

葛骏, 余晔, 解晋, 等. 2017. 青藏高原两类下垫面地表能量分配对气候要素的响应研究 [J]. 大气科学, 41 (5): 918–932. Ge Jun, Yu Ye, Xie Jin, et al. 2017. A study on responses of surface energy partitioning to climatic factors on two types of underlying surface over Qinghai–Xizang Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (5): 918–932, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16200.

青藏高原两类下垫面地表能量分配 对气候要素的响应研究

葛骏^{1,4} 余晔^{1,2} 解晋^{1,2,3} 咎蓓蕾^{1,2,3}

1 中国科学院西北生态环境资源研究院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 兰州 730000

2 中国科学院平凉陆面过程与灾害天气观测研究站, 甘肃省平凉市 744015

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 南京大学大气科学学院, 南京 210023

摘 要 利用青藏高原北麓河观测站(退化高寒草甸)和玛曲观测站(高寒草原)2014年地面观测资料,通过组合分类法,对比分析了两类下垫面生长季土壤含水量、水汽压差和净辐射对地表能量分配的直接和间接影响,并且利用路径分析法研究了影响地表能量分配的关键气候因子。结果表明:北麓河站和玛曲站潜热占比(潜热通量与地表可利用能量的比值)对土壤含水量的响应分别处于土壤水分抑制阶段和能量抑制阶段。其中,北麓河站潜热占比在水汽压差较大时随土壤含水量增长较快,受净辐射的影响较小;而玛曲站潜热占比随土壤含水量的变化趋势受水汽压差和净辐射的影响均较小。北麓河站潜热占比随水汽压差的增大先减小后趋于不变,并且潜热占比对水汽压差的敏感性随土壤含水量的增大而减小;而玛曲站潜热占比随水汽压差的增大先增大后趋于不变,几乎不受土壤含水量和净辐射的影响。北麓河站和玛曲站潜热占比均随净辐射的增大趋于稳定,其稳定值分别与土壤含水量和水汽压差有关。路径分析结果显示,降水是影响北麓河站潜热占比的主要气候因子,而气温是影响玛曲站潜热占比的主要气候因子。

关键词 潜热占比 植被 气候因子 青藏高原

文章编号 1006-9895(2017)05-0918-15

中图分类号 P422.4

献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16200

A Study on Responses of Surface Energy Partitioning to Climatic Factors on Two Types of Underlying Surface over Qinghai–Xizang Plateau

GE Jun^{1,4}, YU Ye^{1,2}, XIE Jin^{1,2,3}, and ZAN Beilei^{1,2,3}

1 Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

2 Pingliang Land Surface Process & Severe Weather Research Station, Chinese Academy of Sciences, Pingliang, Gansu Province 744015

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

4 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023

Abstract Based on surface observational data obtained at Beiluhe site (degraded alpine meadow) and Maqu site (alpine grassland) over Qinghai–Xizang Plateau in 2014, a combinatorial stratification method was used to compare and analyze

收稿日期 2016-07-19; 网络预出版日期 2017-02-21

作者简介 葛骏, 1990 年出生, 博士研究生, 主要从事陆—气相互作用研究。 E-mail: nju_gejun@qq.com

通讯作者 余晔, yyu@lzb.ac.cn

资助项目 国家重大科学研究计划 2013CB956004

Funded by National Basic Research Program of China (Grant 2013CB956004)

direct and indirect effects of soil water content, vapor pressure deficit and net radiation on surface energy partitioning. A path analysis method was used to study the key climatic factors that influence the surface energy partitioning on two types of underlying surface. The results show that the response of evaporative fraction (the ratio of latent heat flux to the available energy of the land surface) to soil water content stays in the soil moisture-limited regime at Beiluhe site and energy-limited regime at Maqu site. Evaporative fraction grows fast with increases in soil water content at high levels of vapor pressure deficit and net radiation has little impact on the variation of evaporative fraction at Beiluhe site. The variation of evaporative fraction with changes in soil water content is not influenced by vapor pressure deficit and net radiation at Maqu site. Evaporative fraction first decreases and then tends to be stable as vapor pressure deficit increases, and the sensitivity of evaporative fraction to vapor pressure deficit decreases when soil water content becomes larger while it is independent of net radiation at Beiluhe site. Evaporative fraction increases slightly as vapor pressure deficit increases at first, and then becomes stable and is no longer influenced by soil water content and net radiation at Maqu site. At both sites, evaporative fraction tends to become stable as net radiation increases and the stable value is determined by soil water content at Beiluhe site and vapor pressure deficit at Maqu site. Results from path analysis indicate that precipitation is the dominant factor that controls evaporative fraction at Beiluhe site and air temperature is the dominant factor for evaporative fraction at Maqu site.

Keywords Evaporative fraction, Vegetation, Climatic factor, Qinghai-Xizang Plateau

1 引言

陆地表面是由构成多样、性质复杂和分布不均匀的下垫面组成，是气候系统的重要组成部分 (Shukla and Mintz, 1982; Betts et al., 1996; Guo et al., 2011c)。受大气环流驱动和太阳辐射强迫，地表与大气之间不断进行着各种时空尺度的相互作用，包括动量、能量和物质的交换以及辐射传输等过程 (孙菽芬, 2005)。其中，感热通量和潜热通量是陆—气能量和水分交换过程的重要组成部分。陆—气之间的感热和潜热交换不仅直接影响降水，还间接影响行星边界层高度、抬升凝结高度、自由对流高度和对流启动 (Eltahir, 1998; Schär et al., 1999; Pielke, 2001; Findell and Eltahir, 2003; Betts, 2007; Berg et al., 2013)。感热和潜热通量也是衔接地面和大气的能量纽带，它们使土壤湿度与气温、降水紧密耦合 (Koster et al., 2004, 2006; Guo et al., 2006; Seneviratne et al., 2010)。地表能量在感热和潜热间的分配对气候要素的响应极为复杂，并且在不同地区差异明显 (Wang and Dickinson, 2012)。这会导致不同地区陆—气耦合强度存在差异，从而使某些地区更容易发生极端气候事件 (Koster et al., 2009)。因此，陆—气之间的感热和潜热交换与大气环流以及气候状况紧密联系，在某些地区或者某个时段内甚至还起着关键作用 (孙菽芬, 2005)。

模式结果显示，全球平均地表蒸散发约占净辐射的 48%~88%，是地表能量收支的主要部分 (Trenberth et al., 2009)。地表蒸散发包括土壤蒸

发、植物蒸腾和冠层截流蒸发等过程。植物蒸腾是指植物通过毛细管力的作用将土壤水分从根系输送至叶面，然后通过植物气孔扩散到大气过程。土壤、空气和光等外部水、热条件通过影响植物的光合作用和呼吸作用控制植物气孔的闭合程度以及水汽出入气孔的能力，从而影响陆—气之间的能量和水分交换 (Sellers et al., 1996; 孙菽芬, 2005)。因此，不同的植被状况可能导致地表能量分配对水、热条件的响应存在差异。Giambelluca et al. (2009) 对巴西热带草原地区地表能量分配状况的研究表明，波文比 (感热与潜热的比值) 与土壤湿度的依赖关系在植被覆盖度较低的地区更强。植物对地表能量分配的影响通过陆—气间的反馈过程，又会进一步影响局地天气和气候。Teuling et al. (2010) 利用观测数据研究发现，欧洲夏季高温期间森林与大气的感热交换显著增强，而草地与大气的潜热交换显著增强，草地加速了土壤水分的流失，从而在土壤变干后引起持续时间更长、温度更高的热浪事件。Myoung et al. (2012) 对东亚的模拟结果显示，中国东北和华北地区植被覆盖度的增加能够有效降低该地区地表蒸散发的变率和陆—气耦合强度，从而减少夏季发生干旱的频率。

青藏高原 (简称高原) 平均海拔超过 4000 m，面积大约为 $2.57 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，素有“世界屋脊”之称。由于其海拔高、空气稀薄、太阳辐射强，高原上陆—气相互作用非常强烈 (Ma et al., 2005)。高原陆—气之间的感热和潜热交换对亚洲季风的形成与演化以及全球气候系统中能量和水分循环具有十

分重要的作用(王介民, 1999; Ma et al., 2007)。土壤湿度和植被状况是影响高原草甸生态系统地表能量分配的主要因素(Gu et al., 2005)。许多研究表明, 雨季前后, 降水少、土壤偏干、陆一气以感热交换为主; 雨季期间, 降水多、土壤偏湿、陆一气以潜热交换为主(Tanaka et al., 2001, 2003; Ma et al., 2003; 马耀明等, 2006; Li et al., 2015)。由于海拔高、气候寒冷、高原上冻土分布广泛, 冻土中冰和水的相变过程也会改变土壤湿度, 从而影响地表能量分配(王澄海和师锐, 2007; 王澄海等, 2008; Guo et al., 2011a, 2011b; 陈渤黎, 2013; Gu et al., 2015; 葛骏等, 2016)。除了土壤湿度外, 高原植被状况同样影响地表能量分配。研究表明, 植被生长期前后, 波文比大于 1, 地表能量通量以感热通量为主; 植被生长期, 波文比小于 1, 地表能量通量以潜热通量为主(Gu et al., 2005; 王少影等, 2012; Shang et al., 2015)。

然而, 由于受高原地面观测的制约, 已有的研究大多局限于单一下垫面, 针对不同植被状况对地表能量分配影响的研究仍然较少。因此, 基于高原两类下垫面的地面观测资料, 我们试图探究植被状况对地表能量分配的影响。本文拟利用北麓河站和玛曲站 2014 年生长季的地面观测资料, 通过对比和分析两站地表能量分配对气候因子响应的特征及其差异, 探究影响两站地表能量分配的关键气候因子, 从而加深对高原植被状况对地表能量分配影响的认识。

2 研究区域和观测数据

2.1 研究区域

北麓河站观测资料来自于国家重大科学研究计划项目“青藏高原沙漠化对全球变化的响应”依托北麓河冻土工程与环境综合观测研究站(简称北麓河站, 34.83°N, 92.94°E, 海拔 4628 m)进行的观测试验。北麓河站位于高原羌塘盆地大片连续多年冻土区东侧, 在格尔木西南约 320 km(图 1a)。该地区年平均气温-5.30°C, 年平均降水量 285 mm, 属高原亚寒带半干旱气候(尤全刚等, 2015)。观测场周围地形平坦、开阔, 下垫面植被类型为退化高寒草甸, 植被覆盖度低, 地表以砂土和砾石为主(图 1b)。

玛曲站观测资料来自于中国科学院西北生态环境资源研究院若尔盖高原湿地生态系统研究站

(简称玛曲站, 33.89°N, 102.14°E, 海拔 3423 m)高寒草原下垫面观测场。该观测场位于甘肃省甘南藏族自治州玛曲县河曲马场草场内(图 1a)。该地区年平均气温 1.20°C, 年平均降水量 595 mm, 属高寒湿润气候(王少影等, 2012)。观测场周围地形平坦、开阔, 下垫面植被以藏嵩草(*Kobresia tibetica*)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)和矮嵩草(*Kobresia humilis*)为主, 夏季草高约 20 cm, 冬季约 10 cm, 地表总植被覆盖度在 92%左右(Wang et al., 2016)(图 1c)。

2.2 观测数据

观测项目主要包括地表能量通量、地表辐射、近地面空气温湿度、土壤温湿度和降水等, 具体的观测仪器和架设高度见表 1 和表 2。两站涡动数据采集频率均为 10 Hz, 其它观测数据为 30 min 平均值。北麓河站降水数据由 Peng et al. (2015) 提供, 时段从 2014 年 6 月 1 日至 2015 年 5 月 31 日, 其它观测项目的时段从 2014 年 5 月 7 日至 2015 年 8 月 21 日。玛曲站观测资料时段从 2014 年 6 月 1 日至 9 月 30 日。两站观测数据均使用北京时间, 北麓河站和玛曲站当地时间分别比北京时间大约晚 1 h 48 min 和 1 h 12 min。

表 1 北麓河站观测仪器说明

Table 1 Specification of observation instruments at Beiluhe site

| 观测项目 | 观测仪器 | 仪器精度 | 高度/cm |
|--------------------|--------------------|---|------------|
| 三维风速 | CSAT3, Campbell | u', v' : 1 mm s ⁻¹ , w' : 0.5 mm s ⁻¹ , T : 2×10 ⁻³ °C | 290 |
| 水汽/CO ₂ | LI-7500A, LI-COR | ±2%/±1% | 290 |
| 辐射分量 | CNR1, Kipp & Zonen | ±10% | 150 |
| 空气温度 | HMP45C, Vaisala | ±0.2°C | 290 |
| 空气湿度 | HMP45C, Vaisala | ±2% (RH: 0~90%), ±3% (RH: 90%~100%) | 290 |
| 土壤温度 | 109L, Campbell | ±0.2°C (0~70°C 时), ±0.5°C (-50°C 时) | -5, -10 |
| 土壤湿度 | CS616, Campbell | ±2.5% | -5, -10 |
| 土壤热通量 | HFP01, Hukseflux | -15%~5% | -2.5, -7.5 |

3 数据处理和研究方法

3.1 涡动数据处理

两站的感热通量(H)和潜热通量(LE)均是用涡动相关法计算得到。涡动相关法是利用观测得到的垂直风速脉动和物理量(如温度、水汽和 CO₂ 浓度)脉动, 通过计算协方差得到湍流通量的方法

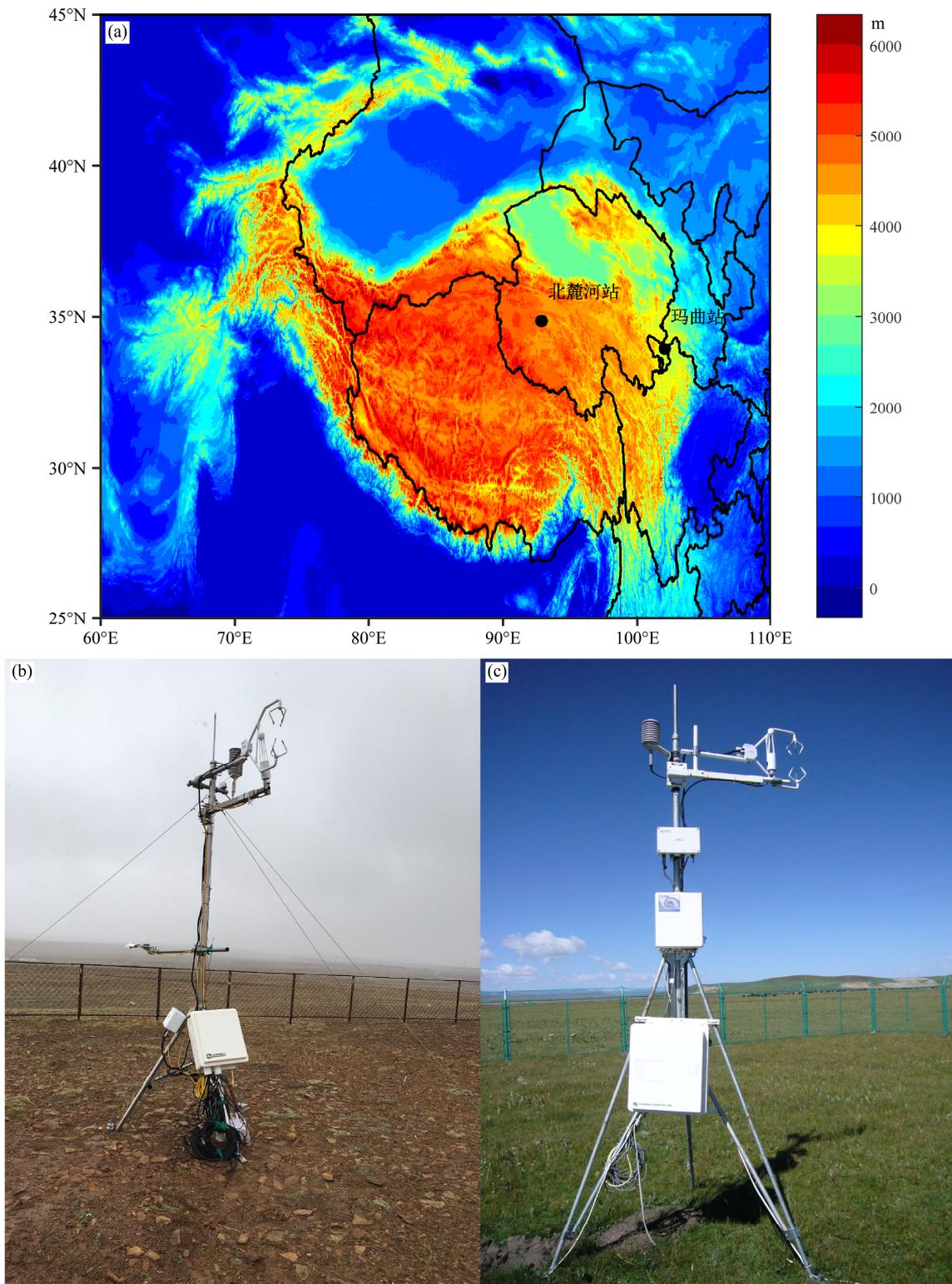


图 1 (a) 试验站的地理位置 (彩色阴影: 海拔高度, 单位: m) 以及 (b) 北麓河站和 (c) 玛曲站观测场生长季的情况

Fig. 1 (a) Geographical location of observation sites (colour shading area: altitude; units: m) and conditions at (b) Beiluhe site and (c) Maqu site in the growing season

表 2 玛曲站观测仪器说明

Table 2 Specification of observation instruments at Maqu site

| 观测项目 | 观测仪器 | 仪器精度 | 高度/cm |
|-------------------|--------------------|--|------------------------------|
| 三维风速 | CSAT3, Campbell | $u', v': 1 \text{ mm s}^{-1}, w': 0.5 \text{ mm s}^{-1}, T: 2 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$ | 320 |
| 水汽/ CO_2 | LI-7500A, LI-COR | $\pm 2\% / \pm 1\%$ | 320 |
| 辐射分量 | CNR1, Kipp & Zonen | $\pm 10\%$ | 150 |
| 空气温度 | HMP45C, Vaisala | $\pm 0.2^\circ\text{C}$ | 200 |
| 空气湿度 | HMP45C, Vaisala | $\pm 2\%$ (RH: 0~90%), $\pm 3\%$ (RH: 90%~100%) | 200 |
| 土壤温度 | 107L, Campbell | $\pm 0.5^\circ\text{C}$ | -5, -10, -20, -40, -80, -160 |
| 土壤湿度 | CS616, Campbell | $\pm 2.5\%$ | -5, -10, -20, -40, -80, -160 |
| 土壤热通量 | HFP01, Hukseflux | $-15\% \sim 5\%$ | -7.5, -15, -30, -60 |
| 降水 | T200B, Geonor | 0.1% | 150 |

(Stull, 1988)。本文利用美国 LI-COR 公司研发的 EddyPro 软件计算 H 和 LE ，并对数据进行了必要的修正，主要包括“野点”去除、倾斜修正 (Kaimal and Finnigan, 1994)、频率损失修正 (Moore, 1986)、超声虚温修正 (Schotanus et al., 1983) 和 WPL 修正 (Webb et al., 1980)。另外，剔除了降水时段的数据，北麓河站和玛曲站剔除的数据分别占使用数据的 9.35% 和 11.90%。对修正后的通量数据，采用 Mauder and Foken (2006) 标准对半小时的通量数据进行质量评级。其中，0 类数据质量最好，可作为基础研究；1 类数据质量较好，用来分析年或月尺度的通量收支变化；2 类数据质量较差，不予使用。两站通量数据的质量情况见表 3。本文分析中使用了 0 类通量数据。

表 3 北麓河站和玛曲站通量数据的质量情况

Table 3 Quality of fluxes observations at Beiluhe site and Maqu site

| 质量评级 | 北麓河站 | | 玛曲站 | |
|------|--------|--------|--------|--------|
| | 感热通量 | 潜热通量 | 感热通量 | 潜热通量 |
| 0 | 67.95% | 59.19% | 70.85% | 65.54% |
| 1 | 22.58% | 22.22% | 20.54% | 20.06% |
| 2 | 7.94% | 9.72% | 8.57% | 9.31% |
| 缺测 | 1.53% | 8.87% | 0.04% | 5.09% |

注：百分数表示各类质量的数据占全部观测数据的百分比。

3.2 研究方法

由于高原非生长季地表植被覆盖度普遍较低，为了研究下垫面差异对地表能量分配的影响，我们仅对生长季的数据进行分析。我们采用 Gu et al. (2005) 的方法，将非冻结期日平均波文比 (日平均 H 和 LE 的比值) 连续小于或等于 1 的时段定义为生长季。其中，非冻结期满足土壤日最低温度至少连续 3 天以上大于 0°C 条件 (Guo et al., 2011b)。北麓河站 2014 年的生长季为 6 月 1 日至 10 月 9 日，

玛曲站 2014 年 6~9 月都是生长季。

潜热占比 (Evaporative Fraction, 简称 EF) 是 LE 与地表可利用能量的比值 (Shuttleworth et al., 1989)，具体如下：

$$EF = \frac{LE}{R_n - G} = \frac{LE}{H + LE}, \quad (1)$$

其中， R_n 为净辐射， G 为地表土壤热通量。EF 与波文比相似，反映了地表能量的分配情况。但是波文比的变化范围没有上界 (当 LE 趋于 0 W m^{-1} 时，波文比趋于无穷大)，而 EF 的变化范围在 0 到 1 之间，因此使用 EF 更有优势 (Nishida et al., 2003; Wang et al., 2006)。 G 通常难以被直接测量，目前普遍采用热传导方程校正法、谐波分析法和耦合热传导对流法等计算得到，但是均存在一定的偏差 (徐自为等, 2013)。为了避免计算 G ，我们用 LE 与 $H + LE$ 的比值来计算 EF。尽管使用涡动相关法计算 H 和 LE 时能量不闭合现象 ($R_n - G$ 与 $H + LE$ 不相等) 普遍存在，但是目前校正 H 和 LE 的方法都是基于波文比在计算 H 和 LE 时准确可靠这一假设 (Wang and Dickinson, 2012)。因此，EF 不受能量闭合问题的影响，不用对其校正 (Zhou and Wang, 2016)。EF 在晴天条件下通常呈倒“U”型的日变化特征，除早晨和傍晚外，EF 较稳定 (图未给出)，可以忽略其日变化的影响。因此，我们用两站 10:00~18:00 时段内 30 min 的 H 和 LE 计算得到的 EF 进行分析。

许多研究表明，EF 受大气需求和水分供给的影响，包括净辐射 (R_n)、气温 (T_a)、水汽压差 (VPD)、风速 (WS) 和土壤含水量 (SWC) 等 (Bucci et al., 2008; Tanaka et al., 2008; Wang et al., 2007; Wang and Liang, 2008; Zhou and Wang, 2016)。 R_n 、 T_a 、WS 和 SWC 直接由观测得到，VPD 根据 Tetens 经

验公式（盛裴轩等, 2003）计算得到：

$$VPD = e_s - e = e_s \left(1 - \frac{RH}{100}\right), \quad (2)$$

$$e_s = 6.11 \exp\left[\frac{17.27T_a}{T_a + 237.30}\right], \quad (3)$$

其中， e_s 是饱和水汽压（hPa）， e 是实际水汽压（hPa）， T_a 和 RH 分别是空气的温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）和相对湿度（%）。由于在计算 VPD 时使用了 T_a ，两者存在很强的相关性，很难将两者对 EF 的影响分开。另外，Ball et al.（1987）的研究也表明植物气孔对 VPD 的响应比 T_a 更直接。另外，我们在研究过程中发现，WS 对两站 EF 的影响非常小。因此，本文仅分析 EF 对 SWC、VPD 和 R_n 的响应。植物水分主要来源于根部对土壤水分的汲取。高原草甸的根区通常较浅，密集的根系集中在 0~20 cm 浅层土壤（Yang et al., 2009）。因此本文仅对 5 cm 的 SWC 进行分析。SWC、VPD 和 R_n 除了直接影响地表能量分配外，相互还会产生间接影响（Gu et al., 2006）。为了探究不同气候因子对 EF 的直接和间接影响，

本文采用类似于 Gu et al.（2006）和 Wang et al.（2016）的组合分类法进行分析。我们用 $\mu - \sigma/2$ 和 $\mu + \sigma/2$ 将两站的 SWC、VPD 和 R_n 分为偏低（L）、中等（M）和偏高（H）三类（ μ 和 σ 分别是各站在研究时段内各气候因子的平均值和方差），分组情况见表 4 和表 5。

为了进一步研究影响两站地表能量分配的关键气候因子，我们采用路径分析法。路径分析法是多元回归法的衍生物，在已知各变量间因果关系的前提下，路径分析法可以给出不同变量构成因果关系的强度和可靠性。尤其是当变量间的独立性不确定时，相对于传统的多元回归法，路径分析法对变量间关系的描述更准确（Huxman et al., 2003）。路径分析法的主要工具是路径图，它通常由带箭头的线连接各个变量而构成。如图 2 所示是一个描述变量 η_1 、 η_2 和 η_3 之间关系的路径图，图中 η_1 不仅直接影响 η_3 ，还通过 η_2 间接影响 η_3 。 γ_{12} 、 γ_{13} 和 γ_{23} 表示路径系数，它是箭头连接的两个变量之间的偏回归系数，反映了变量之间因果关系的强度。图 2 中

表 4 北麓河站生长季土壤含水量（SWC）、水汽压差（VPD）和净辐射（ R_n ）的分组情况，以及各组的样本数量、SWC、VPD、 R_n 和潜热占比（EF）的平均值（ \pm 标准差）

Table 4 The grouping of soil water content (SWC), vapor pressure deficit (VPD), net radiation (R_n) at Beiluhe site in the growing season, and the sample numbers and mean values (\pm standard deviations) of SWC, VPD, R_n , and evaporative fraction (EF) in each group

| 气候因子 | 分组 | 样本数量 | SWC/m ³ m ⁻³ | VPD/kPa | R_n /W m ⁻² | EF |
|-------|----|------|------------------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|
| SWC | L | 437 | 0.150 \pm 0.006 | 5.17 \pm 2.77 | 400 \pm 161 | 0.51 \pm 0.18 |
| | M | 626 | 0.164 \pm 0.003 | 4.63 \pm 2.55 | 419 \pm 177 | 0.64 \pm 0.12 |
| | H | 444 | 0.178 \pm 0.006 | 4.06 \pm 1.97 | 428 \pm 186 | 0.75 \pm 0.05 |
| VPD | L | 550 | 0.166 \pm 0.012 | 2.21 \pm 0.73 | 357 \pm 161 | 0.69 \pm 0.09 |
| | M | 560 | 0.164 \pm 0.012 | 4.60 \pm 0.75 | 449 \pm 177 | 0.65 \pm 0.16 |
| | H | 397 | 0.162 \pm 0.010 | 7.99 \pm 1.66 | 452 \pm 170 | 0.53 \pm 0.18 |
| R_n | L | 481 | 0.164 \pm 0.012 | 4.07 \pm 2.74 | 212 \pm 75 | 0.66 \pm 0.15 |
| | M | 492 | 0.163 \pm 0.012 | 4.47 \pm 2.42 | 415 \pm 51 | 0.61 \pm 0.16 |
| | H | 531 | 0.165 \pm 0.012 | 5.27 \pm 2.20 | 604 \pm 73 | 0.63 \pm 0.16 |

表 5 玛曲站生长季 SWC、VPD 和 R_n 的分组情况，以及各组的样本数量、SWC、VPD、 R_n 和 EF 的平均值（ \pm 标准差）

Table 5 The grouping of SWC, VPD, R_n at Maqu site in the growing season, and the sample numbers and mean values (\pm standard deviations) of SWC, VPD, R_n , and EF in each group

| 气候因子 | 分组 | 样本数量 | SWC/m ³ m ⁻³ | VPD/kPa | R_n /W m ⁻² | EF |
|-------|----|------|------------------------------------|------------------|--------------------------|-----------------|
| SWC | L | 606 | 0.141 \pm 0.029 | 8.04 \pm 3.79 | 441 \pm 197 | 0.66 \pm 0.08 |
| | M | 418 | 0.249 \pm 0.026 | 7.21 \pm 3.29 | 410 \pm 194 | 0.68 \pm 0.08 |
| | H | 623 | 0.333 \pm 0.028 | 5.60 \pm 2.75 | 369 \pm 174 | 0.65 \pm 0.08 |
| VPD | L | 613 | 0.271 \pm 0.091 | 3.63 \pm 1.00 | 282 \pm 137 | 0.63 \pm 0.08 |
| | M | 570 | 0.238 \pm 0.082 | 6.70 \pm 0.99 | 473 \pm 175 | 0.65 \pm 0.06 |
| | H | 464 | 0.207 \pm 0.077 | 11.49 \pm 2.33 | 489 \pm 183 | 0.72 \pm 0.06 |
| R_n | L | 576 | 0.254 \pm 0.092 | 5.25 \pm 3.24 | 198 \pm 67 | 0.70 \pm 0.09 |
| | M | 517 | 0.248 \pm 0.086 | 7.00 \pm 3.55 | 402 \pm 56 | 0.64 \pm 0.08 |
| | H | 554 | 0.222 \pm 0.083 | 8.55 \pm 2.84 | 626 \pm 82 | 0.65 \pm 0.05 |

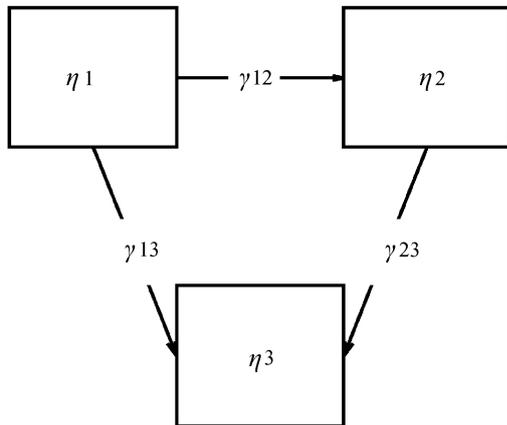


图2 路径图示例

Fig. 2 Example of the path diagram

的变量和路径系数可以构成方程组:

$$\begin{cases} \eta_2 = \gamma_{12}\eta_1 + \zeta_1 \\ \eta_3 = \gamma_{13}\eta_1 + \gamma_{23}\eta_2 + \zeta_2 \end{cases} \quad (4)$$

公式(4)中 ζ_1 和 ζ_2 为截距。在路径分析中,直接效应是指自变量和因变量之间单向因果关系产生的效应,间接效应是指自变量通过中间变量对因变量产生的效应,累积效应是指一个变量对另一个变量所产生的直接效应和间接效应的综合。我们用SPSS AMOS 21.0软件对两站地表能量分配和不同气候因子之间的关系进行路径分析。

4 结果与讨论

4.1 气候特征分析

图3a-f给出了两站2014年生长季日累计降水量以及日平均SWC、 T_a 、 R_n 、VPD和WS的变化。可以看出,北麓河站日累积降水量略少于玛曲站,平均值分别为 2.80 mm d^{-1} 和 3.30 mm d^{-1} 。北麓河站SWC在大部分时段低于玛曲站,平均值分别为 $0.16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 和 $0.25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 。同时,北麓河站SWC的变化幅度也远远小于玛曲站,变化范围分别为 $0.13 \sim 0.19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 和 $0.09 \sim 0.40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 。北麓河站日平均 T_a 最高为 8.78°C ,最低为 -3.97°C ,平均值为 3.80°C ;玛曲站日平均 T_a 最高为 15.31°C ,最低为 4.24°C ,平均值为 9.87°C 。北麓河站和玛曲站 R_n 差异较小,平均值分别为 120 W m^{-2} 和 122 W m^{-2} 。玛曲站VPD略大于北麓河站,平均值分别为 3.63 hPa 和 2.58 hPa 。北麓河站WS略大于玛曲站,平均值分别为 3.41 m s^{-1} 和 2.52 m s^{-1} 。

4.2 潜热占比对土壤含水量的响应

图4a、b给出了两站生长季EF在不同的VPD和 R_n 组合条件下随SWC的变化。可以看出,在所有的VPD和 R_n 组合条件下,北麓河站EF均随SWC的增大而增大,并且当SWC接近 $0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 时EF趋于稳定。然而,玛曲站EF在所有的VPD和 R_n 组合条件下基本不随SWC变化。因此,北麓河站EF对SWC的变化更敏感。经典的概念模型指出,当SWC低于某一临界值(SWC_{crit})时EF随SWC的增大而线性增长,该阶段为土壤水分抑制阶段;当SWC高于 SWC_{crit} 时EF随SWC的增大而不变,该阶段为能量抑制阶段(Seneviratne et al., 2010)。显然,EF对SWC的响应过程在北麓河站主要处于土壤水分抑制阶段,而在玛曲站处于能量抑制阶段。可以注意到,玛曲站即使是在SWC小于 $0.2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 时,EF对SWC的变化仍然不敏感,说明植被覆盖度增大可能使 SWC_{crit} 减小,从而减弱了EF对SWC变化的敏感性。从两站VPD和 R_n 对EF随SWC变化的间接影响可以看出,北麓河站在同一VPD条件下,EF随SWC变化趋势在不同的 R_n 条件下差异较小,除了当SWC和VPD均较小时,可能与样本数量少有关,有待进一步研究;而在同一 R_n 条件下,EF随SWC变化的速率随VPD的增大而增大。玛曲站由于EF不随SWC变化,VPD和 R_n 对其的间接影响较小。

为了进一步解释SWC对EF的直接影响以及VPD和 R_n 对EF随SWC变化的间接影响,图4c-f给出了两站生长季H和LE在不同的VPD和 R_n 组合条件下随SWC的变化。可以看出,北麓河站H(LE)随SWC的增大而减小(增大),而玛曲站H和LE均不随SWC变化,与EF随SWC的变化吻合(图4a和b)。这种差异主要是由于北麓河站地表植被覆盖度低,土壤蒸发对LE的贡献较大,从而造成LE对SWC较强的依赖关系;然而玛曲站植被覆盖度高,植被蒸腾占LE的比重较大,植物控制蒸腾过程的光合作用和呼吸作用除受SWC的影响外,还受光、热等其他气候因子的影响,从而降低了LE对SWC变化的敏感性,这与Giambelluca et al. (2009)的研究结果一致。另外,从图4c和e也可以看出,北麓河站H和LE在VPD较大时随SWC的变化较快,主要是由于干燥的空气有利于土壤蒸发;而H和LE随SWC的变化受 R_n 的影响较小,与EF的情况一致(图4a)。

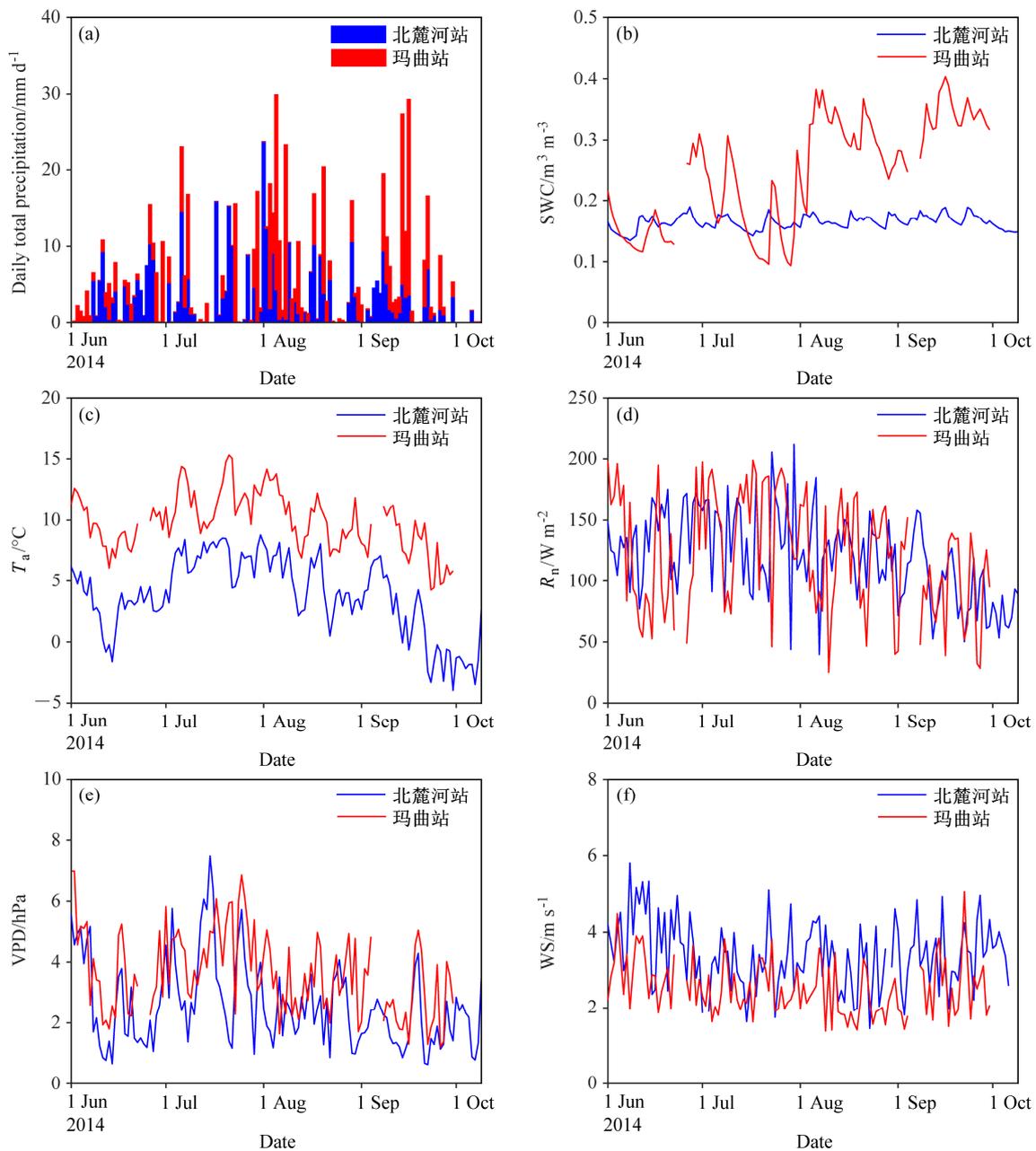


图3 北麓河站和玛曲站2014年生长季日累计降水量以及日平均土壤含水量(SWC)、气温(T_a)、净辐射(R_n)、水汽压差(VPD)和风速(WS)的变化

Fig. 3 Variations of daily accumulative precipitation and daily means of soil water content (SWC), air temperature (T_a), net radiation (R_n), vapor pressure deficit (VPD), and wind speed (WS) at Beiluhe site and Maqu site in the growing season of 2014

4.3 潜热占比对水汽压差的响应

图5a、b给出了两站生长季EF在不同的SWC和 R_n 组合条件下随VPD的变化。可以看出，北麓河站EF随VPD的变化趋势受SWC的影响非常明显。其中，当SWC偏低时，EF随VPD的增大先减小，后趋于不变；当SWC中等时，EF虽仍随VPD的增大而减小，但是其减小速率明显小于在

SWC偏低时；当SWC偏高时，EF随VPD的增大略呈增大趋势，然后趋于不变。北麓河站EF随VPD的变化趋势受 R_n 的影响较小。玛曲站EF在所有的SWC和 R_n 组合条件下均随VPD的增大呈缓慢增长的趋势，并趋于稳定，受SWC和 R_n 的影响较小。

图5c-f给出了两站生长季H和LE在不同的SWC和 R_n 组合条件下随VPD的变化。可以看出，

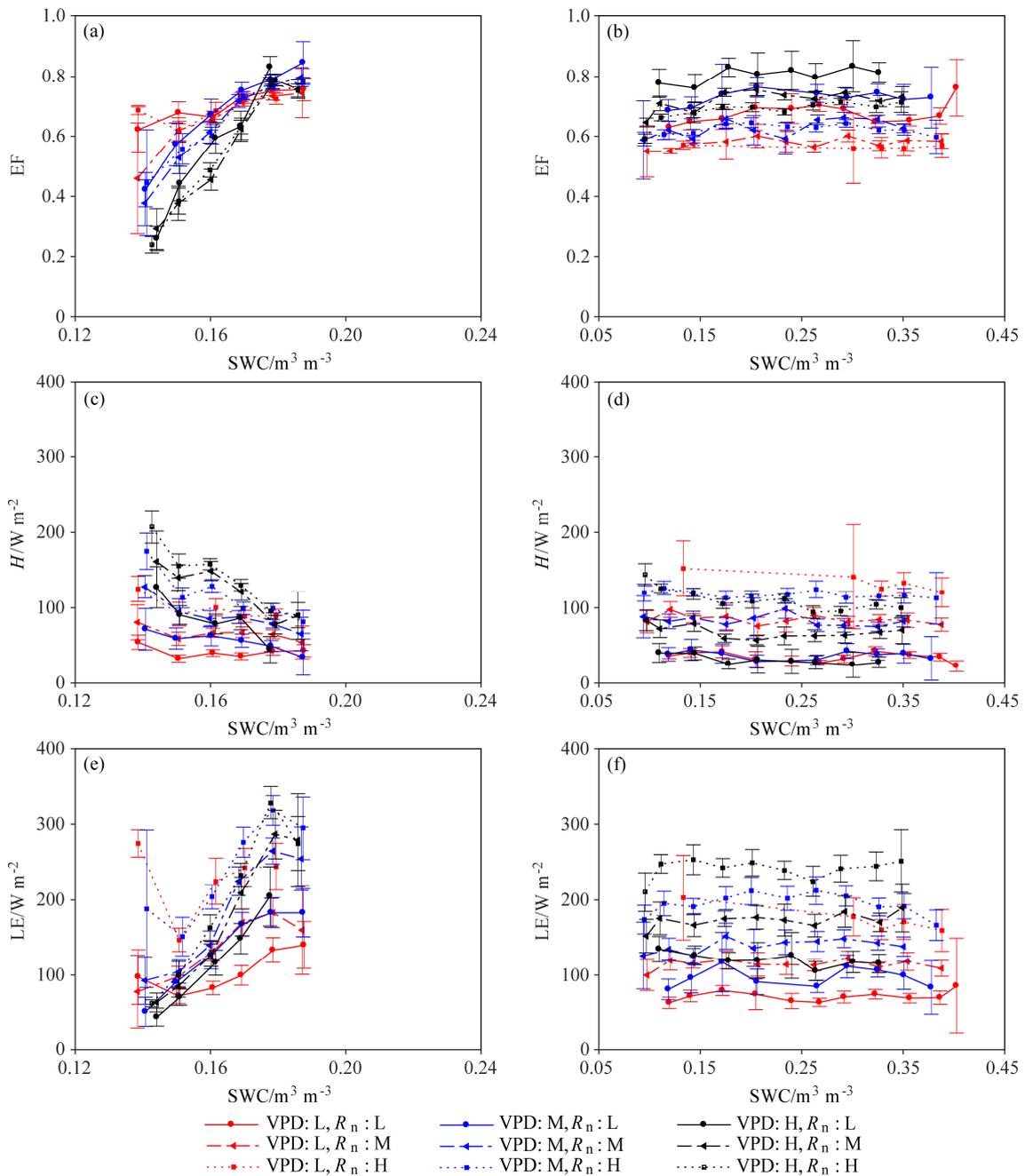


图4 (a, c, e) 北麓河站和 (b, d, f) 玛曲站生长季 (a, b) 潜热占比 (EF)、(c, d) 感热通量 (H) 和 (e, f) 潜热通量 (LE) 在不同的 VPD 和 R_n 组合条件下随 SWC 的变化。EF、感热通量 (H) 和潜热通量 (LE) 为 SWC 间隔 $0.01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (北麓河站) 和 $0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (玛曲站) 的平均值。误差线表示 95% 的置信区间

Fig. 4 Variations of (a, b) evaporative fraction (EF), (c, d) H , and (e, f) LE with SWC under different combined conditions of VPD and R_n in the growing season at (a, c, e) Beiluhe site and (b, d, f) Maqu site. EF, sensible heat flux (H), and latent heat flux (LE) data were averaged using SWC bins of $0.01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ for Beiluhe site and $0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ for Maqu site. Error bars indicate the 95% confidence interval

北麓河站 LE 在不同的 SWC 条件下随 VPD 的变化趋势不同, 在 SWC 偏高时, LE 随 VPD 的增大先增大, 后趋于稳定, 这时主要是由于受 SWC 的抑制; 在 SWC 中等时, LE 仍然随 VPD 的增大而增大, 但是很快达到稳定状态; 当 SWC 偏低时, 北

麓河站 LE 不再随 VPD 的增大而增大。北麓河站 H 在所有的 SWC 和 R_n 组合条件下均随 VPD 的增大而增大, 这可能与地表温度的升高有关。可以注意到, 北麓河站 H 随 VPD 变化的速率随着 SWC 的增大而略有减小, 主要是由于 SWC 越大, 土壤蒸发

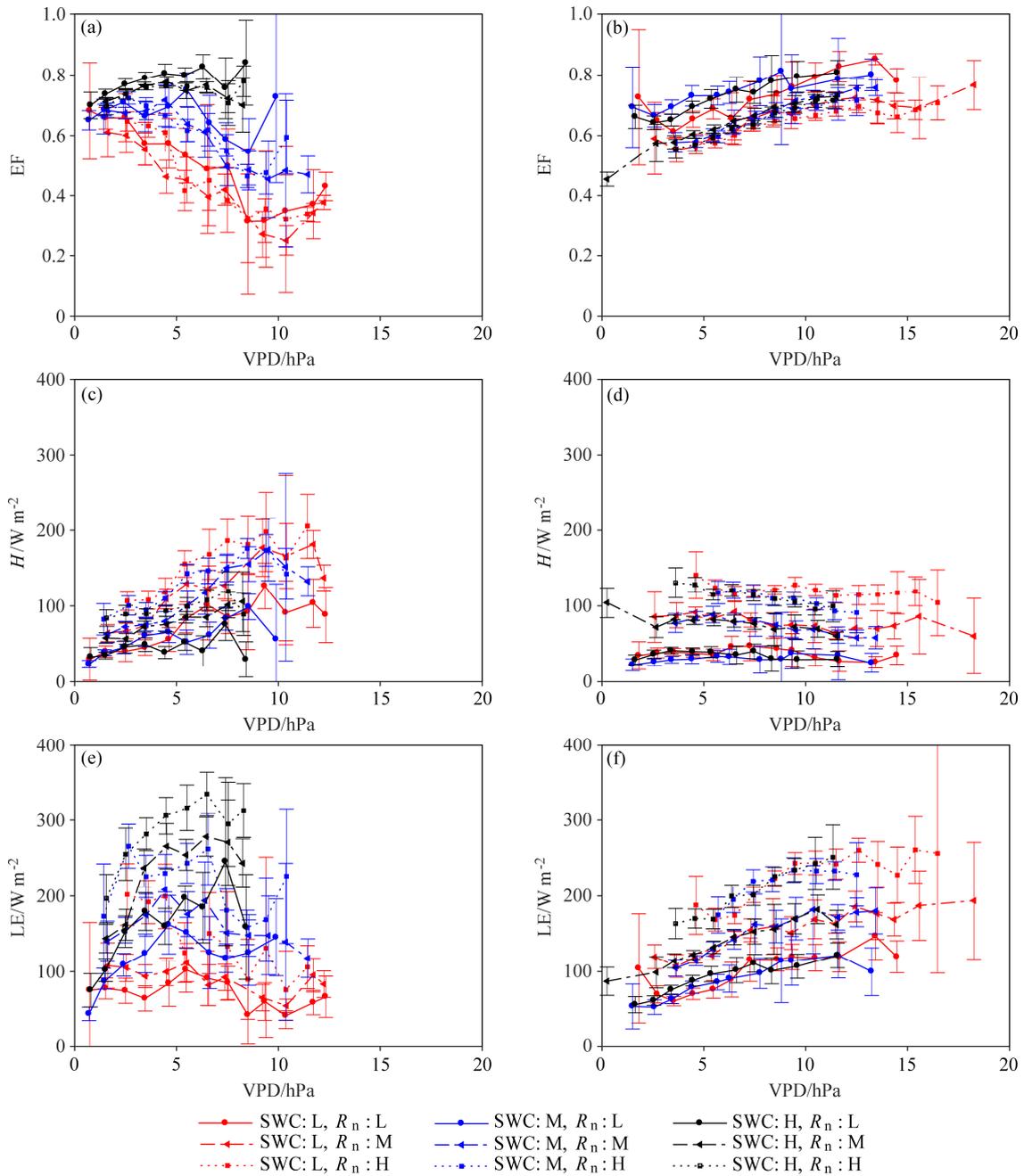


图5 (a, c, e) 北麓河站和 (b, d, f) 玛曲站生长季 (a, b) EF、(c, d) H 和 (e, f) LE 在不同的 SWC 和 R_n 组合条件下随 VPD 的变化。EF、 H 和 LE 为 VPD 间隔 1hPa 的平均值。误差线表示 95% 的置信区间

Fig. 5 Variations of (a, b) EF, (c, d) H , and (e, f) LE with VPD under different combined conditions of SWC and R_n in the growing season at (a, c, e) Beiluhe site and (b, d, f) Maqu site. EF, H , and LE data were averaged using VPD bins of 1hPa for both sites. Error bars indicate the 95% confidence interval

带走的地表热量越多，从而抑制了地表温度和 H 的增大。北麓河站 H 和 LE 随 VPD 的变化受 R_n 的间接影响较小。不同于北麓河站，玛曲站 LE 在所有的 SWC 和 R_n 条件下均随 VPD 的增大呈缓慢增长的趋势，然后趋于稳定，这主要是由于 VPD

的增大使植物叶面气孔导度增大，有利于水分通过叶面气孔，从而使植物蒸腾作用加强 (Ball et al., 1987; Leuning, 1995)。但是另一方面，植物也会根据 VPD 的大小调节叶面气孔的闭合度，尤其是当 VPD 较大时，植物通过关闭叶面气孔降低蒸腾

作用 (Ball et al., 1987; Leuning, 1995)。因此, 玛曲站 LE 不会随 VPD 的增大而一直增长, 这与 Gu et al. (2006) 的研究结果一致。受植物生理过程的调节, 玛曲站 LE 随 VPD 的变化趋势受 SWC 和 R_n 的影响较小。玛曲站 H 随 VPD 的增大略有减小的趋势, 这同样与地表蒸散发增加造成的地表冷却有关。

4.4 潜热占比对净辐射的响应

图 6a、b 给出了两站生长季 EF 在不同的 SWC 和 VPD 组合条件下随 R_n 的变化。可以看出, 在 R_n 较小时, 玛曲站 EF 随 R_n 的增大有明显的下降趋势, 而北麓河站 EF 随 R_n 的变化趋势不明显; 在 R_n 较大时, 两站 EF 均随 R_n 的增大趋于稳定。 R_n 是 H 和 LE 的唯一来源, R_n 的变化必然引起 H 和 LE 的变

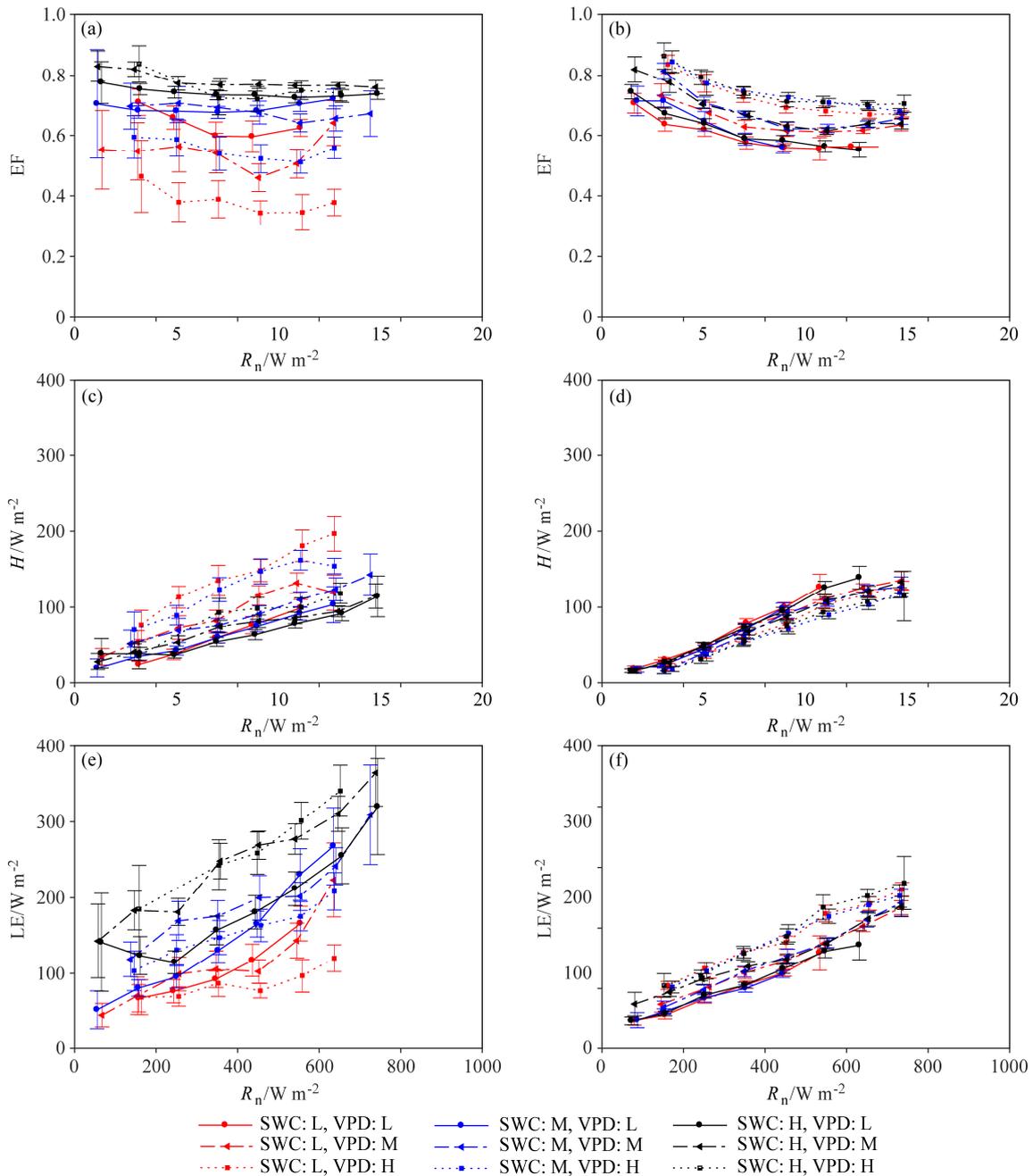


图 6 (a, c, e) 北麓河站和 (b, d, f) 玛曲站生长季 (a, b) EF、(c, d) H 和 (e, f) LE 在不同的 SWC 和 VPD 组合条件下随 R_n 的变化。EF、 H 和 LE 为 R_n 间隔 $100 W m^{-2}$ 的平均值。误差线表示 95% 的置信区间

Fig. 6 Variations of (a, b) EF, (c, d) H , and (e, f) LE with R_n at different combined conditions of SWC and VPD in the growing season at (a, c, e) Beiluhe site and (b, d, f) Maqu site. EF, H , and LE data were averaged using R_n bins of $100 W m^{-2}$ for both sites. Error bars indicate the 95% confidence interval

化。从公式 (1) 可以看出, 当 ΔH 和 ΔLE (ΔH 和 ΔLE 分别是 H 和 LE 的变化量) 的分配与 H 和 LE 的分配不相等时, 会导致 EF 变化, 这种情况在 R_n 较低时很容易发生。但是另一方面, H 和 LE 的变化又受 SWC 和 VPD 等气候因子的控制, 因此随着 R_n 的增大, EF 将调整到 SWC 和 VPD 决定的平衡状态。对北麓河站来说, 同一 SWC 条件下 (SWC 偏大时除外), VPD 越小, EF 越大; 同一 VPD 条件下时, SWC 越大, EF 越大; 对玛曲站来说, VPD 越大, EF 越大, 与 4.2 和 4.3 节的结论是一致的。

图 6c-f 给出了两站生长季 H 和 LE 在不同的 SWC 和 VPD 组合条件下随 R_n 的变化。可以看出, 两站的 H 和 LE 在不同的 SWC 和 VPD 条件下均随 R_n 的增大而增大。 SWC 对北麓河站 LE 随 R_n 变化趋势的影响较明显, 尤其是在 SWC 偏低时, LE 随 R_n 的增大趋势明显减弱。玛曲站 SWC 和 VPD 对 H 和 LE 随 R_n 变化趋势的影响较小。

4.5 路径分析

为了探究影响两站 EF 的关键气候因子, 图 7 给出了两站生长季气候因子对地表能量分配影响的路径图。路径系数经过了标准化处理, 因此可以用来直接比较不同气候因子对 EF 影响的相对大小。在路径分析过程中, 除了 SWC 、 VPD 和 R_n 外, 我们还考虑了 T_a 和 WS , 这一方面是由于路径

分析对不同气候因子之间的独立性没有要求, 另一方面也可以帮助我们检验 4.2~4.4 节分析结果的合理性。从图 7 可以看出, 北麓河站 VPD 和 SWC 对 EF 的直接影响较大, 路径系数分别为 -0.57 和 0.50 ; T_a 、 WS 和 R_n 对 EF 的直接影响较小, 路径系数分别为 0.29 , 0.03 和 -0.02 。考虑到间接效应, 北麓河站 SWC 增大使 VPD 减小 (路径系数为 -0.23), 进一步导致 EF 增大; T_a 升高使 VPD 增大 (路径系数为 0.73), 反而引起 EF 减小。北麓河站 SWC 和 T_a 对 EF 的累计效应分别为 0.63 和 -0.13 。玛曲站 T_a 和 R_n 对 EF 的直接效应较大, 路径系数分别为 0.54 和 -0.53 ; VPD 、 WS 和 SWC 对 EF 的直接影响较小, 路径系数分别为 0.28 , 0.21 和 0.19 。同样考虑到间接效应, SWC 对 VPD 的影响非常小 (路径系数仅为 0.03), 而气温对 VPD 的正效应比北麓河站更大。玛曲站 SWC 和 T_a 对 EF 的累计效应分别为 0.20 和 0.78 。玛曲站虽然 R_n 对 EF 的直接负效应较大, 但是 R_n 通过 T_a 对 EF 的间接正效应同样明显, R_n 对 EF 累计效应仅为 -0.19 。从路径分析的结果可以看出, 北麓河站 SWC 对 EF 的影响最大, 降水可能是影响该地区生长季地表能量分配的关键气候因子; 玛曲站 T_a 对 EF 的影响最大, 气温可能是影响该地区生长季地表能量分配的关键气候因子。

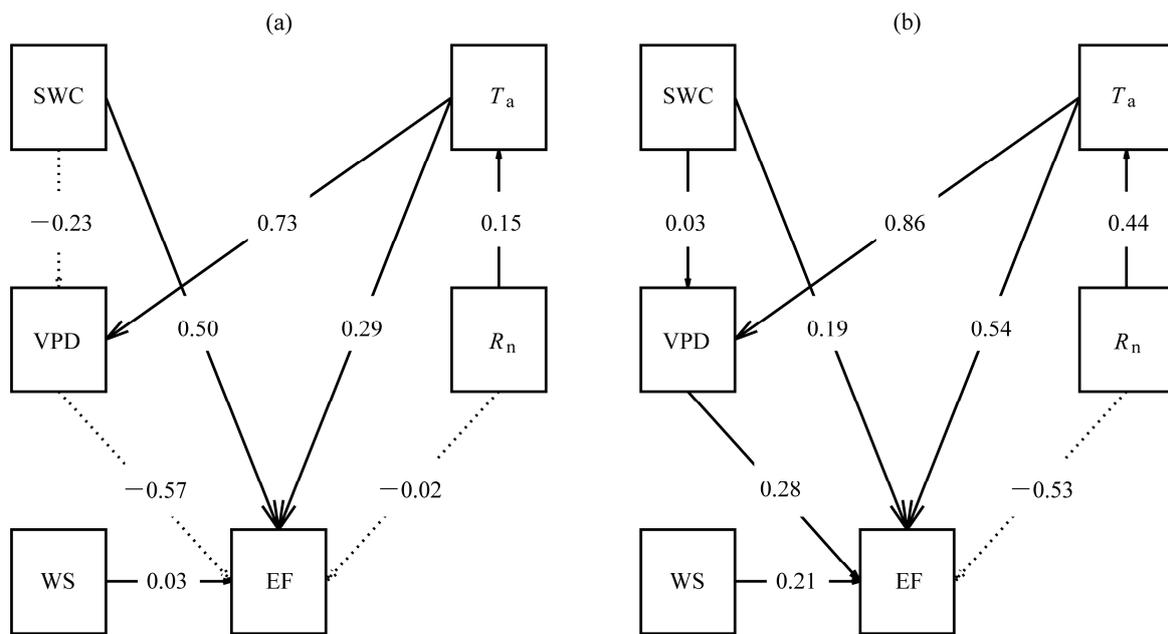


图 7 (a) 北麓河站和 (b) 玛曲站生长季气候因子对地表能量分配影响的路径图。实线箭头表示正效应, 点线箭头表示负效应
Fig. 7 Path diagrams illustrating the effects of climatic factors on surface energy partitioning at (a) Beiluhe site and (b) Maqu site in the growing season. Solid and dashed lines denote positive and negative effects, respectively

5 结论

通过对比和分析北麓河站和玛曲站生长季两类不同下垫面的地表能量分配对气候因子的响应,得到以下主要结论:

(1) 北麓河站 EF 随 SWC 的增大而增大,其增长速率在 VPD 较大时偏大,受 R_n 的影响较小。玛曲站 EF 随 SWC 的增大基本不变,其变化趋势受 VPD 和 R_n 的影响较小。

(2) 北麓河站 EF 随 VPD 的增大先减小后趋于不变,并且随着 SWC 增大时,EF 对 VPD 变化的敏感性下降。玛曲站 EF 随 VPD 的增大先增大后趋于不变,受 SWC 的影响较小。两站 EF 随 VPD 的变化趋势受 R_n 的影响均较小。

(3) 在 R_n 较小时,玛曲站 EF 随 R_n 的增大有明显的下降趋势,而北麓河站 EF 随 R_n 的变化趋势不明显;在 R_n 较大时,两站 EF 均随 R_n 的增大趋于 SWC 和 VPD 决定的稳定状态。

(4) 路径分析结果显示,SWC 和 T_a 分别是影响北麓河站和玛曲站 EF 的主要气候因子。

受观测资料的制约,我们仅对两个站点的观测数据进行了分析。然而高原地域广袤,不同地区海拔、气候和环境差异较大,因此本文的结论是否能够代表整个高原相似下垫面的情况有待于进一步验证。在今后的研究中,我们将使用卫星遥感资料和再分析资料等其它资料,由点及面,进一步研究高原陆—气能量和水分交换对气候变化的响应机理。

致谢 感谢中国科学院西北生态环境资源研究院若尔盖高原湿地生态系统研究站提供的玛曲站观测数据。感谢中国科学院西北生态环境资源研究院彭飞博士提供的北麓河站降水资料。感谢两位审稿人极有价值和建设性的问题和建议。

参考文献 (References)

Ball J T, Woodrow I E, Berry J A. 1987. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions [M]// Biggins J. Progress in Photosynthesis Research. Netherlands: Springer, 221–224, doi:10.1007/978-94-017-0519-6_48.

Berg A, Findell K, Lintner B R, et al. 2013. Precipitation sensitivity to surface heat fluxes over North America in reanalysis and model data [J]. J. Hydrometeorol., 14 (3): 722–743, doi:10.1175/JHM-D-12-0111.1.

Betts A K. 2007. Coupling of water vapor convergence, clouds, precipitation, and land-surface processes [J]. J. Geophys. Res., 112 (D10): D10108,

doi:10.1029/2006JD008191.

Betts A K, Ball J H, Beljaars A C M, et al. 1996. The land surface-atmosphere interaction: A review based on observational and global modeling perspectives [J]. J. Geophys. Res., 101 (D3): 7209–7225, doi:10.1029/95JD02135.

Bucci S J, Scholz F G, Goldstein G, et al. 2008. Controls on stand transpiration and soil water utilization along a tree density gradient in a Neotropical savanna [J]. Agric. Forest Meteorol., 148 (6–7): 839–849, doi:10.1016/j.agrformet.2007.11.013.

陈渤黎. 2013. 青藏高原土壤冻融过程陆面能水特征及区域气候效应研究 [D]. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所硕士学位论文. Chen Boli. 2013. A study of land surface energy and water in soil freezing and thawing process and impact on regional climate of the Qinghai-Tibet Plateau [D]. M. S. thesis (in Chinese), Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences.

Eltahir E A B. 1998. A soil moisture-rainfall feedback mechanism: 1. Theory and observations [J]. Water Resour. Res., 34 (4): 765–776, doi:10.1029/97WR03499.

Findell K L, Eltahir E A B. 2003. Atmospheric controls on soil moisture-boundary layer interactions. Part I: Framework development [J]. J. Hydrometeorol., 4 (3): 552–569, doi:10.1175/1525-7541(2003)004<0552:ACOSML>2.0.CO;2.

葛骏, 余晔, 李振朝, 等. 2016. 青藏高原多年冻土区土壤冻融过程对地表能量通量的影响研究 [J]. 高原气象, 35 (3): 608–620. Ge Jun, Yu Ye, Li Zhenchao, et al. 2016. Impacts of freeze/thaw processes on land surface energy fluxes in the permafrost region of Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorol. (in Chinese), 35 (3): 608–620, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00032.

Giambelluca T W, Scholz F G, Bucci S J, et al. 2009. Evapotranspiration and energy balance of Brazilian savannas with contrasting tree density [J]. Agric. Forest Meteorol., 149 (8): 1365–1376, doi:10.1016/j.agrformet.2009.03.006.

Gu L H, Meyers T, Pallardy S G, et al. 2006. Direct and indirect effects of atmospheric conditions and soil moisture on surface energy partitioning revealed by a prolonged drought at a temperate forest site [J]. J. Geophys. Res., 111 (D16): D16102, doi:10.1029/2006JD007161.

Gu L L, Yao J M, Hu Z Y, et al. 2015. Comparison of the surface energy budget between regions of seasonally frozen ground and permafrost on the Tibetan Plateau [J]. Atmos. Res., 153: 553–564, doi:10.1016/j.atmosres.2014.10.012.

Gu S, Tang Y H, Cui X Y, et al. 2005. Energy exchange between the atmosphere and a meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Agric. Forest Meteorol., 129 (3–4): 175–185, doi:10.1016/j.agrformet.2004.12.002.

Guo D L, Yang M X, Wang H J. 2011a. Sensible and latent heat flux response to diurnal variation in soil surface temperature and moisture under different freeze/thaw soil conditions in the seasonal frozen soil region of the central Tibetan Plateau [J]. Environ. Earth Sci., 63 (1): 97–107, doi:10.1007/s12665-010-0672-6.

Guo D L, Yang M X, Wang H J. 2011b. Characteristics of land surface heat and water exchange under different soil freeze/thaw conditions over the

- central Tibetan Plateau [J]. *Hydrol. Process.*, 25 (16): 2531–2541, doi:10.1002/hyp.8025.
- Guo Z C, Dirmeyer P A, Koster R D, et al. 2006. GLACE: The global land-atmosphere coupling experiment. Part II: Analysis [J]. *J. Hydrometeorol.*, 7 (4): 611–625, doi:10.1175/JHM511.1.
- Guo Z C, Dirmeyer P A, DelSole T. 2011c. Land surface impacts on subseasonal and seasonal predictability [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 38 (24): L24812, doi:10.1029/2011GL049945.
- Huxman T E, Turnipseed A A, Sparks J P, et al. 2003. Temperature as a control over ecosystem CO₂ fluxes in a high-elevation, subalpine forest [J]. *Oecologia*, 134 (4): 537–546, doi:10.1007/s00442-002-1131-1.
- Kaimal J C, Finnigan J J. 1994. *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement* [M]. New York: Oxford University Press.
- Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z C, et al. 2004. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation [J]. *Science*, 305 (5687): 1138–1140, doi:10.1126/science.1100217.
- Koster R D, Sud Y C, Guo Z C, et al. 2006. GLACE: The global land-atmosphere coupling experiment. Part I: Overview [J]. *J. Hydrometeorol.*, 7 (4): 590–610, doi:10.1175/JHM510.1.
- Koster R D, Schubert S D, Suarez M J. 2009. Analyzing the concurrence of meteorological droughts and warm periods, with implications for the determination of evaporative regime [J]. *J. Climate*, 22 (12): 3331–3341, doi:10.1175/2008JCLI2718.1.
- Leuning R. 1995. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C₃ plants [J]. *Plant Cell Environ.*, 18 (4): 339–355. doi:10.1111/j.1365-3040.1995.tb00370.x.
- Li M S, Babel W, Chen X L, et al. 2015. A 3-year dataset of sensible and latent heat fluxes from the Tibetan Plateau, derived using eddy covariance measurements [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 122 (3–4): 457–469, doi:10.1007/s00704-014-1302-0.
- Ma Y, Fan S, Ishikawa H, et al. 2005. Diurnal and inter-monthly variation of land surface heat fluxes over the central Tibetan Plateau area [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 80 (2–4): 259–273, doi:10.1007/s00704-004-0104-1.
- Ma Y M, Su Z B, Koike T, et al. 2003. On measuring and remote sensing surface energy partitioning over the Tibetan Plateau—From GAME/Tibet to CAMP/Tibet [J]. *Phys. Chem. Earth*, 28 (1–3): 63–74, doi:10.1016/S1474-7065(03)00008-1.
- 马耀明, 姚檀栋, 王介民. 2006. 青藏高原能量和水循环试验研究——GAME/Tibet 与 CAMP/Tibet 研究进展 [J]. *高原气象*, 25 (2): 344–351.
- Ma Yaoming, Yao Tandong, Wang Jiemin. 2006. Experimental study of energy and water cycle in Tibetan Plateau—The progress introduction on the study of GAME/Tibet and CAMP/Tibet [J]. *Plateau Meteor. (in Chinese)*, 25 (2): 344–351, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.02.023.
- Ma Y M, Song M H, Ishikawa H, et al. 2007. Estimation of the regional evaporative fraction over the Tibetan Plateau area by using Landsat-7 ETM data and the field observations [J]. *J. Meteor. Soc. Jpn. Ser. II*, 85A: 295–309, doi:10.2151/jmsj.85A.295.
- Mauder M, Foken T. 2006. Impact of post-field data processing on eddy covariance flux estimates and energy balance closure [J]. *Meteor. Z.*, 15 (6): 597–609, doi:10.1127/0941-2948/2006/0167.
- Moore C J. 1986. Frequency response corrections for eddy correlation systems [J]. *Bound.-Layer Meteorol.*, 37 (1–2): 17–35, doi:10.1007/BF00122754.
- Myoung B, Choi Y S, Choi S J, et al. 2012. Impact of vegetation on land-atmosphere coupling strength and its implication for desertification mitigation over East Asia [J]. *J. Geophys. Res.*, 117 (D12): D12113, doi:10.1029/2011JD017143.
- Nishida K, Nemani R R, Running S W, et al. 2003. An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D9): 4270, doi:10.1029/2002JD002062.
- Peng F, You Q G, Xue X, et al. 2015. Evapotranspiration and its source components change under experimental warming in alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Ecol. Eng.*, 84: 653–659, doi:10.1016/j.ecoleng.2015.09.069.
- Pielke R A. 2001. Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall [J]. *Rev. Geophys.*, 39 (2): 151–177, doi:10.1029/1999RG000072.
- Schär C, Lüthi D, Beyerle U, et al. 1999. The soil-precipitation feedback: A process study with a regional climate model [J]. *J. Climate*, 12 (3): 722–741, doi:10.1175/1520-0442(1999)012<0722:TSPFAP>2.0.CO;2.
- Schotanus P, Nieuwstadt F T M, De Bruin H A R. 1983. Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes [J]. *Bound.-Layer Meteorol.*, 26 (1): 81–93, doi:10.1007/BF00164332.
- Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, et al. 1996. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMS. Part I: Model formulation [J]. *J. Climate*, 9 (4): 676–705, doi:10.1175/1520-0442(1996)009<0676:ARLSPF>2.0.CO;2.
- Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. 2010. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review [J]. *Earth-Sci. Rev.*, 99 (3–4): 125–161, doi:10.1016/j.earscirev.2010.02.004.
- Shang L Y, Zhang Y, Lü S H, et al. 2015. Energy exchange of an alpine grassland on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Sci. Bull.*, 60 (4): 435–446, doi:10.1007/s11434-014-0685-8.
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2003. *大气物理学* [M]. 北京: 北京大学出版社. Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2003. *Atmospheric Physics (in Chinese)* [M]. Beijing: Peking University Press.
- Shukla J, Mintz Y. 1982. Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate [J]. *Science*, 215 (4539): 1498–1501, doi:10.1126/science.215.4539.1498.
- Shuttleworth W J, Gurney R J, Hsu A Y, et al. 1989. FIFE: The variation in energy partition at surface flux sites [M]// Rango A, Ed. *Remote Sensing and Large-Scale Processes*. Proceedings of the IAHS third international Assembly, Baltimore, MD, May, 1989. IAHS Publication, vol. 186., 67–74.
- Stull R B. 1988. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology* [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- 孙淑芬. 2005. 陆面过程的物理、生化机理和参数化模型 [M]. 北京: 气象出版社. Sun Shufen. 2005. *Parameterization Study of the Physical and Biochemical Mechanism in Land Surface Processes (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- Tanaka K, Ishikawa H, Hayashi T, et al. 2001. Surface energy budget at Amdo on the Tibetan Plateau using GAME/Tibet IOP98 data [J]. *J. Meteor. Soc. Jpn. Ser. II*, 79 (1B): 505–517, doi:10.2151/jmsj.79.505.

- Tanaka K, Tamagawa I, Ishikawa H, et al. 2003. Surface energy budget and closure of the eastern Tibetan Plateau during the GAME-Tibet IOP 1998 [J]. *J. Hydrol.*, 283 (1–4): 169–183, doi:10.1016/S0022-1694(03)00243-9.
- Tanaka N, Kume T, Yoshifuji N, et al. 2008. A review of evapotranspiration estimates from tropical forests in Thailand and adjacent regions [J]. *Agric. Forest Meteorol.*, 148 (5): 807–819, doi:10.1016/j.agrformet.2008.01.011.
- Teuling A J, Seneviratne S I, Stöckli R, et al. 2010. Contrasting response of European forest and grassland energy exchange to heatwaves [J]. *Nat. Geosci.*, 3 (10): 722–727, doi:10.1038/NGEO950.
- Trenberth K E, Fasullo J T, Kiehl J. 2009. Earth's global energy budget [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90 (3): 311–323, doi:10.1175/2008BAMS2634.1.
- 王澄海, 师锐. 2007. 青藏高原西部陆面过程特征的模拟分析 [J]. *冰川冻土*, 29 (1): 73–81. Wang Chenghai, Shi Rui. 2007. Simulation of the land surface processes in the western Tibetan Plateau in summer [J]. *J. Glaciol. Geocryol.* (in Chinese), 29 (1): 73–81, doi:10.3969/j.issn.1000-0240.2007.01.012.
- 王澄海, 师锐, 左洪超. 2008. 青藏高原西部冻融期陆面过程的模拟分析 [J]. *高原气象*, 27 (2): 239–248. Wang Chenghai, Shi Rui, Zuo Hongchao. 2008. Analysis on simulation of characteristic of land surface in western Qinghai-Xizang Plateau during frozen and thawing [J]. *Plateau Meteorol.* (in Chinese), 27 (2): 239–248.
- 王介民. 1999. 陆面过程实验和地气相互作用研究——从 HEIFE 到 IMGRASS 和 GAME-Tibet/TIPEX [J]. *高原气象*, 18 (3): 280–294. Wang Jiemin. 1999. Land surface process experiments and interaction study in China—From HEIFE to IMGRASS and GAME-TIBET/TIPEX [J]. *Plateau Meteorol.* (in Chinese), 18 (3): 280–294, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.1999.03.005.
- Wang K C, Li Z Q, Cribb M. 2006. Estimation of evaporative fraction from a combination of day and night land surface temperatures and NDVI: A new method to determine the Priestley-Taylor parameter [J]. *Remote Sens. Environ.*, 102 (3–4): 293–305, doi:10.1016/j.rse.2006.02.007.
- Wang K C, Wang P C, Li Z Q, et al. 2007. A simple method to estimate actual evapotranspiration from a combination of net radiation, vegetation index, and temperature [J]. *J. Geophys. Res.*, 112 (D15): D15107, doi:10.1029/2006JD008351.
- Wang K C, Liang S L. 2008. An improved method for estimating global evapotranspiration based on satellite determination of surface net radiation, vegetation index, temperature, and soil moisture [J]. *J. Hydrometeorol.*, 9 (4): 712–727, doi:10.1175/2007JHM911.1.
- Wang K C, Dickinson R E. 2012. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability [J]. *Rev. Geophys.*, 50 (2): RG2005, doi:10.1029/2011RG000373.
- 王少影, 张宇, 吕世华, 等. 2012. 玛曲高寒草甸地表辐射与能量收支的季节变化 [J]. *高原气象*, 31 (3): 605–614. Wang S Y, Zhang Y, Lü S H, et al. 2012. Seasonal variation characteristics of radiation and energy budgets in alpine meadow ecosystem in Maqu grassland [J]. *Plateau Meteorol.* (in Chinese), 31 (3): 605–614.
- Wang S Y, Zhang Y, Lü S H, et al. 2016. Biophysical regulation of carbon fluxes over an alpine meadow ecosystem in the eastern Tibetan Plateau [J]. *Int. J. Biometeorol.*, 60 (6): 801–812, doi:10.1007/s00484-015-1074-y.
- Webb E K, Pearman G I, Leuning R. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 106 (447): 85–100, doi:10.1002/qj.49710644707.
- 徐自为, 刘绍民, 徐同仁, 等. 2013. 不同土壤热通量测算方法的比较及其对地表能量平衡闭合影响的研究 [J]. *地球科学进展*, 28 (8): 875–889. Xu Ziwei, Liu Shaomin, Xu Tongren, et al. 2013. The observation and calculation method of soil heat flux and its impact on the energy balance closure [J]. *Adv. Earth Sci.* (in Chinese), 28 (8): 875–889, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2013.08.0875.
- Yang K, Chen Y Y, Qin J. 2009. Some practical notes on the land surface modeling in the Tibetan Plateau [J]. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13 (5): 687–701.
- 尤全刚, 薛娴, 彭飞, 等. 2015. 高寒草甸草地退化对土壤水热性质的影响及其环境效应 [J]. *中国沙漠*, 35 (5): 1183–1192. You Quan'gang, Xue Xian, Peng Fei, et al. 2015. Alpine meadow degradation effect on soil thermal and hydraulic properties and its environmental impacts [J]. *J. Desert Res.* (in Chinese), 35 (5): 1183–1192, doi:10.7522/j.issn.1000-694X.2015.00088.
- Zhou C L, Wang K C. 2016. Biological and environmental controls on evaporative fractions at AmeriFlux sites [J]. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 55 (1): 145–161, doi:10.1175/JAMC-D-15-0126.1.