

DOI: 10.5846/stxb201712182270

李桐, 鄢春华, 王蓓, 赵文利, 张杨, 邱国玉. 九寨沟针阔混交林能量平衡特征. 生态学报, 2018, 38(22): - .

Li T, Yan C H, Wang B, Zhao W L, Zhang Y, Qiu G Y. Characteristics of energy balance in a mixed forest in Jiuzhaigou Valley. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22): - .

## 九寨沟针阔混交林能量平衡特征

李 桐, 鄢春华, 王 蓓, 赵文利, 张 杨, 邱国玉\*

北京大学深圳研究生院环境与能源学院 深圳市太阳能与风能海水淡化关键技术工程实验室, 深圳 518055

**摘要:** 青藏高原及其周边地区的能量交换过程是推动我国及东亚地区天气过程演变与气候变化的重要因素。青藏高原及其周边山谷地区与青藏高原—四川盆地过渡区具有独特的大气边界层热力结构, 其能量收支研究不可忽视, 但由于长期观测数据的缺失, 该地区的能量平衡特征尚未解明。以青藏高原东北边缘向四川盆地陡跌的过渡地带的典型亚高山河谷九寨沟的针阔混交林为研究对象, 利用涡度相关系统, 对九寨沟典型针阔混交林 2014—2015 年各能量通量进行了连续观测, 分析了该生态系统能量平衡各分量的变化特征, 讨论其能量闭合状况。结果表明: 能量平衡各分量均与净辐射有相似的日变化、季节变化特征。与萌芽期、生长期、生长后期相比, 冻土期各分量峰现时间均延迟 2—3 h; 而且各项绝对值大小在不同季节占比不同; 冻土期和萌芽期显热通量为能量主要支出项; 而生长期与生长后期潜热通量占主导地位。九寨沟 2014 与 2015 年生长期潜热通量占净辐射比值分别为 0.69、0.75, 远高于青藏高原其他地区。两年间研究区能量不闭合, 能量闭合度分别为 0.75、0.71。本研究对于更好地理解高原山区和从高原到盆地的能量循环机理和动力学有着重要意义。

**关键词:** 青藏高原-四川盆地过渡带; 涡度相关; 能量平衡; 能量闭合

## Characteristics of energy balance in a mixed forest in Jiuzhaigou Valley

LI Tong, YAN Chunhua, WANG Bei, ZHAO Wenli, ZHANG Yang, QIU Guoyu\*

Shenzhen Engineering Laboratory for Water Desalination with Renewable Energy, School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China

**Abstract:** In China and East Asia, characteristics of energy exchange in the Tibetan Plateau and its surrounding areas are important factors for promoting the processes of weather change and climate change. The energy budget cannot be ignored because of the unique thermal structure of the atmospheric boundary layer of the Qinghai-Tibet Plateau and its surrounding valleys, as well as of the transition zone between the Qinghai-Tibet Plateau and Sichuan Basin. However, because of the lack of long-term observational data, the characteristics of energy balance in these areas are unclear. In this study, we installed an eddy covariance system over a coniferous and broad-leaved mixed forest in Jiuzhaigou Valley, which is a typical subalpine valley in the transitional zone extending from the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau to the Sichuan Basin. The turbulent energy fluxes and available energy over this forest were continuously measured for two years, from 2014 to 2015; the characteristics of energy balance were analyzed and energy balance closure was discussed. The results showed that the diurnal and seasonal variations in energy balance terms were similar to those in net radiation. When the pre-growth, growth, and post-growth periods were compared, a 2—3 hour lag was observed in the peak time of each energy balance term during the frozen-soil period. Moreover, the values of each term varied in different seasons. Sensible heat flux dominated the energy terms in the pre-growth and frozen-soil periods, while available energy was mainly consumed by latent heat flux in the growth and post-growth periods. In the growth period of 2014 and 2015, the ratio of latent heat flux to net radiation was

基金项目: 科技部科技基础资源调查专项《中国荒漠主要植物群落分布图集与数据库(2017FY100206-03)》

收稿日期: 2017-12-18; 网络出版日期: 2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qiugy@pkusz.edu.cn

0.69 and 0.75, respectively, and these values are dramatically higher than those in other parts of the Qinghai-Tibetan Plateau. The energy budget was unbalanced in the two years, and the energy balance closure was 0.75 and 0.71, respectively. These results are essential for a better understanding of the energy cycling mechanism and dynamics from the plateau to the basin, as well as in the mountainous areas of the Tibetan Plateau.

**Key Words:** Transition zone between Qinghai-Tibet Plateau and Sichuan Basin; eddy covariance; energy balance; energy balance closure

能量交换对推动气候变化至关重要<sup>[1]</sup>。青藏高原地区海拔高、地区广以及下垫面复杂(林地、草地、草甸、积雪与冰川等),是我国及东亚地区一些重要天气系统产生源地,该地区主要是通过地气相互作用交换水分和能量过程对亚洲季风、全球大气环流及全球气候变化产生巨大的影响<sup>[2-4]</sup>。在全球变化背景下,青藏高原对于气候变化响应更为敏感<sup>[2]</sup>。由于青藏高原对大气的热力和动力效应都是通过高原近地层与边界层逐渐影响自由大气,探讨青藏高原地表与大气之间能量交换是剖析高原大气边界层地气相互作用的关键科学问题之一<sup>[5-7]</sup>。

青藏高原地表辐射平衡和热量平衡特征是近年来青藏高原地区的研究热点问题<sup>[3-4, 8-20]</sup>。然而,以往开展的研究主要集中在青藏高原主体,对青藏高原及其周边广泛分布的山谷地区的研究极为不足。山谷地区由于地形起伏大、下垫面不均一,局地环流十分复杂。因此,对青藏高原大气边界层的研究,不能忽略青藏高原及其周边的山谷地区。

由于大气边界层热力结构与高原、盆地和高原平原过渡地区的差异较大,过渡地区有着独特于高原和盆地的地表能量过程。大部分在青藏高原的能量收支研究表明季风前(冬、春季)显热通量占主导地位,季风期和季风后(夏、秋季)潜热通量是净辐射的主要消耗项<sup>[10, 17-20]</sup>,极少数研究发现全年显热通量在净辐射的分布中占主导地位<sup>[13]</sup>,但在四川盆地,研究发现全年潜热通量在净辐射的分布中占主导地位,显热通量的作用和土壤热通量相当<sup>[17]</sup>。因此,为了更好地理解从高原到盆地的能量循环机理和动力学,研究过渡区的能量分配至关重要。

本文选择青藏高原东北边缘向四川盆地陡跌的过渡地带的亚高山河谷——九寨沟为研究区域,以九寨沟典型针阔混交林为研究对象,基于涡度相关系统的实测数据,研究其能量收支各分量的分配特征,分析其能量闭合状况,为进一步了解青藏高原及周边地区不同区域地表能量过程及相关机理提供依据。

## 1 研究区概况及研究方法

### 1.1 研究区概况

本研究在九寨沟国家自然保护区内进行,地处青藏高原东北边缘向四川陡跌的过渡地带,位于岷山山脉南段,行政区划属于四川省阿坝藏族羌族自治州九寨沟县,地理坐标为 32°53′—33°20′N, 103°46′—104°05′E。在高原季风和亚热带海洋季风的影响下,主要表现出冷凉干燥的季风气候特征。同时由于九寨沟内高山峡谷切割分布,垂直海拔差异大,气候垂直分带明显。该地区多年平均气温为 7.3℃,年日照时数为 1800 h 左右,多年平均降水量为 762 mm,多为 700—800 mm,降水多集中在 4—10 月,占到全年降水量的 70%以上,降水年变化率比较小(10%—15%)。九寨沟植被覆盖率超过 80%,其中森林覆盖率在 65%左右<sup>[21]</sup>,天然植被类型垂直分布包含针叶林、阔叶林、灌丛、草甸。本研究选取海拔 2600 m 以下的天然针叶林遭受自然或人为破坏后人为更新了油松的针阔叶混交林为研究对象,主要树种有黄果冷杉(*Abies ernestii*)、青杆(*Picea wilsonii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)、红桦(*Betula albo-sinensis*)、辽东栎(*Quercus wutaishansea*)、茶条槭(*Acer ginnala*)等。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 涡度相关系统

涡度相关系统(Eddy covariance, EC)主要由 LI-7500A 开路式 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 分析仪(LI-COR, Lincoln, NE, USA), R3-50 三维超声风速风向传感器(Gill, Hampshire, UK)组成,搭配 LI-7550 分析器预处理元件(LI-COR, Lincoln, NE, USA)和 CR3000 数据采集器(Campbell Scientific, Logan, UT, USA)进行数据预处理和存储,安装高度距地面 30 m。通过 CR3000 数据采集器采集存储数据,原始数据采集频率为 10 Hz,每 30 min 记录 1 次所有观测数据和处理结果的平均值,同时每 10 min 记录 1 次辐射通量、温湿度、降雨量基础气象数据的平均值。地表以下 3 cm 处安装两个土壤热通量板(HFP01, Hukseflux, Netherlands),采用 CR1000 数据采集器(Campbell Scientific, Logan, UT, USA)采集土壤热通量数据,采集数据间隔为 1 min,每 10 min 记录 1 次平均值。

### 1.2.2 数据处理

本研究采用的涡度相关系统是一种可以直接准确观测水热垂直传输通量的微气象学方法<sup>[22]</sup>。本研究利用 CR3000 与 LI-7550 分析器预处理元件对采样频率为 10 Hz 的气象参数(温度、湿度、风速等)进行处理,进而计算出潜热通量和显热通量。

由于数据处理过程中对湍流数据进行了大量筛选以及传感器状态异常等原因,通量数据会存在许多缺失值或异常值。其中异常值主要包括少部分大于 800 W/m<sup>2</sup>的极大值,小于-100 W/m<sup>2</sup>的极小值,极少数的大于 100 W/m<sup>2</sup>夜间异常值以及 H<sub>2</sub>O 与 CO<sub>2</sub>浓度、辐射通量超过传感器测量阈值的数据。因此为了获取完整的通量数据,就必须对缺失的通量值进行插补。本研究中显热通量  $H$  缺失值或异常值主要是根据当地实测有效显热通量与净辐射通量的线性关系进行插值<sup>[23]</sup>。而潜热通量  $LE$  缺失值或异常值则根据 Wilson and Baldocchi<sup>[24]</sup>基于 Priestly-Talyor 公式<sup>[22]</sup>提出的方法:

$$LE = \alpha LE_{eq} \quad (1)$$

式中,  $LE$  为潜热通量缺失值或异常值,  $\alpha$  为两周内有有效潜热通量数据与根据 30 min 有效气象数据计算得到的平衡蒸散发比值的平均值。Priestley 和 Talyor<sup>[25]</sup>指出对于任意足够宽阔的均匀下垫面(无论水分供应是否充足),此时下垫面上空大气趋于饱和,此时蒸散发只包括辐射项,并将此定义为平衡蒸散发( $LE_{eq}$ ),计算公式为

$$LE_{eq} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}(R_n - G) \quad (2)$$

式中,  $\Delta$  为饱和水汽压-气温曲线的斜率(kPa/K),  $\gamma$  为空气湿度常数(kPa/K),显热通量,  $R_n$  是 30 min 净辐射通量(W/m<sup>2</sup>),  $G$  是 30 min 土壤热通量(W/m<sup>2</sup>)。

涡度相关数据处理过程如图 1 所示。根据最终获得的 30 min 完整通量数据即可进一步计算得到蒸散发与能量收支各项的日值、月值与年度值。

### 1.2.3 能量闭合分析

来自太阳辐射的能量首先经过云层和地面反射、大气吸收、海洋和陆地吸收等过程。然后,被海洋和陆地吸收的能量又以显热通量、潜热通量和红外辐射的形式返回到大气和宇宙,形成了能量循环。总体来说,地球系统的能量收支基本处于一种动态平衡状态,到达地球的能量与地球放出的能量相等。

对于某一地区或某一生态系统而言,地表能量平衡方程一般可写成<sup>[26]</sup>

$$R_n + A_e = H + LE + G + P_0 + A_d \quad (3)$$

式中,  $R_n$  为净辐射通量,为到达地面的总辐射减去返回大气的辐射(包括净短波辐射和净长波辐射);  $H$  为显热通量,  $LE$  为潜热通量,为地表与大气的热量交换;  $G$  为土壤热通量,其值为通过地表的能量传输。此外,  $A_e$  为人工热源辐射量,包括燃料等消耗对地表产生的能量释放;  $P_0$  为植物光合成的能量消耗,其所占比例往往很小,在很多场合可以忽略;  $A_d$  为因空气或水的水平流动引起的能量净损失的移流项。在不考虑人类能量释

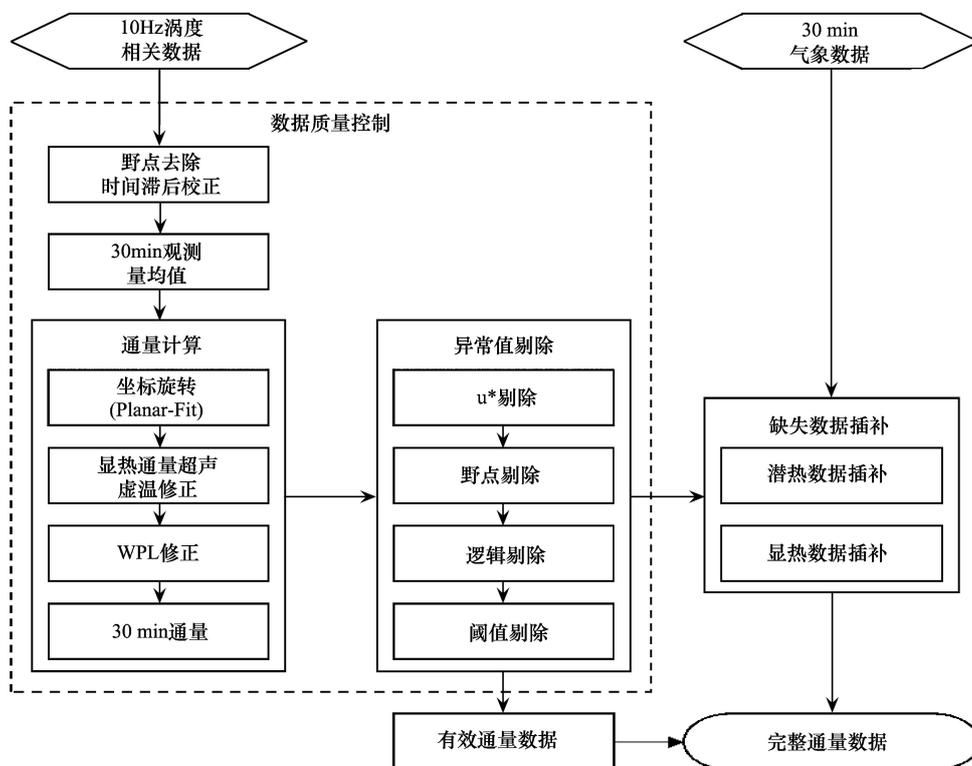


图1 涡度相关系统数据处理流程

Fig.1 Flow charts of eddy covariance data processing

WPL 为三个人的人名首字母, Webb E K, Pearman G I, Leuning R, 通常都写为 WPL

放、忽略植物光合作用能量消耗以及水平方向能量输送可忽略的情况下,地表能量平衡方程可以简化表示为:

$$R_n = H + LE + G \quad (4)$$

当湍流能 ( $LE + H$ ) 与有效能 ( $R_n - G$ ) 相等时,该系统能量闭合,反之能量不闭合。本文采用线性回归法来分析研究区针阔混交林能量闭合状况<sup>[10,27-30]</sup>。实验中根据土壤表层 3 cm 的温度和生长周期,将全年分为萌芽期(3月)、生长期(4—9月)、生长后期(10—11月)、冻土期(12—次年2月)共4个时期。

## 2 结果与分析

### 2.1 能量收支各分量的日变化

各个时期各能量平衡分量变化如图2(图例中, $LE$ :潜热通量, Latent heat; $H$ :显热通量, Sensible heat; $R_n$ :净辐射, Net radiation; $G$ :土壤热通量, Soil heat)。九寨沟典型针阔混交林能量平衡各分量各时期的平均日变化均呈明显的单峰型曲线,夜间波动不大,萌芽期、生长期、生长后期峰现时间无明显差异,均在正午12:00—13:00左右,冻土期峰现时间有所延迟大约在15:00。各时期日均值均为晨间各分量由负值变为正值;在日落后各分量由正值变为负值。生长期各分量正值持续时间最长,约为12h,8:00至20:00;冻土期各分量正值持续时间最短且各分量由负值变为正值分界点最晚,约为6h,12:00至18:00;萌芽期、生长后期各分量正值持续时间约为10h,8:00至18:00。

净辐射在生长期值最大,日均值  $125 \text{ W/m}^2$ ,步入冻土期后最小,日均值为  $52 \text{ W/m}^2$ 。正午时刻达到日最大,但冻土期的峰值有所延迟。潜热通量与显热通量与净辐射通量有相似的日变化趋势,峰现时间也与净辐射同步。比较同一时期内显热通量与潜热通量差异如表1,并对同一时期内二者进行 One-Way ANOVA 分析,结果表明在萌芽期日内显热通量  $30 \text{ W/m}^2$  高于潜热通量  $28 \text{ W/m}^2$ ,但差异不显著 ( $P = 0.830, n = 1488$ ),在进入生长期和生长后期日内潜热通量均显著高于显热通量(生长期和生长后期内  $P < 0.001, n = 8784$  与  $2928$ ),

进入冻土期后显热通量  $11 \text{ W/m}^2$  再次高于潜热通量  $10 \text{ W/m}^2$ , 两者差异仍然不显著 ( $P=0.924, n=4320$ )。这与大部分在青藏高原进行的能量平衡研究结果一致, 冻土期显热通量高于潜热通量, 而生长期显热通量低于潜热通量<sup>[10,17-20]</sup>。不同的是, Gu 等<sup>[7]</sup>在青藏高原东北部的研究发现萌芽期、生长后期与冻土期主要能量消耗均为显热通量。岳平等<sup>[17]</sup>的研究则指出四川盆地全年潜热通量在净辐射的分布中占主导地位, 显热通量的作用和土壤热通量相当。由此可知, 由于大气边界层热力结构与高原、盆地和过渡地区的差异较大, 研究区有着独特于青藏高原和四川盆地的地表能量过程。

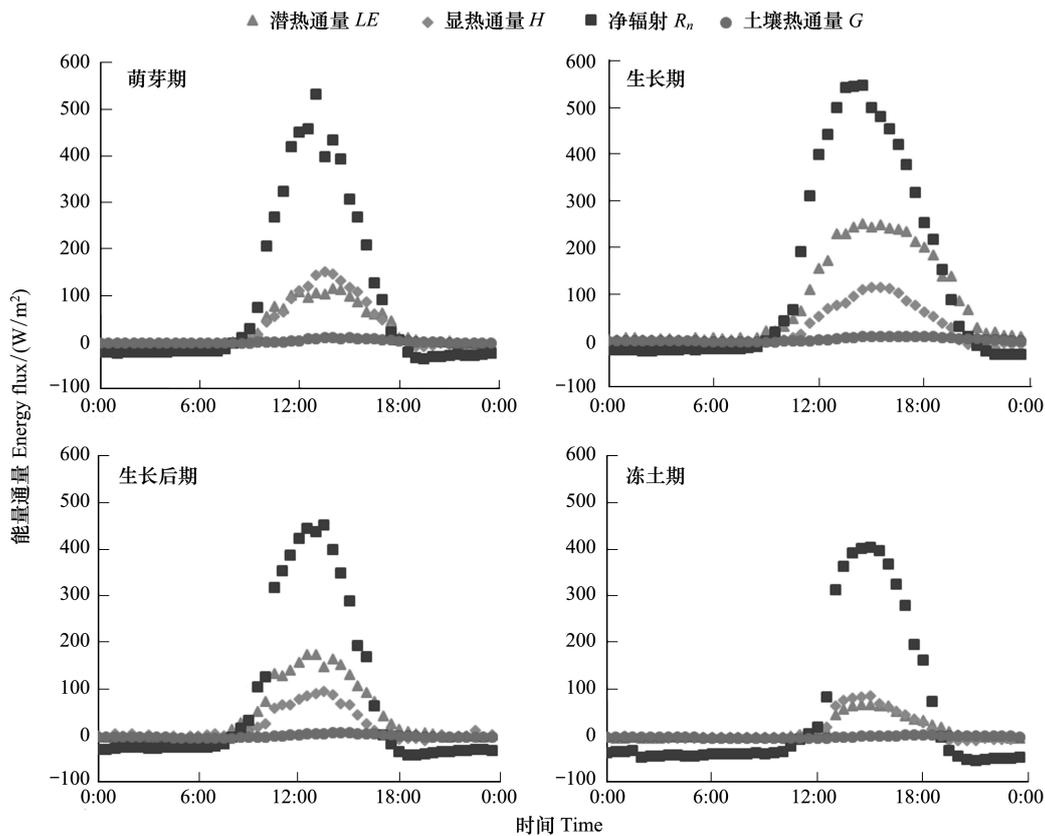


图 2 能量平衡分量平均日变化

Fig.2 Daily variation of the energy component

LE: Latent heat; H: Sensible heat;  $R_n$ : Net radiation; G: Soil heat

表 1 2014 年各时期及年均净辐射, 潜热通量, 显热通量, 土壤热通量, 总降水量值

Table 1 Summaries of net radiation, latent heat, sensible heat, soil heat flux, total precipitation for each period of 2014

项目 Items	非冻土期 None-frozen-soil period			冻土期 (12月—2月) Frozen-soil period (Dec to Feb)	年值 Annual
	萌芽期 (3月) Pre-growth period (March)	生长期 (4月—9月) Growth period (Apr to Sep)	生长后期 (10月—11月) Post-growth period (Oct to Nov)		
净辐射, Net radiation, $R_n$ / ( $\text{W/m}^2$ )	91	125	72	52	95
潜热通量, Latent heat, $LE$ / ( $\text{W/m}^2$ )	28	86	40	10	54
显热通量, Sensible heat, $H$ / ( $\text{W/m}^2$ )	30	23	17	11	20
土壤热通量, Soil heat, $G$ / ( $\text{W/m}^2$ )	1	2	-3	-4	0
降水量, Total precipitation, $P$ / mm	61	795	129	18	1003

## 2.2 能量平衡各分量的季节变化

图 3 所示, 净辐射在年尺度上也近似呈单峰变化, 峰值出现在 7—8 月, 净辐射主要受太阳高度角影响, 夏

至前后太阳直射北回归线,北回归线的太阳高度在正午达到一年中的最大值  $90^\circ$ ,因而北半球夏季净辐射为全年最大。过程线存在着锯齿状波动,这是由于小尺度天气变化的影响,该地区年均降水量 513—1003 mm,尤其在雨水充沛的生长季波动格外显著<sup>[31]</sup>。

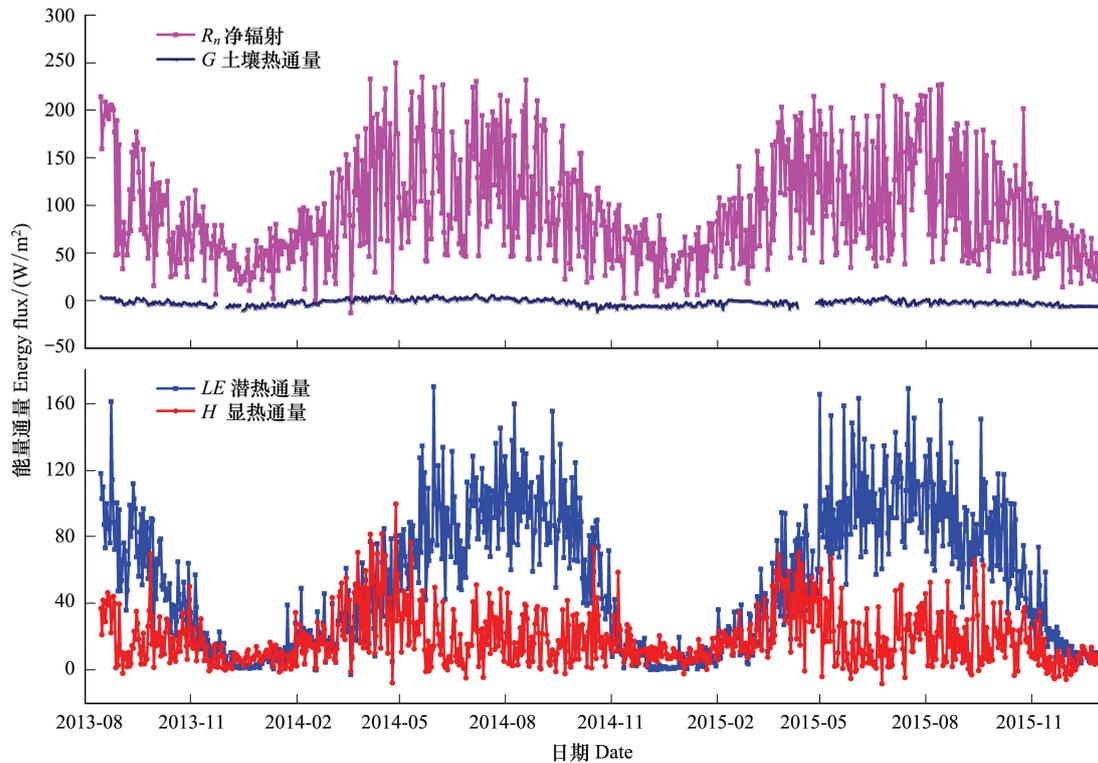


图3 研究区净辐射通量( $R_n$ ),土壤热通量( $G$ ),潜热通量( $LE$ )与显热通量( $H$ )变化特征

Fig.3 Daily mean values of net radiation ( $R_n$ ), soil heat flux ( $G$ ), latent heat flux ( $LE$ ) and sensible heat flux ( $H$ ) for the study site

潜热通量与显热通量在年尺度的变化规律基本与净辐射一致,也存在锯齿波动。显热通量和潜热通量的能量分配随着新叶长出和老叶掉落呈现明显的变化。显热通量的峰现时间早于其他分量,出现在4月前后,随后逐渐降低,并远小于潜热通量。潜热通量峰值也出现在7、8月间,至9月末已开始出现显著下降趋势,这是因为植被进入生长后期生理活动减弱。11月基本落叶,至次年4月长出新叶,此阶段蒸腾大幅减少,潜热通量分量占比下降,显热通量与潜热通量接近,冬季数值持续较低,回春发芽后潜热通量、净辐射逐渐上升而显热通量下降,待新叶完全长出后显热通量维持较稳定数值约  $23 \text{ W/m}^2$ ,而植被生理活动旺盛使得潜热通量再次成为能量平衡的主要支出项,生长季日均值  $86 \text{ W/m}^2$ ,远高出显热通量,因此显热通量在冻土解冻期间、植被生出新叶前出现峰值。

表2表示的是研究区2014和2015年全年与生长季能量收支情况。由表2可知,2014与2015年全年潜热通量占净辐射比值为0.57、0.60,在生长期甚至可高达0.69、0.75。说明在生长过程(4—11月)能量分配主要以潜热通量为主,即净辐射大多由蒸散发消耗。这是因为期间雨水充沛,温度较高,日照长,植物生长旺盛,蒸发及蒸腾更强烈。Yan等<sup>[28]</sup>研究发现,研究区多年平均潜在蒸散发(759 mm)略低于平均降水量(762 mm)。基于Budyko假设的研究认为,当 $ET_p \leq P$ 时年 $ET$ 与潜在可蒸散量有关,而 $ET > P$ 时 $ET$ 与降水量有关<sup>[32-34]</sup>。因此,九寨沟的蒸散发主要是受有效能控制,而不是降水(植物可利用水)。值得注意的是,在青藏高原的研究发现即使在生长期,潜热通量占净辐射比例也小于0.5<sup>[10,13,35]</sup>,其主要是受到土壤水分的限制。

由图3可知,土壤热通量也表现出与净辐射相似的季节特征。从3月中旬至整个夏季,土壤作为能量汇。4月至7月间出现最大日均土壤热通量值(小于  $8 \text{ W/m}^2$ ),日均正午土壤热通量达  $10\text{--}15 \text{ W/m}^2$ 且全天土壤

热通量占净辐射不足 5%。至 9 月末土壤热通量改变传输方向且日均值最小约  $-6 \text{ W/m}^2$ 。小时尺度上土壤热通量通常小于植被冠层热储量;一般在温暖季节从上午至午后,土壤热通量不到净辐射 10%,在冬季夜间,相当一部分土壤热通量为负净辐射。总体而言,土壤热通量是在昼夜和季节时间尺度上是重要的,但土壤热通量比其他能量分量小 1—2 个数量级,各阶段土壤热通量都较为微弱,尤其是年尺度上土壤热通量占净辐射不足 1%,基本可忽略<sup>[24]</sup>。因此,净辐射的支出项主要为显热通量和潜热通量,土壤热通量占净辐射的比重很小,年尺度基本可忽略(表 2)。

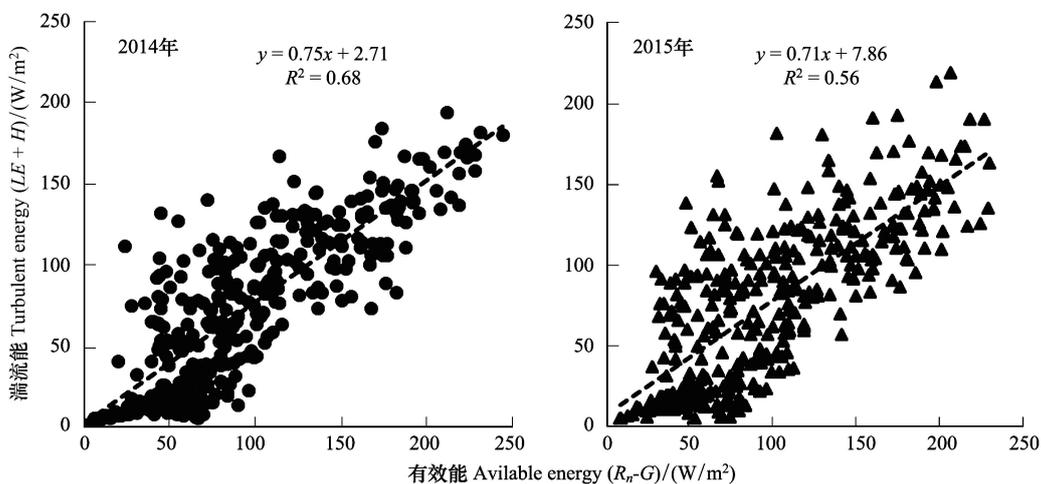
表 2 研究区 2014 和 2015 年全年与生长季(4—11 月)能量收支情况

Table 2 Summaries of energy partitioning for the growth period and whole year of 2014 and 2015

年份 Year	净辐射 Net radiation $R_n / (\text{W/m}^2)$	潜热通量 Latent heat, $LE / (\text{W/m}^2)$	显热通量 Sensible heat $H / (\text{W/m}^2)$	土壤热通量 Soil heat $G / (\text{W/m}^2)$	$LE/R_n$	$H/R_n$
2014 全年 Whole year	95	54	20	0	0.57	0.21
生长季 Growth period	125	86	23	2	0.69	0.18
2015 全年 Whole year	98	59	19	-2	0.60	0.20
生长季 Growth period	121	91	23	-1	0.75	0.19

### 2.3 能量闭合分析

Wilson 等通过分析全球通量网 FLUXNET 站点能量平衡的闭合状况,发现通量观测中普遍存在 10%—30%的不闭合<sup>[36]</sup>。本文对九寨沟典型针阔混交林的能量闭合度进行了分析,将涡度相关法获得的湍流能量通量 ( $LE + H$ ) 和森林有效能量通量 ( $R_n - G$ ) 做线性回归统计<sup>[24]</sup>,用能量闭合状况评价涡度相关观测值。如图 4 所示两年回归方程斜率均小于 1 且截距大于 0。年尺度上看 ( $LE + H$ ) 约占净辐射 70%,即涡度相关法测定的显热通量与潜通量之和小于有效能量,研究区域存在能量不平衡现象。2014 年和 2015 年能量闭合度分别为 0.75 和 0.71,与相关研究结果 0.55—0.99 一致<sup>[28,30,36]</sup>。能量平衡闭合分析表明研究区域通量数据比较可靠。

图 4 2014 与 2015 年涡度相关观测结果能量闭合分析 ( $n=364$ )Fig.4 Analysis on energy balance closure of EC measurement in 2014 and 2015 ( $n=364$ )

本研究中造成能量不闭合的原因可能有:(1)土壤热通量板埋放在地下 3 cm 处,测量了地下 3 cm 部分的土壤热通量,而忽略了埋深以上的部分。在锦州玉米农田的能量平衡研究发现未考虑 0—5 cm 土层土壤热储量与忽略冠层储热以及涡度相关系统本身对水热通量的低估,大约造成 18%的能量损失<sup>[37]</sup>。(2)忽略了植被的热量变化和光合作用消耗的能量。植被冠层储热量有时作为重要能量来源,日均值为  $2—3 \text{ W/m}^2$ ,尽管

在年尺度上可忽略不计,但其昼夜变化极大<sup>[24]</sup>。(3)涡度相关系统测量理论上要求下垫面均一旦地势平坦,以避免在水平和垂直方向上形成平流,而九寨沟地区植被茂密,地势陡峭多变,不能忽略森林内部空气流动的影响<sup>[38]</sup>。类似的研究还有鼎湖山森林生态系统,对其能量平衡分析的研究表明该地区能量不闭合度为33%—7%<sup>[39]</sup>,略高于普遍研究结果10%—30%。(4)仪器造成的误差,各分量测定方法存在空间取样误差<sup>[40]</sup>。(5)高频和低频湍流通量的损失,显热通量和潜热通量测量系统的通量损失通常为5%到10%<sup>[41]</sup>。

### 3 结论

本研究基于2014年与2015年两年的涡度相关系统观测数据,分析了九寨沟典型针阔混交林能量收支各分量的日变化、季变化特征,并分析了其能量闭合。结果表明:

(1)九寨沟典型针阔混交林能量平衡各分量日变化与季变化均呈现单峰型二次曲线,与净辐射的日变化、季变化同步,峰现时间也较一致,冻土期峰现时间延迟。

(2)冬季和春季显热通量为能量主要支出项,而夏季和秋季则以潜热通量为主,年尺度上土壤热通量不到净辐射的1%。显热通量在冻土解冻期间、植被生出新叶前出现峰值,潜热通量在盛夏时节出现峰值。

(3)观测期两年间研究区域生长季 $LE/R_n$ 分别为0.69、0.75,高于青藏高原等地的类似研究,原因是该地区蒸散发主要受该地区有效能的控制而不是受可利用水分的控制,较高的潜热通量占比可能是森林恢复过程蒸散发较高导致的。

(4)研究区域能量观测闭合度两年分别为0.75、0.71,表明该地存在能量不闭合,这与相关研究结果一致,研究区域通量数据比较可靠。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Betts A K, Ball J H, Viterbo P. Basin-scale surface water and energy budgets for the Mississippi from the ECMWF reanalysis. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(D16): 19293-19306.
- [ 2 ] Zhang Y S, Ohata T, Kadota T. Land-surface hydrological processes in the permafrost region of the eastern Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 2003, 283(1/4): 41-56.
- [ 3 ] Tanaka K, Ishikawa H, Hayashi T, Tamagawa I, Ma Y M. Surface energy budget at Amdo on the Tibetan Plateau using GAME/Tibet IOP98 data. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 2001, 79(1): 505-517.
- [ 4 ] Zhang S Y, Li X Y, Ma Y J, Zhao G Q, Li L, Chen J, Jiang Z Y, Huang Y M. Interannual and seasonal variability in evapotranspiration and energy partitioning over the alpine riparian shrub *Myricaria squamosa* Desv. on Qinghai-Tibet Plateau. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 102: 8-20.
- [ 5 ] 王永杰. 青藏高原山谷地区近地层气象特征及能量平衡研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2011.
- [ 6 ] 徐祥德, 王寅钧, 赵天良, 姚文清. 高原东南缘大气近地层湍能特征与边界层动力、热力结构相关特征. *气象*, 2014, 40(10): 1165-1173.
- [ 7 ] 马耀明, 姚檀栋, 王介民. 青藏高原能量和水循环试验研究——GAME/Tibet 与 CAMP/Tibet 研究进展. *高原气象*, 2006, 25(2): 344-351.
- [ 8 ] Hu Z M, Yu G R, Zhou Y L, Sun X M, Li Y N, Shi P L, Wang Y F, Song X, Zheng Z M, Zhang L, Li S G. Partitioning of evapotranspiration and its controls in four grassland ecosystems: Application of a two-source model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(9): 1410-1420.
- [ 9 ] Liu S, Li S G, Yu G R, Sun X M, Zhang L M, Hu Z M, Li Y N, Zhang X Z. Surface energy exchanges above two grassland ecosystems on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Biogeosciences Discussions*, 2009, 6(5): 9161-9192.
- [ 10 ] Gu S, Tang Y H, Cui X Y, Kato T, Du M Y, Li Y N, Zhao X Q. Energy exchange between the atmosphere and a meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 129(3/4): 175-185.
- [ 11 ] 程根伟, 余新晓, 赵玉涛, 周杨明, 罗辑. 贡嘎山亚高山森林带蒸散特征模拟研究. *北京林业大学学报*, 2003, 25(1): 23-27.
- [ 12 ] Lin Y, Wang G X, Guo J Y, Sun X Y. Quantifying evapotranspiration and its components in a coniferous subalpine forest in Southwest China. *Hydrological Processes*, 2012, 26(20): 3032-3040.
- [ 13 ] Zhu G F, Lu L, Su Y H, Wang X F, Cui X, Ma J Z, He J H, Zhang K, Li C B. Energy flux partitioning and evapotranspiration in a sub-alpine spruce forest ecosystem. *Hydrological Processes*, 2014, 28(19): 5093-5104.
- [ 14 ] 蔡雯悦. 青藏高原东南部云状况与地表能量收支结构[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.

- [15] 蔡雯悦, 徐祥德, 孙绩华. 青藏高原东南部云状况与地表能量收支结构. 气象学报, 2012, 70(4): 837-846.
- [16] Min W B, Li Y Q, Xu X D, Zhao X B. Comparative analysis of satellite remotely-sensed surface energy flux and ground-based observation in the Sichuan Basin. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 2012, 90C: 203-213.
- [17] 岳平, 李耀辉, 张良, 杨金虎, 王若安, 殷晓荣. 青藏高原林芝与四川盆地温江地区晴天辐射和能量平衡特征. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1328-1335.
- [18] Yao J M, Zhao L, Gu L L, Qiao Y P, Jiao K Q. The surface energy budget in the permafrost region of the Tibetan Plateau. Atmospheric Research, 2011, 102(4): 394-407.
- [19] 肖瑶, 赵林, 李韧, 姚济敏. 青藏高原腹地高原多年冻土区能量收支各分量的季节变化特征. 冰川冻土, 2011, 33(5): 1033-1039.
- [20] 姚济敏. 青藏高原唐古拉垭口多年冻土区地表能水收支研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2009.
- [21] Bossard C C, Cao Y T, Wang J Y, Rose A, Tang Y. New patterns of establishment and growth of *Picea*, *Abies* and *Betula* tree species in subalpine forest gaps of Jiuzhaigou National Nature Reserve, Sichuan, southwestern China in a changing environment. Forest Ecology and Management, 2015, 356: 84-92.
- [22] Swinbank W C. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. Journal of Meteorology, 1951, 8(3): 135-145.
- [23] Stoy P C, Katul G G, Siqueira M B S, Juang J Y, Novick K A, McCarthy H R, Oishi A C, Uebelherr J M, Kim H S, Oren R. Separating the effects of climate and vegetation on evapotranspiration along a successional chronosequence in the southeastern US. Global Change Biology, 2006, 12(11): 2115-2135.
- [24] Wilson K B, Baldocchi D D. Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest in North America. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 100(1): 1-18.
- [25] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Monthly Weather Review, 1972, 100(2): 81-92.
- [26] 邱国玉, 熊育久. 水与能: 陆地蒸散发、热环境及其能量收支. 北京: 科学出版社, 2014.
- [27] Gu J J, Smith E A, Merritt J D. Testing energy balance closure with GOES-retrieved net radiation and in situ measured eddy correlation fluxes in BOREAS. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(D22): 27881-27893.
- [28] Shi T T, Guan D X, Wang A Z, Wu J B, Jin C J, Han S J. Comparison of three models to estimate evapotranspiration for a temperate mixed forest. Hydrological Processes, 2008, 22(17): 3431-3443.
- [29] Wu J B, Guan D X, Han S J, Shi T T, Jin C J, Pei T F, Yu G R. Energy budget above a temperate mixed forest in northeastern China. Hydrological Processes, 2007, 21(18): 2425-2434.
- [30] Wu J B, Jing Y L, Guan D X, Yang H, Niu L H, Wang A Z, Yuan F H, Jin C J. Controls of evapotranspiration during the short dry season in a temperate mixed forest in Northeast China. Ecohydrology, 2013, 6(5): 775-782.
- [31] Yan C H, Zhao W L, Wang Y, Yang Q X, Zhang Q T, Qiu G Y. Effects of forest evapotranspiration on soil water budget and energy flux partitioning in a subalpine valley of China. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 246: 207-217.
- [32] Budyko M I. The heat balance of the Earth's surface. Soviet Geography, 1961, 2(4): 3-13.
- [33] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. Water Resources Research, 2001, 37(3): 701-708.
- [34] Komatsu H, Maita E, Otsuki K. A model to estimate annual forest evapotranspiration in Japan from mean annual temperature. Journal of Hydrology, 2008, 348(3/4): 330-340.
- [35] Gu L L, Yao J M, Hu Z Y, Zhao L. Comparison of the surface energy budget between regions of seasonally frozen ground and permafrost on the Tibetan Plateau. Atmospheric Research, 2015, 153: 553-564.
- [36] Wilson K, Goldstein A, Falge E, Aubinet M, Baldocchi D, Berbigier P, Bernhofer C, Ceulemans R, Dolman H, Field C, Grelle A, Ibrom A, Law B E, Kowalski A, Meyers T, Moncrieff J, Monson R, Oechel W, Tenhunen J, Valentini R, Verma S. Energy balance closure at FLUXNET sites. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113(1/4): 223-243.
- [37] 李伟君, 许振柱, 王云龙, 周莉, 周广胜. 玉米农田水热通量动态与能量闭合分析. 植物生态学报, 2007, 31(6): 1132-1144.
- [38] Belcher S E, Finnigan J J, Harman I N. Flows through forest canopies in complex terrain. Ecological Applications, 2008, 18(6): 1436-1453.
- [39] 王春林, 周国逸, 王旭, 周传艳, 于贵瑞. 鼎湖山针阔叶混交林生态系统能量平衡分析. 热带气象学报, 2007, 23(6): 643-651.
- [40] 刘渡, 李俊, 于强, 同小娟, 欧阳竹. 涡度相关观测的能量闭合状况及其对农田蒸散测定的影响. 生态学报, 2012, 32(17): 5309-5317.
- [41] Moore C J. Frequency response corrections for eddy correlation systems. Boundary-Layer Meteorology, 1986, 37(1/2): 17-35.