU S J. Climate in south China [M]. Beijing: Meteorological Press, 1990.
- [27] 许建明, 何金海, 阎凤霞. 1961—2007 年西北地区地面太阳辐射长期变化特征研究 [J]. 气候与环境研究, 2010, 15(1): 89-96.
- XU J M, HE J H, YAN F X. Research on secular variation of solar radiation over Northwest China from 1961 to 2007 [J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15(1): 89-96.
- [28] 桑卫国, 郑豫, 张德全. 暖温带落叶阔叶林林冠层表面辐射通量动态与特点 [J]. 东北林业大学学报, 2001, 29(3): 40-43.
- SANG W G, ZHENG Y, ZHANG D Q. Research on radiation flux dynamics of canopy surface in warm temperate zone deciduous broad-leaved forests [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2001, 29(3): 40-43.
- [29] 任海, 彭少麟. 鹤山人工林的辐射能环境研究 [J]. 生态科学, 1997, 16(1): 22-29.
- REN H, PENG S L. The studies on the environment of radiation energy of man-made forests in Heshan [J]. Ecologic Science, 1997, 16(1): 22-29.
- [30] 王旭, 周国逸, 孙阁, 等. 鼎湖山针阔混交林生态系统外向辐射通量研究 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2007, 33(3): 328-337.
- WANG X, ZHOU G Y, SUN G, et al. Study on outside radiation flux of coniferous and broad-leaved mixed forest ecosystem at Dinghushan in south China [J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Science), 2007, 33(3): 328-337.
- [31] 闭建荣, 黄建平, 刘玉芝, 等. 黄土高原半干旱区地表辐射特征 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2008, 44(3): 33-38.
- BI J R, HUANG J P, LIU Y Z, et al. Characteristics of surface radiation over semi-arid region of the Loess Plateau [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2008, 44(3): 33-38.
- [32] 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.
- GONG Y F, DUAN T Y, CHEN L X, et al. The variation characteristics of radiation budget components of the western Tibetan Plateau in 1997/1998 [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(2): 225-235.
- [33] KRISHNAN P, MEYERS T P, SCOTT R L, et al. Energy exchange and evapotranspiration over two temperate semi-arid grasslands in North America [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 153: 31-44.

(责任编辑 范娟  
责任编委 孟平)