蒸渗仪法和涡度相关法测定蒸散的比较

王韦娜[1] 张 翔[1] 张立锋[1] 刘晓琴[1] 赵 亮[2] 李 奇[2] 古 松[1*]
([1]南开大学生命科学学院, 天津 300071; [2]中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008)

摘 要 为准确揭示三江源区退化高寒草甸生态系统的水分收支状况,本文利用涡度相关系统(EC)和蒸渗仪对退化高寒草甸的蒸散进行了连续观测,结果表明:两种方法测定的蒸散量年变化趋势一致,涡度相关法测定的年蒸散量为 481 mm(约占降水量的 86%),低于蒸渗仪法的 558 mm。涡度相关法的湍流能量与有效能的闭合度(*EBR*)年均值约为 0.78,生长季的 *EBR* 要高于非生长季;当摩擦风速(u^*)<0.25 m·s^{-1}时,*EBR* 随 u^* 的增大而增加,当 u^*>0.25 m·s^{-1}时,*EBR* 随 u^* 的增大无明显变化。此外,土壤热通量相对于太阳净辐射的滞后可能也是导致能量不闭合的原因之一。随着净辐射、温度和风速的升高,涡度相关法测定的蒸散逐渐接近于蒸渗仪法的测定值,而土壤含水量对两种方法观测蒸散的影响不明显。本研究结果说明,涡度相关和蒸渗仪法测定的蒸散具有较好的相关性,但涡度相关法可能会低估该生态系统的蒸散量。

关键词 三江源; 涡度相关系统; 蒸渗仪; 净辐射; 摩擦风速

A comparison study of the evapotranspiration measured by lysimeter and eddy covariance.

WANG Wei-na[1], ZHANG Xiang[1], ZHANG Li-feng[1], LIU Xiao-qin[1], ZHAO Liang[2], LI Qi[2], GU Song[1*] ([1]*College of Life Sciences*, *Nankai University*, *Tianjin* 300071, *China*; [2]*Northwest Plateau Institute of Biology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Xining* 810008, *China*).

Abstract: To accurately examine the water budget of degraded meadow ecosystems in the Three-River Source Region, eddy covariance system (EC) and lysimeter were used to continuously measure the evapotranspiration (ET) of a degraded meadow. Our results showed that ET measured by two methods had the same trend of annual variation. The annual cumulative ET measured by EC was 481 mm (accounting for 86% of annual precipitation), which was lower than that measured by lysimeter (558 mm). The annual energy balance ratio (*EBR*) of turbulent fluxes measured by eddy covariance against the independently available energy was about 0.78. The *EBR* in the growing season was higher than that in the non-growth season. When the friction velocity (u^*) was less than 0.25 m·s^{-1}, the *EBR* increased with the increasing u^*. There was no significant change in *EBR* when u^*>0.25 m·s^{-1}. The changes in soil heat flux relatively lagging behind the net radiation might be one of the causes of energy imbalance. The value of ET measured by EC was getting close to that by lysimeter with the increases of net radiation, temperature and wind speed. Soil water content had no obvious effect on ET measured by both methods. The results suggested that there was a good relationship of the ET obtained with both methods, but ET may be underestimated by EC in this meadow ecosystem.

Key words: Three Rivers Source Region; eddy covariance; lysimeter; net radiation; friction velocity.

在陆地生态系统水分收支中,土壤蒸发和植物蒸腾是最主要的支出项,地表降水量的 70%通过蒸散返回大气,干旱地区则可达 90%以上(吴锦奎等,2013)。蒸散是水循环最主要的过程之一,同时伴随着巨大的能量转换,其中,陆地生态系统接收净辐射的 50%以上用于蒸散过程(Jung *et al.*,2010)。因此,蒸散作为水热平衡中的重要组成部分,不仅是反

国家自然科学基金项目(31570478)资助。
收稿日期: 2018-01-29 接受日期: 2019-06-25
*通讯作者 E-mail: songgu@nankai.edu.cn

映生态系统水分状况的重要指标,也是影响区域气候的重要因素,与全球气候变化密切相关(许振柱,2003)。准确测定陆地生态系统的蒸散状况对于深入揭示水循环过程、合理利用水资源也具有重要意义(Sellers *et al.*,1996)。

三江源区位于"世界第三极"的青藏高原腹地,是长江、黄河和澜沧江的发源地,水分收支过程是该区土壤-植被-大气间相互作用的关键环节,对该地区的生态环境变化具有深刻影响。三江源区气候严酷、环境恶劣,生态系统脆弱,对全球变化反应异常敏感(郑度等,2002),高寒草甸是该区最主要的植被类型,在区域生物地球化学循环和能量平衡中起着极为重要的作用(乔春连等,2012)。然而,由于气候变化和过度放牧等因素的影响,加之该生态系统本身的脆弱性,高寒草甸呈现大面积退化现象。其中,中度退化草地面积已达到 5.7197×10^6 hm^2,占可利用草地面积 55.4%,严重地区已成为"黑土滩"(陈国明,2005),近年三江源生态保护与建设工程实施以来,区域生态环境虽发生了明显改善,但仍有部分县存在退化发生和退化加剧的现象(徐新良等,2017),对区域的水分收支产生了深刻影响,并导致生态环境急剧恶化。高寒草甸的退化加剧了生态系统的水分散失,从而降低了生态系统涵养水分的能力(张立锋等,2017)。范晓梅等(2010)研究表明,在植被盖度较低的生长前期,高寒草甸生态系统的蒸散量随着植被盖度降低呈现逐渐增大的趋势;而在生长旺季,蒸散量随植被盖度的增加呈逐渐上升趋势。因此,植被变化直接改变了生态系统的土壤蒸发和植被蒸腾,进而导致蒸散量的变化。所以,准确测定三江源区高寒草甸生态系统的蒸散量对于揭示其水分收支状况和能量平衡具有极其重要的现实意义。

测定或估算生态系统蒸散的方法很多,如蒸渗仪法、涡度相关法、波文比法、遥感和模型估算等(Seneviratne *et al.*,2010;Wang *et al.*,2012),不同方法得出的结果也存在一定程度的差异。涡度相关技术是直接测定地表与大气间的水汽通量,目前被认为是较理想的方法而广泛应用于测定陆地生态系统的蒸散(Chavez *et al.*,2009)。但由于涡度相关法测定的湍流通量存在误差(Twine *et al.*,2000),尤其是在夜间湍流通量较弱时,涡度相关法难以准确测定(Lee *et al.*,1996),导致该方法会出现能量不闭合现象,且测定的能量值普遍偏低。Wilson 等(2002)对 20 多个观测点近 50 年的统计研究表明,观测点的能量闭合度范围为 0.53~0.99。戚培同等(2008)通过对青藏高原海北高寒草甸生态系统研究表明,涡度相关系统测定的能量闭合度约为 0.73。Chavez 等(2009)研究发现,涡度相关法测定的棉花蒸散量比蒸渗仪法低估了近 30%;刘渡等(2012)和戚培同等(2008)研究表明,涡度相关法测定的蒸散量低于蒸渗仪法观测值。蒸渗仪法被认为是测定蒸散最为精确的直接测定方法(Chavez *et al.*,2009),也是野外研究土壤蒸发、水分平衡的重要方法,它是利用高精度称重传感器系统来测定蒸渗仪内土柱的重量变化及渗漏水量,进而计算其水分收支各分项(Howell *et al.*,1995)。但由于蒸渗仪价格昂贵,不易管理,通常用于农田观测,而在自然生态系统的研究中较少使用。

本研究利用蒸渗仪、涡度相关技术及微气象方法对三江源区退化高寒草甸生态系统的蒸散和环境要素进行连续观测,通过数据解析,探讨分析了该区退化高寒草甸生态系统的蒸散量变化特征及其环境因子的影响,同时对蒸渗仪和涡度相关技术两种方法观测的蒸散结果进行对比分析,探讨两种方法测定蒸散的差异及其影响因素,以期为准确评价该区域退化高寒草甸生态系统的水分收支状况提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地概况

研究地位于青海省三江源区的果洛州大武镇东南部的退化高寒草甸,实验样地(34°21′N,100°29′E,海拔 3963 m)属于典型的高原大陆性气候(张立锋等,2017),无明显的四季之分,只有冷、暖两季之别。该区接收的太阳辐射较强,年总辐射量达 5500~6800 MJ · m^{-2},暖季净辐射日平均为 10.2 MJ · m^{-2},冷季净辐射日平均为 5.7 MJ · m^{-2}。该区具有温度年较差小,而日较差大的特点,年平均气温为-0.4 ℃,生长季(5—9 月)平均气温约为 7 ℃,而非生长季寒冷漫长(戚培同等,2008)。降水相对丰沛,年降水量在 420~560 mm 范围内变动,其中约 85%集中在生长季,呈现水热同期的特征;由于气候变化和放牧等因素影响,该区草甸退化严重,群落建群种为矮嵩草(*Kobresia humilis*),主要伴生种有小嵩草(*Kobresia pygmaea*)、早熟禾(*Poa annua*)、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)等。该区草甸退化严重,群

落植被低矮,植被盖度约为 64%。土壤类型主要为高山草甸土和高山灌丛草甸土(张立锋等,2017)。

1.2 研究方法

1.2.1 涡度相关与微气象系统 开路式涡度相关系统和微气象观测系统安装在地势平坦、视野开阔的退化高寒草甸上,周围有足够大的"风浪区"(半径大于 300 m)。涡度相关系统包括开路式红外气体分析仪(Li-7500,Li-COR,USA)和三维超声风速仪(CSAT3,Campbell Scientific Inc.,USA),用来监测 CO_2 和 H_2O 通量,数据采集频率为 10 Hz;同时,利用微气象观测系统监测净辐射、空气温度、风速、5 cm 土壤含水量和降水量(P)等环境要素(表 1),每 15 min 输出一次平均值,所有数据记录在数据采集仪(CR5000)中。

根据涡度相关技术原理,可以通过下列公式计算出潜热和感热通量(吴锦奎等,2013):

$$H=\rho_a C_p \overline{\omega'\theta'} \quad (1)$$

$$LE=\lambda\rho_a \overline{\omega'q'} \quad (2)$$

式中,ω'为垂直风速脉动值;θ'为温度脉动值;q'为空气比湿脉动值;H 为感热通量;LE 为潜热通量;ρ_a 为空气密度;λ 为蒸发潜热;C_p 为定压比热。

1.2.2 蒸渗仪 在涡度相关观测系统附近,选取植被盖度相对均匀的地点安装蒸渗仪(LYS40)。本研究所用蒸渗仪直径 40 cm,高度 50 cm,最大称重量为 220 kg,蒸发分辨率为 0.01 mm,渗漏分辨率 0.04 mm,渗漏水由自动排水泵排出。数据采集间隔时间为 30 min,利用 GPRS 进行数据远程传输。本实验共安装 3 个蒸渗仪,其平均值用于本研究数据分析。

由于实验地为地势平坦的草甸,且降水强度较小,因此不考虑地表径流的影响,根据水量平衡原理,一时段的蒸散量可由下式计算(吴锦奎等,2013):

表 1 主要观测仪器

Table 1 Measurements of main instruments

观测要素	仪器	安装高度或深度(cm)
水汽密度	Li-7500,Li-COR,USA	220
垂直风速和气温	CSAT3,Campbell Scientific Inc.,USA	220
净辐射	CNR-1,Kipp&Zonen,Netherlands	150
土壤热通量	HFT-3 and HFP01,CSI,USA	−2
风速	034A-L,CSI,USA	220
空气温度	HMP45C,CSI,USA	220
土壤含水量	TDR,CS615,CSI,USA	−5
降水量	TE525MM,CSI,USA	50

$$ET=\Delta S+P-Q \quad (3)$$

式中,ET 为蒸散量;ΔS 为蒸渗仪内储水量变化;P 为降水量;Q 为渗漏量;以上变量单位均为 mm。

1.3 数据处理

涡度相关法测定的数据经过了三维坐标旋转、温度变换和 WPL 校正等方法进行数据校正(Webb,1982)。由于涡度相关法传感器受降水、结露等因素的影响,对其采集的数据需要进行筛选,出现以下情况的数据被作为异常值剔除,有降水发生及其前后 1 h 数据,摩擦风速(u^*)小于 0.1 m·s^{-1}(湍流混合较弱)的数据(Alavi *et al.*,2006)。此外,由于断电和观测系统自身故障也会导致部分数据的缺失,因此在数据处理时需对剔除和缺失的数据进行插补。当时刻数据缺失时,数据插补主要采用平均昼夜变化法(MDV)(Baldocchi *et al.*,2001;Falge *et al.*,2001),即对缺失数据采用临近天同时刻数据进行填补,一般窗口选取大小为 4~15 d;当数据连续缺失时,采用潜热通量与净辐射函数方程的非线性回归方法插补(徐自为等,2009),数据选取范围为缺失数据前后 10 天。最后采用 SPSS 软件进行统计分析。

1.4 能量闭合状况

能量平衡率(energy balance rate,EBR)是评价能量闭合度的方法,是特定时间范围内($LE+H$)之和与(R_n-G)之和的比值(Wilson *et al.*,2002;Li *et al.*,2010)。它的优点在于可以对能量闭合状况作出整体评价,平衡短期条件下造成的随机误差,缺点是它忽视了短时间内能量平衡的变化(Blanken,1998)。

$$EBR=\frac{\sum(LE+H)}{\sum(R_n-G)} \quad (4)$$

式中,R_n 为净辐射,G 为土壤热通量,单位为 W·m^{-2}。

2 结果与分析

2.1 能量闭合状况

本研究为 2017 年 1—12 月观测数据的统计结果。涡度相关和能量平衡法测定的能量年累计值结果表明,能量闭合度(EBR)为 0.78,涡度相关法观测的感热和潜热通量之和($H+LE$)低于能量平衡法观测的有效能量(R_n-G)之和,说明本研究存在能量不闭合现象,闭合度在 Wilson 等(2002)报道的 0.34~

1.69 范围内。*EBR* 的季节变化表明,生长季的 *EBR* 在 0.79~0.84,高于非生长季的 0.68~0.81(图 1a),最低值出现在 4 月。

EBR 的日变化是利用一日中每个整点时刻观测的($H+LE$)与(R_n-G)计算得出(图 1b)。结果表明,*EBR* 的日变化在 0.04~0.98,大于各月的波动范围(0.68~0.84),且昼间的能量闭合度明显高于夜间,下午的能量闭合度高于上午。从 09:00 到 18:00,($H+LE$)随辐射和温度的增加而迅速增大,*EBR* 呈明显的上升趋势,最高值出现在 18:00 左右(0.98)。

2.2 环境因子的季节变化

净辐射(R_n)和空气温度(T)呈明显的季节变化(图 2a 和 2b),由于受云量变化的影响,生长季中 R_n 的变化幅度非常大,R_n 的日累计最高值和最低值分别出现在 6 月和 1 月(分别为 16.45 和-0.49 MJ·m^{-2}·d^{-1}),其中生长季(5—9 月)的 R_n 约占全年总量的 62%。T 的年变化趋势与 R_n 一致,从 3 月份开始,T 呈现波动上升趋势,7 月达最高值,月平均气温为 9.7 ℃,其中,日平均气温最高值为 14.2 ℃(7 月 23 日)。之后,T 呈下降趋势,最低温出现在 1 月(月平均温度为-14.2 ℃),其中日平均最低气温为-19.8 ℃(1 月 12 日)。降水主要集中在生长季,约占全年总降水量(560 mm)的 87%,且降水发生频率较高,但日降水量并不大,日均降水量约为 2.4 mm·d^{-1},最高日降水量为 14.2 mm·d^{-1}。非生长季降水量仅占年降水量的 13%,平均日降水量约为 0.4 mm·d^{-1}。5cm深度的土壤含水量(SWC)变化

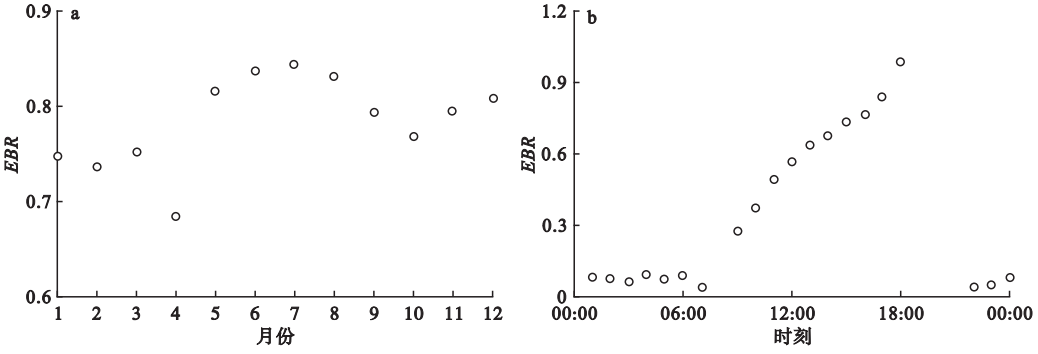


图 1 研究期间能量闭合度(*EBR*)的季节变化(a)与日变化(b)

Fig.1 Seasonal (a) and diurnal (b) variation of energy balance ratio (*EBR*) during the observation period

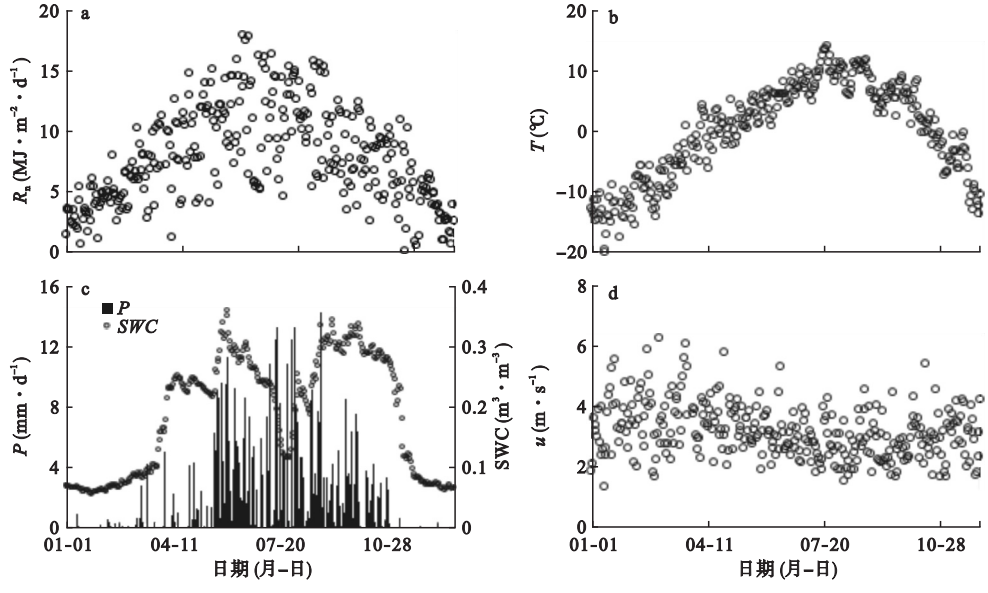


图 2 2017 年退化高寒草甸环境因子的季节变化

Fig.2 Seasonal variation of (a) net radiation (R_n), (b) air temperature (T), (c) soil water content at 5 cm depth (SWC) and precipitation (P), (d) wind velocity (u) in degraded alpine meadow in 2017

a.净辐射(R_n);b.空气温度(T);c.降水量(P)和 5 cm 土壤含水量(SWC);d.风速(u)。

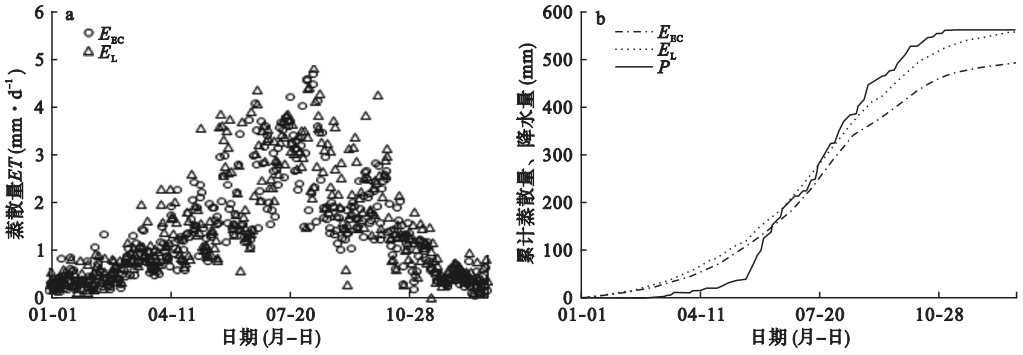


图 3 涡度相关和蒸渗仪法观测蒸散量(E_{EC}和E_L)的年变化(a)及其累计量(b)与降水累计量

Fig.3 Annual variation (a) and cumulative amount (b) of evapotranspiration observed by eddy covariance (E_{EC}) and lysimeter (E_L) and cumulative precipitation

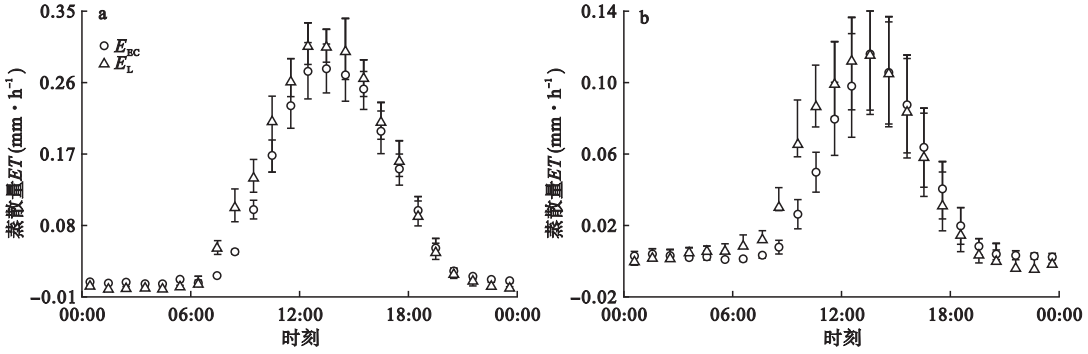


图 4 蒸渗仪法和涡度相关法测定蒸散量(E_L与E_{EC})的日变化

Fig.4 Daily variations of evapotranspiration observed by eddy covariance (E_{EC}) and lysimeter (E_L)

a.生长季;b.非生长季。

主要受降水和蒸散的影响,总体上生长季中的土壤含水量较高,最高值为 0.36 $m^3 \cdot m^{-3}$,但在生长旺季的 7 月,由于较强的辐射导致蒸散量增加,*SWC* 出现了下降趋势(图 2c)。日平均风速(u)的年变化主要在 2~4 $m \cdot s^{-1}$ 范围内变动,无明显的季节变化,但生长季中略有降低(图 2d)。

2.3 蒸散的季节变化

涡度相关法与蒸渗仪法测定的蒸散量(E_{EC}和E_L)呈相同的年变化趋势(图 3a),生长季明显高于非生长季,生长季的蒸散约占年蒸散量的 68%。在土壤冻结的 1—3 月,E_L与 E_{EC}均维持在较低水平,且二者没有明显差异,但从土壤逐渐解冻的 4 月开始,随着降水和辐射的增加,为蒸散提供了水分和热量条件,蒸散量呈明显的增加趋势,最高值出现在 7 月,之后随辐射和温度的降低,蒸散呈降低趋势。由年蒸散累计值可以发现(图 3b),蒸渗仪测定的年蒸散量高于涡度相关法测定值,蒸渗仪测定的年蒸散量与年降水量接近,而涡度相关法测定年蒸散量则低于年降水量。

2.4 蒸散的日变化

无论是生长季还是非生长季,E_{EC}与 E_L均呈相同的日变化趋势(图 4),日蒸散量的最高值出现在午后 12:00—14:00 左右。但两种方法观测的蒸散量差异随时间变化而不同。在夜间的 E_{EC}与 E_L的差异非常小,但在 06:00—14:00 之间,E_L明显高于 E_{EC},而 14:00 之后几乎没有差异。由该结果可以推断,两种方法所测定的蒸散量差异可能主要发生在上午。

3 讨 论

3.1 能量闭合度

涡度相关法是通过湍流交换原理测定感热和潜热通量,而湍流的强弱则直接影响到能量闭合度。国内外诸多研究表明,涡度相关法普遍存在能量不闭合现象(Wilson *et al.*,2002;Li *et al.*,2005),而导致能量不闭合的原因有很多,包括环境和仪器自身因素等(郭家选等,2004)。其中,近地层的摩擦风速是度量湍流特征的重要参数,也是影响能量闭合

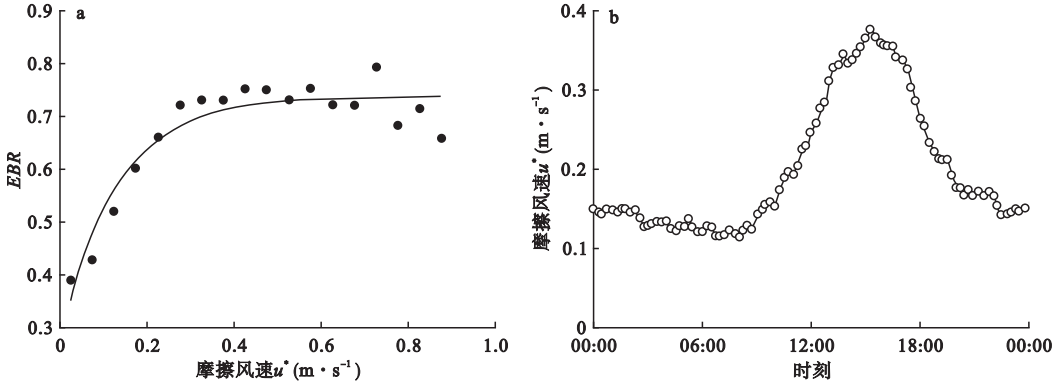


图 5 摩擦风速与能量闭合度的关系(a)以及摩擦风速的日变化(b)

Fig.5 (a) The relationship between friction velocity (u^*) and energy balance rate (*EBR*) and (b) daily variation of friction velocity (u^*)

度的关键因素(Wang *et al.*,2007)。对于高原上能量不闭合的现象,有研究指出,夜间近地面层较低的摩擦风速导致了涡度相关系统能量损失(Wilson *et al.*,2002)。本研究表明,当摩擦风速(u^*)小于0.25 m·s^{-1}时,能量闭合度(*EBR*)随 u^* 的增大迅速增加,而 u^* 大于 0.25 m·s^{-1}时,*EBR* 增长缓慢并趋于稳定(图 5a),该变化趋势与 Li 等(2005)的研究结果相一致。另外,本研究发现 u^* 日变化随时间呈现明显的差异(图 5b),夜间的 u^* 明显低于昼间,从 09:00 开始 u^* 迅速增大,*EBR* 也随之升高(图 1b),在 12:00—18:00 之间 u^* 大于 0.25 m·s^{-1},这可能是导致下午的能量闭合度高于上午的原因之一。该结果说明,对于三江源区退化高寒草甸生态系统,涡度相关法的能量闭合度对 u^* 的响应非常敏感。能量闭合度除了受到摩擦风速的影响,一天中辐射、温度和大气稳定度等因素的变化对能量闭合度的日变化也会产生影响。

此外,能量平衡中各分项通量日变化随时间变化的差异也会影响能量闭合程度(Li *et al.*,2008)。本研究结果表明,虽然各能量通量的日变化均呈单峰型趋势(图 6),但 *H*、*LE* 与 *G* 的时间变化相对于 R_n 存在延迟现象,其中 *G* 的滞后现象最为明显。R_n 在 13:00 左右达到最高值,而 *G* 的峰值出现在14:30 左右,这与李辉东等(2014)研究结果相似,*G* 的变化滞后于 R_n 可能是导致能量不闭合的原因之一。(*LE*+*H*)的峰值出现在 13:00,相对于(R_n−*G*)峰值时间 12:30 也存在延迟。有研究表明,土壤热通量相对于净辐射的延迟,会导致有效能量(R_n−*G*)高于湍流能量(*LE*+*H*),进而导致能量闭合度的降低(Quan *et al.*,2008;Hirschi *et al.*,2015)。而导致能量不闭合的原因非常复杂,如两种系统测定面积不同引起的采样误差、仪器的系统误差、湍流通量观测中的高低频损失(戚培同等,2008)以及各通量源区分布的变异性和风向(郑宁,2010)等,因此,在以后的研究中尚有待于进一步探讨研究。

3.2 能量闭合度与蒸散的关系

涡度相关法对蒸散的测定准确度直接影响能量闭合度,而能量闭合度与涡度相关法和蒸渗仪法测定差异程度存在一定关系(刘渡等,2012),且能量闭合度随植被生长状况的变化而不同,因此涡度相关法测定的蒸散(E_{EC})与蒸渗仪法(E_L)的差异程度存在季节变化。本研究结果表明,E_{EC} 与 E_L 具有良好的线性关系(图 7),但 E_{EC} 低于 E_L,且在生长季(图 7a)的相关性高于非生长季(图 7b),说明与非生长季相比,生长季的 E_{EC} 更接近于 E_L,这与本研究的植物生长季的能量闭合度高于非生长季相一致(图 1a),也与戚培同等(2008)、Li 等(2005)和 Gebler等(2015)的研究结果一致。由此可推断,能

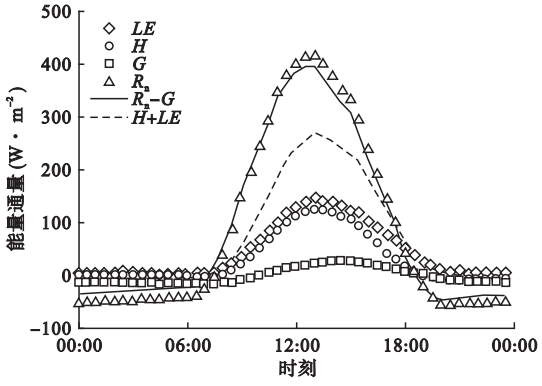


图 6 能量平衡分量日变化

Fig.6 Diurnal variation of the energy balance components

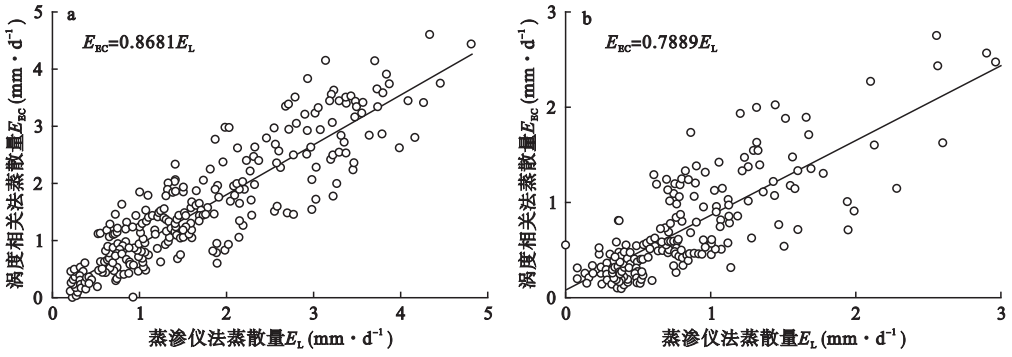


图 7 涡度相关法(EC)和蒸渗仪(L)测定蒸散量(*ET*)的关系

Fig.7 Relationship between evapotranspiration (*ET*) measured by eddy covariance (EC) and lysimeter (L)

a.生长季;b.非生长季。

量不闭合是导致本研究涡度相关法测定的蒸散量低于蒸渗仪法的重要原因,且涡度相关法低估了该生态系统的蒸散量,这与 Alfieri 等(2012)利用涡度相关法和蒸渗仪法测定蒸散的结果相同。Li 等(2010)和 Dugas 等(1991)的研究也表明,随涡度相关法的能量闭合度增加,观测的蒸散值逐渐接近于实际蒸散量。

涡度相关法是通过湍流交换输送空气中的水汽来测定生态系统的蒸散(Li *et al.*,2010),而湍流强弱的变化则直接影响蒸散的测定值。由蒸散日变化可知,无论是生长季还是非生长季 E_{EC} 和 E_L 的差异均表现为上午大于下午(图 4),这是由于本研究地在海拔约为 4000 m 的三江源区,昼夜温差大,特别是在夜间的近地面空气层,通常会形成逆温层,导致上午空气湍流较弱,而下午的摩擦风速明显大于上午(图 5b),能量闭合度也大于上午(图 1b),因此导致两种方法观测的蒸散量差异在下午小于上午。

3.3 环境因子对蒸散量的影响

净辐射(R_n)、空气温度(T)、土壤含水量(SWC)和风速(u)是影响蒸散最重要的环境因子(戴黎聪等,2018)。本研究用$(E_L-E_{EC})/E_L$的值表示 E_L 与 E_{EC} 间差异程度,该比值等于 0 说明两者无差异,偏离零值的程度越大说明两者差异越大。在此分别讨论上述因子对该比值的影响。

辐射是蒸散的主要驱动力,也是影响温度变化的最主要因子。涡度相关法是依据湍流交换原理测定蒸散,而近地层温度的变化将直接影响空气的湍流交换,因此对涡度相关法测定的蒸散影响较大(张立锋等,2017),进而影响两种方法测定的生态系统蒸散。本研究表明,当 R_n 小于 600 W·m^{-2}时,$(E_L-E_{EC})/E_L$ 随 R_n 的升高呈下降趋势,而当 R_n>600 W·m^{-2}时,该比值基本稳定在−0.2 附近(图 8a),这可能是由于湍流交换随辐射的增强而增强,进而导致 E_{EC} 值增大。虽然到达该研究区的太阳总辐射较多,但由于高原上大气逆辐射较弱,因此 R_n 占太阳总辐射的比例并不高(张翔等,2017)。观测值的统计结果表明,R_n 主要集中在 400 W·m^{-2}以下(约占总数据的 76%),因此总体上本研究中的 E_L 高于 E_{EC}。由温度对$(E_L-E_{EC})/E_L$的影响可知,随空气温度的升高该比值呈线性下降趋势并逐渐接近零值(图 8b),这是因为温度升高会增加湍流作用,使 E_{EC} 值渐渐接近于 E_L。上述结果与 Hirschi 等(2015)报道的 R_n 和 T 对蒸散影响的结果相似。

土壤水分是生态系统蒸散的物质基础,对水分受限的生态系统蒸散具有明显的影响(黄泽,2017)。而本研究发现,$(E_L-E_{EC})/E_L$的值随土壤含水量变化并没有出现明显的变化(图 8c),说明土壤含水量变化不是造成两种方法测定蒸散差异的主要影响因子。这可能是由于本研究地降水比较充沛,为蒸散提供了较充足的水分条件,不能成为蒸散的限制因子,这与张立锋等(2017)的结果一致。

风速是影响蒸散的重要环境因子,不仅影响涡度相关系统,对蒸渗仪也会产生影响(强小嫚等,2009)。本结果表明,当 u 小于 4 m·s^{-1}时,随着 u 的增加,$(E_L-E_{EC})/E_L$的值迅速减小,并逐渐趋近于零值(图 8d);而当 u 在 4~10 m·s^{-1}时,该比值随 u 的变化不明显,基本稳定在零值附近,即 E_{EC} 接近于 E_L 值。这是因为随 u 的增大,加大了近地面空气的湍流作用,进而导致涡度相关法测定的水汽通量增加,朱璇浩等(2018)研究指出涡度相关法测定的蒸散与风速之间存在正相关关系。但当 u 大于 10 m·s^{-1}时,该比值偏离零值,并呈增加趋势。一方面,

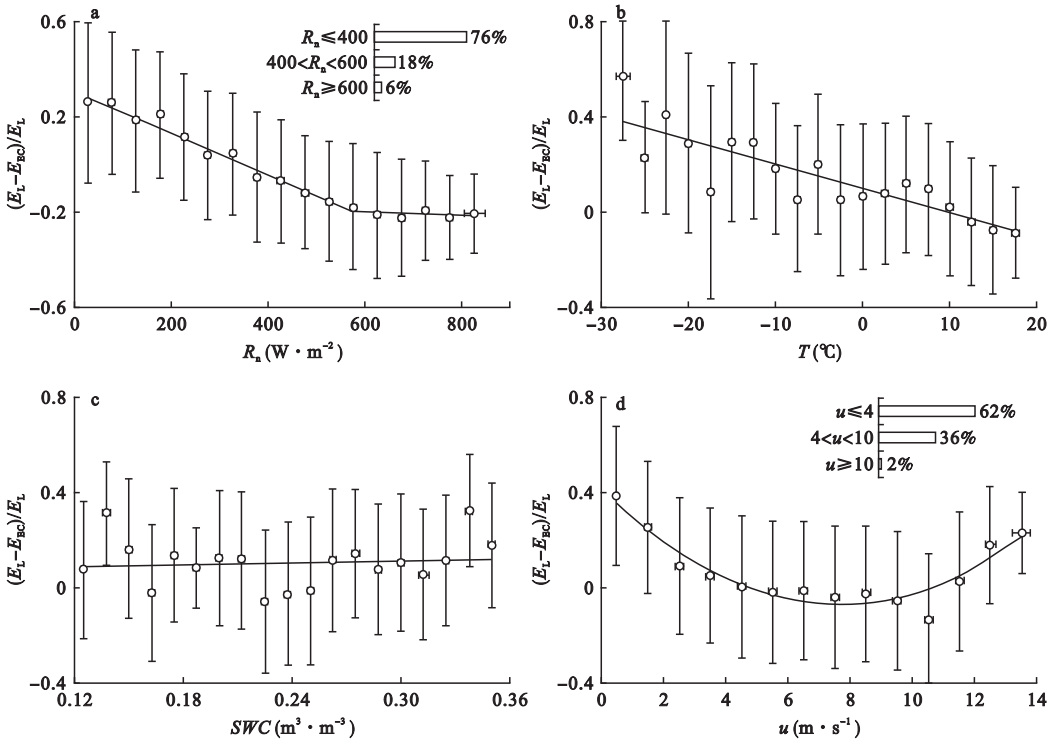


图 8 环境因子与两种方法测定蒸散量差异(E_L-E_{EC})/E_L的关系

Fig.8 Relationship between environmental factors and the relative differences between lysimeter evapotranspiration (E_L) and EC-based evapotranspiration (E_{EC}), (E_L-E_{EC})/E_L

a.净辐射;b.空气温度;c.5 cm 土壤含水量;d.风速。

可能是 u 对蒸渗仪的影响比较大,当施加在蒸渗仪的风压不均匀时,蒸渗仪称重系统表现出易变性;另一方面,u 过大时,空气的平流运动可能导致水汽和热量在水平方向的移动,进而引起涡度相关法测定的感热和潜热偏低(姜华,2003)。但在研究地,由于全年的风速主要在 0~4 m · s^{-1}变化,风速大于 10 m · s^{-1}的数据仅占数据总量的 2%,因此风速对该比值的影响总体上是随风速的增大而降低。该结果进一步说明,两种方法测定蒸散的差异主要是由于涡度相关法的能量不闭合导致测定值偏低。

4 结 论

本研究利用蒸渗仪法和涡度相关法测定了三江源区退化高寒草甸生态系统的蒸散量,结果表明,涡度相关法与蒸渗仪法测定的蒸散量具有较好的相关性,但前者低于后者,两种方法测定的蒸散差异主要受净辐射、温度及风速等环境因子影响。另外,涡度相关法存在明显的能量不闭合现象(能量闭合度约为 78%)。因此,利用涡度相关技术观测该高寒草甸生态系统的蒸散量可能会低估其真实值,进而对生态系统水分收支的评价和相关研究产生影响。

参考文献

陈国明. 2005. 三江源地区“黑土滩”退化草地现状及治理对策. 草业与畜牧, (10): 37-39.

戴黎聪, 曹莹芳, 柯 浔, 等. 2018. 气象因子对青藏高原高寒草甸参考蒸散的驱动特征. 草业科学, **35**(9): 2137-2147.

范晓梅, 刘光生, 王一博, 等. 2010. 长江源区高寒草甸植被覆盖变化对蒸散过程的影响. 水土保持通报, **30**(6): 17-21.

郭家选, 梅旭荣, 卢志光, 等. 2004. 测定农田蒸散的涡度相关技术. 中国农业科学, **37**(8): 1172-1176.

黄 泽. 2017. 黄土高原半干旱区典型人工草地与天然草地土壤水分平衡研究(硕士学位论文). 陕西: 西北农林科技大学.

姜 华. 2003. 热带大西洋海表潜热和感热通量的季节和年际变化研究(博士学位论文). 山东: 中国海洋大学.

李辉东, 关德新, 袁凤辉, 等. 2014. 科尔沁温带草甸能量平衡的日季变化特征. 应用生态学报, **25**(1): 69-76.

刘 渡, 李 俊, 于 强, 等. 2012. 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, **32**(17): 5309-5317.

戚培同, 古 松, 唐艳鸿, 等. 2008. 三种方法测定高寒草甸生态系统蒸散比较. 生态学报, **28**(1): 202-211.

强小嫚, 蔡焕杰, 王 健. 2009. 波文比仪与蒸渗仪测定作物蒸发蒸腾量对比. 农业工程学报, **25**(2): 12-17.

乔春连, 李婧梅, 王基恒, 等. 2012. 青藏高原高寒草甸生态系统 CO_2通量研究进展. 山地学报, **29**(2): 204-210.
吴锦奎, 陈军武, 吴 灏, 等. 2013. 疏勒河上游高寒草甸蒸散对比研究. 地理科学, **33**(1): 97-103.
徐新良, 王 靓, 李 静, 等. 2017. 三江源生态工程实施以来草地恢复态势及现状分析. 地球信息科学学报, **19**(1): 50-58.
徐自为, 刘绍民, 徐同仁, 等. 2009. 涡动相关仪观测蒸散量的插补方法比较. 地球科学进展, **24**(4): 372-382.
许振柱. 2003. 半干旱区典型植物对气候变化与 CO_2浓度升高的响应与适应(博士学位论文). 北京: 中国科学院研究生院(植物研究所).
张 翔, 刘晓琴, 张立锋, 等. 2017. 青藏高原三江源区人工草地能量平衡的变化特征. 生态学报, **37**(15): 4973-4983.
张立锋, 张继群, 张 翔, 等. 2017. 三江源区退化高寒草甸蒸散的变化特征. 草地学报, **25**(2): 273-281.
郑 度, 林振耀, 张雪芹. 2002. 青藏高原与全球环境变化研究进展. 地学前缘, **9**(1): 95-102.
郑 宁. 2010. 低丘山地人工林显热通量空间代表性和尺度效应的研究(硕士学位论文). 安徽: 安徽农业大学.
朱璇浩, 齐广平, 康燕霞, 等. 2018. 黑河流域参考作物蒸散量与气象因素的相关关系研究. 甘肃农业大学学报, **53**(1): 115-123.
Alavi N, Warland JS, Berg AA. 2006. Filling gaps in evapotranspiration measurements for water budget studies: Evaluation of a Kalman filtering approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, **141**: 57-66.
Alfieri JG, Kustas WP, Prueger JH, *et al*. 2012. On the discrepancy between eddy covariance and lysimetry-based surface flux measurements under strongly advective condition. *Advances in Water Resources*, **50**: 62-78.
Baldocchi D, Falge E, Wilson K. 2001. A spectral analysis of biosphere-atmosphere trace gas flux densities and meteorological variables across hour to multi-year time scales. *Agricultural and Forest Meteorology*, **107**: 1-27.
Blanken PD. 1998. Turbulent flux measurements above and below the overstory of a boreal aspen forest. *Boundary-Layer Meteorology*, **89**: 109-140.
Chavez JL, Howell TA, Copeland KS. 2009. Evaluating eddy covariance cotton ET measurements in an advective environment with large weighing lysimeters. *Irrigation Science*, **28**: 35-50.
Dugas WA, Fritschen LJ, Gay AA, *et al*. 1991. Bowen ratio, eddy correlation, and portable chamber measurements of sensible and latent heat flux over irrigated spring wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, **56**: 1-20.
Falge E, Baldocchi D, Olson R, *et al*. 2001. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, **107**: 43-69.
Gebler S, Franssen HJH, Putz T, *et al*. 2015. Actual evapotranspiration and precipitation measured by lysimeters: A comparison with eddy covariance and tipping bucket. *Hydrology and Earth System Sciences*, **19**: 2145-2161.
Hirschi M, Michel D, Lehner I, *et al*. 2015. A site-level comparison of lysimeter and eddy-covariance flux measurements of evapotranspiration. *Hydrology and Earth System Sciences*, **21**: 1809-1825.
Howell TA, Schneider AD, Dusek DA, *et al*. 1995. Calibration and scale performance of bushland weighing lysimeters. *Transactions of the ASAE*, **38**: 1019-1024.
Jung M, Reichstein M, Ciais P, *et al*. 2010. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature*, **467**: 951-954.
Lee X, Black TA, Hartog GD, *et al*. 1996. Carbon dioxide exchange and nocturnal processes over a mixed deciduous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, **81**: 13-29.
Li Q, Zhang XZ, Shi PL, *et al*. 2008. Study on the energy balance closure of alpine meadow on Tibetan Plateau. *Journal of Natural Resources*, **23**: 391-399.
Li S, Kang S, Zhang L, *et al*. 2010. A comparison of three methods for determining vineyard evapotranspiration in the arid desert regions of northwest China. *Hydrological Processes*, **22**: 4554-4564.
Li ZQ, Yu GR, Wen XF, *et al*. 2005. Energy balance closure at China FLUX sites. *Science in China Series D*, **48**: 51-62.
Sellers PJ, Randall DA, Collatz GJ, *et al*. 1996. A revised land surface parameterization (SiB_2) for atmospheric GCMS. Part I: Model Formulation. *Journal of Climate*, **9**: 706-737.
Seneviratne SI, Corti T, Davin EL, *et al*. 2010. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth Science Reviews*, **99**: 125-161.
Twine TE, Kustas WP, Norman JM, *et al*. 2000. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, **103**: 279-300.
Wang CL, Zhou GY, Xu W, *et al*. 2007. Energy balance analysis of the coniferous and broad-leaved mixed forest ecosystem in Dinghushan. *Journal of Tropical Meteorology*, **23**: 643-651.
Wang KC, Dickinson RE. 2012. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Reviews of Geophysics*, **50**: RG2005.
Webb EK. 1982. On the correction of flux measurements for effects of heat and water vapour transfer. *Boundary-Layer Meteorology*, **23**: 251-254.
Wilson K, Goldstein A, Falge E, *et al*. 2002. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, **113**: 223-243.

作者简介 王韦娜,女,1992 年生,硕士研究生,研究方向为全球变化生态学。E-mail: wangweina_1@163.com
责任编辑 魏中青