

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0009

ZHANG Wenxu, WANG Genxu, HU Zhaoyong. Comparison of three evapotranspiration calculation methods: a case study of Fenghuoshan area in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(1):130-139. [张文旭, 王根绪, 胡兆永. 三种蒸散发测算方法的比较——以青藏高原风火山地区为例[J]. 冰川冻土, 2023, 45(1):130-139.]

## 三种蒸散发测算方法的比较 ——以青藏高原风火山地区为例

张文旭<sup>1,2</sup>, 王根绪<sup>1,3</sup>, 胡兆永<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 四川大学 水利水电学院 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

**摘 要:** 作为全球气候变化的敏感器和放大器, 青藏高原的水文过程是目前的研究热点, 其中, 蒸散发是青藏高原水文循环最难估算的分量。借助青藏高原腹地风火山地区涡度相关系统、蒸渗仪、气象观测系统获取的观测数据, 采取涡度相关法、蒸渗仪测定和FAO56 Penman-Monteith公式三种方式, 对2019年风火山地区生长季实际蒸散发量进行了评价。结果表明: 在青藏高原风火山地区高寒草甸生长季前期、中期、后期作物系数分别为0.93、1.11、1.14; 三种方法获得的生长季实际蒸散发值基本相似, 生长季蒸散发量(495.00±21.69) mm大于同时期降水量377.89 mm; 风火山地区生长季蒸散发量日均值为(2.70±0.12) mm, 风火山地区生长季不同阶段蒸散发量日均值表现为生长季中期[(3.03±0.10) mm]>生长季后期[(2.49±0.12) mm]>生长季前期[(2.23±0.18) mm]。文章中求取的不同生长阶段作物系数、蒸散发量为青藏高原类似地区蒸散发观测和模拟提供了基础资料。

**关键词:** 青藏高原; 生长季蒸散发; 涡度; 蒸渗仪; Penman-Monteith公式

**中图分类号:** Q945.17<sup>2</sup>; S161.2<sup>1</sup> **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2023)01-0130-10

### 0 引言

青藏高原素有“亚洲水塔”的美称, 是黄河、长江、澜沧江等数十条大江大河的发源地, 也是“一带一路”沿线30多亿人口的水源地<sup>[1]</sup>。在青藏高原广泛分布的多年冻土区, 通过独特的水分运移影响着区域水文及水循环过程<sup>[2]</sup>。水文过程和生态过程处在一个相互作用和反馈的系统中, 水文过程的变化势必会改变生态系统格局<sup>[3]</sup>。近年来青藏高原多年冻土区发生着严重的退化(如地温升高、活动层加厚、浅表层多年冻土逐渐融化等), 显著影响区域水热循环<sup>[4]</sup>。由此引起的连锁反应将随河流径流量变化向下传播, 影响下游水资源安全及生态环境, 从而波及“一带一路”沿线几十亿人民的生产生活及社会发展<sup>[5]</sup>。由此可见, 全球气候变化背景下青藏

高原多年冻土区水文过程将如何变化是我们亟需厘清的问题。

降水、蒸发和径流是陆地水循环过程的三个最核心部分, 其中蒸散是陆地表层水循环中最难估算的分量<sup>[6]</sup>。全球陆地每年有70%左右的降水通过蒸散发返回到大气中, 在干旱区甚至达到90%, 但在青藏高原这一返回比例可能会有所差异<sup>[7-8]</sup>。目前蒸散发的主要测定方法主要有观测法、模型模拟法及遥感观测方法<sup>[9]</sup>。遥感观测法在时空分辨率和精度上受到卫星技术和反演算法的影响在小流域尺度表现较差<sup>[7,10]</sup>。主要的观测方法有蒸渗仪、波文比、涡度相关方法及闪烁计, 在青藏高原蒸渗仪和涡度相关系统应用较多<sup>[11-13]</sup>。模型模拟法方法众多其中FAO56 Penman-Monteith方法(PM公式法)只需要简单的气象观测数据适用性广<sup>[14]</sup>。

收稿日期: 2020-11-17; 修订日期: 2021-06-05

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41890821); 中国科学院、青海省人民政府三江源国家公园联合研究专项(LHZX-2020-10)资助

作者简介: 张文旭, 硕士研究生, 主要从事山地生态水文变化过程学习研究. E-mail: wenxuzhang163@163.com

通信作者: 王根绪, 研究员, 主要从事生态水文学、区域环境与变化研究. E-mail: wanggx@imde.ac.cn

高原地区环境因子和生物因子与低海拔区差异较大,冻融循环下活动层水热条件的差异使得高原地区蒸散发过程更加复杂,同时高原地区严酷的自然环境条件不利于研究工作的开展<sup>[15]</sup>。青海风火山地区,多年冻土显著发育,人类活动稀少,是我们开展气候变化下青藏高原多年冻土区水文过程研究的理想场所<sup>[16]</sup>。通过架设在风火山地区的涡度、蒸渗仪、气象站观测平台,测算该地区蒸散发数值,对于我们准确把握该地区水分收支状况,以及研究整个风火山地区水热平衡有着重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于青海省玉树藏族自治州曲麻莱县境内,隶属于长江源区北麓河一级支流左冒西孔曲流域,位于青藏高原高寒半湿润及高寒半干旱地区的过渡地带(图1)。该区气候条件属于高寒大陆性的干旱气候区,气候寒冷干燥。年均相对湿度为55%,年均气温为 $-5.3^{\circ}\text{C}$ (极端最高气温 $24.7^{\circ}\text{C}$ ,极端最低气温 $-38.5^{\circ}\text{C}$ ),年均降水量为269.7 mm。降水主要集中于每年6—9月,占全年总降水量80%以上<sup>[17]</sup>。该区域多年冻土显著发育,属多年冻土区,多年冻土平均厚度为50~120 m,冻土活动层厚度可达2.5 m;土壤厚度约为30~50 cm,淋溶作用强,发育缓慢,处于原始的粗骨土状态,剖面分异不明显,砾石含量较多,属原始的高寒草甸土。植被以多年生耐寒植物矮嵩草(*Kobresia humilis*)、高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)和线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)为主要建群种,植株高一般不超过20 cm,层次结构简单,致密的毡状根系使得植被可以牢牢抓住表层土壤,防止坡面径流带走过多土壤中的养分<sup>[18]</sup>。

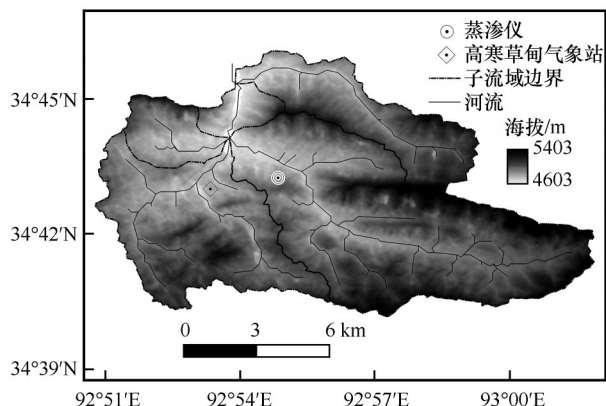


图1 研究区概况图

Fig. 1 Overview of the study area

### 1.2 数据获取

#### 1.2.1 涡度数据

2014年11月在风火山建立涡度相关系统,配套设置的高寒草甸气象站在涡度相关系统旁3 m处,涡度相关系统主要由3 m高铁塔、三维超声风速仪(Wind masterPro, Gill, UK)和开路式红外气体分析仪(Li-7500A, Li-Cor, USA)构成。三维超声风速仪和开路式红外气体分析仪安装在塔高2 m处,用于观测 $\text{CO}_2$ 和水汽通量。

#### 1.2.2 蒸渗仪数据

2017年在不同海拔高度选择典型区域,上覆土柱桶后少量、多次开挖周围土体,并不断下压土柱桶,直到完整获取高40 cm、直径30 cm的原状土体,保持原有植被覆盖。加装称重平台及抽水泵等其他外部设备后,利用土体底部的翻斗式渗漏计测量土壤水分渗漏量,该渗漏计分辨率为5 g。蒸渗仪(LYS30, Truvel, China)利用数据采集器(G12M, T&D, USA)以30 min间隔自动记录。

#### 1.2.3 气象数据

高寒草甸气象站架设在涡度相关系统旁,下垫面为高寒草甸生态系统,在严格按照《地面气象观测规范》进行安装架设后,经过中国气象局的标定和调试,利用耐低温的数据采集器每半小时记录一次平均值,记录的常规气象数据包括空气温度、相对湿度、2 m风速、净辐射( $R_n$ )、土壤热通量( $G$ ),具体观测参数详见表1。

表1 气象观测仪器

Table 1 meteorological observation instruments

观测项目	高度或深度/m	探头型号,厂商,国家
空气温度/湿度	2	CLIMA, Thies, Germany
风速/风向	2	CLIMA, Thies, Germany
辐射	2	NR01, Hukseflux, Netherlands
土壤热通量	-0.05	HFP01SC, Hukseflux, Netherlands

### 1.3 数据处理

#### 1.3.1 生长季划分

根据风火山地区前期研究基础结合实际情况,借鉴范晓梅等的生长季划分方法,将风火山地区生长季划分为:生长季前期、生长季中期和生长季后期<sup>[13]</sup>。表2展示了风火山地区2019年不同生长阶段起始时间和持续天数。

#### 1.3.2 涡度观测

涡度法蒸散发计算:获得涡度数据后,利用Ed-

表2 生长季阶段划分

Table 2 Stage division of growing season

生长阶段	生长季	生长季 前期	生长季 中期	生长季 后期
起止日期 (月-日)	04-11— 10-10	04-11— 05-20	05-21— 08-20	08-21— 10-10
持续天数/d	183	40	92	51

dyPro 软件对涡度数据进行野点剔除、虚温转换等前处理过程,为了保证数据质量,还需要对数据进行降雨同期数据删除、异常值剔除等质量控制过程,最后利用全球通量网的在线数据插补程序对缺失数据进行插补(<https://www.bgc-jena.mpg.de/bgi/index.php/Services/REddyProcWeb>),最后通过求和获取到天序列的潜热通量( $LE$ )、显热通量( $H$ )<sup>[19]</sup>。通过潜热通量换算公式,最终得到2019年生长季183天的涡度法日蒸散发量<sup>[20]</sup>。

$$\lambda = \frac{(2500.78 - 2.361 \times T)}{1000} \quad (1)$$

$$ET = LE \times \lambda \times 0.0864 \quad (2)$$

式中: $ET$ 为日蒸散发量,单位为 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $\lambda$ 为蒸发潜热,单位为 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $T$ 为2 m处空气温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.3.3 蒸渗仪观测

蒸渗仪法蒸散发计算:

$$ET = P - \left( \frac{\Delta W + I_n}{125.6} \right) \quad (3)$$

式中: $ET$ 为日蒸散发量,单位为 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $P$ 为日降水量,单位为 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $\Delta W = W_1 - W_2$ ,为蒸渗仪今日称重的重量 $W_1$ 减去上一日同一时间称重的重量 $W_2$ ,单位为 $\text{g}$ ;  $I_n$ 为蒸渗仪底部翻斗式渗漏计记录土体渗漏水量,单位为 $\text{g}$ ; 125.6为蒸渗仪土体表面积换算系数,每125.6 g水在蒸渗仪内代表1 mm水深。

### 1.3.4 作物系数法

PM公式法蒸散发计算:先根据PM公式计算风火山2019年生长季参考作物蒸散发量,后利用涡度数据求取生长季不同生长阶段作物系数,具体步骤:将涡度数据按照2019年生长季天数分成两部分,一部分用于标定作物系数,另一部分用来验证作物系数法,用一半的涡度数据标定生长季每个时期的作物系数,然后用每个时期的作物系数来计算该时期的实际蒸散发,各生长阶段PM公式参考作物蒸散发量乘以相应生长阶段作物系数求取得到2019年生长季PM公式法日蒸散发量<sup>[18]</sup>。

参考作物蒸散发计算利用FAO56 Penman-

Monteith(PM)公式:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (4)$$

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \right]}{(T + 237.3)^2} \quad (5)$$

$$e_s = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \quad (6)$$

式中: $ET_0$ 为参考作物日蒸散发量,单位为 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $\Delta$ 为饱和水汽压随温度变化的斜率,单位为 $\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $\gamma$ 为干湿表常数,单位为 $\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $R_n$ 、 $G$ 、 $U_2$ 分别为净辐射、土壤热通量、2 m风速,单位分别为 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $e_a$ 和 $e_s$ 为气象站记录的实际水汽压、饱和水汽压,单位为 $\text{kPa}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 气象因子

图2显示的是2019年风火山地区高寒草甸气象观测站气温、相对湿度、风速、净辐射的日平均变化。2019年风火山地区年平均气温为 $-4.67^{\circ}\text{C}$ ,6—9月月平均气温大于 $0^{\circ}\text{C}$ ,其余8个月月平均气温小于 $0^{\circ}\text{C}$ ,12月为全年最冷月,月平均温度为 $-16.01^{\circ}\text{C}$ ,8月为全年最暖月,月平均温度为 $5.73^{\circ}\text{C}$ ,气温年较差为 $21.74^{\circ}\text{C}$ 。相对湿度的年平均值为53.30%,日平均值在17.19%~90.86%之间波动,冬季相对湿度较低,春夏秋三季变化不大均在55%以上。日平均风速的变幅为 $2.00 \sim 13.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,全年日平均风速为 $5.45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,月平均风速在 $4.39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。净辐射表现为夏秋大,春冬小,年平均值为 $95.25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。图3为2019年风火山地区记录到的降水量。2019年记录到降水386.32 mm,全年有258天没有发生降水,8月6日这一天降水量达到最大为21.58 mm。1、2、11、12月未记录到降水量,全年月降水量最大为8月份达121.32 mm。

### 2.2 蒸散发量

按照1.3.4节作物系数等于实际蒸散发除以参考作物蒸散发,求得2019年风火山地区生长季前期作物系数变化范围为0.52~1.51,平均值为0.93,生长季中期作物系数变化范围为0.63~1.86,平均值为1.11,生长季后期作物系数变化范围为0.82~1.79,平均值为1.14,验证数据集结果显示PM公式法和涡度法 $R^2$ 为0.62,相关系数为0.79呈现极显著正相关关系,具有一定可信度(图4)。表3展示了不同生长阶段蒸散发量日均值及总量变化,在生长季三种



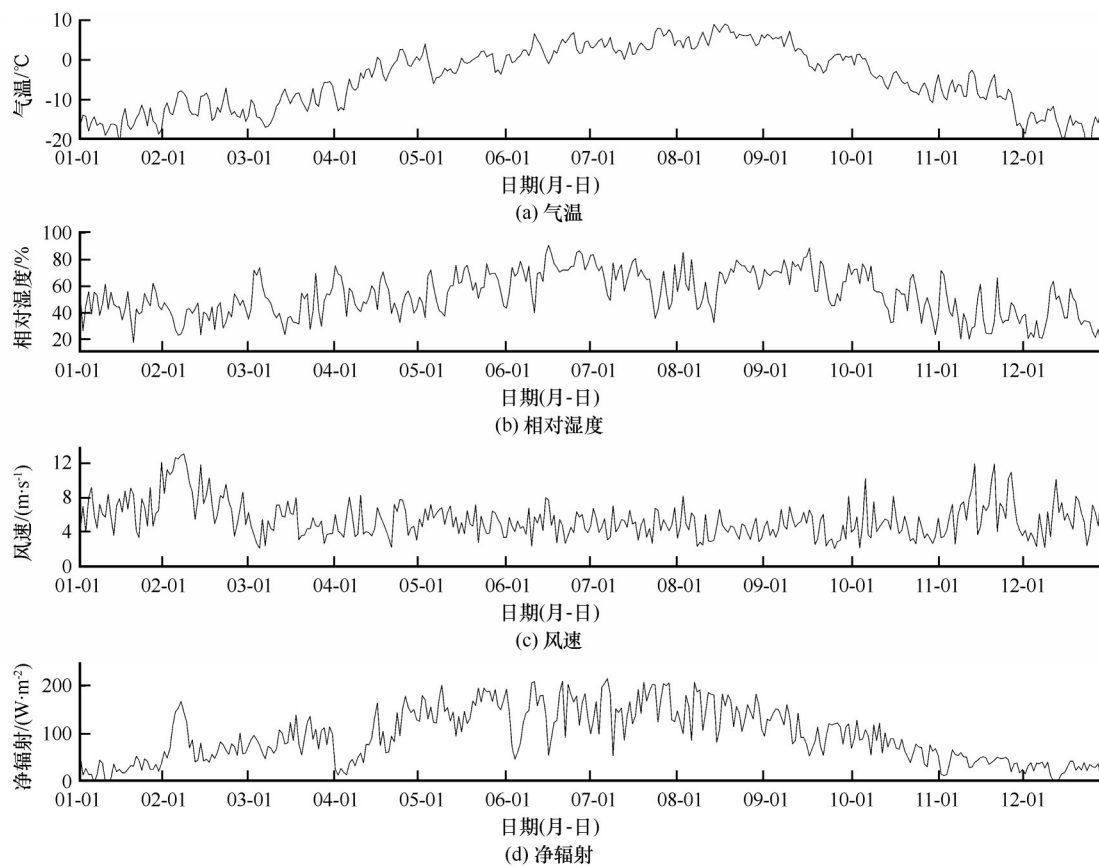


图2 2019年风火山气象要素的日平均变化

Fig. 2 Daily average variation of meteorological elements of Fenghuoshan in 2019: the air temperature (a); relative humidity (b); the wind speed (c); net radiation (d)

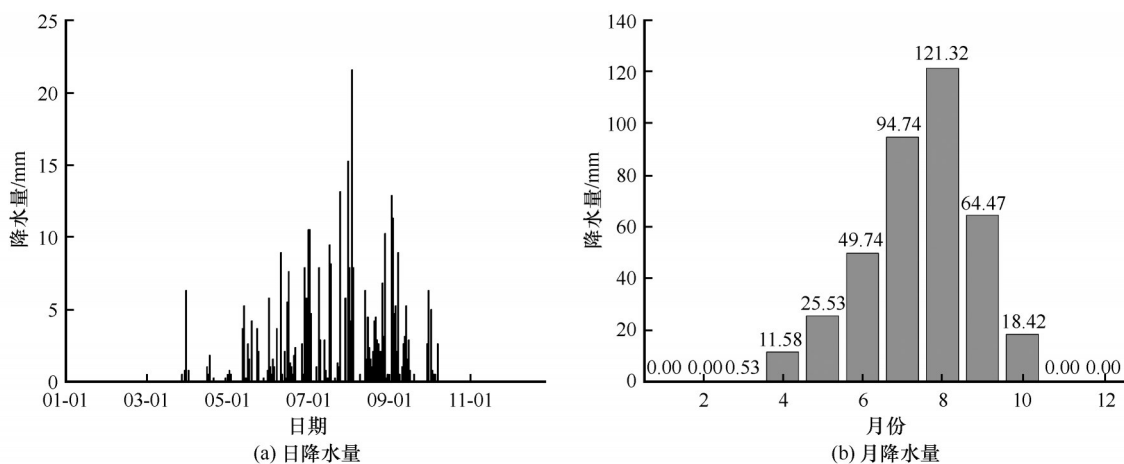


图3 2019年风火山降水量变化

Fig. 3 Precipitation change of Fenghuoshan in 2019: daily precipitation (a); monthly precipitation (b)

方法蒸散发量均大于降水量,彼此之间差异不大,生长季降水量为377.89 mm,蒸散发量为 $(495.00 \pm 21.69)$  mm,风火山土壤水分处于亏损状态。涡度法生长季后期蒸散发量日均值2.40 mm小于降水量2.45 mm,其他生长阶段蒸散发量日均值均大于降水量日均值。风火山地区生长季蒸散发量日均值

表现为蒸渗仪法(2.83 mm)>PM公式法(2.69 mm)>涡度法(2.59 mm),风火山地区生长季蒸散发量日均值为 $(2.70 \pm 0.12)$  mm。风火山地区生长季不同阶段蒸散发量日均值表现为生长季中期 $[(3.03 \pm 0.10)$  mm]>生长季后期 $[(2.49 \pm 0.12)$  mm]>生长季前期 $[(2.23 \pm 0.18)$  mm]。

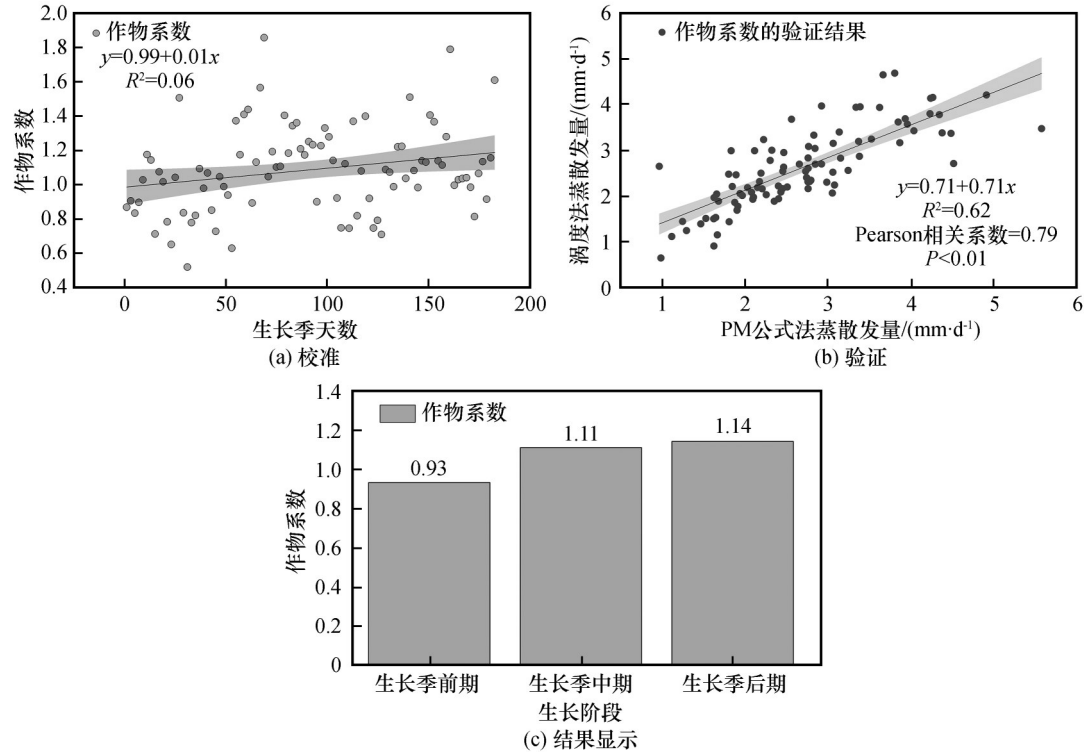


图4 作物系数的确定

Fig. 4 Determination of crop coefficient: calibration (a); validation (b); the results show (c)

表3 生长季蒸散发量和降水量(单位: mm)

Table 3 Evapotranspiration and precipitation in growing season (unit: mm)

	生长季日均值/总量	生长季前期日均值/总量	生长季中期日均值/总量	生长季后期日均值/总量
降水	2.06/377.89	0.47/18.95	2.55/234.21	2.45/124.74
涡度法	2.59/474.66	2.10/83.82	2.92/268.24	2.40/122.59
蒸渗仪法	2.83/517.83	2.43/97.20	3.12/286.74	2.63/133.89
PM公式法	2.69/492.51	2.15/85.99	3.06/281.61	2.45/124.91

2.3 蒸散发量的比较

涡度法观测手段先进、精度较高、数据完整,以涡度法观测蒸散发量为参考值。图5展示了涡度法与蒸渗仪法和PM公式法测量火山蒸散发量的相

关关系。蒸渗仪法与涡度法呈正相关关系,相关系数为0.14, $P$ 值为0.06,未达到显著差异;PM公式法与涡度法呈极显著正相关关系,相关系数高达0.76,同时一元线性回归结果表明两者 $R^2$ 为0.58,

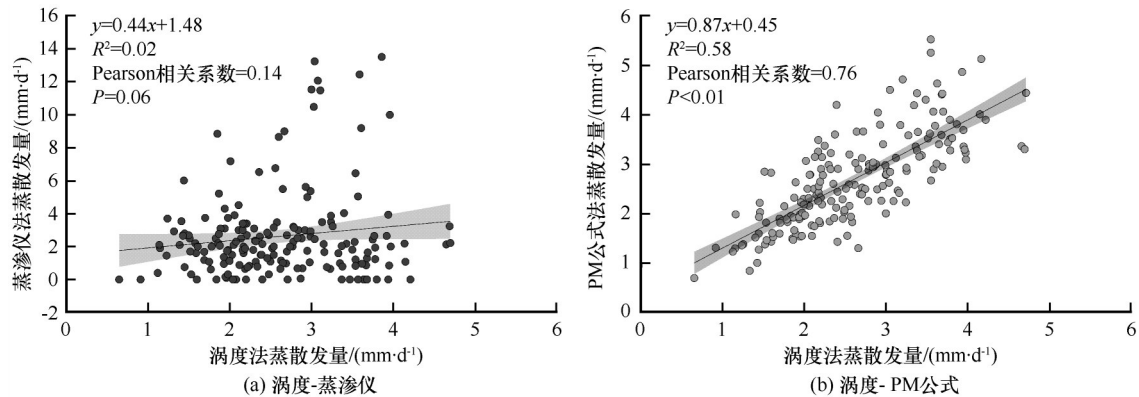


图5 三种方法蒸散发量比较

Fig. 5 Comparison of evapotranspiration of three methods: vorticity-lysimeter (a); vorticity-PM formula (b)

进一步说明了2.2节求取得到的不同生长阶段作物系数适合风火山地区作物生长情况。

### 3 讨论

#### 3.1 不同地区高寒草甸蒸散发量

表5列出了不同地区高寒草甸蒸散发量观测结果,风火山地区2019年生长季蒸散发量与童雅琴等<sup>[21]</sup>、郭淑海等<sup>[12]</sup>结果相近,与范晓梅等<sup>[13]</sup>、李念等<sup>[14]</sup>、闫俊杰等<sup>[7]</sup>、王利辉等<sup>[11]</sup>相比明显偏大,可能是由于研究区海拔高度不同,也可能与不同生长阶段作物系数的选取有关。在李念等<sup>[14]</sup>的文章中采用FAO56轮作放牧草原不同生长阶段作物系数,分别为0.40、0.95、0.85,我们作物系数是利用涡度法实际蒸散发量反推过来的,据此利用PM公式法计算的蒸散发量与三种方法平均值非常接近,不同生长阶段作物系数分别为0.93、1.11、1.14,与李念等<sup>[14]</sup>不同生长阶段作物系数呈现相同的变化规律,在生

长前期作物系数较小,后两个时期差异不大。风火山地区2019年生长季涡度法、蒸渗仪法、PM公式法蒸散发量为474.66 mm、517.83 mm、492.51 mm,三种方法评价的实际蒸散发量彼此相差不大,可以认为风火山地区生长季实际蒸散发量为 $(495.00 \pm 21.69)$  mm,高于生长季降水量377.89 mm。涡度法观测手段先进、精度较高、数据完整,以涡度法观测蒸散发量为参考值,蒸渗仪法与涡度法呈正相关关系,PM公式法与涡度法呈极显著正相关关系。三种方法中涡度法数据质量最好,但安装成本高。蒸渗仪法数值偏高,数据稳定性较差,常出现突变数据。依据涡度数据计算出的PM公式法蒸散发量数值十分接近三种方法平均值,且与涡度数据相关性很好。因此认为所使用的不同生长阶段作物系数0.93、1.11、1.14不仅适合风火山地区,也能为青藏高原类似地区蒸散发观测和模拟提供基础资料。

表5 其他地区蒸散发量  
Table 5 Evapotranspiration in other regions

位置	海拔/m	方法	时间	降水量/mm	蒸散发量/mm	文献来源
祁连山老虎沟	4 200	FAO Penman-Monteith	2010年生长季	—	238.30	李念等 <sup>[14]</sup>
伊犁河谷	1 000左右	遥感反演	2001—2015年	425.00左右	395.74	闫俊杰等 <sup>[7]</sup>
黑河流域阿柔站	3 044	涡度相关	2014—2015年生长季	411.62	415.00	童雅琴等 <sup>[21]</sup>
唐古拉山冬克玛底河流域	5 170	自制小型蒸渗仪	2007—2013年生长季	346.40	290.50	王利辉等 <sup>[11]</sup>
阿克苏河上游科其喀尔站	3 550	自制小型蒸渗仪	2013年生长季	567.80	457.40	郭淑海等 <sup>[12]</sup>
长江源区风火山	4 600	自制小型蒸渗仪	2007年生长季	331.50	273.01	范晓梅等 <sup>[13]</sup>
长江源区风火山	4 600	涡度法、蒸渗仪、PM公式	2019年生长季	377.89	474.66	本研究

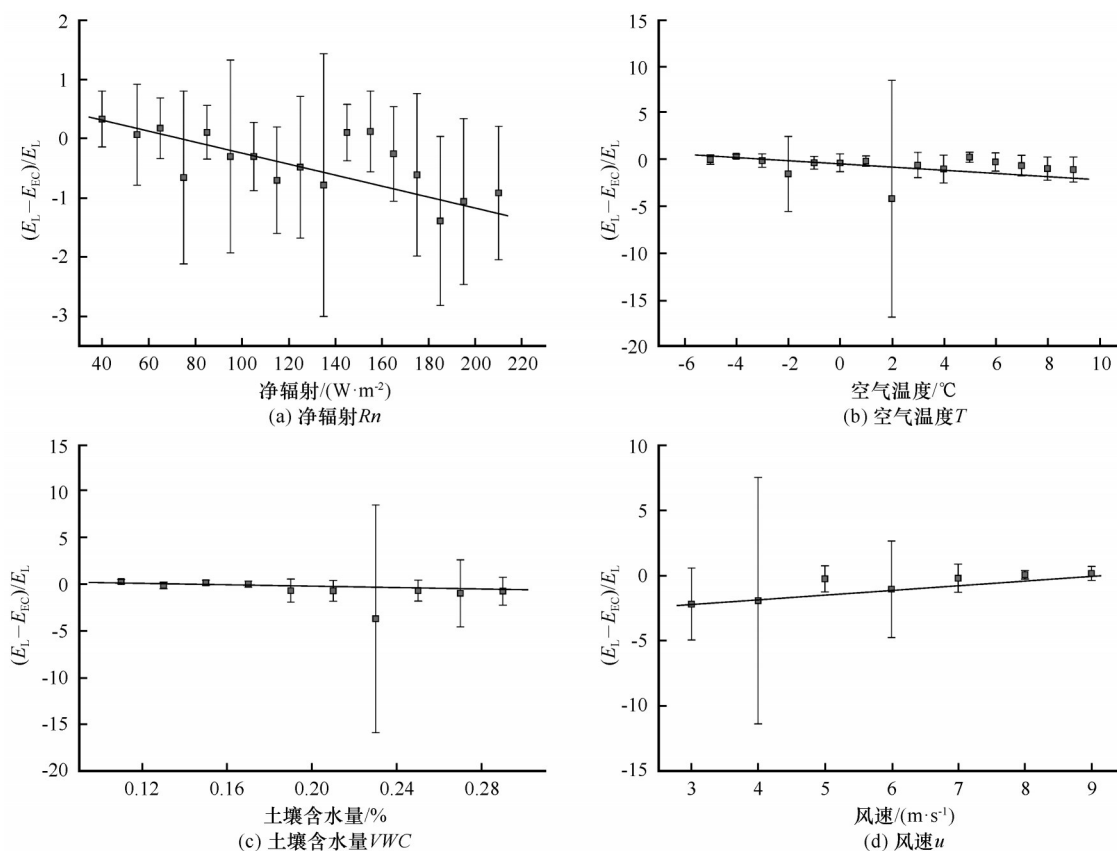
#### 3.2 观测手段与环境因子关系

净辐射( $R_n$ )、空气温度( $T$ )、土壤含水量(VWC)和风速( $u$ )是影响蒸散发量众多环境因子中最重要的四个变量。本研究利用表3中涡度法蒸散发量( $E_{ec}$ )、蒸渗仪法蒸散发量( $E_L$ )、PM公式法蒸散发量( $E_{pm}$ )构建相对差异表达式 $(E_L - E_{ec})/E_L$ 与 $(E_{pm} - E_{ec})/E_{pm}$ ,该比值越接近0说明两者之间差异越小,该比值绝对值越大说明两者差异越大,在此分别讨论上述四个环境因子变量对该比值的影响(图6~7)。

净辐射( $R_n$ )不仅是影响蒸散的主要驱动力,同时也是影响温度变化的重要环境因子。涡度法测量生态系统蒸散发的原理是依据空气的湍流交换,地表植被上部温度的变化将直接影响空气的湍流交换,从而影响到涡度法蒸散发量( $E_{ec}$ )的大小,也对其他方法蒸散发量的计算有所影响。2019年生长季风火山地区 $R_n$ 在38.82~215.23  $W \cdot m^{-2}$ 之间波动,

均值为136.30  $W \cdot m^{-2}$ , $R_n$ 主要集中在200  $W \cdot m^{-2}$ 以下。相对差异数值 $(E_L - E_{ec})/E_L$ 与 $(E_{pm} - E_{ec})/E_{pm}$ 均表现出随 $R_n$ 的增大逐渐下降。当 $R_n$ 在160  $W \cdot m^{-2}$ 以上时,相对差异数值 $(E_L - E_{ec})/E_L$ 与 $(E_{pm} - E_{ec})/E_{pm}$ 符号相反,这说明 $R_n$ 的增加增强了近地面空气的湍流运动, $E_{ec}$ 数值增加,由于 $E_{pm}$ 数值大小与 $R_n$ 为正相关关系,所以 $(E_{pm} - E_{ec})/E_{pm}$ 数值在 $R_n$ 在160  $W \cdot m^{-2}$ 以上时为正值。

由空气温度( $T$ )对相对差异数值 $(E_L - E_{ec})/E_L$ 与 $(E_{pm} - E_{ec})/E_{pm}$ 的图片中可以看出,随 $T$ 的增加 $(E_L - E_{ec})/E_L$ 数值逐渐减小并接近于0, $(E_{pm} - E_{ec})/E_{pm}$ 数值逐渐增大并接近于0。说明随 $R_n$ 、 $T$ 的增加近地面空气湍流运动增强, $E_{ec}$ 数值增大, $E_{pm}$ 数值与 $R_n$ 、 $T$ 为正相关关系,在 $R_n$ 、 $T$ 数值较大时,与 $E_{pm}$ 数值越接近。上述结果与Hirschi等<sup>[22]</sup>、王韦娜等<sup>[23]</sup>文章中 $R_n$ 、 $T$ 对蒸散发数值大小影响的结果相似。

图6  $(E_L - E_{EC})/E_L$  与环境因子的关系Fig. 6 Relationship between  $(E_L - E_{EC})/E_L$  and environmental factors: net radiation (a); the air temperature (b); soil moisture content (c); the wind speed (d)

土壤含水量(VWC)的大小制约着生态系统蒸散发能力,这一现象尤其体现在水分受限的生态系统中。在本研究中, $(E_L - E_{EC})/E_L$ 与 $(E_{PM} - E_{EC})/E_{PM}$ 随VWC的增加均没有呈现明显的趋势,数值在0左右波动,这说明VWC不是造成 $E_L$ 、 $E_{EC}$ 、 $E_{PM}$ 三种方法蒸散发数值差异的主要原因。在图3和表3中,风火山地区生长季降水量占全年降水量的97.82%,在生长季降水量较为丰富,供给蒸散发能力较强,VWC不能成为限制因子,这与张立峰等<sup>[24]</sup>的研究结果类似。

风速( $u$ )在 $E_{PM}$ 、 $E_{EC}$ 的计算中均为重要的变量,并且对蒸渗仪也会产生一定影响,影响 $E_L$ 的大小。本研究中2019年生长季风火山地区 $u$ 日平均值为 $4.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,随 $u$ 的增加 $(E_L - E_{EC})/E_L$ 数值逐渐接近0,这是因为 $u$ 的增加,增大了近地面空气的湍流运动,增加了 $E_{EC}$ 的数值,说明 $E_{EC}$ 与 $u$ 存在正相关关系,这与朱璇浩等<sup>[25]</sup>的研究结果类似。随 $u$ 的增加 $(E_{PM} - E_{EC})/E_{PM}$ 数值先下降稳定为0,随 $u$ 的进一步增加而逐渐下降,这可能与 $E_{PM}$ 的计算公式有关,但是 $(E_{PM} - E_{EC})/E_{PM}$ 数值绝对值较小, $u$ 的变化对 $E_{PM}$ 、 $E_{EC}$ 的测定

不会有较大的影响。

## 4 结论

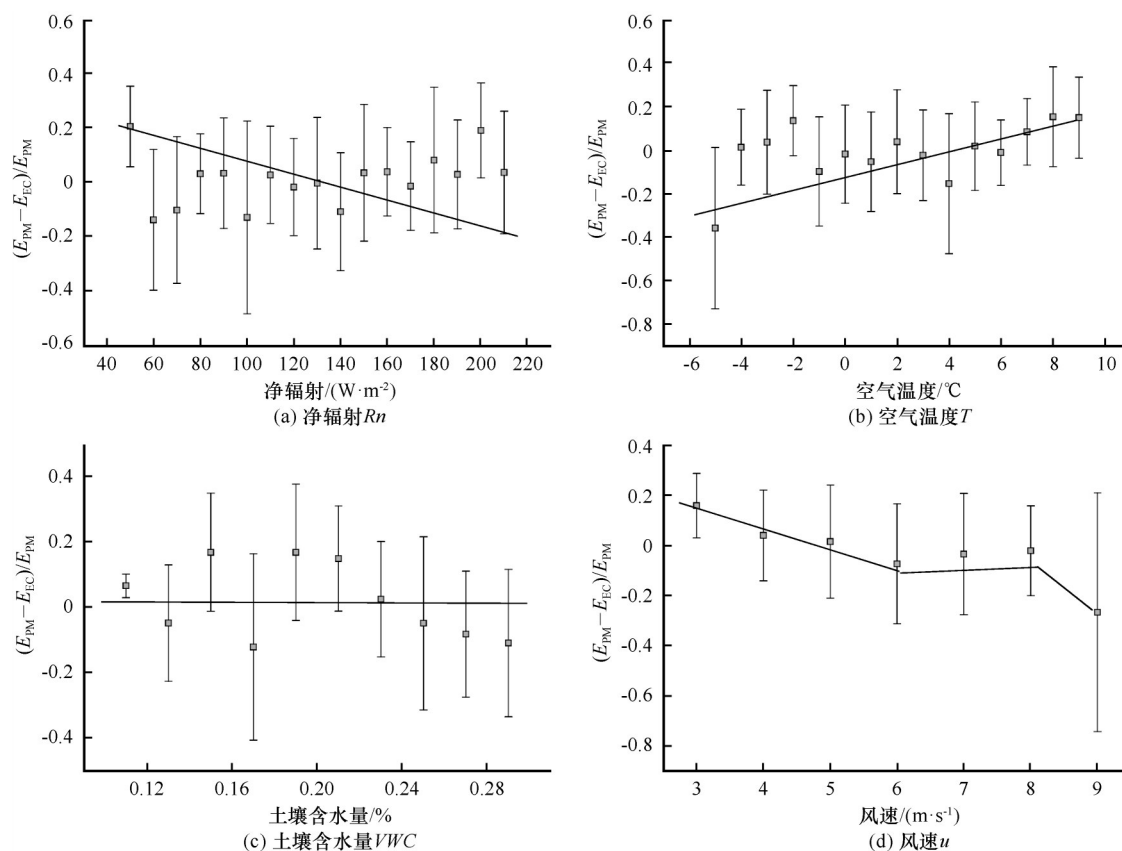
借助青藏高原腹地风火山地区涡度相关系统、蒸渗仪、气象观测系统获取的观测数据,采取涡度相关法、蒸渗仪测定和FAO56 Penman-Monteith公式三种方式,对2019年风火山地区生长季实际蒸散发量进行了评价,结果表明:

(1)风火山地区高寒草甸生长季前期、中期和后期的作物系数分别为0.93、1.11、1.14,生长季前期略小,后两个时期变化不大。

(2)风火山地区2019年生长季涡度法、蒸渗仪法、PM公式法蒸散发量为474.66 mm、517.83 mm、492.51 mm,三种方法评价的实际蒸散发量基本接近,相差不大,可以认为风火山地区生长季实际蒸散发量为 $(495.00 \pm 21.69) \text{ mm}$ ,高于生长季降水量377.89 mm。

(3)风火山地区2019年生长季涡度法、蒸渗仪法、PM公式法生长季蒸散发量日均值分别为2.59 mm、2.83 mm、2.69 mm,三种方法不同生长阶段日蒸散



图7  $(E_{PM}-E_{EC})/E_{PM}$  与环境因子的关系Fig. 7 Relationship between  $(E_{PM}-E_{EC})/E_{PM}$  and environmental factors: net radiation (a); the air temperature (b); soil moisture content (c); the wind speed (d)

发量变化规律相同,表现为生长季中期 $[(3.03 \pm 0.10) \text{ mm}] >$ 生长季后期 $[(2.49 \pm 0.12) \text{ mm}] >$ 生长季前期 $[(2.23 \pm 0.18) \text{ mm}]$ 。

(4) 涡度法、蒸渗仪法、PM公式法测定的蒸散发量具有较好的相关性,但涡度法测量蒸散发量数值较低,三种方法测定的蒸散发量差异主要受净辐射( $R_n$ )、空气温度( $T$ )、风速( $u$ )等环境因子的影响。

## 参考文献(References):

- [1] Chen Fahu, Wu Shaohong, Cui Peng, et al. Progress of applied research of physical geography and living environment in China from 1949 to 2019[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(9): 1799-1830. [陈发虎, 吴绍洪, 崔鹏, 等. 1949—2019年中国自然地理学与生存环境应用研究进展[J]. 地理学报, 2020, 75(9): 1799-1830.]
- [2] Zhao Lin, Hu Guojie, Zou Defu, et al. Permafrost changes and its effects on hydrological processes on Qinghai-Tibet plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1233-1246. [赵林, 胡国杰, 邹德富, 等. 青藏高原多年冻土变化对水文过程的影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1233-1246.]
- [3] Xia Jun, Zhang Yongyong, Mu Xingmin, et al. Progress of ecohydrological discipline and its future development in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(3): 445-457. [夏军, 张永勇, 穆兴民, 等. 中国生态水文学发展趋势与重点

方向[J]. 地理学报, 2020, 75(3): 445-457.]

- [4] Chen Fahu, Fu Bojie, Xia Jun, et al. Major advances in studies of the physical geography and living environment of China during the past 70 years and future prospects[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2019, 49(11): 1659-1696. [陈发虎, 傅伯杰, 夏军, 等. 近70年来中国自然地理与生存环境基础研究的重要进展与展望[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(11): 1659-1696.]
- [5] Du Debin, Liu Chengliang, Hu Zhiding, et al. The impact of "Asian Water Tower" change on the geopolitical environment around China[J]. World Regional Studies, 2020, 29(2): 223-231. [杜德斌, 刘承良, 胡志丁, 等. "亚洲水塔"变化对中国周边地缘政治环境的影响[J]. 世界地理研究, 2020, 29(2): 223-231.]
- [6] Li Yuanshou, Jia Xiaohong, Qi Yanjun, et al. Sensitivity of soil evapotranspiration to climate change in the permafrost area[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(6): 1293-1299. [李元寿, 贾晓红, 齐艳军, 等. 多年冻土区土壤蒸散发对气候变化的敏感性分析[J]. 高原气象, 2019, 38(6): 1293-1299.]
- [7] Yan Junjie, Fu Xiudong, Zhao Yu, et al. Spatiotemporal variation of evapotranspiration in the grassland of Yili valley from 2001 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(6): 184-190, 197. [闫俊杰, 付秀东, 赵玉, 等. 2001—2015年伊犁河谷草地蒸散发时空变化分析[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 184-190, 197.]
- [8] Liang Shunlin, Bai Rui, Chen Xiaona, et al. Review of China's land surface quantitative remote sensing development in



- 2019[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(6): 618-671. [梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 等. 2019年中国陆表定量遥感发展综述[J]. *遥感学报*, 2020, 24(6): 618-671.]
- [9] Wen Xin, Zhou Ji, Liu Shaomin, et al. Spatio-temporal characteristics of surface evapotranspiration in source region of rivers in Southwest China based on multi-source products[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(3): 32-42. [温馨, 周纪, 刘绍民, 等. 基于多源产品的西南河流域地表蒸散发时空特征[J]. *水资源保护*, 2021, 37(3): 32-42.]
- [10] Yao Tianci, Lu Hongwei, Yu Qing, et al. Potential evapotranspiration characteristic and its abrupt change across the Qinghai-Tibetan Plateau and its surrounding areas in the last 50 years[J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(5): 534-546. [姚天次, 卢宏伟, 于庆, 等. 近50年来青藏高原及其周边地区潜在蒸散发变化特征及其突变检验[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(5): 534-546.]
- [11] Wang Lihui, He Xiaobo, Ding Yongjian. Characteristics and influence factors of the evapotranspiration from alpine meadow in central Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(4): 801-808. [王利辉, 何晓波, 丁永建. 青藏高原中部高寒草甸蒸散发特征及其影响因素[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(4): 801-808.]
- [12] Guo Shuhai, Yang Guojing, Li Qingfeng, et al. Observation and estimation of the evapotranspiration of alpine meadow in the upper reaches of the Aksu River, Xinjiang[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(1): 241-248. [郭淑海, 杨国靖, 李清峰, 等. 新疆阿克苏河上游高寒草甸蒸散发观测与估算[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(1): 241-248.]
- [13] Fan Xiaomei, Liu Guangsheng, Wang Genxu, et al. Evapotranspiration process and influencing factors of alpine meadow in the source region of the Yangtze River[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2009, 45(5): 138-140. [范晓梅, 刘光生, 王根绪, 等. 长江源区高寒草甸蒸散发过程及影响因子[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(5): 138-140.]
- [14] Li Nian, Sun Weijun, Qin Xiang, et al. Estimation of evapotranspiration in an alpine meadow in zone of Laohugou in Qilian Mountains[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(6): 173-178. [李念, 孙维君, 秦翔, 等. 祁连山老虎沟地区高寒草甸蒸散发估算[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(6): 173-178.]
- [15] Wang Genxu, Yang Yan, Zhang Guangtao, et al. Cryosphere ecosystems: outpost and barrier in global change[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(4): 425-433. [王根绪, 杨燕, 张光涛, 等. 冰冻圈生态系统: 全球变化的前哨与屏障[J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(4): 425-433.]
- [16] Mao Tianxu, Wang Genxu, Zhang Tao. Impacts of climatic change on hydrological regime in the Three-River Headwaters region, China, 1960—2009[J]. *Water Resources Management*, 2016, 30(1): 115-131.
- [17] Song Chunlin, Wang Genxu, Hu Zhaoyong, et al. Net ecosystem carbon budget of a grassland ecosystem in central Qinghai-Tibet Plateau: Integrating terrestrial and aquatic carbon fluxes at catchment scale[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 290: 108021.
- [18] Liu Xin, Yang Wenjing, Zhao Haipeng, et al. Effects of the freeze-thaw cycle on potential evapotranspiration in the permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 687: 257-266.
- [19] Hu Zhaoyong, Wang Genxu, Sun Xiangyang, et al. Spatial-temporal patterns of evapotranspiration along an elevation gradient on Mount Gongga, southwest China[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(6): 4180-4192.
- [20] Twine T E, Kustas W P, Norman J M, et al. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 103(3): 279-300.
- [21] Tong Yaqin, Wang Pei, Li Xiaoyan, et al. Water budget and evapotranspiration partition in an alpine meadow ecosystem in the upstream of the Heihe River, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(20): 7400-7411. [童雅琴, 王佩, 李小雁, 等. 黑河流域高寒草甸生态系统水分收支及蒸散发拆分研究[J]. *生态学报*, 2018, 38(20): 7400-7411.]
- [22] Hirschi M, Michel D, Lehner I, et al. A site-level comparison of lysimeter and eddy covariance flux measurements of evapotranspiration[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(3): 1809-1825.
- [23] Wang Weina, Zhang Xiang, Zhang Lifeng, et al. A comparison study of the evapotranspiration measured by lysimeter and eddy covariance[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(11): 3551-3559. [王伟娜, 张翔, 张立锋, 等. 蒸渗仪法和涡度相关法测定蒸散量的比较[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(11): 3551-3559.]
- [24] Zhang Lifeng, Zhang Jiqun, Zhang Xiang, et al. Characteristics of evapotranspiration of degraded alpine meadow in the three-river source region[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, 25(2): 273-281. [张立锋, 张继群, 张翔, 等. 三江源区退化高寒草甸蒸散量的变化特征[J]. *草地学报*, 2017, 25(2): 273-281.]
- [25] Zhu Xuanhao, Qi Guangping, Kang Yanxia, et al. The correlation between reference crop evapotranspiration and meteorological factors in Heihe River[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2018, 53(1): 115-123. [朱璇浩, 齐广平, 康燕霞, 等. 黑河流域参考作物蒸散量与气象因素的相关关系研究[J]. *甘肃农业大学学报*, 2018, 53(1): 115-123.]

## Comparison of three evapotranspiration calculation methods: a case study of Fenghuoshan area in Qinghai-Tibet Plateau

ZHANG Wenxu<sup>1,2</sup>, WANG Genxu<sup>1,3</sup>, HU Zhaoyong<sup>1,3</sup>

(1. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** As a sensor and amplifier of global climate change, the hydrological process of the Qinghai-Tibet Plateau is a hot topic at present. Among them, evapotranspiration is the most difficult component in the hydrological cycle of the Qinghai-Tibet Plateau. Based on the observation data of vorticity system, Lysimeter and meteorological observation system in the Fenghuoshan area in the hinterland of the Qinghai-Tibet Plateau, the actual evapotranspiration in the growing season of the Fenghuoshan area in 2019 was evaluated by means of vorticity correlation method, lysimeter measurement and FAO56 Penman-Monteith formula. The results showed that: in Fenghuoshan area of Qinghai-Tibet Plateau, the crop coefficients of early, middle and late growing season were 0.93, 1.11 and 1.14, respectively; the actual evapotranspiration values obtained by the three methods were basically similar. The evapotranspiration in growing season was  $(495.00 \pm 21.69)$  mm, which was greater than 377.89 mm of precipitation in the same period; The results showed that the daily mean of evapotranspiration in Fenghuoshan area was  $(2.70 \pm 0.12)$  mm in the growing season, and the daily mean value of evapotranspiration in different stages of the growing season in Fenghuoshan area was  $(3.03 \pm 0.10)$  mm >  $(2.49 \pm 0.12)$  mm > and  $(2.23 \pm 0.18)$  mm, respectively. The calculated crop coefficients and evapotranspiration at different growth stages provide basic data for evapotranspiration observation and simulation in similar areas of the Qinghai-Tibet Plateau.

**Key words:** Qinghai-Tibet Plateau; evapotranspiration in growing season; vorticity; lysimeter; Penman-Monteith formula

(责任编辑：孟宪红)