

杨丽薇, 高晓清, 惠小英, 等. 2017. 青藏高原中部聂荣半干旱草地夏季近地层能量平衡与输送分析 [J]. 气候与环境研究, 22 (3): 335-345. Yang Liwei, Gao Xiaoqing, Hui Xiaoying, et al. 2017. A study on energy balance and transfer in the surface layer over semi-arid grassland of Nyainrong area in central Tibetan Plateau in summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (3): 335-345, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16136.

青藏高原中部聂荣半干旱草地夏季近地层 能量平衡与输送分析

杨丽薇¹ 高晓清¹ 惠小英¹ 周亚^{1,2} 侯旭宏¹

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 730030

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 利用青藏高原中部聂荣地区草地下垫面 2014 年 7~8 月近地层气象要素梯度观测及湍流观测数据, 分析讨论了该地区观测期间的基本气象要素特征、能量平衡特征以及能量输送特征, 主要结论如下: (1) 向下、向上短波辐射和净辐射日变化规律一致, 向下、向上长波辐射日变化平缓。反照率呈“U”型分布, 早晚大, 中午小, 聂荣夏季地表平均反照率为 0.20。(2) 在夏季白天, 聂荣地区净辐射大部分以潜热的形式加热大气。考虑了土壤浅层热储存和垂直运动引起的平流输送后, 能量闭合率由 0.65 提高到 0.80, 闭合率有显著的提高。(3) 在不稳定层结下, 动量总体输送系数 C_D 平均值为 4.7×10^{-3} 和热量总体输送系数 C_H 平均值为 3.5×10^{-3} ; 在稳定层结下, C_D 平均值为 3.4×10^{-3} , C_H 平均值为 1.8×10^{-3} ; C_D 和 C_H 在近中性层结下的平均值分别为 4.30×10^{-3} 和 2.39×10^{-3} 。

关键词 青藏高原 半干旱草地 能量平衡 总体输送系数

文章编号 1006-9585 (2017) 03-0335-11

中图分类号 P422.4

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16136

A Study on Energy Balance and Transfer in the Surface Layer over Semi-Arid Grassland of Nyainrong Area in Central Tibetan Plateau in Summer

YANG Liwei¹, GAO Xiaoqing¹, HUI Xiaoying¹, ZHOU Ya^{1,2}, and HOU Xuhong¹

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 730030

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstracts Based on gradient and turbulence data observed in the near surface layer over semi-arid grassland of Nyainrong area in the central Tibetan Plateau from 18 July 2014 to 31 August 2014, characteristics of several basic meteorological elements and energy balance and transfer are analyzed. The main results are: (1) The downward and upward short-wave radiation and net radiation fluxes have a similar diurnal variation pattern, and the diurnal fluctuation of the downward and upward long-wave radiation fluxes are small. The surface albedo shows a "U" type distribution with large values in the morning and evening and small values in the noon. The mean surface albedo over Nyairong area in summer is 0.20. (2) The latent heat flux is obviously larger than the sensible heat flux, which indicates that the latent heat plays a dominate role in the heat transfer between the atmosphere and surface. The closure rate of surface energy balance

收稿日期 2016-07-18; 网络预出版日期 2017-01-04

作者简介 杨丽薇, 1989 年出生, 女, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为陆面过程与气候变化。E-mail: yanglw@lzb.ac.cn

通讯作者 高晓清, E-mail: xqgao@lzb.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 91437108, 科技部公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201406001

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 91437108), Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest of China (Grant GYHY201406001)

increases significantly from 0.65 to 0.80 after considering the heat storage in the shallow soil layer and heat advection caused by vertical movement. (3) The bulk transfer coefficients C_D and C_H for momentum and heat are 4.7×10^{-3} and 3.5×10^{-3} respectively under unstable stratification; their values are 3.4×10^{-3} and 1.8×10^{-3} under stable stratification, and 4.30×10^{-3} and 2.39×10^{-3} under near neutral stratified condition.

Keywords Tibetan Plateau, Semi-arid grassland, Energy balance, Bulk transfer coefficient

1 引言

陆面过程是气候系统各子系统相互作用的纽带,通过这个纽带,实现着各子系统间物质和能量交换。这种物质和能量交换是相伴发生的。地表的能量交换过程表现为地表辐射收支与热量收支,地表能量交换主要是通过近地层大气湍流活动实现地气间动量和热量交换(胡隐樵等,1990;马耀明等,1997,2000)。它在全球气候变化及大气环流调整中起着重要的作用(Dickinson,1995)。

青藏高原地形复杂多样,面积达 $250 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均海拔在 3500 m 以上,有地球“第三极”之称。青藏高原强大的动力、热力过程对我国和亚洲乃至全球的大气环流及天气气候有非常重要的影响(刘辉志和洪忠祥,2000;卞林根等,2001)。而这种影响是通过青藏高原近地层大气与下垫面相互作用,进而影响上层大气来实现的。因此研究青藏高原近地层能量平衡与输送特征,对揭示青藏高原地气相互作用过程和机理,深入理解高原及其周边气候环境变化有重要意义。国内外气象工作者已在这方面开展了大量的观测研究(Ma et al., 2002; Tanaka et al., 2003; Choi et al., 2004; Gao et al., 2007; Yue et al., 2014),最近几十年,在高原上进行了一系列气象观测试验,如 1979 年“第一次青藏高原气象试验”(QXPMEEX)、“第二次青藏高原大气科学试验”(TIPEX II)、“全球能量水循环亚洲季风青藏高原试验研究”(GAME/Tibet)、“全球协调加强观测计划之亚澳季风青藏高原试验”(CAMP/Tibet)、“第三次青藏高原大气科学试验”(TIPEX III)等,在高原的动力和热力作用方面取得了许多新的认识(汤懋苍等,1998; Bian et al., 2003; 李跃清等,2004; Ma et al., 2006; 常祎和郭学良,2016)。但由于青藏高原下垫面复杂,已有的观测站点较少且观测时间较短,对高原上不同地区不同下垫面近地层能量平衡与能量输送特征认识不足,为了更加全面的认识高原夏季地气相互作用的规律,对青藏高原不同地区不同性质下垫

面的能量平衡与输送特征进行观测分析非常重要。

那曲地区位于青藏高原腹地,地形分布复杂,植被类型丰富多样。那曲地区总面积达 $40 \times 10^4 \text{ km}^2$,地形西高东低,平均海拔 4500 m 以上,年平均气温由东南向西北急速递减,降水分布由东向西、由南向北递减,植被分布由东南到西北大体为山地森林—亚高山、高山灌木—高山草甸—高山草原—高寒半荒漠—高寒荒漠。聂荣位于那曲地区东北部,境内山峦起伏,沟壑纵横,低山丘陵与谷地错落相间,地表具有显著不均匀性,对气候变化响应敏感。

本文利用 2014 年 7~8 月在西藏那曲地区聂荣县半干旱草地下垫面获取的近地层梯度观测数据以及湍流观测数据,分析讨论了该地区夏季基本气象要素特征、能量平衡特征以及能量输送特征,并与高原其他站点的研究结果进行对比分析,以期为进一步认识青藏高原中部地—气相互作用物理过程及改进高原陆面过程参数和参数化方案提供依据。

2 研究区域、观测仪器和资料处理

2.1 观测场概况

本次观测试验在西藏那曲地区聂荣县城东侧平坦开阔草地上建有观测系统(下称聂荣站)。聂荣县地处西藏北部、唐古拉山南麓,面积 14540 km^2 ,与青海省交界。地势西北高东南低,境内山峦起伏,沟壑纵横,平均海拔在 4700 m 左右。属高原亚寒带半干旱季风气候区,没有绝对无霜期。全年雨雪日 100 d 左右,年均气温 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$,年均降水量为 400 mm 左右(毛飞等,2007)。聂荣站地处 ($32^\circ 07.332' \text{N}$, $92^\circ 18.273' \text{E}$) (图 1),海拔 4607 m,观测点周围地形开阔,地势较为平坦,下垫面生长有高寒针状草(7~8 月草高约 3 cm),能够代表聂荣地区的典型环境。

聂荣站观测场内安装了涡动、辐射、梯度观测以及土壤温湿度观测系统,其中涡动观测系由超声风速仪测定三维风速和超声虚温、红外气体分析仪测定 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 浓度,由数据采集器(传感器型号:

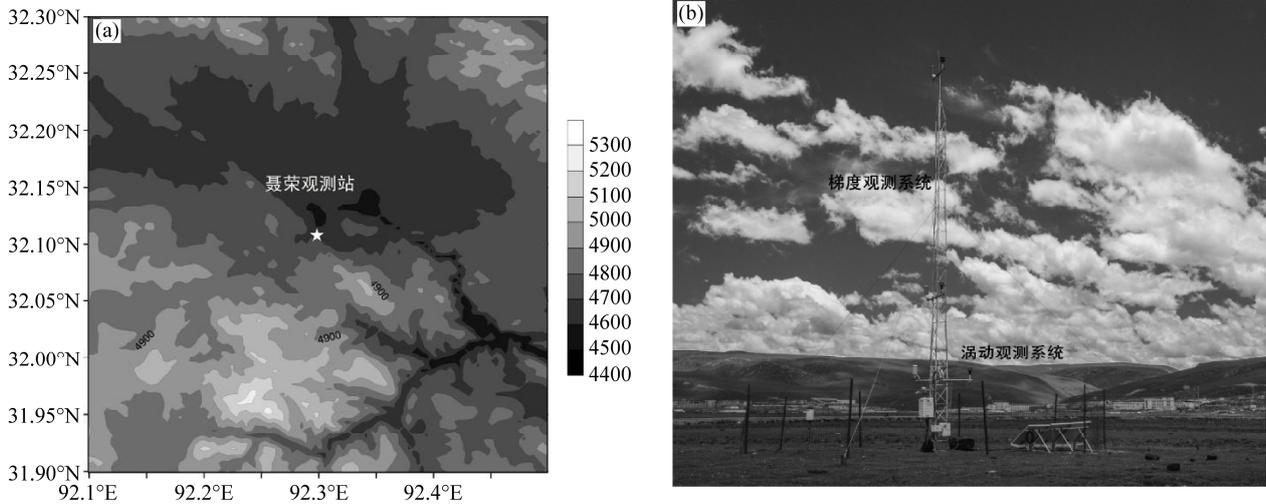


图1 聂荣观测站 (a) 周围地形和 (b) 观测仪器

Fig. 1 (a) The topography around the Nyainrong station and (b) observational instruments at Nyainrong station

表 1 观测项目及仪器概况

Table 1 Observation variables and measurement instruments at Nyainrong station

观测项目	传感器型号	厂家	观测高度/m	仪器精度
超声风速	CAST3	Campbell, USA	2	0.04 m s ⁻¹
水汽、CO ₂	LI-7500	LI-COR, USA	2	2%
3 层空气温度、湿度	HMP155A	Campbell, USA	2、4、10	2%
3 层风速、风向	Wind Sonic	Campbell, USA	2、4、10	±2% (风速), ±3° (风向)
四分量辐射	CNR4	Kipp&Zones, USA	1.5	1%
有效光合辐射	LI190SB	LI-COR, USA	1.5	1%
2 层土壤热通量	HFP01	Hukseflux, Netherlands	-0.05、-0.10	5%
5 层土壤湿度	CS616	Campbell, USA	-0.05、-0.10、-0.20、-0.50、-1	2.5%
5 层土壤温度	109	Campbell, USA	-0.05、-0.10、-0.20、-0.50、-1	0.1 °C
降雨量	52202	YOUNG, USA	1	2%

CR1000; 厂家: Campbell, USA) 记录储存, 采样频率 10 Hz。微气象观测包括 3 层风向风速、3 层空气温度和湿度、辐射四分量、5 层土壤温度、5 层土壤湿度、2 层土壤热通量和降水量。对应的观测仪器以及观测高度见表 1。

本研究选取 2014 年 7 月 18 日至 8 月 31 日期间的观测资料, 此时段为青藏高原夏季风最强盛的时期 (汤懋苍等, 1998)。对能量平衡特征的分析选取了观测期间的 5 个典型晴天, 其他资料分析均为 7 月 18 日至 8 月 31 日期间的观测数据。在数据处理过程中, 平均场观测数据采用 30 min 平均数据, 观测资料订正: 参考聂荣基本气象站的气候极值、观测仪器测量范围、系统故障记录等因素剔除不合理数据。湍流资料的每个样本采用 30 min 平均湍流量, 观测数据进行野点剔除、坐标旋转、

频率修正和空气密度效应修正 (即 WPL 修正) 等订正。数据质量控制包括: 湍流定常性检验和湍流发展充分性检验。数据时间均为北京时间。

2.2 资料处理

2.2.1 能量平衡及修正计算

在水平、均匀下垫面和大气定常条件下, 地表能量平衡方程通常表示为

$$R_{n0} = H_0 + \lambda_{E0} + G_0, \quad (1)$$

其中, R_{n0} 为地表净辐射, 可由 (2) 式计算得到, H_0 为地表感热通量, λ_{E0} 为地表潜热通量, G_0 为地表热通量。它们一般能够用近地层感热 (H_s)、潜热通量 (L_E) 和浅层土壤热通量 (G_{5cm}) 来代替。 R_{n0} 可由下式计算得到:

$$R_{n0} = (R_{sd} - R_{su}) + (R_{ld} - R_{lu}), \quad (2)$$

其中, R_{sd} 为地表向下短波辐射, R_{su} 为地表向上短

波辐射, R_{ld} 为地表向下长波辐射, R_{lu} 为地表向上长波辐射。

在实际情况下, 目前还无法实现对地表土壤热通量的直接观测, 本文利用 5 cm 处土壤热通量板的观测值 G , 补充 0~5 cm 的土壤热存储, 那么(1)式可改写为

$$R_{n0} = H_0 + \lambda_{E0} + G + S, \quad (3)$$

其中, S 即为 0~5 cm 的土壤热存储项。由下式计算(胡隐樵等, 1990):

$$S = \rho_s c_s \int_{z=5}^{z=0} \frac{\partial T}{\partial t} dz, \quad (4)$$

其中, $\rho_s c_s$ 为土壤体积热容, 取为 $1.18 \times 10^6 \text{ J (m}^3 \text{ K)}^{-1}$ (马伟强等, 2005); T 为近地层大气温度。(4)式经差分近似和离散处理后可写为

$$S = \frac{\rho_s c_s}{\Delta t} \sum_{z=5}^{z=0} [T(z_i, t + \Delta t) - T(z_i, t)] \Delta z, \quad (5)$$

其中, $T(z_i, t)$ 为 z 层土壤温度, 这里 z 取 0、5 cm。一般, 大气接近静力平衡, 可以不考虑垂直运动的作用, 但在复杂地形或非均匀下垫面下, 热力或地形强迫往往会引起局地环流或中小尺度运动, 产生量级较小但又十分关键的垂直运动。而在高原上近地层的温度梯度一般比较大, 垂直运动会输送一定热量, 形成垂直感热平流热通量(张强等, 2012)。因而考虑到近地层垂直感热平流输送后(3)式可改写为

$$R_{n0} = H_0 + \lambda_{E0} + H_{\text{vad}} + G + S, \quad (6)$$

其中, H_{vad} 为近地层垂直感热平流通量, 可由下式(张强和李宏宇, 2010)计算得到:

$$H_{\text{vad}} = \rho c_p \int_0^{z_r} w \frac{\partial T}{\partial z} dz, \quad (7)$$

其中, ρ 为空气密度, 取为 0.73 kg m^{-3} ; c_p 为空气定压比热; z_r 为超声风速仪探头垂直高度, 在本文中 z_r 取 3 m; w 为近地层垂直速度。

在现实中, 地表能量总是存在一定程度的不平衡, 主要是由于下垫面和大气条件往往比较复杂所致。Moore (1986) (Liebethal et al., 2005; 王介民等, 2009) 曾用地表能量闭合度来表示地表能量平衡的程度:

$$E_C = (H_0 + \lambda_{E0} + H_{\text{vad}}) / (R_{n0} - G_{5\text{cm}} - S), \quad (8)$$

其中, E_C 表示地表能量平衡闭合度, $0 < E_C \leq 1$, E_C 等于 1 时表示地表能量平衡闭合, E_C 偏离 1 越大表示闭合度越低。

2.2.2 近地层总体输送系数的计算

地面向上的长波辐射计算(左洪超和胡隐樵, 1992)公式:

$$R_{lu} = \epsilon_g \sigma T_g^4 + (1 - \epsilon_g) R_{ld}, \quad (9)$$

其中, R_{lu} 表示向上长波辐射; R_{ld} 表示大气逆辐射; σ 表示 Stefan-Boltzmann 常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$; T_g 为地表温度; ϵ_g 为地面的比辐射率, $\epsilon_g = 0.96$ 。利用公式(9)即可求出地表温度。

在近地面层, 通量整体输送系数的计算公式(左洪超和胡隐樵, 1992; 刘辉志和洪钟祥, 2000)如下:

$$C_D = \frac{U_*^2}{U^2}, \quad (10)$$

$$C_H = \frac{\overline{w'T'}}{U(T_0 - T)}, \quad (11)$$

其中, C_D 、 C_H 分别为动量总体输送系数和感热总体输送系数; U 、 T 、 U_* 分别为参考高度处的水平风速(单位: m s^{-1})、温度(单位: $^{\circ}\text{C}$)和摩擦速度(单位: m s^{-1})。本文参考高度为 2 m。

3 结果分析

3.1 基本气象要素特征

图 2 给出了 2014 年夏季聂荣草地基本气象要素变化曲线。由图 2a 可知, 7~8 月的日最高气温的平均值为 13.3°C , 变幅为 $7.6 \sim 16.6^{\circ}\text{C}$; 日最低气温的平均值为 3.4°C , 变幅为 $-0.9 \sim 6.6^{\circ}\text{C}$ 。7~8 月的日平均气温为 7.7°C , 变幅为 $3.7 \sim 9.9^{\circ}\text{C}$, 与青藏高原其他地区相比较低(林芝夏季日平均气温 16.0°C 、理塘 13.9°C 、海北 13.7°C) (赵兴炳等, 2011), 主要是由于聂荣地区海拔较高, 日较差较大所致。图 2b 为 0、5、10、20、50、100 cm 深度土壤温度平均日变化特征, 其中 5~100 cm 为观测数据, 0 cm 地表温度为推算数据。受太阳辐射、大气运动及下垫面类型等因素影响, 越靠近地表, 温度变幅越大, 50 cm 以下深度受这些因素影响较小。0、5、10、20 cm 浅层土壤温度平均日较差分别为 14.8 、 9.1 、 4.5 、 2.4°C 。图 2c 为 5、10、20、50、100 cm 深度土壤含水量平均日变化特征, 各层土壤含水量日平均值分别为 0.29 、 0.33 、 0.10 、 0.05 、 $0.12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 。图 2d 为 7~8 月的日累计降水量, 由图可知, 总的 45 d 累计降水量为 177.7 mm , 最大日降水量为 20 mm , 平均降水量为 4.0 mm 。

3.2 辐射收支特征

图 3 给出了 2014 年 7~8 月聂荣草地下垫面辐射通量及反照率的平均日变化曲线。由图 3a 可知，地表辐射通量与其他地区有着相似的日变化特征，

呈早晚小，中午大。短波辐射与净辐射日最大值均出现在 14:00（北京时间，下同），向下短波辐射日最大值为 671.5 W m^{-2} ，向上短波辐射为 121.5 W m^{-2} ，净辐射为 460.3 W m^{-2} ，短波辐射与净辐射

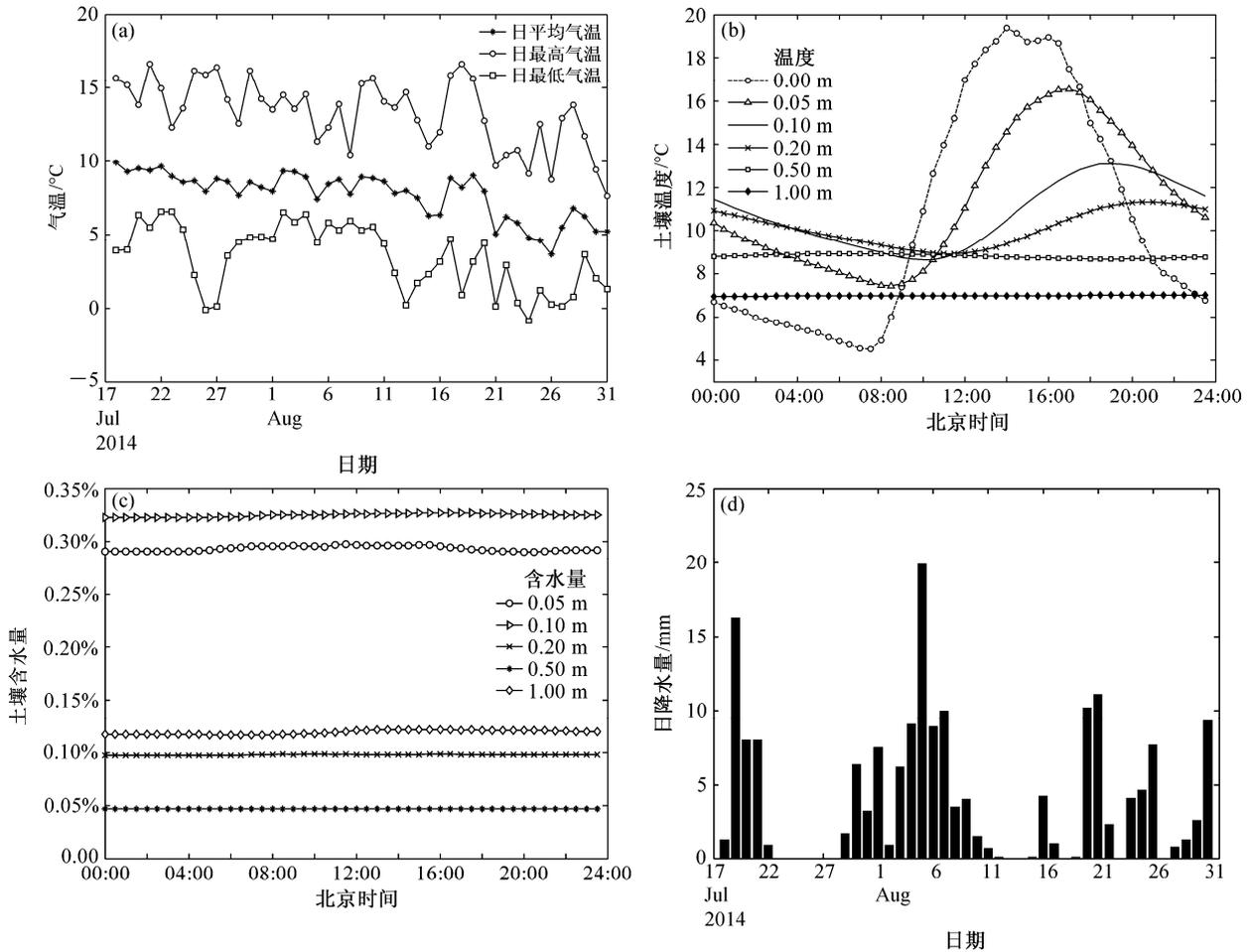


图 2 2014 年 7~8 月聂荣草地基本气象要素变化：(a) 日最高气温、日最低气温、日平均气温；(b) 土壤温度平均日变化；(c) 土壤含水量平均日变化；(d) 日降水量

Fig. 2 Diurnal variations of basic meteorology elements at Nyainrong station from July to August 2014: (a) Daily maximum and minimum air temperature and daily mean air temperature; (b) diurnal variation of soil temperature; (c) diurnal variation of volumetric soil water content; (d) daily precipitation

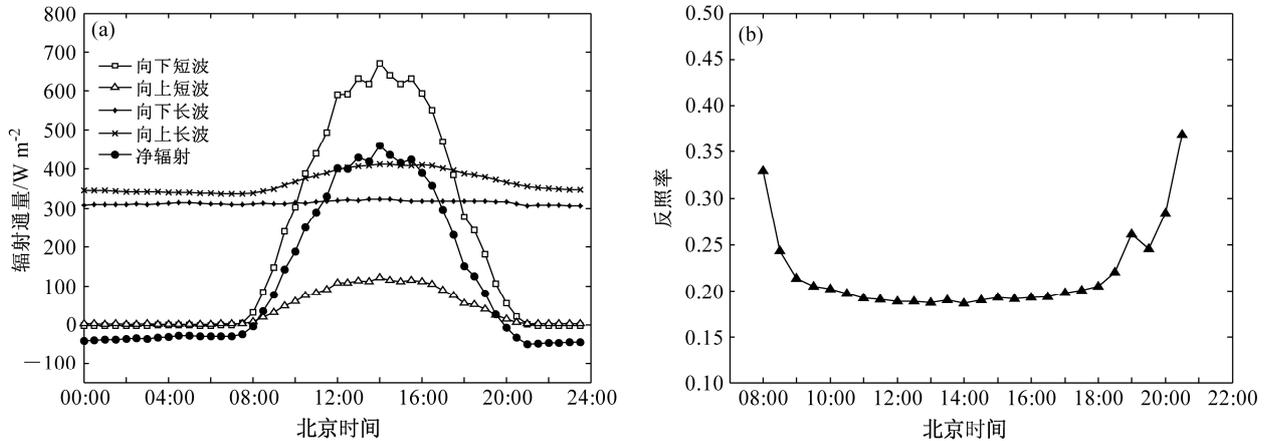


图 3 2014 年 7~8 月聂荣草地 (a) 辐射通量及 (b) 反照率平均日变化

Fig. 3 Diurnal variations of (a) radiation component and (b) surface albedo at Nyainrong station from July to August 2014

的日最大值较林芝、玛曲及理塘地区较小，与麻多地区较为接近（赵兴炳等，2011）。向下长波辐射日变化幅度非常小，这是因为大气的有效温度较为稳定的原因，日最大值出现在 14:30，为 323.9 W m^{-2} 。向上长波辐射有较小幅度的日变化，向上长波辐射与地表温度和地表比辐射率的变化相一致，地表比辐射率是相对稳定的量，因此向上长波辐射与地表温度变化相一致，地表温度随着太阳总辐射的逐渐加热而升高，因此向上长波辐射与太阳总辐射的变化趋势一致（岳平等，2012），只是日振幅相对较小，相位滞后，日最大值出现在 14:30，为 412.3 W m^{-2} 。

地表反照率反映了地面对太阳辐射的反射能力。影响地表反照率的因素主要有下垫面状况（颜色、湿度、粗糙度、植被覆盖等）、太阳高度角和天气状况等（岳平等，2012）。因地表覆盖类型的多样性和多变性，使得能量分布在区域上重新分配，导致投射到地面的太阳能的变化较为复杂。图 3b 可知，反照率呈“U”型分布，早晚大，中午小。太阳高度角较低时，地表反照率变化较大，随着太阳高度角的增大地表反照率减小并趋于稳定，经计算，09:00 至 19:00 地表平均反照率为 0.20，大于安多地区（夏季反照率为 0.17）、理塘（0.17）、当雄（0.15）、昌都（0.16），与林芝地区（0.20）（赵兴炳等，2011）相同。

3.3 能量平衡特征分析

为了保证计算结果的可靠性，剔除了降水及多云条件下的数据，选取了 5 个典型晴天条件下的数据，能够代表聂荣地区典型夏季晴天的特征。感热交换是指因温度变化而引起的大气与下垫面之间发生的湍流形式的能量交换；潜热交换是温度不变条件下单位面积的热量交换，主要形式为大气中水发生相变时引起的热量交换；土壤热通量是单位时间、单位面积上的土壤热交换量；垂直热平流输送是指垂直运动对热量的垂直输送（张强等，2012）。

图 4 给出了聂荣地区晴天条件下地表通量的日变化。图 4a 为 5 cm 土壤热通量的观测值与 5 cm 土壤热通量加上 0~5 cm 土壤层热存储量得到的地表土壤热通量的平均日变化图，由图可知，白天土壤热通量为正值，表明热量从地表向深层土壤输送，土壤温度升高；而夜间土壤热通量为负值，热量由深层向地表输送，导致夜间地温降低。5 cm 土壤热通量日最高值出现在 16:00，为 92.5 W m^{-2} ，地表土

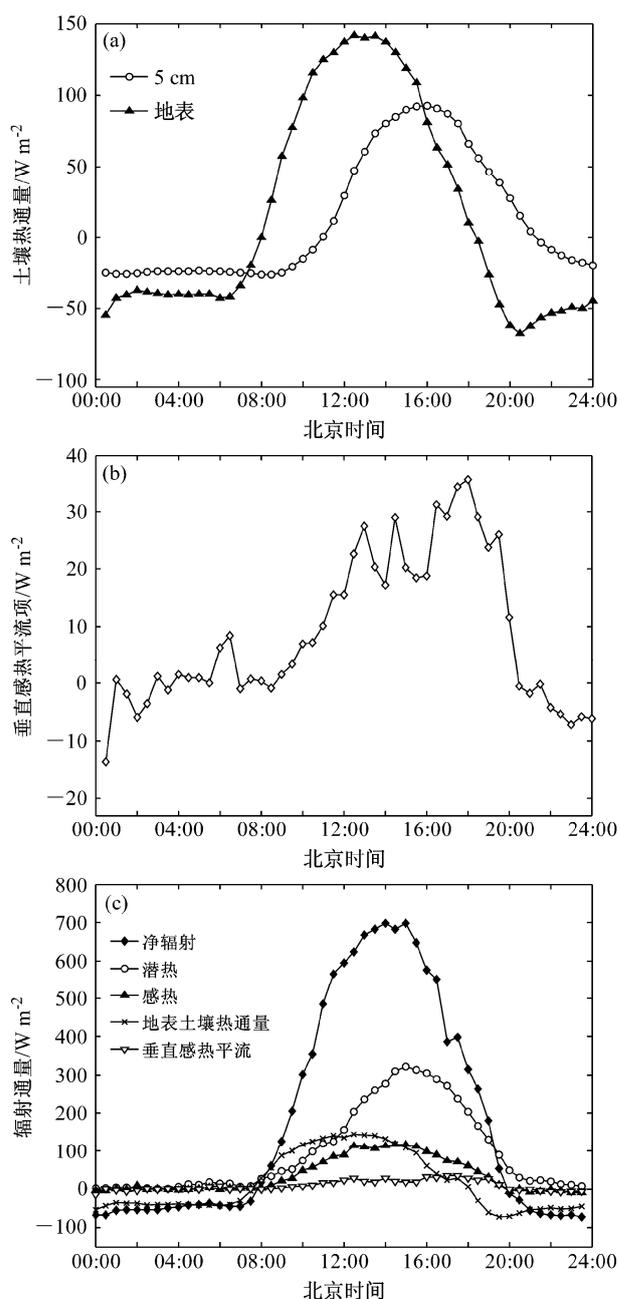


图 4 2014 年 7~8 月聂荣草地 (a) 土壤热通量、(b) 垂直感热平流及 (c) 能量平衡各分量的平均日变化

Fig. 4 Diurnal variations of (a) soil heat flux, (b) vertical heat advection, and (c) the components of surface energy balance at Nyainrong station from July to August 2014

壤热通量日最高值出现在 14:00，为 142.7 W m^{-2} 。与地表热通量相比，5 cm 土壤热通量振幅较小且相位滞后，峰值相差 50 W m^{-2} 左右。与以往的研究成果一致（王介民等，2009；左金清等，2010；郭阳等，2015），土壤热通量板到地表之间的热存储对能量闭合具有显著影响。因此在能量平衡分析中使

用地表土壤热通量是十分必要的。图 4b 为估算的近地层垂直感热平流平均日变化, 由图可知, 其最高值可达 35.7 W m^{-2} , 几乎达到了其他热通量同样的量级, 与张强等 (2012) 的研究结论一致, 因此考虑近地层垂直感热平流项也是十分必要的。图 4c 为能量平衡各分量的平均日变化图, 给出了下垫面收支情况。由图可知, 在夏季白天, 聂荣地区的净辐射大部分以潜热的形式加热大气, 主要由于 7~8 月处于雨季, 较多的降水使得地表湿润, 水分蒸发释放热能较强。感热通量的作用与土壤热通量相当, 相比之下垂直感热平流输送所占比例较小。在夜间, 净辐射、感热、土壤热通量以及垂直感热平流输送均为负值, 表明大气和深层土壤对地表开始加热。夏季聂荣地区潜热通量日均值为 96.6 W m^{-2} , 小于理塘地区 (106.7 W m^{-2}), 大于林芝 (69.3 W m^{-2})、海北 (66.4 W m^{-2})、拉萨地区 (73.7 W m^{-2})。夏季聂荣地区感热通量日均值为 34.6 W m^{-2} , 大于理塘 (18.2 W m^{-2})、林芝 (19.7 W m^{-2})、海北 (9.8 W m^{-2})、拉萨 (30.2 W m^{-2}) (赵兴炳等, 2011)。夏季聂荣地区地表土壤热通量日均值为 11.3 W m^{-2} , 垂直感热平流输送日均值为 8.7 W m^{-2} 。

近地层能量闭合问题已经展开了大量的研究工作, 普遍认为导致不闭合的原因有: (1) 仪器的观测精度; (2) 土壤浅层热储存的计算; (3) 没有考虑垂直运动引起的平流输送; (4) 高频损失和低频损失会造成涡动相关技术 (EC) 对湍流通量的低估; (5) 地形复杂地区, 容易形成局地环流或夜间泄流 (王介民等, 2009)。图 5a 给出了夏季聂荣地区观测数据 (未改进前) 近地层地表可利用能量 ($R_n - G_{5\text{cm}}$) 与有效能量 ($H_s + L_E$) 的线性回归 (OLR) 结果, 地表能量闭合度为 0.65, 闭合率较低, 低于国际上大多数观测地表能量不闭合度 10%~30%。图 5b 给出了引入土壤热存储项后地表可利用能量 ($R_n - G_{0\text{cm}}$) 与有效能量 ($H_s + L_E$) 的线性回归结果, 闭合度提高到 0.74。图 5c 给出了同时引入土壤热存储项和垂直感热平流项后地表可利用能量 ($R_n - G_{0\text{cm}}$) 与有效能量 ($H_s + L_E + H_{\text{vad}}$) 的线性回归结果, 闭合度提高到 0.80, 能量闭合度有较大的提高。

考虑了土壤浅层热储存和垂直运动引起的平流输送后, 闭合率由 0.65 提高到 0.80, 闭合率有显著的提高, 但仍存在 20% 的不闭合, 可能的原因一方面是近地层空气热储存、光合作用以及土壤水分的垂直运动, 另一方面 EC 对湍流通量的低估。

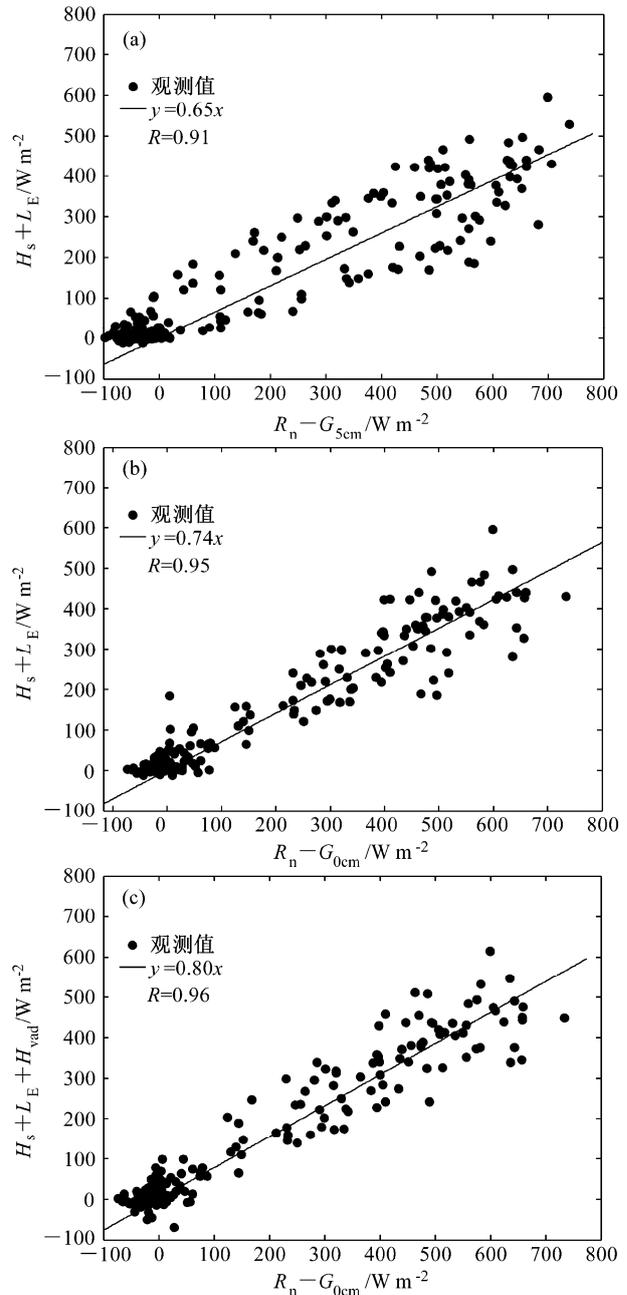


图 5 2014 年 7~8 月聂荣草地地表可利用能量与有效能量的比较: (a) 改进前; (b) 引入土壤热存储项; (c) 同时引入热存储和垂直感热平流
Fig. 5 Relationship between surface available energy and effective energy at Nyainrong station from July to August 2014: (a) Before improvement; (b) after introduction of the soil heat storage; (c) after introduction of both the soil heat storage and vertical heat advection

3.4 近地层总体输送系数

陆面过程的核心问题是下垫面与大气之间的能量平衡以及物质的输送和交换 (左洪超和胡隐樵, 1992)。通常利用总体输送系数的参数化公式确定陆气之间能量和物质的交换。动量和热量总体

输送系数分别表征了湍流动力作用和湍流热力作用，是衡量湍流强弱程度的物理量（周明煜等，2000）。同时，在模式中由于总体输送系数随着研究时段和研究地区有着明显的差异，造成模拟误差较大。因此，准确计算聂荣地区的总体输送系数，对于加深了解陆气相互作用过程以及大气模式参数化方案的设计都有十分重要的意义。

图 6 给出了夏季聂荣草地不同稳定层结下摩擦速度平方 U_*^2 与水平风速平方 U^2 的关系，其斜率代表了不同稳定度条件下的动量总体输送系数 C_D 的平均值。由图可知，在不稳定层结下， C_D 平均值为 4.7×10^{-3} ；在稳定层结下为 3.4×10^{-3} 。马耀明等（2000）计算的藏北那曲站夏季不稳定条件 C_D 的平均值为 2.72×10^{-3} ，稳定条件下的平均值为 2.44×10^{-3} ；以及安多站夏季不稳定条件的平均值为 3.29×10^{-3} ，稳定条件下的平均值为 2.89×10^{-3} 。可知，在不稳定和稳定层结下，夏季聂荣地区 C_D 值均大于

那曲站和安多站。图 7 给出了夏季聂荣草地不同稳定层结下 $\overline{w'T'}$ 与 $U(T_0 - T)$ 的关系，其斜率代表了不同稳定度条件下的热量总体输送系数 C_H 平均值，由图可知，在不稳定层结下， C_H 平均值为 3.5×10^{-3} ，在稳定层结下为 1.8×10^{-3} 。马耀明等（2000）计算的藏北那曲站夏季不稳定条件的 C_H 平均值为 3.83×10^{-3} ，稳定条件下的平均值为 1.02×10^{-3} ；以及安多站夏季不稳定情况的平均值为 4.0×10^{-3} ，稳定情况下的平均值为 1.48×10^{-3} 。可知，在不稳定层结下，聂荣地区 C_H 值均小于那曲站和安多站，在稳定层结下，聂荣地区 C_H 值均大于那曲站和安多站。

表 2 给出了不同地区不同下垫面类型近中性层结的总体输送系数。由表可知，总体输送系数与研究时段以及下垫面类型有着很大关系，与所用计算方法也有一定关系。经计算，聂荣 7~8 月 C_D 和 C_H 在近中性层结下 ($-0.05 < -z/L < 0.05$) 数值分别为

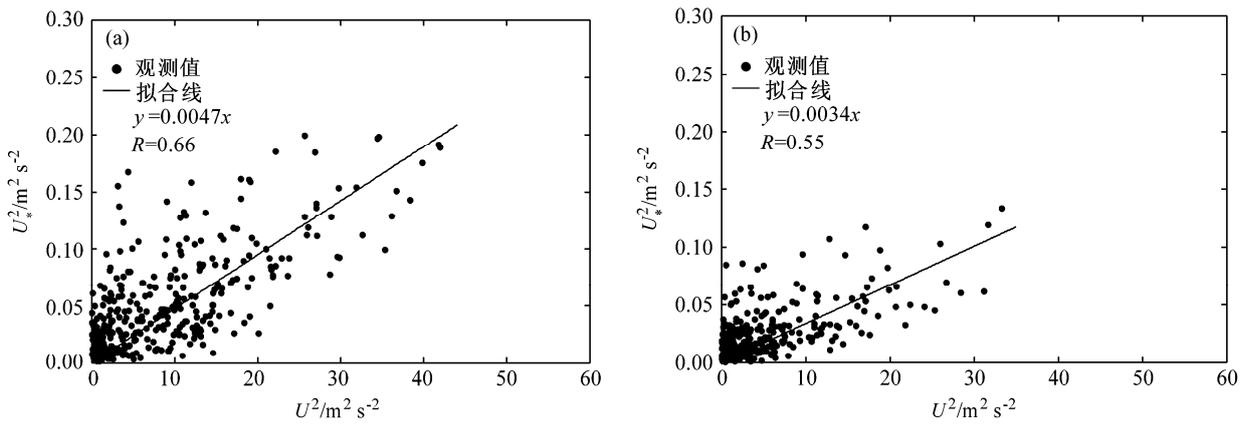


图 6 2014 年 7~8 月聂荣草地不同稳定层结下摩擦速度平方 U_*^2 与水平风速平方 U^2 的关系：(a) 不稳定层结；(b) 稳定层结

Fig. 6 Relationship between friction velocity U_*^2 and horizontal wind speed U^2 at Nyainrong station from July to August 2014: (a) Under unstable stratification; (b) under stable stratification

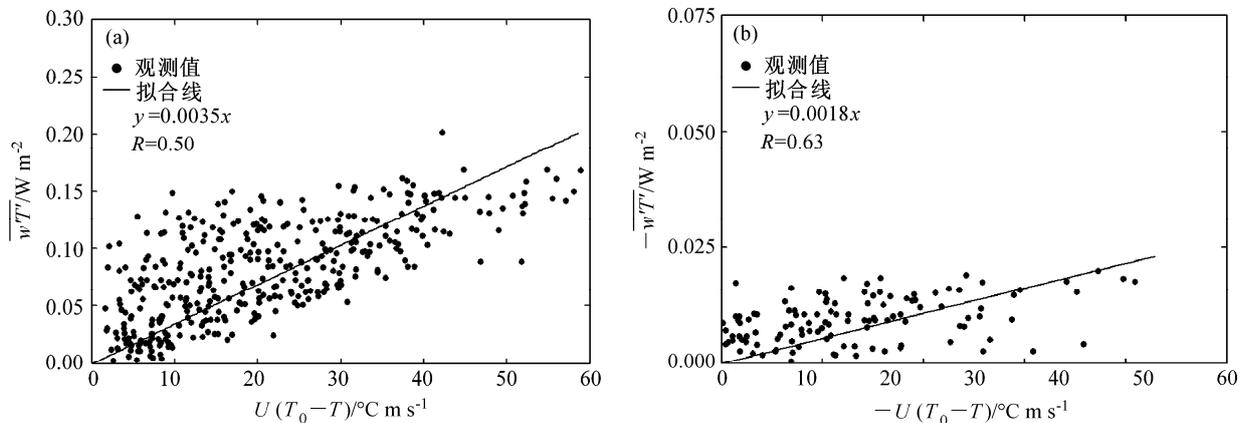


图 7 2014 年 7~8 月聂荣草地不同稳定层结下 $\overline{w'T'}$ 与 $U(T_0 - T)$ 的关系：(a) 不稳定层结；(b) 稳定层结

Fig. 7 Relationship between covariance $\overline{w'T'}$ and $U(T_0 - T)$ at Nyainrong station from July to August 2014: (a) Under unstable stratification; (b) under stable stratification

表 2 不同地区近中性层结的总体输送系数

Table 2 Bulk transfer coefficients under near neutral stratified condition in different regions

地点	时间	下垫面类型	$C_D (\times 10^{-3})$	$C_H (\times 10^{-3})$	计算方法	参考文献
黄土高原 SACOL 站	6~8 月	荒漠草地	4.20	2.80	涡旋相关方法	岳平等 (2015)
敦煌	5~6 月	戈壁	0.92	1.81	涡旋相关方法	张强等 (2002)
黑河试验区	8~9 月	沙漠	2.20	2.20	组合法	左洪超和胡隐樵 (1992)
黑河试验区	8~9 月	戈壁	1.60	1.60	组合法	左洪超和胡隐樵 (1992)
狮泉河	年平均	稀疏植被	4.65	6.27	廓线通量法	李国平等 (2000)
改则	年平均	稀疏植被	4.83	6.58	廓线通量法	李国平等 (2000)
改则	6~7 月	稀疏植被荒漠土	2.31	2.15	涡旋相关方法	李家伦等 (1999)
昌都	5~6 月	稀疏杂草	4.40	4.70	涡旋相关法	卞林根等 (2001)
陇中黄土高原	8 月	裸地	2.31	1.57	空气动力学方法	杨兴国等 (2010)
北麓河	5~6 月	稀疏短草沙壤土	1.74	1.37	空气动力学方法	钱泽雨等 (2005)
聂荣	7~8 月	草地	4.30	2.39	涡旋相关方法	本文

4.30×10^{-3} 、 2.39×10^{-3} 。同接近同时段的动量总体输送系数来比较，聂荣草地与黄土高原 SACOL 站荒漠草地以及昌都稀疏杂草较为接近，大于北麓河稀疏短草、陇中黄土高原裸地。同接近同时段的热量总体输送系数来比较，聂荣草地大于改则稀疏植被荒漠、北麓河稀疏短草、陇中黄土高原裸地和黑河戈壁，小于黄土高原 SACOL 站荒漠草地。

4 结论

本文利用青藏高原中部聂荣地区草地下垫面 2014 年 7~8 月获取的近地层梯度观测数据以及湍流观测数据，分析讨论了该地区的基本气象要素特征、能量平衡特征以及能量输送特征，得到如下主要结论：

(1) 向下短波、向上短波辐射与净辐射日变化规律一致，日最大值均出现在 14:00，分别为 671.5、121.5 和 460.3 W m^{-2} 。向下长波辐射日变化幅度非常小，日最大值出现在 14:30，为 323.9 W m^{-2} ，向上长波辐射有较小幅度日变化，日最大值出现在 14:30，为 412.3 W m^{-2} 。反照率呈“U”型分布，早晚大，中午小，聂荣地表平均反照率为 0.20。

(2) 潜热通量日均值为 96.6 W m^{-2} ，感热通量日均值为 34.6 W m^{-2} ，地表土壤热通量日均值为 11.3 W m^{-2} ，垂直感热平流输送日均值为 8.7 W m^{-2} 。在夏季白天，聂荣草地净辐射大部分以潜热的形式加热大气。在夜间，净辐射、感热、土壤热通量以及垂直感热平流输送均转为负值。考虑了土壤浅层热储存和垂直运动引起的平流输送后，闭合率由 0.65 提高到 0.80，闭合率有显著的提高。

(3) 在不稳定层结下，动量总体输送系数 C_D 平

均值为 4.7×10^{-3} 和热量总体输送系数 C_H 平均值为 3.5×10^{-3} ；在稳定层结下， C_D 平均值为 3.4×10^{-3} ， C_H 平均值为 1.8×10^{-3} ； C_D 和 C_H 在近中性层结下的平均值分别为 4.30×10^{-3} 、 2.39×10^{-3} 。

致谢 感谢聂荣观测站各位工作人员在观测数据获取中付出的辛勤劳动，同时本课题得到中国科学院寒区旱区环境与工程研究所中国科学院超级计算兰州分中心的支持，特此感谢。

参考文献 (References)

卞林根, 陆龙骅, 程彦杰, 等. 2001. 青藏高原东南部昌都地区近地层湍流输送的观测研究 [J]. 应用气象学报, 12 (1): 1-13. Bian Lingen, Lu Longhua, Cheng Yanjie, et al. 2001. Turbulent measurement over the southeastern Tibetan Plateau [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 12 (1): 1-13, doi: 10.3969/j.issn.1001-7313.2001.01.001.

Bian L G, Xu X D, Lu L H, et al. 2003. Analyses of turbulence parameters in the near-surface layer at Qamdo of the southeastern Tibetan Plateau [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 20: 369-378, doi: 10.1007/BF02690795.

常伟, 郭学良. 2016. 青藏高原那曲地区夏季对流云结构及雨滴谱分布日变化特征 [J]. 科学通报, 61 (15): 1706-1720. Chang Yi, Guo Xueliang. 2016. Characteristics of convective cloud and precipitation during summer time at Naqu over Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 2016, 61 (15): 1706-1720, doi: 10.1360/N972015-01292.

Choi T, Hong J, Kim J, et al. 2004. Turbulent exchange of heat, water vapor, and momentum over a Tibetan prairie by eddy covariance and flux variance measurements [J]. J. Geophys. Res., 109 (D21): D21106, doi: 10.1029/2004JD004767.

Dickinson R E. 1995. Land-atmosphere interaction [J]. Rev. Geophys., 33: 917-922, doi: 10.1029/95RG00284.

郭阳, 左洪超, 陈继伟, 等. 2015. 均匀裸土地表土壤热通量计算方法对比及对能量闭合的影响 [J]. 气候与环境研究, 20 (2): 177-187. Guo Yang, Zuo Hongchao, Chen Jiwei, et al. 2015. Comparison of soil heat

- flux calculation approaches and their impacts on surface energy balance closure over homogeneous bare soil surface [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 20 (2): 177–187, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14019.
- Gao Z Q, Chen T J, Hu Y B. 2007. Impact of soil vertical water movement on the energy balance of different land surfaces [J]. *International Journal of Biometeorology*, 51: 565–573, doi: 10.1007/s00484-007-0095-6.
- 胡隐樵, 奇跃进, 杨选利. 1990. 河西戈壁(化音)小气候和热量平衡特征的初步分析 [J]. *高原气象*, 9 (2): 113–119. Hu Yinqiao, Qi Yuejin, Yang Xuanli. 1990. Preliminary analyses about characteristics of microclimate and heat energy budget in Hexi Gobi [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 9 (2): 113–119.
- 李国平, 段廷扬, 巩远发. 2000. 青藏高原西部地区的总体输送系数和地面通量 [J]. *科学通报*, 45 (8): 865–869. Li Guoping, Duan Tingyang, Gong Yuanfa. 2000. The bulk transfer coefficients and surface fluxes on the western Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 45 (13): 1221–1226, doi: 10.1007/BF02886084.
- 李家伦, 洪钟祥, 罗卫东, 等. 1999. 青藏高原改则地区近地层通量观测研究 [J]. *大气科学*, 23 (2): 142–151. Li Jialun, Hong Zhongxiang, Luo Weidong, et al. 1999. A study of surface fluxes in Gerze area, Qinghai–Xizang Plateau [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 23 (2): 142–151, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1999.02.02.
- 李跃清. 2004. 青藏高原气象学研究文集 [M]. 北京: 气象出版社, 19–48. Li Yueqing. 2004. *The Study on Tibetan Plateau Meteorology* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 19–48.
- Liebenthal C, Huwe B, Foken T. 2005. Sensitivity analysis for two ground heat flux calculation approaches [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 132: 253–262, doi: 10.1016/j.agrformet.2005.08.001.
- 刘辉志, 洪忠祥. 2000. 青藏高原改则地区近地层湍流特征 [J]. *大气科学*, 24 (3): 289–300. Liu Huizhi, Hong Zhongxiang. 2000. Turbulent characteristics in the surface layer over Gerze area in the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 24 (3): 289–300, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2000.03.01.
- 马伟强, 马耀明, 李茂善, 等. 2005. 藏北高原地区地表辐射收支和能量平衡的季节变化 [J]. *冰川冻土*, 27 (5): 673–679. Ma Weiqiang, Ma Yaoming, Li Maoshan, et al. 2005. Seasonal variation on land surface energy budget and energy balance components in the northern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 27 (5): 673–679.
- Ma Y, Tsukamoto O, Wang J M, et al. 2002. Analysis of aerodynamic and thermodynamic parameters on the grassy marshland surface of Tibetan Plateau [J]. *Progress in Natural Science*, 12 (1): 36–40.
- 马耀明, 王介民, Menenti M, 等. 1997. HEIFE 非均匀陆面上区域能量平衡研究 [J]. *气候与环境研究*, 2 (3): 293–301. Ma Yaoming, Wang Jiemin, Menenti M, et al. 1997. The study of regional surface heat fluxes over the heterogenous landscape of HEIFE [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2 (3): 293–301, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.1997.03.11.
- 马耀明, 塚本修, 吴晓鸣, 等. 2000. 藏北高原草甸下垫面近地层能量输送及微气象特征 [J]. *大气科学*, 24 (5): 715–722. Ma Yaoming, Tsukamoto O, Wu Xiaoming, et al. 2000. Characteristics of energy transfer and micrometeorology in the surface layer of the atmosphere above grassy marshland of the Tibetan Plateau area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 24 (5): 715–722, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2000.05.16.
- Ma Y M, Zhong L, Su Z B, et al. 2006. Determination of regional distributions and seasonal variations of land surface heat fluxes from Landsat-7 enhanced thematic mapper data over the central Tibetan Plateau area [J]. *J. Geophys. Res.*, 111 (D10): D10305, doi: 10.1029/2005JD006742.
- 毛飞, 卢志光, 张佳华, 等. 2007. 近 40 年那曲地区气候特征分析 [J]. *高原气象*, 26 (4): 708–715. Mao Fei, Lu Zhiguang, Zhang Jiahua, et al. 2007. Analysis on climate characteristics in Naqu in recent 40 years [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 26 (4): 708–715.
- Moore C J. 1986. Frequency response corrections for eddy correlation systems [J]. *Bound.-Layer Meteorol.*, 37 (1): 17–35, doi: 10.1007/BF00122754.
- 钱泽雨, 胡泽勇, 杜萍, 等. 2005. 青藏高原北麓河地区近地层能量输送与微气象特征 [J]. *高原气象*, 24 (1): 43–48. Qian Zeyu, Hu Zeyong, Du Ping, et al. 2005. Energy transfer of near surface layer and micrometeorology characteristics in Bailuhe area of Qinghai–Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 24 (1): 43–48.
- 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: 169–183, doi: 10.1016/S0022-1694(03)00243-9.
- 汤懋苍, 程国栋, 林振耀. 1998. 青藏高原近代气候变化及对环境的影响 [M]. 广东: 广东科技出版社, 164–172. Tang Maocang, Cheng Guodong, Lin Zhenyao. 1998. *Contemporary Climatic Variations over Qinghai–Xizang (Tibetan) Plateau and Their Influences on Environments* (in Chinese) [M]. Guangdong: Guangdong Science and Technology Press, 164–172.
- 王介民, 王维真, 刘绍民, 等. 2009. 近地层能量平衡闭合问题——综述及个例分析 [J]. *地球科学进展*, 24 (7): 705–713. Wang Jiemin, Wang Weizhen, Liu Shaomin, et al. 2009. The Problems of surface energy balance closure—An overview and case study [J]. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 24 (7): 705–713, doi: 10.3321/j.issn:1001-8166.2009.07.003.
- 杨兴国, 张强, 杨启国, 等. 2010. 陇中黄土高原半干旱区总体输送系数的特征 [J]. *高原气象*, 29 (1): 44–50. Yang Xingguo, Zhang Qiang, Yang Qiguo, et al. 2010. Characteristics of bulk transfer coefficients over the Middle-Gansu semi-arid region of Loess Plateau [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 29 (1): 44–50.
- Yue P, Li Y H, Zhang Q, et al. 2014. Surface energy-balance closure in a gully region of the Loess Plateau at SACOL on eastern edge of Tibetan Plateau [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90C: 173–184, doi: 10.2151/jmsj.2012-C12.
- 岳平, 李耀辉, 张良, 等. 2012. 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 [J]. *冰川冻土*, 34 (6): 1328–1335. Yue Ping, Li Yaohui, Zhang Liang, et al. 2012. Radiation and surface energy balance characteristics during clear days in Nyingchi (Tibet) and Wenjiang (Sichuan) [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 34 (6): 1328–1335.
- 岳平, 张强, 赵文, 等. 2015. 黄土高原半干旱草地近地层湍流温湿特征及总体输送系数 [J]. *高原气象*, 34 (1): 21–29. Yue Ping, Zhang Qiang, Zhao Wen, et al. 2015. Characteristics of turbulence transfer in surface

- layer over semi-arid grassland in Loess Plateau in summer[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34 (1): 21–29, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00170.
- 张强, 李宏宇. 2010. 黄土高原地表能量不闭合度与垂直感热平流的关系 [J]. 物理学报, 59 (8): 5888–5895. Zhang Qiang, Li Hongyu. 2010. The relationship between surface energy balance unclosure and vertical sensible heat advection over the Loess Plateau [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 59 (8): 5888–5895.
- 张强, 卫国安, 黄荣辉. 2002. 绿洲对其临近荒漠大气水分循环的影响——敦煌试验数据分析 [J]. 自然科学进展, 12 (2): 170–175. Zhang Qiang, Wei Guo'an, Huang Ronghui. 2002. Effect of oasis on the atmospheric water circulation near the desert: An analysis of the data from Dunhuang experiment [J]. Progress in Natural Science (in Chinese), 12 (2): 170–175, doi: 10.3321/j.issn:1002-008X.2002.02.011.
- 张强, 李宏宇, 赵建华. 2012. 垂直平流输送和土壤热储存补偿对黄土高原地表能量平衡的修正 [J]. 中国科学: 地球科学, 42 (1): 42–51. Zhang Qiang, Li Hongyu, Zhao Jianhua. 2012. Modification of the land surface energy balance relationship by introducing vertical sensible heat advection and soil heat storage over the Loess Plateau[J]. Science China Earth Science (in Chinese), 55 (4): 580–589, doi: 10.1007/s11430-011-4220-3.
- 赵兴炳, 彭斌, 秦宁生, 等. 2011. 青藏高原不同地区夏季近地层能量输送与微气象特征比较分析 [J]. 高原山地气象研究, 31 (1): 6–11. Zhao Xingbing, Peng Bin, Qin Ningsheng, et al. 2011. Characteristics of energy transfer and micrometeorology in surface layer in different areas of Tibetan Plateau in summer [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 31 (1): 6–11, doi: 10.3969/j.issn.1674-2184.2011.01.002.
- 周明煜, 徐祥德, 卞林根, 等. 2000. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1–25. Zhou Mingyu, Xu Xiangde, Bian Lingen, et al. 2000. Observational Analysis and Dynamic Study of Atmospheric Boundary Layer on Tibetan Plateau (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1–25.
- 左洪超, 胡隐樵. 1992. 黑河试验区沙漠和戈壁的总体输送系数 [J]. 高原气象, 11 (4): 371–380. Zuo Hongchao, Hu Yinqiao. 1992. The bulk transfer coefficient over desert and Gobi in Heihe region[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 11 (4): 371–380.
- 左金清, 王介民, 黄建平, 等. 2010. 半干旱草地地表土壤热通量的计算及其对能量平衡的影响 [J]. 高原气象, 29 (4): 840–848. Zuo Jinqing, Wang Jiemin, Huang Jianping, et al. 2010. Estimation of ground heat flux for a semi-arid grassland and its impact on the surface energy budget [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29 (4): 840–848.