

贺兰山油松林冠层的辐射能量截获及传输利用特征

田 静^{1,2,3}, 杜灵通^{1,2,3}, 潘海珠^{1,2,3}, 乔成龙^{1,2,3}, 袁洪艺^{1,2,3},
吴宏玥^{1,2,3}, 易志远^{1,2,3}, 张 祎^{1,2,3}, 施光耀^{1,2,3}, Irumva Olivier^{1,2,3}

(1.宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地,银川 750021;
2.宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室,银川 750021;3.宁夏大学生态环境学院,银川 750021)

摘要: 油松作为我国北方地区典型的森林植被类型,研究辐射能量在其冠层中的分配、收支及传输,是构建森林冠层辐射传输模型和生态过程模型的理论基础,对阐明森林植被群落中能量流动和物质循环机理具有重要意义。基于贺兰山生态站油松林通量塔定位观测获取的上、下行长短波辐射、光合有效辐射(photosynthetically active radiation,PAR)以及气象数据,分析 2021 年 4—9 月不同天气和季节条件下油松林冠层的辐射能量截获及传输特征。结果表明:(1)晴天条件下太阳总辐射的日变化表现为光滑的“单峰”曲线,但多云条件下则呈现不规则的“多峰”曲线,且减弱 48.3% 的太阳总辐射能量到达冠层顶部。(2)太阳总辐射以下行短波辐射为主,晴天的上行短波辐射日变化虽也呈“单峰”形态,但仅占下行短波辐射的 8.1%,上行和下行长波辐射随昼夜交替略有波动。(3)太阳短波辐射的季节动态特征表明,上行和下行短波辐射在 6 月最高,而上行和下行长波辐射在 7 月最高。(4)在冠层上方(25 m 处)呈规则“单峰”形态的 PAR 日动态曲线,经过冠层截获和传输作用后,在冠层下方(7 m 处)变为不规则曲线;PAR 的透过率为 32.2%~53.9%,透过率在 6 月达到最高。(5)4—9 月生长季短波反射率为 7.8%~8.8%,而地表长波辐射收支比为 0.73~0.80。结果显示,贺兰山油松林冠层对辐射能量有明显的截获作用,其辐射传输在不同天气条件和不同季节表现出较大的差异。

关键词: 油松林; 辐射通量; 反射率; 冠层; 透过率

中图分类号: S712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2023)01-0289-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.037

Characteristics of Radiation Interception, Transmission and Utilization in the Canopy of *Pinus tabulaeformis* Forest in Helan Mountain

TIAN Jing^{1,2,3}, DU Lingtong^{1,2,3}, PAN Haizhu^{1,2,3}, QIAO Chenglong^{1,2,3}, YUAN Hongyi^{1,2,3},
WU Hongyue^{1,2,3}, YI Zhiyuan^{1,2,3}, ZHANG Yi^{1,2,3}, SHI Guangyao^{1,2,3}, Irumva OLIVIER^{1,2,3}

(1.Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021; 2.Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China, Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021; 3.School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021)

Abstract: *Pinus tabulaeformis* is a typical species in the forest of northern China. The researches on the distribution, budget and transmission of radiant energy of *P. tabulaeformis* canopy are the theoretical basis for the building radiation transmission model and the ecological process model of the forest canopy, which are crucial for exploring the mechanism of energy flow and material circulation in forest communities. Based on the upwelling and downwelling of longwave and shortwave radiation, photosynthetically active radiation (PAR) and meteorological data obtained from the flux tower over the *P. tabulaeformis* communities in Helan Mountain forest ecosystem research station, the radiative energy interception and transmission characteristics of the *P. tabulaeformis* forest canopy under various weather and season conditions over the period of April to September 2021 were analyzed. The results showed that: (1) Under sunny condition, the diurnal variation of total solar radiation showed a smooth curve with a single peak, but an irregular curve

收稿日期:2022-07-12
资助项目:中央引导地方科技发展专项(202008);宁夏回族自治区重点研发计划项目(2021BEG02010);宁夏自然科学基金项目(2021AAC03115);宁夏重点研究项目引才专项(2021BEB04038);宁夏生态状况遥感监测与评价项目(NXZ20220203);宁夏大学研究生创新项目(GIP2021041)
第一作者:田静(1994—),女,硕士研究生,主要从事森林碳通量过程监测与模拟研究。E-mail:tianjingjio@qq.com
通信作者:杜灵通(1980—),男,博士,研究员,主要从事资源环境遥感研究。E-mail:dult80@qq.com

with multiple peaks under cloudy condition, and the total solar radiation energy decreased by 48.3% to reach the top of the canopy. (2) The total solar radiation reaching the top of the canopy was dominated by the downwelling shortwave radiation. Although the diurnal variation of upwelling shortwave radiation showed a single peak curve under sunny condition, it only accounted for 8.1% of downwelling shortwave radiation. The longwave radiation of upwelling and downwelling fluctuated slightly with the alternation of day and night. (3) The seasonal dynamic characteristics of solar shortwave radiation revealed that both upwelling and downwelling shortwave radiation were the highest in June, while the highest upwelling and downwelling longwave radiation appeared in July. (4) The diurnal variation of PAR was a regular single peak curve above the canopy (25 m), but became irregular below the canopy (7 m) after interception and transmission by the canopy. The transmissivity of PAR ranged from 32.2% to 53.9%, and the highest value appeared in June. (5) The shortwave reflectance was over 7.8%~8.8% during the growing season from April to September, while the ratio of incoming and outgoing longwave radiation of surface ranged from 0.73 to 0.80. The above results showed that the *P. tabulaeformis* canopy in Helan Mountain had a large radiation interception effect, and the transmission of radiation through the canopy changed significantly in different weather conditions and seasons.

Keywords: *Pinus tabulaeformis* forest; radiant flux; reflectance; canopy; transmissivity

森林生态系统具有调节气候、涵养水源、保持水土、净化空气等功能^[1],在全球陆—气间的碳平衡维持、水分交换、能量分配以及缓解气候变化等方面发挥着重要作用^[2]。地表辐射能量收支是陆面过程研究的重要内容,对于森林生态系统而言,太阳总辐射决定森林植被的光合速率和生长发育过程,是植物生长最重要的限制因子,而不同季节和不同天气条件下的太阳总辐射差异是导致同类型森林发育状态出现差异的重要原因^[3],同时引起陆面能量供应不均,进而影响森林生态系统的碳水循环过程。可见,开展森林生态系统野外观测试验,研究其辐射能量收支过程,对理解全球变化背景下的整个森林生态系统的能量平衡和碳循环特征具有重要意义。

准确描述森林冠层的辐射能量截获及传输是当前森林生态过程模拟的关键。在森林生态系统内部,由于能量和物质的分配、收支与传输存在差异,不同植被群落占据不同层位空间,其中乔木林冠层是森林与外界环境交互最为密切的交流层面,通过对光的吸收、透射和反射来控制林下植被所能获取的光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR),进而影响林下植被的发育和多样性^[4-5]。由于冠层结构差异和林隙的不规则性增强林下生境的异质性,致使不同高度植被可获得的辐射能量存在显著差异,不同的冠层特征会形成不同的林内微生境,从而影响着林下植物的更新和生长^[6-7]。因此,开展冠层尺度的辐射过程观测,获取先验知识,为了解林下植被与森林冠层的相互作用提供科学依据,对研究森林生态系统物质和能量循环过程至关重要。

目前,国内外学者^[4,8-9]已开展大量关于森林冠层辐射分布及传输方面的研究,尤为关注北方针阔混交

林和热带季雨林^[10-11],但鲜有研究关注我国干旱半干旱过渡区脆弱森林生态系统的冠层能量辐射截获和传输特征。为此,本研究以位于我国温带草原与荒漠区的过渡地带的贺兰山油松林为研究对象,基于生态站通量塔定位观测获取的不同冠层高度的上下行长短波辐射、PAR 以及气象数据,分析油松林生长季的辐射传输过程及能量分配格局,以期干旱半干旱过渡带森林构造合理的林分结构提供理论依据,也可为森林冠层辐射传输模型和生态过程模型提供先验知识。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏贺兰山国家级自然保护区(105°49'—106°41'E, 38°19'—39°22'N)的天然油松林内。贺兰山位于我国温带草原与荒漠区的过渡地带,平均海拔 2 000~3 000 m,不仅能够有效地阻挡腾格里沙漠入侵,而且在区域可持续发展和生态平衡维持中扮演着重要角色,是我国西北地区重要的生态屏障^[12]。油松(*Chinese pine*)作为北方干旱半干旱地区典型的松属针叶树种,具有耐干旱、耐瘠薄、生长快、适应性强等特点^[13]。贺兰山天然油松林分布在海拔 2 000~2 350 m 范围的山地中,常成纯林,是贺兰山主要的森林群落之一^[14]。生态站所在的油松林区观测的 2021 年平均气温为 7.3℃,年降水量 237 mm,主要土壤类型为灰褐土和灰钙土,冠层高度 20 m,森林郁闭度为 0.3~0.7,林内坡度范围 0~60°,平均树龄 75 年,胸径 12.59 cm,常伴有山杨(*Populus davidiana* Dode)、杜松(*Juniperus rigida* Sieb. et Zucc.)、青海云杉(*Picea crassifolia* Kom.)等乔木,林下有栒子(*Cotoneaster hissaricus* Pojark.)、小叶忍冬(*Lonicera microphylla* Willd. ex Roem. et Schult.)等灌木,草本植物有苔

草(*Carex muliensis* Nees.)、唐松草(*Thalictrum aquilegifolium* var. *sibiricum* Linnaeus)、早熟禾(*Poa annua* L.)等^[12,15-16]。

1.2 研究方法

1.2.1 辐射通量测定 为研究贺兰山油松林的能量交换和碳水循环过程,宁夏贺兰山森林生态系统国家定位观测研究站在苏峪口内的油松林区(38°45′42″N,105°54′13″E)建设通量观测塔,塔基地面海拔 2 089 m,塔高 30 m。

辐射通量的测定依托油松林通量塔进行,利用四分量辐射仪(CNR4,Kipp&Zonen,荷兰)对冠层上方(25 m 处)的上行长波辐射(upwelling longwave radiation, ULR)、下行长波辐射(downwelling longwave radiation, DLR)、上行短波辐射(upwelling shortwave radiation, USR)和下行短波辐射(downwelling shortwave radiation, DSR)进行测定;利用 PAR 传感器(LI190R-L, LI-COR,美国),对冠层上方(25 m 处)和冠下方(7 m 处)的 PAR 进行观测;辐射强度指标以 0.5 h 的频率记录期间的 PAR 平均值,所有观测设备通过坎贝尔的数据采集器(CR6,CSI,美国)进行存储和自动计算,观测时间为 2021 年 4—9 月。

1.2.2 地表辐射能量分配与交换过程测定 地表辐射按照波长和传播方向划分为 DSR、USR、DLR、ULR,在物理意义上可分别对应太阳总辐射、反射辐射、大气逆辐射和下垫面长波辐射。根据 USR 和 DSR 可计算出地表短波反射率(ρ)和地表长波辐射收支比(γ),来说明不同波长能量的分配与交换过程,主要计算公式^[17]为:

$$\rho = (\text{USR}/\text{DSR}) \times 100\% \quad (1)$$

$$\gamma = \text{DLR}/\text{ULR} \quad (2)$$

式中: ρ 为地表短波反射率(%); γ 为地表长波辐射收支比;DSR、USR、DLR、ULR 分别为下行短波辐射、上行短波辐射、下行长波辐射和上行长波辐射。

1.2.3 林冠光合有效辐射的透过率测定 通过对比冠层上方和冠层下方的 PAR 值,可以定量分析 PAR 在林冠中的分配和利用效率,林冠 PAR 的透过率计算公式^[18]为:

$$\lambda = \text{PAR}_b / \text{PAR}_a \quad (3)$$

式中: PAR_a 为冠层上方(25 m 处)的 PAR(W/m^2); PAR_b 为冠层下方(7 m 处)的 PAR(W/m^2)。

1.2.4 晴空指数计算 晴空指数是指一定太阳高度角下地表接受的太阳总辐射与地球大气层上方平行于地表面上接受的太阳总辐射的比值^[19]:

$$kt = S/S_e \quad (4)$$

$$S_e = S_{sc} [1 + 0.033 \cos(360t_d/365)] \sin \beta \quad (5)$$

式中: S 为地表太阳总辐射(W/m^2); S_e 为大气顶层太阳

总辐射(W/m^2); S_{sc} 为太阳常数($1\,370\,\text{W}/\text{m}^2$); t_d 为日序数; β 为太阳高度角。当晴空指数 $k_t > 0.4$ 为晴天, $0 < k_t < 0.4$ 为多云天。

1.2.5 数据处理 PAR 传感器观测的数据是光合有效量子的通量密度 [$\mu\text{mol}/(\text{m} \cdot \text{s})$],为了便于将 PAR 与其他辐射能量对比,本文利用董泰锋等^[20]报道的量子转换系数,将量子通量密度转换成单位为 W/m^2 的光合辐射度,公式为:

$$Q_{\text{PAR}} = U_{\text{PAR}}/\mu \quad (6)$$

式中: U_{PAR} 为光合有效量子通量密度 [$\mu\text{mol}/(\text{m} \cdot \text{s})$]; Q_{PAR} 为光合有效辐射的辐射度 (W/m^2); μ 为量子转换系数,取值 4.55。根据油松的生长周期,选择生长季初(4 月)、生长季中(7 月)和生长季末(9 月)的月内晴天进行冠层 PAR 的日变化研究,以冠层上(地上 25 m 高度)和冠层下(地上 7 m 高度)的 PAR 差异,分析油松林冠层对 PAR 的截获特征。

所有辐射观测数据由 CR6 数据采集器采集,并记录 0.5 h 内的平均值为 1 次原始观测数据,根据 1 天内 48 次观测记录,求平均得出日尺度辐射数据,同理用日尺度辐射数据求算月尺度辐射,后期计算处理及制图在 Excel 2016 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 不同天气条件下太阳总辐射日变化特征

选择典型晴天(7 月 31 日)与多云日期(7 月 11 日),分析不同天气条件下贺兰山油松林冠层接收到的太阳总辐射特征。由图 1 可知,在晴天条件下,太阳总辐射的日变化值表现为较光滑的“单峰”曲线,在 5:00 之前的时间段太阳总辐射为 0,日出后随着太阳高度角的增大,太阳总辐射强度快速增强,在 13:30 太阳总辐射达到最大值为 $626.55\,\text{W}/\text{m}^2$,午后太阳高度角下降,太阳总辐射强度下降,在 21:00 日落之后降为 0。在多云条件下,太阳总辐射受云层影响严重,呈现出较强的波动性。由于天气变化和云层的影响,即便是在太阳总辐射最强的正午时刻,多云天的太阳总辐射亦可降低到 $150\,\text{W}/\text{m}^2$ 以下,不及晴天同时刻的 25%。但由于云层在早晚时段对太阳光的折射、反射等作用,导致辐射仪接收到视域之外的非太阳直射光,极端情况下引起早晚时段多云天气条件下的太阳总辐射出现高于晴天太阳总辐射的现象。从全天来看,多云天气能减弱 48.3% 的太阳总辐射能量到达冠层顶部,可见天气条件对油松林冠层辐射能量供给的影响巨大。

2.2 油松林冠层辐射特征及转化利用

2.2.1 冠层辐射日变化特征 图 2 为 8 月所有晴天的辐射分量日变化,下行短波辐射日变化显著,表现为明显的“单峰”曲线。下行短波辐射在日出后迅速升高,日

间的最大峰值出现在 13:00,为 $1\,017.87\text{ W/m}^2$,随后开始下降,在 20:30 降低至 0。上行短波辐射与下行短波辐射有相同的昼夜变化规律,均为日间“单峰”变化,夜间降为 0,但上行短波辐射的日间峰值较低,最大值出现在正午 12:00,为 72.75 W/m^2 ,日内平均值约占下行短波辐射平均值的 8.1%,即每日太阳短波辐射中有 8.1% 的能量被油松反射回大气,无法被森林生态系统利用。上、下行长波辐射都表现出白天略高于晚上的规律,即白天的大气逆辐射(下行长波辐射)和下垫面长波辐射(上行长波辐射)均高于夜间,这与大气和地表白天温度高于夜晚有关。上行长波辐射为 $307.10\sim 346.36\text{ W/m}^2$,下行长波辐射为 $385.25\sim 457.69\text{ W/m}^2$ 。

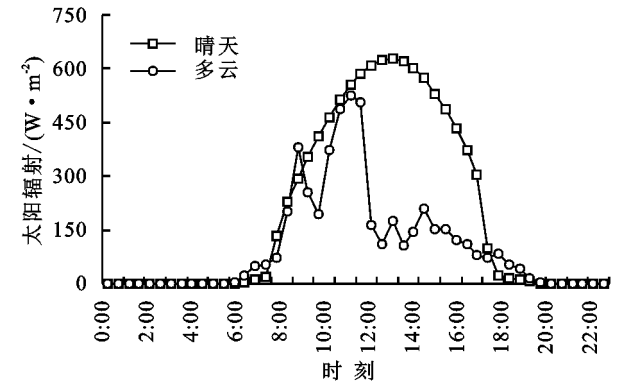
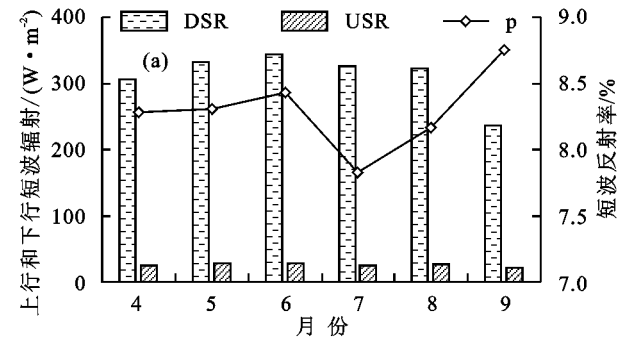


图 1 不同天气条件下太阳总辐射的日变化

2.2.2 冠层辐射月变化特征及转化利用 贺兰山油松林的短波辐射特征与该区域的森林生育过程一致(图 3),来自太阳的短波下行辐射最大值出现在 6 月,为 343.05 W/m^2 ,而同月的上行短波辐射也达到 28.91 W/m^2 的年内最大;在 4—9 月的整个生长季中,9 月的上、下行短波辐射最低,但油松林冠层的短波反射率却与短波上、下行反射量值的季节变化无关(图 3),在上、下行短波辐射较强的 7 月,地表短波反



2.3 油松林冠层光合有效辐射截获及透过特征 2.3.1 光合有效辐射的日变化及冠层截获特征 晴天状态下,冠层顶部的 PAR 在日内成平滑的“单峰”形态,最高值出现在太阳高度角最大的正午,在生长季初期、中期和末期的日内 PAR 最大值分别为 325.58 , 346.74 , 286.58 W/m^2 ;而冠层下部的 PAR 在日内为

射率却是最低,只有 7.8%;而在短波能量最弱的 9 月,地表短波反射率却达到最大的 8.8%。从平均短波反射率来看,贺兰山油松林生态系统吸收利用或转化的太阳短波辐射能量高达 90% 以上,在 4—9 月整个生长季,油松林冠层月平均接收短波辐射 311.07 W/m^2 ,其中 25.73 W/m^2 的短波辐射被直接反射出冠层,高达 285.34 W/m^2 的短波能量被生态系统吸收用于碳水循环等生理生态过程或被地表储存并转化为长波辐射。

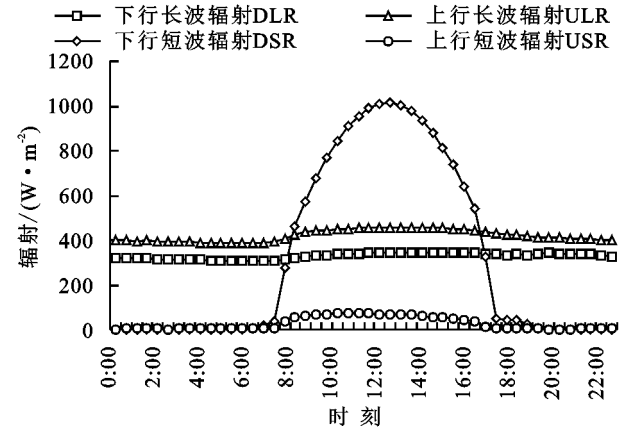


图 2 油松林冠层辐射日变化

从季节来看,贺兰山油松林的上、下行长波辐射也均在 7 月达到最大,分别为 439.88 , 352.40 W/m^2 ,长波辐射收支比达到 0.8,也为生长季最高(图 3)。从整体长波能量平衡来看,贺兰山油松林冠层接收来自大气的下行长波辐射总低于冠层向天空发射的长波辐射,油松林冠层散失掉约 20%~27% 的长波能量,在 4—9 月生长季,总共亏缺 88.26 W/m^2 的长波辐射能量。但因为森林冠层能量过程较为复杂,吸收的太阳短波辐射加热土壤和冠层后又转换成长波辐射向外发射,扣除长波损耗,从全波段能量平衡来看,贺兰山油松林冠层在 4—9 月生长季净吸收 197.08 W/m^2 能量。

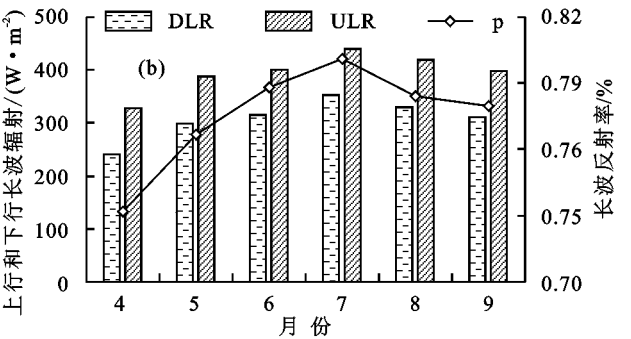


图 3 油松林冠层 4 种辐射月变化

不规则的变化曲线,且随着太阳方位角的变化而随机波动(图 4)。不同生长季的冠层顶部和冠层下部的 PAR 均表现为白天高于 0,而夜间接近于 0 的规律,但不同季节昼夜转换时间点不同,生长季初期的 20:30 至次日 6:00 之间没有 PAR,生长季中期则为 21:00 至次日 5:30 之间,而生长季末期又延长至

20:00 至次日 6:30 之间,这与不同生长季的昼夜时长变化一致。从 PAR 强度来看,生长季初的冠层顶部的平均 PAR 为 97.09 W/m^2 ,冠层下部为 39.22 W/m^2 ,冠层能截获 59.6% 的 PAR;生长季中期冠层顶部的平均 PAR 升高到 110.18 W/m^2 ,冠层下部也升高为 54.39 W/m^2 ,但冠层仅截获 50.6% 的 PAR;生长季末期冠层顶部的平均 PAR 下降到 77.48 W/m^2 ,冠层下部则下降到 17.26 W/m^2 ,而冠层则把高达 77.7% 的 PAR 截获。从冠层顶部和冠层下部 PAR 日变化曲线来看,生长季初、中期,冠层下 PAR 常会有零星的波动高峰,即冠下在不同时刻可能有零星的强光斑透过并引发冠下 PAR 升高。但到生长季末期,冠层在日内则能较均一地截获 PAR。

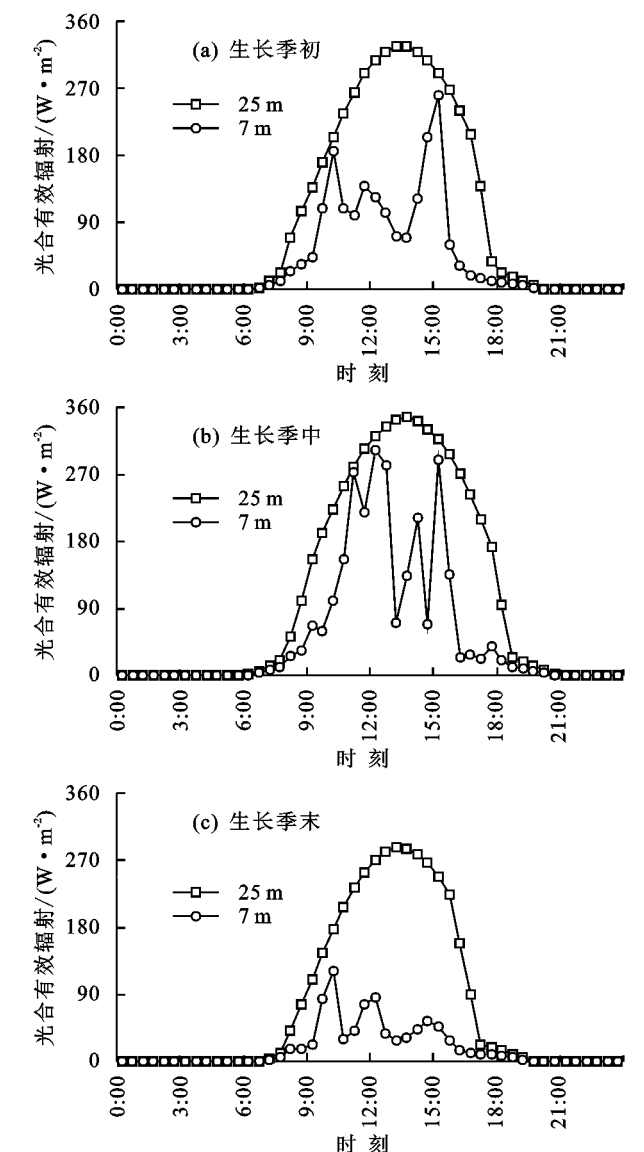


图 4 油松不同生长阶段的冠层 PAR 日变化

2.3.2 光合有效辐射的月变化及其冠层透过率 贺兰山油松林冠层对 PAR 的吸收比例存在季节性差别(图 5)。在晴天条件下,冠层上的 PAR 均高于冠层下的 PAR,在 4—9 月的生长季内,PAR 表现出先增强后减弱的特征。PAR 最高值出现在 6 月,其冠

层上和冠层下的 PAR 分别为 $116.2, 73.1\text{ W/m}^2$; 9 月的 PAR 最弱,其冠层上和冠层下的 PAR 分别为 77.5 W/m^2 和 17.3 W/m^2 ,PAR 的变化规律与贺兰山所在地区的年太阳短波辐射年变化有关。在 4—9 月的生长季内,PAR 的透过率为 $32.2\%\sim 53.9\%$,其季节性变化规律与 PAR 的变化一致,表现为先增高后降低的趋势,最高透过率出现在 6 月,即在 6 月林下植被可以获得最大强度的 PAR 用于光合作用。

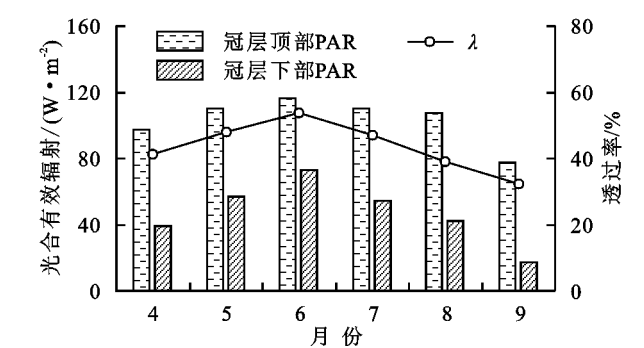


图 5 冠层顶部、下部 PAR 及其透过率的月变化

3 讨论

3.1 影响贺兰山油松林冠层辐射收入的因素

陆地表面可获得的太阳总辐射及日内、季节分配特征,决定着陆地生态系统碳水循环的强弱,但不同地区的太阳总辐射受控因素存在差异。一般情况下,太阳高度角、大气透明度、云量均对太阳总辐射产生影响,纬度、海拔、坡度、坡向等地理因素也对陆面太阳总辐射的可获得性产生间接影响^[21]。在晴天条件,太阳高度角的变化是引起日内太阳总辐射(以短波辐射为主)变化的最主要原因(图 1),在太阳高度角较低的早晚时刻,短波辐射较低,而在太阳高度角最大的正午左右短波辐射出现峰值^[22-23]。天山中段雪岭云杉林区下行短波辐射在中午 14:00 出现日内峰值^[24];秦岭火地塘林区油松林下行短波辐射峰值在 13:00—13:30^[25];南亚热带针阔混交林下行短波辐射峰值也出现在 13:00—13:30,但雨季和旱季略有差异^[26];贺兰山油松林区下行短波辐射峰值出现在 13:00,与上述研究结果较为一致。但多云条件下,太阳总辐射的日变化规律表现出强烈的波动性,其变化曲线为“多峰”形(图 1),转而受控于云量变化,这与刘俊^[27]的研究结果相似;云层对太阳总辐射具有吸收、反射、散射作用,使到达地面的太阳总辐射减少^[28],天空云量变化又影响瞬时太阳总辐射到达地面的强度,产生日内波动特征;在早晚时刻,由于云层对可见光的折射等作用,还导致多云条件下的太阳总辐射大于同时刻晴天的太阳总辐射(图 1)。相对于太阳总辐射,下行长波辐射(大气逆辐射)较小,但也是贺兰山油松林冠层辐射收入的一部分,大气逆辐射与大气温度有关,其在昼夜间的变化不是很大(图 2),可源源不断地给油松林冠层和土壤带来热能。因

大气受白天太阳总辐射的增温效应影响,也导致下行长波辐射出现白天略高于夜间的规律^[29]。

3.2 油松林冠层辐射能量转化与消耗规律

下行短波辐射到达油松林冠层后,最直接的一部分消耗为通过地表反射返回天空,而影响冠层短波反射的因素有林区地形特征和森林生长季相差异。本研究所用的通量观测塔建在贺兰山朝西北向的山坡上,受山地地形阴影的影响,下行短波辐射在偏午后达到峰值。经油松林冠层反射而出的上行短波辐射,其不仅与下行短波辐射的日内波动有关,还与地表反射的热点效应有关,在正午时刻太阳高度角最大,此时太阳入射方向与四分量辐射仪的上行短波辐射传感器的观测方向最为一致,产生 1 个反射峰值,使得上行短波辐射达到最大值^[30]。油松林冠层以热辐射的形式向天空发射的长波辐射,其辐射能量消耗规律与油松林冠层温度的变化有关,与大气逆辐射一样,其也表现出白天略高于夜间的规律。

从季节来看,通过短波反射消耗的能量随森林季相的变化而变化,7 月达到最低后,开始逐月升高(图 3)。对于贺兰山油松林这种地被、灌木和乔木构成的多层片结构植被群落,其反射率是多层片植被与地表土壤共同反射的结果,地表反射率的季节性变化与不同层植物叶片的生育过程直接相关,油松冠层叶片随生长季扩展,引起油松冠上和冠下对短波能量反射占比的变化,进而影响到陆表整体的短波反射率。这一结果与孙雪峰等^[31]得出的暖温带落叶阔叶林反射率在 6 月最高的结果存在差异,落叶阔叶林地表反射率的四季变化较其他植被类型显著,夏季冠层被浓密的叶面覆盖,形成较大反射面^[32],且 6 月的叶片叶绿素含量较低,吸收太阳总辐射的能力弱,从而形成最高的反射率^[33]。依据林冠反射理论,林冠反射率与叶子的反射率及叶面积系数成正比,与叶子的透过率成反比^[34]。贺兰山油松林在 6—7 月因季节性干旱抑制生长,油松林叶面积系数低,透过冠层的短波辐射量高;9 月冠层的叶面积系数高而透过率低,导致该月反射率达到最高。

3.3 影响油松林冠层光合有效辐射穿透的因素

冠层 PAR 透过率的大小决定油松林冠下植被可获得光合能量的多少,冠层 PAR 透过率一般与冠层郁闭度、油松生育期、叶片形态分布等生物因素和林区地形等非生物因素有关。贺兰山油松林郁闭度较低,一般在 0.3~0.7,为中度郁闭林,其冠层存在间隙,PAR 可透过冠层,但又受控于太阳直射角度。当某个角度有直射光通过林冠间隙穿透冠层时,冠层下的 PAR 会急速上升;当某个角度直射光被冠层遮挡较大时,冠层下的 PAR 则急速下降。贺兰山油松林的这一 PAR 穿透冠层的规律,导致其冠下 PAR 在日内出现随机跳动特征(图 4)。从日内来看,往往

午前和午后时刻的冠层 PAR 的透光率较高,这段时期太阳为升起或落下阶段,随着太阳高度角和方位角的变化,生长在山地倾斜坡面上的油松林冠层在太阳直射方向漏出空隙,使光斑容易通过林隙穿过冠层到达冠下;而在正午太阳近直射的状态下,冠层 PAR 的透光率变小,即该油松林冠层在正午有较强的遮光效果。冠层 PAR 透过率也表现出明显的季节变化规律(图 5),生长季初和生长季中的 PAR 冠层透过率较高,而生长季末的 PAR 冠层透过率降到最低,主要是因为生长季末油松林针叶生长成熟,冠层发育完全,冠层的叶面积达到最大,枝叶最为茂密,能够吸收与反射掉最多的 PAR,这与刘晓东等^[35]得出的杨树人工林 PAR 季节变化情况一致。从贺兰山油松的生育期来看,其在 4—5 月生长旺盛,在 6—7 月的初夏由于季节性干旱抑制生长,在 8 月后又加速生长,这也是导致油松林 5—7 月冠层 PAR 透过率较高的原因之一。此外,本研究的样地(38°45′42″N, 105°54′13″E)位于北回归线以北,其年内正午太阳高度角最大值出现在 6 月,即 6 月油松林冠上的 PAR 能达到最大,而贺兰山油松的生育期和气候特征决定 6 月的冠层叶面积相对较低,冠层的吸收辐射较少,透过率高,因此冠下 PAR 最大值也出现在 6 月。与此不同,西双版纳热带季雨林冠层上 PAR 在 2—3 月较高,冠层下 PAR 在 11 月和翌年 2 月较高^[36],可见,研究区地理、气候差异及树种生育期不同造成这种截然不同的冠层 PAR 透过特征。

4 结论

(1)太阳短波辐射日内呈“单峰”形态,且季节性变化明显,是油松林冠层的主要能量来源,但受天气状况影响明显,多云天气能减弱近 1/2 的太阳总辐射到达冠层;下行长波辐射(大气逆辐射)亦可为冠层带来热能,但冠层向天空辐射的上行长波能量更多,地表长波辐射收支比为 0.73~0.80。

(2)太阳总辐射到达油松林冠层后发生反射、透射、吸收和转化等过程,其中 7.8%~8.8%的短波辐射被反射回天空,32.2%~53.9%的 PAR 透过冠层到达冠下,地表吸收的短波能量除用于驱动碳水循环等植被生理生态过程外,部分还被转化为长波辐射。

(3)太阳短波辐射季节变化驱动着冠层上 PAR 和所有长波辐射的季节波动,由于油松林冠层对能量截获和传输的复杂交互作用,使得冠层反射、透射特征又与油松林的郁闭度、生育期等生物因子相关,且在不同天气条件和不同季节表现出较大的差异。

参考文献:

- [1] 徐雨晴,周波涛,於琰,等.气候变化背景下中国未来森林生态系统服务价值的时空特征[J].生态学报,2018,38(6):1952-1963.

- [2] Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests[J]. Science, 2008, 320(5882): 1444-1449.
- [3] 李玉强, 陈云, 曹雯婕, 等. 全球变化对资源环境及生态系统影响的生态学理论基础[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 603-612.
- [4] Isabelle P E, Nadeau D F, Asselin M H, et al. Solar radiation transmittance of a boreal balsam fir canopy: Spatiotemporal variability and impacts on growing season hydrology[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 263: 1-14.
- [5] Aubin I, Beaudet M, Messier C. Light extinction coefficients specific to the understory vegetation of the southern boreal forest, Quebec[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2000, 30(1): 168-177.
- [6] Balzarolo M, Valdameri N, Fu Y H, et al. Different determinants of radiation use efficiency in cold and temperate forests[J]. Global Ecology and Biogeography, 2019, 28(11): 1649-1667.
- [7] 黄慧敏, 董蓉, 何丹妮, 等. 冠层结构和光环境的时空变化对紫耳箭竹种群特征的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2129-2138.
- [8] Xin Q C, Gong P, Li W Y. Modeling photosynthesis of discontinuous plant canopies by linking the geometric optical radiative transfer model with biochemical processes[J]. Biogeosciences, 2015, 12(11): 3447-3467.
- [9] 魏龙, 张方秋, 高常军, 等. 广东湛江沿海木麻黄防护林生态系统的辐射通量特征[J]. 林业与环境科学, 2016, 32(5): 1-6.
- [10] 袁凤辉, 关德新, 吴家兵, 等. 长白山红松针阔叶混交林林下光合有效辐射的基本特征[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 231-237.
- [11] 张一平, 赵双菊, 于贵瑞, 等. 西双版纳热带季节雨林干热季林冠上小气候特征及 CO₂ 通量的观测[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2540-2549.
- [12] 许浩, 张源润, 胡天华, 等. 宁夏贺兰山自然保护区油松林碳储量及分布格局[J]. 生态环境学报, 2013, 22(11): 1785-1789.
- [13] Li G Q, Xu G H, Guo K, et al. Geographical boundary and climatic analysis of *Pinus tabulaeformis* in China: Insights on its afforestation[J]. Ecological Engineering, 2016, 86: 75-84.
- [14] 朱源, 康慕谊, 刘全儒, 等. 贺兰山油松和青海云杉交错区的物种丰富度研究[J]. 植物资源与环境学报, 2007, 16(3): 1-6.
- [15] 吴梦瑶, 陈林, 庞丹波, 等. 贺兰山不同海拔植被下土壤团聚体分布及其稳定性研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 210-216.
- [16] 成文浩, 陈林. 贺兰山油松林根系空间分布特征研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 89-93.
- [17] Constantin J, Inclan M G, Raschendorfer M. The energy budget of a spruce forest: Field measurements and comparison with the forest-land-atmosphere model (FLAME)[J]. Journal of Hydrology, 1998, 212: 22-35.
- [18] Alados I, Foyo-Moreno I, Alados-Arboledas L. Photosynthetically active radiation: Measurements and modelling[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996, 78(1/2): 121-131.
- [19] 朱苑, 刘帆, 王传宽, 等. 帽儿山温带落叶阔叶林净生态系统碳交换的日变化及光响应特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1): 72-82.
- [20] 董泰锋, 蒙继华, 吴炳方, 等. 光合有效辐射(PAR)估算的研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, 30(9): 1125-1134.
- [21] Promis A, Schindler D, Reif A, et al. Solar radiation transmission in and around canopy gaps in an uneven-aged *Nothofagus betuloides* forest[J]. International Journal of Biometeorology, 2009, 53(4): 355-367.
- [22] 陈进, 陈步峰, 潘勇军, 等. 帽峰山常绿阔叶林辐射通量特征[J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6766-6776.
- [23] 崔莎莎, 康文星, 赵仲辉, 等. 杉木人工林生态系统太阳辐射特征研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(3): 18-24.
- [24] 吉春容, 邹陈, 范子昂, 等. 天山中段雪岭云杉林区辐射特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(12): 82-88.
- [25] 余鸽, 王得祥, 陈书军, 等. 秦岭火地塘林区油松林辐射平衡特征研究[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(3): 21-24.
- [26] 王旭, 周国逸, 孙阁, 等. 南亚热带针阔混交林辐射通量特征[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(5): 28-34.
- [27] 刘俊. 喀斯特地区森林植被气候特征研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2015.
- [28] Oliveira P H F, Artaxo P, Pires C, et al. The effects of biomass burning aerosols and clouds on the CO₂ flux in Amazonia[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2007, 59(3): 338-349.
- [29] 吴志祥, 杜莲英, 兰国玉, 等. 海南岛橡胶林辐射通量特征[J]. 热带地理, 2012, 32(6): 575-581.
- [30] 高进波, 张一平, 巩合德, 等. 哀牢山亚热带常绿阔叶林林区太阳辐射特征[J]. 山地学报, 2009, 27(1): 33-40.
- [31] 孙雪峰, 陈灵芝. 暖温带落叶阔叶林辐射能量环境初步研究[J]. 生态学报, 1995, 15(3): 278-286.
- [32] 王舒默, 胡永红, 王式功, 等. 植被功能型差异对地表反照率时空分布的影响分析[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(5): 932-938.
- [33] 刘胜. 黄土高原半干旱区人工林林分消光特性及辐射热量平衡研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [34] 曾士余, 朱劲伟, 冯宗炜, 等. 杉木人工林辐射状况的初步分析[J]. 生态学杂志, 1985, 4(5): 19-23.
- [35] 刘晓东, 朱春全, 雷静品, 等. 杨树人工林冠层光合辐射分布的研究[J]. 林业科学, 2000, 36(3): 2-7.
- [36] 李元, 宋亮, 莫雨轩, 等. 西双版纳热带季节雨林光合有效辐射的垂直分布格局和季节动态[J]. 生态学杂志, 2022, 41(9): 1683-1690.