淮南森林冠层辐射传输过程的特征

戴秋丹 [1] 郭振海 [1] 孙菽芬 [1] 肖霞 [2]

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室（LASG），北京 100029

2 中国科学院大气物理研究所公共技术服务中心，北京 100029

摘 要 本文利用淮南森林观测站 2018 年 7 月 1 日至 2019 年 6 月 30 日冠层辐射观测，分析了淮南栎树森林下垫面冠层内外辐射变化特征。结果表明：1）从春季到夏季，栎树冠层之上向下的太阳短波辐射增加，到冬季逐渐减少。从早春开始，由于叶片生长增多，冠层中间和冠层之下向下的太阳短波辐射下降，从秋季到冬季树叶凋落，其向下的太阳辐射增加，与冠层之上的变化趋势相反；对于向上的短波辐射，无论冠层之上、冠层中间还是冠层之下，随季节的变化都与向下的短波辐射相似，只是数值小很多。2）冠层之上、冠层中间和冠层之下向下的长波辐射，随时间的变化从春季逐渐开始增大至夏季达到最大，随后逐渐减小并在冬季达到最小；就空间变化而言，冠层中间和冠层之下向下的长波辐射值比冠层之上的辐射值高，使得冠层对长波辐射的振幅增大，晴空条件最高可达 1.3 倍。3） 淮南森林区冠层之上（距地面 25m）年平均反照率为 0.14，比中国北方地区（35^{0}N）温带季风气候区（混交林为主）反照率的整体水平低 0.01，表明淮南的森林茂密、灌丛更多些。4）冠层上部分和整层的短波辐射透射率主要受叶片的影响。夏季，冠层的短波透射率平均为 0.1。到了冬天，叶子凋落，透射率增加并趋于一个平稳的波动。冠层的短波辐射吸收率在夏季最高，秋季逐渐降低，随着叶子凋落在冬季迅速减小，趋于一常值。

关键词 太阳辐射，短波辐射，森林冠层，辐射传输，反照率

Characteristics of solar radiation and radiative transfer of a forest canopy in Huainan, China

作者简介 戴秋丹，女，1971 年出生，助理研究员，主要从事陆面过程与陆气相互作用研究。E-mail: dqd@lasg.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41575092，国家重点研发计划项目 2018YFC1506600

Found by National Natural Science Foundation of China (Grant 41575092), National Key Research and Development Program (Grant 2018YFC1506600)

Dai Qiudan[1], Guo Zhenhai[1], Sun Shufen[1], and Xiao xia[2]
1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
2 Public Technology Service Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Forest canopy as an active interface between vegetation and environment transmits energy by reflecting, absorbing and transmitting solar radiation by leaves. The radiation above, within and below the forest canopy is very important in the energy balance, water and carbon cycle. Its variation with season and distribution within forest canopies is few studied in Huainan area. Using the data of total radiation measured at Huainan forest observation station from 1 July 2018 to 30 June 2019, the temporal change characteristics of solar radiation above the Sawtooth Oak canopy, and the spatial distribution and transfer of solar radiation through the canopy were analyzed, and also the albedo, transmittance and absorptance of the canopy were given. The results show that: (1) The downward shortwave radiation above the Sawtooth Oak canopy increases from spring to summer, then decreases gradually to winter. But the downward shortwave radiation within and under the canopy demonstrate a different trend with smaller value. It decreases from the early spring and increases from autumn to winter as opposite to that above the canopy. Concerning the upward shortwave radiation, whether above, within or under the canopy, the seasonal variation pattern is the same as the downward one, but the value is much smaller. (2) The downward longwave radiation above, within and under the canopy gradually increases with time from spring to summer, then decreases gradually and reaches the minimum in winter; in terms of spatial change, the radiation value of longwave within and under the canopy is higher than that above the canopy, which enhances longwave radiation and can be as large as 1.3 times under clear skies. (3) The annual average albedo above the canopy in Huainan forest area is 0.14, which is 0.01 lower than that in the temperate monsoon climate area (mainly mixed forest) in northern China (35^0N), indicating that the forest is denser in Huainan. (4) The shortwave radiation transmittance of the upper part and the whole canopy is mainly affected by the leaves. In summer, the average shortwave transmittance of the whole canopy is 0.1. But in winter, as the leaves fall, the transmittance increases and tends to a stable fluctuation. The absorptance of shortwave radiation in the canopy is the highest in summer and decreases gradually in autumn, and decreases rapidly in winter as the leaves fall, tending to a constant value. These results could be useful for validating layered radiative transfer and photosynthesis models and for further study the energy, water and carbon cycle of the forest ecosystem.

Key words Solar radiation, Shortwave radiation, Forest canopy, Radiative transfer, Albedo

1 引言

森林植被处在大气和地面之间，通过对其间辐射、水、和 CO2 等物质能量的吸收、传输等生物物理和化学作用，在全球范围内热带森林破坏和二氧化碳浓度持续升高的背景下，深刻影响气候和人类的生存环境（Sellers et al., 1995; Ni, 1997；Bonan，2008）。而林冠是森林与外界环境相互作用最直接和最活跃的界面层，通过叶片反射、吸收和透

射太阳辐射来传输能量（Ni, 1997; Dai and Sun，2006; Isabelle et al., 2018）。被森林冠层反射向上的辐射通过决定反照率控制进入大气的感热和潜热，影响其上的气候；森林冠层内部的太阳辐射吸收和分布调节气孔导度决定光合作用和蒸腾作用强度（Sellers，1985；Pieruschka et al., 2010），影响干物质产量（Monteith, 1972; Cannell et al., 1988; Oker-Blom P et al., 1989）和冠层的温度（Isabelle et al., 2018）；透过森林冠层传递到下层的辐射和水决定和影响林下小气候（Dai，1996）、林下物种（Aubinet et al.，2000）、枯枝落叶的分解及土壤微生物的生长情况。因此了解冠层内辐射传输和能量分配，对于更好的理解各种不同的生物化学过程，模拟冠层内辐射传输、光合作用和呼吸作用以及整个森林生态系统的能量水分平衡和碳循环是非常重要的。

林业和气候学都有大量关于描述森林冠层太阳辐射各个方面的研究（张小全等，1999；Wang et al., 2003；Pinty et al., 2006; Bonan，2008；Mercado et al.，2009；Isabelle et al., 2018；周文艳等，2018），气候和陆面过程研究中有很多是针对北方森林的研究，也有一些中国热带和北方森林区域森林辐射的研究（张敏，2008；韦志刚等，2016），但对我国半湿润与湿润季风过渡区的森林冠层研究到目前报道不多。

入射的太阳辐射由短波辐射和长波辐射组成，两者都被上覆的冠层结构所改变，形成了不同于树冠上方或邻近开阔区域的强烈的空间和时间变化（Webster et al., 2016）。太阳的短波辐射由直射光和漫射光构成。研究结果表明，多云的天气条件下支持使用简单的比尔-朗伯特辐射传输方案来计算辐射透过率。而在晴空条件下，对于森林高大植被和低矮植被混合的复杂情况（如高大的乔木、中间的灌木层、以及低矮的草本共存），冠层内部叶片之间、冠层和地面的多次散射会大大消减其中的辐射，简单的比尔朗伯特方案是不够的（Isabelle et al., 2018）。目前陆面模式和气候模式中的辐射参数化模式已经越来越多包含复杂的植被太阳辐射传输特性的考虑，如直射光与漫射光分开处理，考虑漫射光的多次散射过程；冠层区分光照叶子和遮荫叶子（Wang and Leuning, 1998; Dai, et al., 2004)，叶面积指数分层，以及考虑叶子正反面的光学特性等更详细的冠层过程，

但在应用中还需要更多验证和合理简化（Dai and Sun, 2007; Qiu et al., 2016）。植被冠层内辐射随高度变化的研究也较少（Mõttus and Sulev, 2006）。这些都需要加强森林冠层的辐射传输研究，针对冠层内的分层辐射的观测，研究太阳辐射在冠层中随时间和空间的变化规律。

本文基于淮南森林观测站取得观测资料，开展森林冠层内辐射随高度变化的研究，系统分析淮南地区森林冠层的辐射传输和能量分配；本研究为验证和改进森林冠层辐射传输、森林光合作用和林下土壤呼吸等模式提供依据。

2 观测场地及资料处理

2．1 观测点基本情况介绍

淮南森林观测塔站（32°44′N，117°08′E）位于安徽北部淮南地区上窑森林公园内西边一个小山坡上（图1a），具有典型的淮南地区地形和地貌特征。公园总面积约10.4平方公里，境内为石灰岩组成的低山丘陵，其上覆盖植被多为人工栽植和天然次生，有人工针叶林如侧柏纯林、阔叶落叶混交林、阔叶次生林和竹林等类型，有大量毛桦、栎树、香樟和槐树，以及一些银杏、水杉、金钱松和鹅掌楸等植物。站点西面靠近村庄，站点区域树的密度大约是1950棵/ha，全部为麻栎树，树木平均大约高15m，最高约20m。站点周围植被覆盖主要以麻栎、刺槐、毛桦等落叶阔叶林为主，也有石楠、香樟等常绿乔木。林下灌木有牡荆、栎树的小树枝和樱花树等，地表为草、爬藤植物和枯枝落叶覆盖，枯枝落叶层比较厚。2018年4月测得树木根部的小枝、灌木平均高约90-130cm，树下草本植物50-90cm。2019年6月测得枯枝落叶层大约5cm。下面土壤较薄，石头较多，土壤质地属于砂壤土。

站点所在的淮南地区位于淮河以南，处于北半球暖温带半湿润季风气候与亚热带湿润季风气候的过渡地带（王怀军等，2017），受季风气候影响，日照充足，夏季雨量充

沛，冬季干旱，四季分明。年际降水量变化大（颜俊，2019），季节分布不均匀。所用的数据期间2018年7月-2019年6月，年降水量约为925mm，最大降水量在2019年6月，为212.4mm; 年平均气温为16.2℃，最高20.8℃，1月和7月的平均气温分别为2.6℃和28.7℃。

图1 淮南森林观测塔站点地貌图（a）及观测大塔（b）

Fig. 1 (a) Geomorphologic map around tower station and (b) the 108 meter's high tower at Huainan

2．2 观测仪器及资料处理

观测站现设有两座大气观测塔（相距 17.2m），大塔 108m (图 1b)，有 6 层观测台，进行常规的风、温度、湿度和冠层以上 CO2 浓度等气象观测以及太阳辐射的观测。小塔设在植被冠层内，有两层观测架（分别在高于地面 3.5m 和 6m 处），布设一套 CR1000 型气象观测系统（包括 CR3000 数据采集器、CNR4 四分量净辐射传感器、GMP343 二氧化碳传感器、WindSonic 二维超声风速风向传感器和 Hydra Probe II 土壤温湿度传感器等），集中对冠层内的太阳辐射、风速、温度和大气 CO2 浓度、以及土壤、枯枝落叶的水分、温度及 CO2 浓度等进行观测。

资料分析的是 2018 年 7 月－2019 年 6 月为期一年的观测数据，包括树冠内离地 3.5m 和 6m 两层太阳辐射的观测，以及冠层顶部 25m 的辐射观测，太阳辐射分量包括向下短波辐射、向上短波辐射、向下长波辐射、向上长波辐射和净辐射。观测资料均采用质量控制方法进行处理后用于科学研究，本文分析的辐射数据为 10 分钟、30 分钟和日平均值。冠层顶月平均辐射计算采用的是 10 分钟平均辐射数据得到日平均值，再进求月平均。月平均反照率也是采用 10 分钟数据，当向下太阳辐射大于 150W/m^2 时进行计算，然后求日平均，再求月平均值。冠层内用的是 30 分钟平均数据计算得到月平均值。

3 结果与讨论

3.1 森林冠层辐射变化特征

大塔上的辐射仪距地面 25m，在森林植被冠层之上，代表森林冠层顶的辐射特征。图 2 给出的是淮南森林站月平均向下的太阳短波辐射、向上的短波辐射、向下的长波辐射和向上的长波辐射，及各自标准偏差。从图 2 中可以看出，向下的太阳短波辐射月平均值在 5-7 三个月比较高，冬季 12-2 三个月急剧减小，最高值出现在 6 月，达到 233.6 W/m^2；最低值出现在 12 月，为 63.7 W/m^2。向上的太阳短波辐射月平均值在 5、6 月比较高，也是在冬季三个月急剧减小，最高值出现在 5 月，为 36.1 W/m^2；最低值也出现在 12 月，为 9.4 W/m^2。向下和向上的长波辐射变化比较一致，都是最高值出现在 7 月，最低值出现在 1 月，分别是向下的长波辐射最高值为 436.2 W/m^2，最低值为 288.8 W/m^2；向上的长波辐射最高值为 468.2 W/m^2，最低值为 329.7 W/m^2。

图 2 淮南森林塔站冠层顶向下短波辐射（a）、向上短波辐射（b）、向下长波辐射（c）和向上长波辐射（d）的月平均值（柱状）和标准差（短线）

Fig. 2 Monthly mean (bar) and standard deviation (short line) of downward shortwave radiation (a), upward shortwave radiation (b), downward longwave radiation (c) and upward longwave radiation (d) above the canopy at Huainan tower station

图 3 淮南森林塔站冠层顶净辐射月平均（柱状）和标准偏差（短线）

Fig. 3 Monthly mean (bar) and standard deviation (short line) of net radiation above canopy at Huainan tower station

基于短波和长波辐射测量值，可以计算得到净辐射。淮南森林站的净辐射月平均值变化比较大（图 3），由 2018 年 7 月份达最大为 155.8 W/m^2，单调递减，12 月份达最小值，为 19.6 W/m^2，再单调增高。

3.2 冠层内辐射变化特征

太阳辐射的日变化决定了光合作用和蒸腾作用的日过程，而冠层中辐射的垂直梯度是衡量不同高度的叶片吸收能量的一个指标。我们分析冠层内两层短波辐射和长波辐射的月季变化规律，也对比了冠层之上的辐射，从而可以看出辐射的垂直分布变化。除去数据不全和数据不合理的月份，给出了 2018 年 7 月-2019 年 1 月，及 2019 年 4 月的结果。结果表明冠层内向下的短波辐射无论是冠层中间（树冠部位，距地面 6m）（图 4a）还是冠层之下（树冠之下灌丛之上，距地面 3.5m）（图 4b）日变化都比较大，有单峰和双峰甚至是三峰型，出现峰值的时间也不相同，但多数出现在下午 13：00 左右，与 4 个典型晴天的结果比较一致（图略）。冠层中间和冠层之下的向上的短波辐射变化曲线平滑（图 4c, 4d）。

冠层中间向下的短波辐射在 10 月-1 月比较高（图 4a），7-9 月比较小，冠层之下也是同样的趋势（图 4c），数值小一些（图 5a），这主要是因为 10 月-1 月树叶凋落，透过的辐射较多，12 月和 1 月，二者最多相差仅 1.4 倍。冠层中间在 10 月向下辐射达最大，冠层之下在 4 月最大，这是春秋季太阳辐射、树叶凋落和生长以及环境风等共同作用造成的。10 月冠层中间与冠层之下的向下辐射最大相差可达 3 倍。7、8 月冠层中间和冠层之下向下辐射都比较小，二者相差也小，最高相差 2 倍，这时由于植物到达生长最大期，树叶浓密遮荫造成的。

冠层内向上的短波辐射 7-10 月份都很小，其中 9、10 月最小，到 11 月稍微增高，12 月明显变高，1、4 月达到很高。但 7-10 月冠层中间的数值大（图 4c，图 4d），是冠层下面的 1.5 倍左右。在 11 月、12 月冠层中间和冠层之下的向上短波辐射相差不大（图 5b）。

图 4 淮南森林塔站栎树植被冠层内 6m（a）和 3.5m（b）向下的短波辐射，以及 6m（c）和 3.5m（d）向上的短波辐射月平均日变化曲线

Fig. 4 Diurnal variation of monthly mean downward shortwave radiation within the canopy (6m) (a) and below the canopy (3.5m) (b), and upward shortwave radiation within the canopy (6m) (c) and below the canopy (3.5m) (d) at Huainan tower station

图 5 淮南森林塔站栎树植被冠层内 6m 和 3.5m 高度向下(a)和向上(b)短波辐射月平均日变化

Fig. 5 Diurnal variation of monthly mean downward (a) and upward (b) shortwave radiation within (6m) and below (3.5m) the canopy at Huainan tower station

图 6 冠层之上、冠层中间和冠层之下日平均太阳向下短波辐射

Fig. 6 Daily mean downward shortwave radiation below, within and above the canopy

图 7　冠层之上、冠层中间和冠层之下日平均太阳向上短波辐射

Fig. 7 As figure 6 for upward shortwave radiation

图 8 冠层之上、冠层中间和冠层之下日平均太阳向下长波辐射

Fig. 8 As figure 6 for downward longwave radiation

图 9 冠层之下与冠层之上日平均入射长波辐射的比值（实线）及日平均大气相对湿度（虚线）

Fig. 9 The ratio of downward longwave radiation below the canopy to that above the canopy (solid line) and daily mean atmospheric relative humidity (dash line)

我们给出逐日的植被冠层之上（大塔 25m 处，在栎树冠层上面）和冠层中间（小塔 6m，在栎树树冠中间）以及冠层之下（小塔 3.5m，在栎树树冠下面）的辐射对比。图 6 可见从春季到夏季，栎树冠层之上向下的太阳短波辐射增加，到冬季逐渐减少。由于冠层的消光作用，冠层中间和冠层之下的向下短波辐射比冠层之上的小，且呈现不同的变化趋势。从晚春开始，冠层中间和冠层之下由于叶片生长增多造成遮荫，其向下的太阳短波辐射下降，从秋季到冬季树叶凋落其向下的太阳辐射增加，与冠层之上的相反；但从晚春开始，冠层内和冠层下的辐射趋于一个稳定的波动；夏季在冠层之上向下短波辐射最高的一段时间内，此时树叶较为浓密，冠层中间和冠层之下的向下短波辐射趋于一个平均的量值，波动起伏变化不大。尽管总体随季节的变化趋势不一样，但从辐射波动

的形式来看，冠层中间和冠层之下的向下短波辐射与冠层之上的向下短波辐射随天气波动是一致的，只是冠层中间的辐射波动幅度小很多，冠层之下的辐射波动幅度就更小一些。7 月和 10 月波动平稳，与当时晴空天气相对湿度低吻合一致（图 9）。

无论冠层之上、冠层中间还是冠层之下，向上的太阳短波辐射随季节的变化都与向下的短波辐射变化相似，只是数值要小得多（图 7）。

冠层之上、冠层中间和冠层之下向下的长波辐射（图 8）随时间的变化趋势都是一样的，都是从春季逐渐开始增大至夏季达到最大，随后随着太阳角的减小而逐渐减小并在冬季达到最小。但冠层之上向下的长波辐射比冠层中间和冠层之下的长波辐射的起伏要大。因为冠层之上的长波辐射是来自大气的长波辐射，随着天气条件变化而变化，一般晴天向下长波辐射较小，阴雨天变大。相对而言冠层中间和冠层之下的长波辐射变化幅度比冠层之上的变化幅度小，这是因为一方面冠层长波辐射率相对固定，另一方面冠层及其上截留的雨或雪使得冠层的热容量比空气大，温度变化比气温变化要小一些（李伟平等，2008；王胜等，2005）。就空间变化而言，冠层中间和冠层之下的向下长波辐射值比冠层之上的辐射值高，使得冠层对长波辐射的振幅增大，春秋季最大，其次冬季，夏季增幅最小且比较平稳。这是因为春秋季风大，光线透过树叶，阳光加热冠层反倒最强，在秋季晴空条件最高可达 1.3 倍；夏季虽然辐射比较强，但是雨季，对长波辐射的增幅最小，而且平稳。冬季阴雨天也比较多，相对湿度比较大的频率高，这种天气下冠层温度与大气温度几乎一致，因此冠层对长波辐射没有增幅的频率也很多（图 9），此时冠层中间和冠层之下的长波辐射与冠层之上的都很接近（图 8）。但只要是晴天，冠层对长波辐射增幅也还是显著的（图 9），比夏天的要高，这与阿尔卑斯山杉林冠（李伟平等，2008）观测到的结果是一致的。冠层中间和冠层之下的长波辐射全年都很接近，这是因为二者的温度几乎一致。

冠层之上、冠层中间和冠层之下的向上的长波辐射（图略）相差很小，总体来说冠层之上的辐射稍大于冠层中间的，冠层中间的又稍大于冠层之下的。冠层之上与冠层中

间的向上长波辐射最大相差 7.2W/m^2，冠层之上与冠层之下的最大相差 9.4 W/m^2，冠层中间与冠层之下最大只差 2.6 W/m^2。

3.3 森林冠层内外反照率、透射率及吸收率的变化特征

图 10 淮南森林塔站地表反照率的月平均（柱状）和标准偏差（短线）

Fig. 10 Monthly mean (bar) and standard deviation (short line) of surface albedo at Huainan tower station

淮南森林区冠层顶部（25m）年平均反照率为 0.14，比沙漠和高原地区低（朱德琴等，2006），比西南 40km 的寿县（32°43′N，116°8′)反照率低 0.18（寿县资料来源于“寿县国家气候观象台”）。比北方森林也要低，比中国北方地区（35^{0}N）温带季风气候区（混交林为主）反照率的整体水平（赵久佳和张晓丽，2015）低 0.01，表明淮南森林区的森林茂密、灌丛更多些。四季从春到冬的反照率平均值分别为 0.15，0.14，0.14 和 0.13，与我们挑选代表四个季节的四个典型晴天（图略）的差别很小，4 个典型晴天 4 月 6 日，7 月 13 日，10 月 28 日和 1 月 23 日的日平均反照率分别为 0.15，0.13，0.14，0.13，都是在春季大，冬季小，总的变化比较小。由图 10 可见，冠层顶反照率全年变化不算大（0.12~0.16），总体趋势 7-9 月较低为 0.13，10-11 月微高，12 月-3 月反降，最低为 3 月，4-6 月又升高，一年内最高为 5 月。上半年反照率比下半年的高，符合森林区的特征（闫俊华等，2000)，因为林区有常绿阔叶树，上半年的树叶的颜色较浅，下半年树叶的颜色较深。具体表现为 4-6 月的反照率比较高，其中最高是 5 月，对应于树木长叶的盛期，树叶色泽鲜亮较浅，叶子反射率较高，且这个季节是很多树木花草的开花期，楠树和槐树等的花皆为白色，增大了反照率。7-9 月反照率比较低，且变化不大趋于平稳，是因为这段时间植被树叶浓密，生长状态稳定，树叶的颜色比较深。落叶林树叶在 10-11 月逐渐掉落，这两个月的土壤水分最低，反照率稍微增高。12-3 月反照率又降低，且与别的地方的趋势也不一样（Betts and Ball, 1997; Bonan et al., 1995），原因可能是栎树叶

子虽已凋落，林下是一层厚厚的黄褐色的枯枝落叶，6 月测量大约 5cm 厚，在秋冬随着树叶凋落，会更厚一些，颜色也会逐渐变深，且 11 月-2 月常有降雨发生，土壤湿度比较大，使得反照率降低。站点附近的一些常绿乔木如石楠在冬天仍然生长旺盛，也是反照率比非森林区低的原因。若无资料误差，更确切的原因有待进一步的观测和研究。2 月有降雪，出现 6 天高于 0.15 的值，因此标准偏差大。

图 11 冠层之下、冠层中间和冠层之上的日平均反照率

Fig. 11 Daily mean albedo below, within and above the canopy

我们也计算了冠层内的反照率，6 米处冠层的反照率为 0.25，3.5m 的反照率为 0.2 左右。图 11 给的是日平均冠层之下、冠层中间和冠层之上的反照率。可以看到，树叶成熟期（夏季），反照率冠层中间>冠层之下>冠层之上，即冠层之上反照率最小，里面最大。落叶和生长期（冬季和早春），冠层之下>冠层中间>冠层之上。11 月叶子凋落加之降水比较多（11 月降水量为 116.8mm，仅次于 8 月的 196.1mm，比 7 月的 114.1mm 也多），冠层中间的反照率变小。

图 12 冠层上层、冠层下层和整个冠层的日平均短波辐射透射率

Fig. 12 Daily mean transmittance of the upper layer, lower layer and whole canopy

此外还计算了冠层内外的短波辐射透射率，公式为：$\tau = R_b/R_a$，对于冠层上层、冠层下层和冠层整层的透射率（分别以τ_1，τ_2和τ表示），R_b和R_a分别代表冠层中间距离地面 6m 处向下的太阳短波辐射和冠层之上距离地面 25m 处向下的太阳短波辐射；冠层之下距离地面 3.5m 处向下的太阳短波辐射和 6m 处向下的太阳短波辐射；以及 3.5m 处向下的太阳短波辐射与 25m 处向下的太阳短波辐射的比值。冠层上层和整层的透射率τ_1和τ主要受叶片的影响，在夏季和早秋都比较小（图 12），秋叶随着叶片的落下而增加，到冬天透射率趋于一个平稳的波动量值。夏季冠层整层的短波透射率τ平均为 0.1，Isabelle 等（Isabelle et al.，2018）北方脂冷杉林冠层夏季的整层短波透射率大约为 0.3。冠层下

层的透射率τ_2随秋季的到来逐渐减小，到了冬季又逐渐增大，与太阳高度角的季节变化一致。可能是因为冠层上层树叶偏多，截获了很多光线，使得树叶本身的影响变小。但到了冬天，冠层叶子凋落，只剩下枝干，下层的透光率增加趋于一个平稳的波动（图 12）。阿尔卑斯山杉林冠层整层短波透射率从 10 月中旬到第二年 2 月也有同样的变化趋势，经过逐渐减小再逐渐增加的过程（李伟平等，2008）。冠层上层的透射率τ_1在夏秋季节很低，在 0.15 上下浮动，只比整层的τ高一点，比下层的τ_2高很多，因为栎树树冠上部分树叶比下部分多（需要实测 LAI 以确定），拦截了大部分的辐射。冬季冠层上层的透射率τ_1介于冠层整层和下层的透射率之间，如 12 月冠层整层的平均透射率τ为 0.62，冠层上层的平均透射率τ_1为 0.85,下层的平均透射率τ_2为 0.73。是因为冠层上面的叶子落得多一些，树冠上只有树干和枝条及少量叶子所致。

图 13 地表和冠层的日平均吸收率

Fig. 13 Daily mean absorptance of the ground and canopy

地表的短波辐射吸收率为$\Upsilon_{\mathrm{ground}} = 1 - \alpha_{\mathrm{ground}}$, α_{ground}为地表的反照率，即前面提到的冠层之下 3.5m 的反照率。冠层吸收率的计算是$\Upsilon_{\mathrm{canopy}} = 1 - \alpha_{\mathrm{canopy}} - \tau_{\mathrm{canopy}}$, α_{canopy}为冠层的反射率，τ_{canopy}为冠层透射率。图 13 给出的是日平均的地表和冠层的太阳辐射吸收率。可以看到，地面的吸收率在冬天稍高，是因为地面有一层厚厚的较暗的枯枝落叶，土壤的吸收率增大造成。冠层的吸收率在夏季最高，秋季逐渐降低，随着叶子凋落在冬季迅速减小，达到平稳。

冠层对辐射的吸收直接用于光合作用和叶温的升高。太阳辐射中能被绿色植物用来进行光合作用的那部分能量称为光合有效辐射（PAR），波长 0.4-0.7um，是形成生物量的基本能源，直接影响着植物的生长、发育、产量和产品质量。在森林冠层顶 PAR 约占太阳辐射的 0.4（Betts and Ball, 1997），林内的 PAR 由于同样受到森林冠层、林下灌木、草本植物的阻挡和截留，其时空分布会发生显著的变化，强度逐级降低，与森林的类型、

结构和功能等密切相关，受晴天和阴天的影响也很大，与太阳辐射的比例和冠层顶是不同的（Escobedo et al., 2009），因此研究光合作用还需要进行 PAR 的观测。

由于森林冠层上面的辐射传感器不在小塔的正上方，而是在 17.2m 之外的大塔上，则两边净辐射和反射率会有少量差别。大塔底部做了些人为处理，15m^2 围栏内为粗糙的水泥表面，已无植被覆盖，地表辐射与小塔下面自然植被覆盖是不一样的。虽然两个塔之间仅相距 17.2m，文中利用大塔冠层顶的辐射与小塔冠层内的辐射计算反射率、透射率和吸收率或许也会有一定误差。

4 结论

本文利用淮南森林站 2018 年 7 月 1 日至 2019 年 6 月 30 日观测到的冠层辐射数据，分析了淮南栎树森林冠层顶部太阳辐射的变化、太阳辐射在冠层中的分布传输时空变化特征，以及冠层反照率、透射率和吸收率等。得到了如下一些结果：

（1）从春季到夏季，栎树冠层之上向下的太阳短波辐射增加，到冬季逐渐减少。由于冠层的消光作用，冠层中间和冠层之下的向下短波辐射比冠层之上的小，且呈现不同的变化趋势。从早春开始，由于叶片生长增多，其向下的太阳短波辐射下降，从秋季到冬季树叶凋落，其向下的太阳辐射增加，与冠层之上的相反；但从晚春开始，冠层内和冠层下的辐射趋于一个稳定的波动；夏季在冠层以上向下短波辐射最高的一段时间内，此时树叶较为浓密，冠层中间和冠层之下的向下短波辐射趋于一个平均的量值，波动起伏变化不大。对于向上的短波辐射，无论冠层之上、冠层中间还是冠层之下，随季节的变化都与向下的短波辐射相似，只是数值要小得多。

（2）冠层之上、冠层中间和冠层之下向下的长波辐射随时间的变化从春季逐渐开始增大至夏季达到最大，随后随着太阳角的减小而逐渐减小并在冬季达到最小；就空间变化而言，冠层中间和冠层之下的向下长波辐射值比冠层之上的辐射值高，使得冠层对长波辐射的振幅增大，晴空条件最高可达 1.3 倍。

（3）淮南森林区冠层之上（距地面 25m）年平均反照率为 0.14，比中国北方地区（35^0N）温带季风气候区（混交林为主）反照率的整体水平低 0.01，表明淮南的森林茂密、灌丛更多些。

（4）冠层上层和整层的短波辐射透射率主要受叶片的影响，在夏季和早秋都比较小，秋季随着叶片的落下而增加，到冬天透射率趋于一个平稳的波动。夏季，冠层整层的短波透射率τ平均为 0.1。冠层上层短波透射率τ_1在夏秋季节很低，在 0.15 上下浮动，只比整层的透射率τ高一点，比冠层下层的透射率τ_2高很多，因为栎树树冠上部分树叶比下部分多，拦截了大部分的辐射。到冬季，冠层上层透射率τ_1介于τ和冠层下层透射率τ_2之间，因为树叶凋落，树冠上只有树干和枝条及少量叶子所致。τ_2随秋季的到来逐渐减小，到了冬季又逐渐增大，与太阳高度角的季节变化一致。但到了冬天，叶子凋落，透射率增加并趋于一个平稳的波动。

（5）地面的短波吸收率在冬天稍高，可能是因为地面有一层厚厚的较暗的枯枝落叶，土壤的吸收率增大造成。冠层的短波吸收率在夏季最高，秋季逐渐降低，随着叶子凋落在冬季迅速减小，达到平稳。

参考文献（References）

Bonan G B, Chapin F S, Thompson S L. 1995. Boreal forest and tundra ecosystems as components of the climate system [J]. Climatic Change, 29: 145-167.

Bonan G B. 2008. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests [J]. Science, 320(5882): 1444-1449.

Betts A K, Ball J H. 1997. Albedo over the boreal forest [J]. J. Geophys. Res., 102 (D24): 28901-28909.

Cannell M G R, Sheppard L J, Milne R. 1988. Light use efficiency and woody biomass production of poplar and willow [J]. Forestry: An International Journal of Forest Research, 61(2): 125–136.

Dai X. 1996. Influence of light conditions in canopy gaps on forest regeneration: A new gap light index and its application in a boreal forest in east-central Sweden [J]. For. Ecol. Manage, 84: 187–197.

Dai Y, Dickinson R E, Wang Y P. 2004. A two-big-leaf model for canopy temperature, photosynthesis, and stomatal conductance [J]. Journal of Climate, 17(12): 2281-2299.

Dai Q, Sun S. 2006. A generalized layered radiative transfer model in the vegetation canopy [J]. Adv. Atmos. Sci., 23(2): 243-257.

Dai Q, Sun S. 2007. A simplified scheme of the generalized layered radiative transfer model [J]. Adv. Atmos. Sci., 24(2): 213-226.

Escobedo J F, Gomes E N, Oliveira A P, et al. 2009. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil [J]. Applied Energy, 86: 299-309.

李伟平, 孙菽芬, 刘新, 等. 2008. 阿尔卑斯山杉林冠层影响辐射传输的个例分析[J]. 高原气象, 27(4): 51-58. Li Weiping, Sun Shufen, Liu Xin, et al. 2008. A case study of the influence of needle leaf forest canopy on the radiation transfer over Alps Mountain[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27(4): 51-58.

孟翔晨, 历华, 杜永明, 等. 2018. Landsat 8地表温度反演及验证—以黑河流域为例[J]. 遥感学报, 22(5): 857–871. Meng Xiangchen, Li Hua, Du Yongming, et al. 2018. Retrieval and validation of the land surface temperature derived from Landsat 8 data: A case study of the Heihe River Basin [J]. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 22(5): 857–871. doi:10.11834/jrs.20187411

Isabelle P E, Nadeau D F, Asselin M H, et al. 2018. Solar radiation transmittance of a boreal balsam fir canopy: Spatiotemporal variability and impacts on growing season hydrology [J]. Agric. For. Meteorol., 263 (15): 1-14. 10.1016/j.agrformet.2018.07.022

Mercado L M, Bellouin N, Sitch S, et al. 2009. Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink [J]. Nature, 458, 1014-1017. doi.org/10.1038/nature07949

Monteith J L. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems [J]. J. Appl. Ecol., 9: 747–766.

Mõttus M, Sulev M. 2006. Radiation fluxes and canopy transmittance: Models and measurements inside a willow canopy [J]. J. Geophys. Res., 111(D2): D02109. doi:10.1029/2005JD005932

Ni W, Li X, Woodcock C E, et al. 1997. Transmission of solar radiation in boreal conifer forests: Measurements and models [J]. J. Geophys. Res., 102(D24): 29555-29566. doi:10.1029/97JD00198

Oker-Blom P, Pukkala T, Kuuluvainen T. 1989. Relationship between radiation interception and photosynthesis in forest canopies: Effect of stand structure ad latitude [J]. Ecol. Model., 49(1-2): 73–87.

Pieruschka R, Huber G, Berry J A. 2010. Control of transpiration by radiation [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences. 107(30): 13372–13377. doi.org/10.1073/pnas.0913177107

Pinty B, Lavergne T, Dickinson R E, et al. 2006. Simplifying the interaction of land surfaces with radiation for relating remote sensing products to climate models [J]. J. Geophys. Res., 111(D2), D02116. doi.org/10.1029/2005JD005952

Qiu B, Guo W, Xue Y, et al. 2016. Implementation and evaluation of a generalized radiative transfer scheme within canopy in the soil-vegetation-atmosphere transfer (SVAT) model [J].

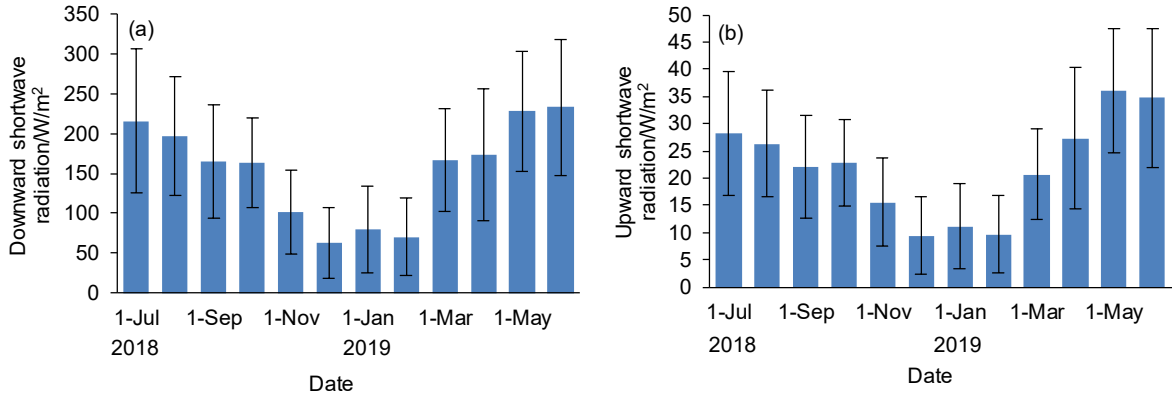
J. Geophys. Res. Atmos., 121(20): 12145-12163. doi:10.1002/ 2016JD025328
Sellers P J. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration [J]. Int. J. Remote Sens., 6: 1335–1372. doi.org/10.1080/01431168508948283
Sellers P, Hall F, Margolis H, et al. 1995. The Boreal Ecosystem–Atmosphere Study (BOREAS): An overview and early results from the 1994 field year [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 76(9):1549-1577.
王怀军，潘莹萍，陈忠升．2017．1960~2014年淮河流域极端气温和降水时空变化特征[J]. 地理科学, 37(12):1900-1908. Wang Huaijun, Pan Yingping, Chen Zhongsheng. 2017. Spatial and temporal patterns of temperature and precipitation extremes in the Huaihe River Basin, China in 1960-2014[J]. Scientia geographica sinica (in Chinese), 37(12): 1900-1908.
王胜，张强，卫国安. 2005．敦煌绿洲-戈壁过渡带地表辐射与能量特征分析[J] .高原气象, 24(4): 556-562. Wang Sheng, Zhang Qiang, Wei Guoan. Analyses on Characters of surface radiation and energy at oasis-desert transition zone in Dunhuang[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24(4):556-562.
韦志刚，胡嘉骢，董文杰，等. 2016．珠海凤凰山陆气相互作用与碳通量观测塔的基本观测及晴天主要观测量的日变化特征[J]．大气科学, 40 (2): 423-436. Wei Zhigang, Hu Jiacong, Dong Wenjie, et al. 2016. Basic observations and diurnal variation of key meteorological variables on clear days in the Phoenix Mountain area of Zhuhai [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (2): 423-436. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.15111
闫俊华，周国逸，韦琴. 2000．鼎湖山季风常绿阔叶林小气候特征分析. 武汉植物学研究，(05), 48-55. Yan Junhua, Zhou Guoyi, Wei Qin. 2000. Environment of microclimate of monsoon evergreen broad-leaves forest in Dinghushan. Plant Science Journal (in Chinese), 18(5): 397-404.
颜俊，高正华，赵锐. 2019．淮南1957_2017年夏季降水变化特征．中国农学通报, 35(7):105-109. Yan Jun, Gao Zhenghua, zhao Rui. 2019. Summer precipitation in Huainan from 1957 to 2017: variation characteristics[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin (in Chinese), 35(7):105-109.
Wang Y P, Leuning R. 1998. A two-leaf model for canopy conductance, photosynthesis and partitioning of available energy. I: Model description and comparison with a multi-layered model [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 91(1-2):89-111.
Wang Y P. 2003. A comparison of three different canopy radiation models commonly used in plant modeling [J]. Functional Plant Biology, 30(2):143-152.
赵久佳，张晓丽. 2015．中国北方地区森林覆盖及反照率年际变化[J]．浙江农林大学学报 32(5) . Zhao Jiujia, Zhang Xiaoli. 2015. Interannual variation of forest cover and albedo in Northern China [J]. Journal of Zhejiang A&F University (in Chinese), 32(5): 683-690. doi: 10.11833/j.issn. 2095-0756.2015.05.00
朱德琴，陈文，刘辉志，等. 2006．我国西北典型干旱区和高原地区地表辐射能量收支特

征的比较[J]. 气候与环境研究, 11: 683-690. Zhu Deqin, Chen Wen, Liu Huizhi, et al. 2006. The comparison of surface radiation budget between typical arid region in Northwest China and plateau region [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11: 683-690. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2006.06.02

张敏. 2008. 油松冠层辐射特征的研究[D]. 西北农林科技大学硕士学位论文, 41pp. Zhang min. 2008. Characteristics of solar radiation and its distribution above the canopy of the Pinus tabulaeformis [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Northwest A&F University, 41pp.

图1 淮南森林观测塔站点地貌图（a）及观测大塔（b）

Fig. 1 (a) Geomorphologic map around tower station and (b) the 108 meter's high tower at Huainan



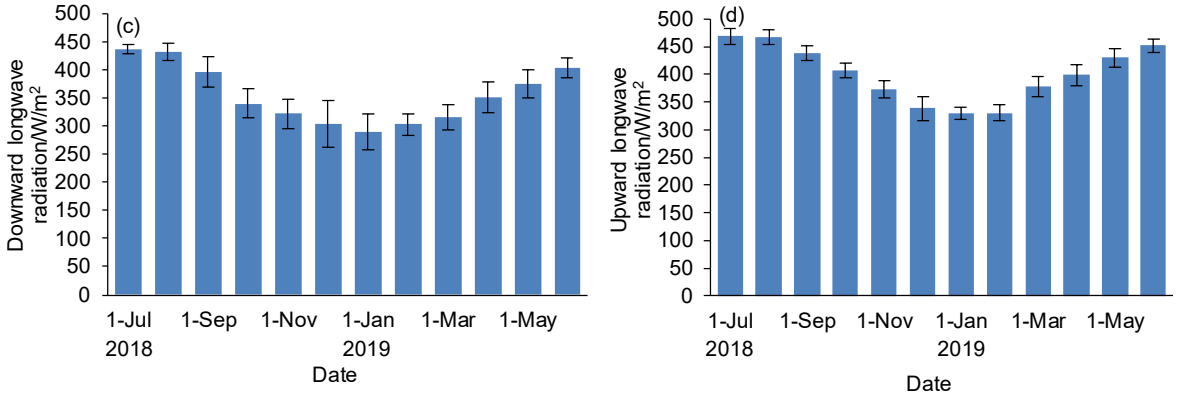


图 2 淮南森林塔站冠层顶向下短波辐射（a）、向上短波辐射（b）、向下长波辐射（c）和向上长波辐射（d）的月平均值（柱状）和标准差（短线）

Fig. 2 Monthly mean (bar) and standard deviation (short line) of downward shortwave radiation (a), upward shortwave radiation (b), downward longwave radiation (c) and upward longwave radiation (d) above the canopy at Huainan tower station

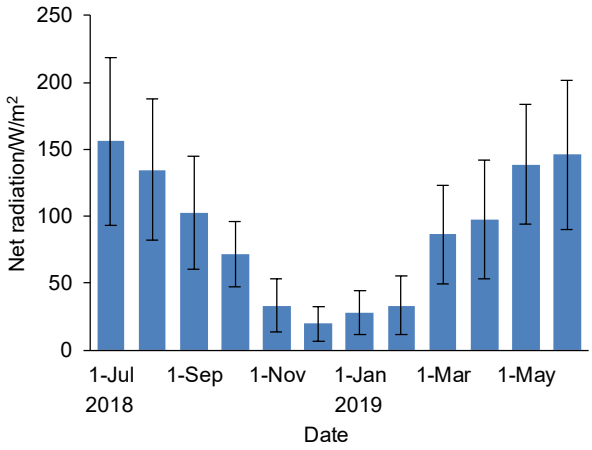
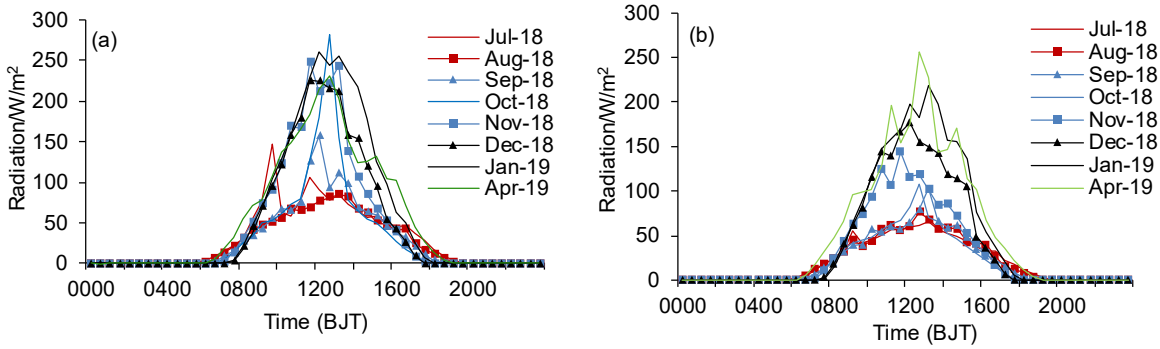


图 3 淮南森林塔站冠层顶净辐射月平均（柱状）和标准偏差（短线）

Fig. 3 Monthly mean (bar) and standard deviation (short line) of net radiation above canopy at Huainan tower station



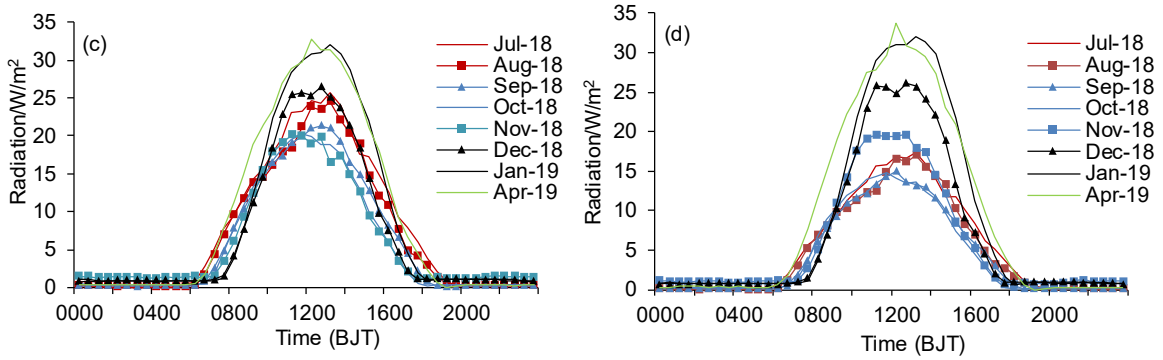


图 4 淮南森林塔站栎树植被冠层内 6m（a）和 3.5m（b）向下的短波辐射，以及 6m（c）和 3.5m（d）向上的短波辐射月平均日变化曲线

Fig. 4 Diurnal variation of monthly mean downward shortwave radiation within the canopy (6m) (a) and below the canopy (3.5m) (b), and upward shortwave radiation within the canopy (6m) (c) and below the canopy (3.5m) (d) at Huainan tower station

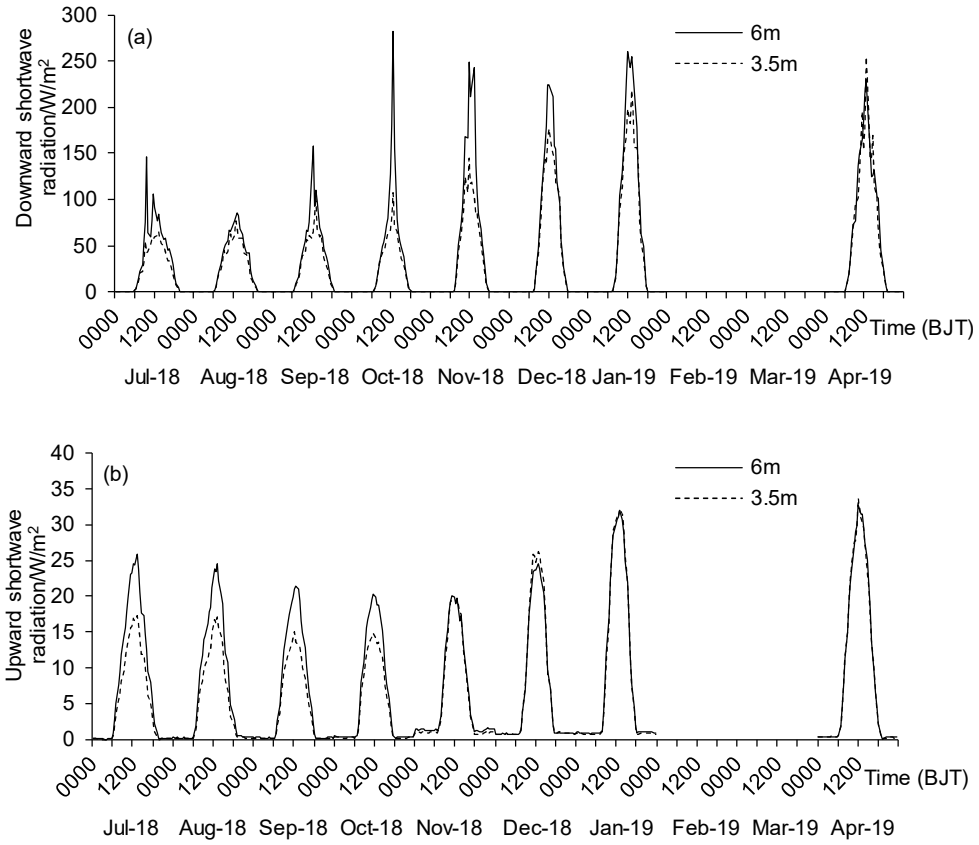


图 5 淮南森林塔站栎树植被冠层内 6m 和 3.5m 高度向下(a)和向上(b)短波辐射月平均日变化

Fig. 5 Diurnal variation of monthly mean downward (a) and upward (b) shortwave radiation within (6m) and below (3.5m) the canopy at Huainan tower station

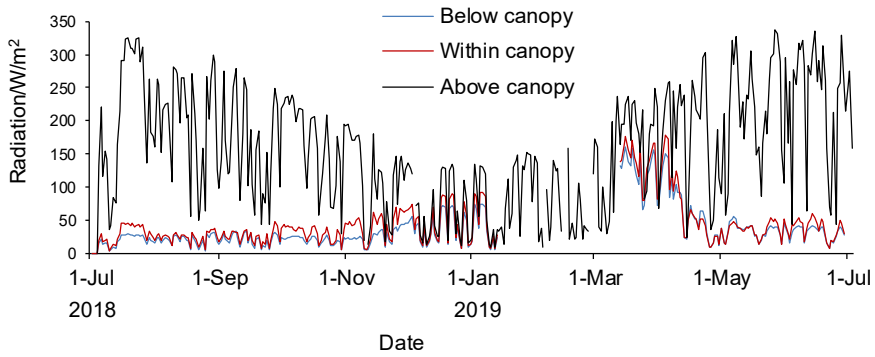


图 6 冠层之上、冠层中间和冠层之下日平均太阳向下短波辐射

Fig. 6 Daily mean downward shortwave radiation below, within and above the canopy

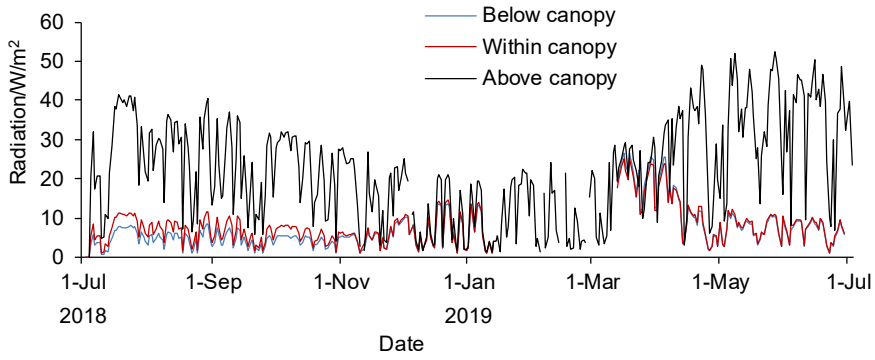


图 7　冠层之上、冠层中间和冠层之下日平均太阳向上短波辐射

Fig. 7 As figure 6 for upward shortwave radiation

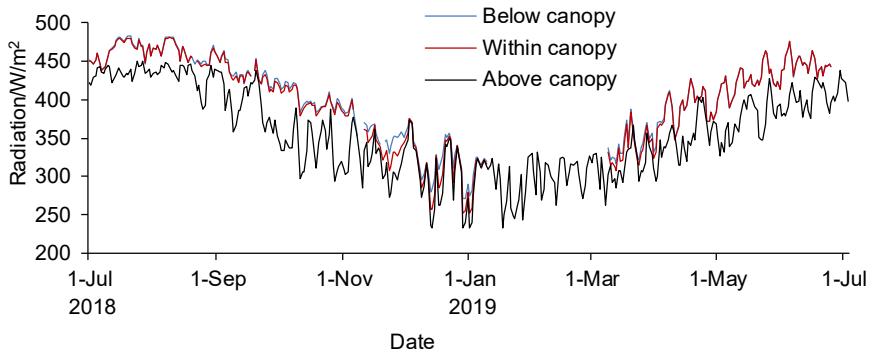


图 8 冠层之上、冠层中间和冠层之下日平均太阳向下长波辐射

Fig. 8 As figure 6 for downward longwave radiation

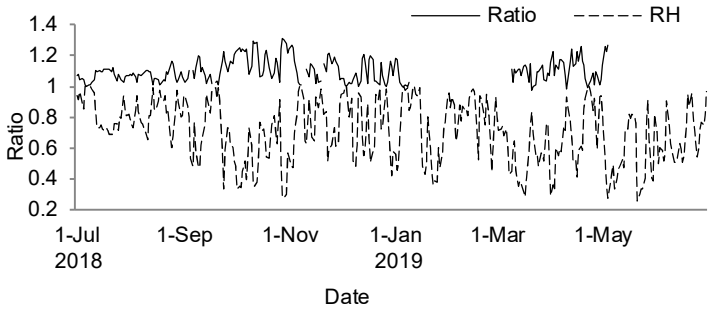


图 9 冠层之下与冠层之上日平均入射长波辐射的比值（实线）及日平均大气相对湿度（虚线）

Fig. 9 The ratio of downward longwave radiation below the canopy to that above the canopy (solid line) and daily mean atmospheric relative humidity (dash line)

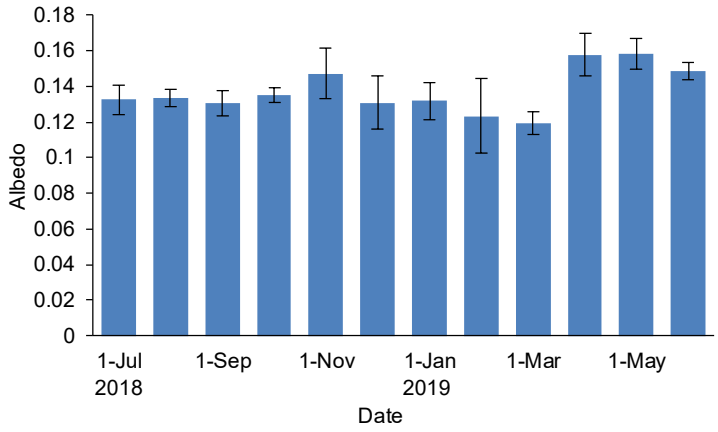


图 10 淮南森林塔站地表反照率的月平均（柱状）和标准偏差（短线）

Fig. 10 Monthly mean (bar) and standard deviation (short line) of surface albedo at Huainan tower station

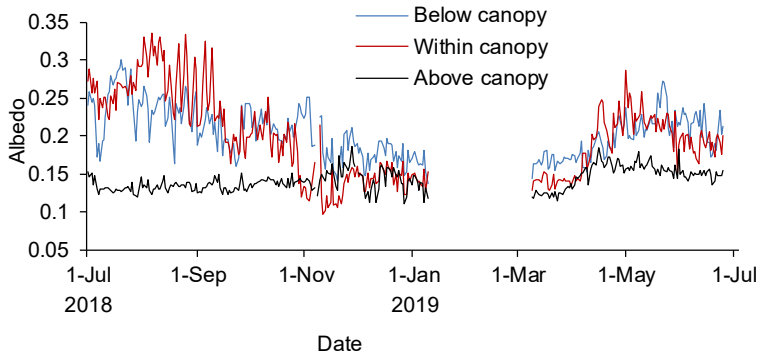


图 11 冠层之下、冠层中间和冠层之上的日平均反照率

Fig. 11 Daily mean albedo below, within and above the canopy

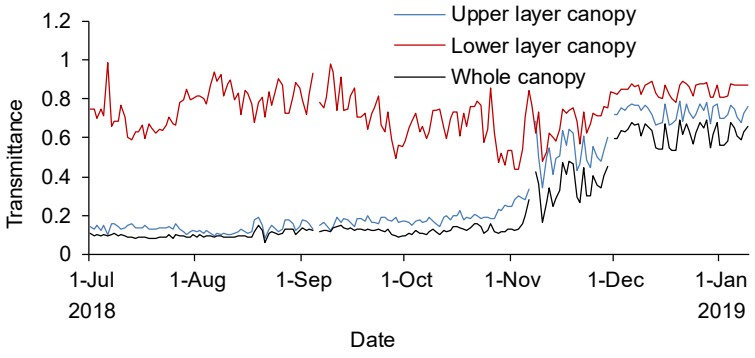


图 12 冠层上层、冠层下层和整个冠层的日平均短波辐射透射率

Fig. 12 Daily mean transmittance of the upper layer, lower layer and whole canopy

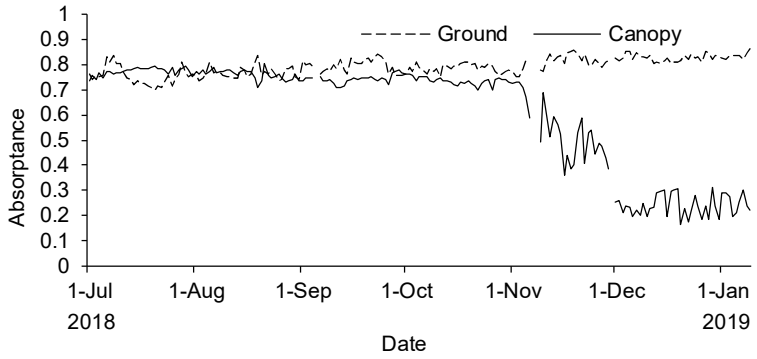


图 13 地表和冠层的日平均吸收率

Fig. 13 Daily mean absorptance of the ground and canopy