

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0154

LIU Jinke, YAO Jimin, GU Lianglei, et al. The surface energy budget process and preliminary analysis of its impact on the active layer in the permafrost region of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(6):1773–1783. [刘金科, 姚济敏, 谷良雷, 等. 青藏高原多年冻土区地表能量收支过程及其对活动层影响的初步分析[J]. 冰川冻土, 2022, 44(6):1773–1783.]

青藏高原多年冻土区地表能量收支过程 及其对活动层影响的初步分析

刘金科^{1,2}, 姚济敏¹, 谷良雷³, 李 韧¹, 吴晓东¹, 吴通华¹, 谢昌卫¹,
邹德富¹, 乔永平¹, 胡国杰¹, 肖 瑶¹, 史健宗¹

(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室 藏北高原冰冻圈特殊环境与灾害国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 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, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 基于2005—2016年青藏高原多年冻土区唐古拉和西大滩站的气象、涡动通量以及活动层资料, 利用涡动相关法、气象梯度法和SHAW模型等方法探究了气候变化背景下高原多年冻土区地表能量通量变化规律及其对活动层的影响。结果表明:2005—2016年唐古拉和西大滩气温、地气温差有所升高, 年降水量、10 cm土壤含水量及风速有所下降。2005年以来唐古拉和西大滩净辐射(R_n)与感热(H)呈增加趋势, 潜热(LE)呈减小趋势, 地表土壤热通量(G)变化较小。唐古拉和西大滩地表能量通量季节变化明显, 但受海拔、纬度、坡向、土壤冻融过程、降水、下垫面状况等因素的影响, 地表能量通量存在区域差异。研究时段内, 唐古拉和西大滩地表冻结指数与土壤热通量呈负相关; 融化指数、活动层厚度与土壤热通量呈正相关, 融化期间土壤热通量积累量与融化深度的变化呈线性增加关系。

关键词: 年际变化; 气象要素; 地表能量收支; 地表冻融指数; 活动层厚度; 青藏高原

中图分类号: P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)06-1773-11

0 引言

青藏高原(以下亦称高原)平均海拔高度超过4 000 m, 是亚洲众多河流的发源地, 被称为“第三极”、“亚洲水塔”^[1-2]。该地区的能量和水分循环是全球能量和水分循环的重要组成部分, 对我国、周边国家乃至世界的气候环境均有着深远影响^[3-7]。高原上多年冻土广泛发育, 面积约为 $1.06 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[8], 在全球变暖的背景下, 其对气候变化十分敏感^[9]。活动层作为多年冻土与大气间水热交换的过渡层, 其变化与地表能水交换过程存在复杂的相互作用关系^[10]。地表能量收支直接影响活动层水热状况, 而活动层冻融过程会引起土壤内部水分的频繁相变, 从而改变土壤的水热状况^[10-11]、地表蒸散发^[12], 反过

来又影响地表能水交换过程^[13]、水文过程^[14-15]、土壤碳循环^[16]等。因此, 研究多年冻土区地表能量通量变化及其对活动层的影响, 对深刻认识多年冻土与气候系统圈层间的相互作用具有重要意义。

高原地表能量收支研究已经取得了一系列的研究成果。第一次大气科学实验(QXP-MEX)、GAME-Tibet实验、第二次大气科学实验(TIPEX)、CAMP-Tibet实验、第三次大气科学实验以及TPC-SIEA实验均把高原地表能水过程作为关注的焦点问题, 并获取了大量分析数据^[17-18], 这为深入理解高原能量水分循环过程提供了宝贵的资料和参考依据。已有研究表明, 地表辐射热量交换与多年冻土和季节冻土的形成密切相关^[19], 其变化对冻土的形成和发育具有决定作用^[20]; 而土壤冻融过程

收稿日期: 2022-01-12; 修订日期: 2022-06-26

基金项目: 中国科学院青年创新促进会项目(2022430); 国家自然科学基金(42071094; 42071093; 41571069; 41575012)资助

作者简介: 刘金科, 硕士研究生, 主要从事寒区陆面过程研究. E-mail: liujinke@nieer.ac.cn

通信作者: 姚济敏, 副研究员, 主要从事冻土与气候研究. E-mail: yjm@lzb.ac.cn

和季风又显著影响地表能量收支过程,使其呈现冬春季湍流通量以感热为主,夏秋季以潜热为主的季节特征^[17,21-23],其中北麓河^[12,24]、唐古拉^[21,25]及西大滩^[21]等典型多年冻土区土壤的冻融过程对地表能量收支过程有显著影响,而藏北高原地区^[3]季节冻土冻融过程对地表能量收支的影响则相对较弱。

近几十年来,青藏高原增温迅速^[26-29],升温率超过全球平均的2倍^[16],高原多年冻土呈现不同程度的退化趋势^[30],表现为活动层增厚、多年冻土温度升高、多年冻土下界上移等,这些变化与地表能水交换过程联系密切。因此,有必要分析地表能量收支过程对活动层变化的影响。基于此,本文利用唐古拉和西大滩站点的气象、涡动及活动层资料,结合 SHAW (Simultaneous Heat and Water) 模型,研究高原多年冻土区长时间序列地表能量收支变化及其影响因素,初步探讨地表能量收支过程对活动层变化的影响,为增强全球变暖背景下高原多年冻土区地-气相互作用的认识

提供科学参考。

1 资料来源与研究方法

1.1 观测站点概况

本文选取唐古拉(TGLMS, 91°56' E, 33°04' N, 海拔 5 100 m)和西大滩综合观测场(XDTMS, 94°08' E, 35°43' N, 海拔 4 538 m)作为研究站点,地理位置如图1所示。其中唐古拉综合试验观测场位于高原腹地连续多年冻土区,该区域地势平坦开阔,被高寒草甸覆盖,植被稀疏低矮。2005—2015年平均气温为-4.7℃,年降水量约363.1 mm。从地表到地下10 cm深度砂粒含量为80%,黏粒含量为8%,粉粒含量为12%^[31]。西大滩综合试验观测场位于高原多年冻土区北界附近,下垫面类型为不连续多年冻土^[32]。该站点周围区域开阔平坦,植被类型以高寒草甸为主。2008—2016年平均气温为-3.7℃,年降水量约392.9 mm。从地表到地下10 cm深度砂粒含量为72%,黏粒含量为11%,粉粒含量为17%^[31]。

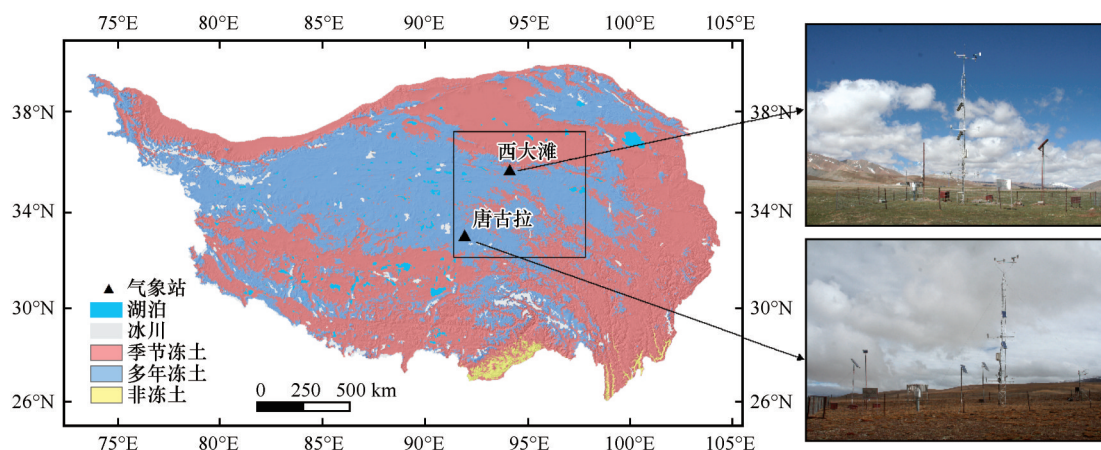


图1 研究站点分布^[8]

Fig. 1 The location of observation sites^[8]

1.2 数据与仪器信息

研究选取2005—2015年唐古拉和2008—2016年西大滩综合观测场气象、涡动通量以及活动层等观测资料。综合观测场的气象资料由三层气象梯度塔观测得到,主要包括3层风温湿压(2 m、5 m、10 m)、降水量、雪深、辐射、土壤热通量(5 cm、10 cm、20 cm)等要素的测量;涡动通量数据由涡动相关系统仪器观测获得;活动层水热数据由接入CR3000型数采仪的监测仪器观测获得,其中活动层厚度根据一年之中0℃等温线最大穿透深度确

定。各仪器信息具体见表1。

1.3 数据处理方法

1.3.1 湍流通量

本文采用涡动相关法、气象梯度法和SHAW模型相结合进行感热和潜热的计算。以涡动相关系统观测结果为基础,利用气象梯度法和SHAW模型对缺失或质量相对较差的结果进行插补以获取长时间序列较为完整的湍流通量数据。

涡动相关法是目前计算地气间湍流通量最先进和常见的方法,主要利用三维超声风速仪和开路

表1 唐古拉和西大滩综合观测场仪器说明
Table 1 Descriptions of instruments at Tanggula and Xidatan observation sites

观测参数		仪器型号及生产商	精度	安置高度或深度	频率
观测系统	观测项目				
涡动相关系统	三维风速	CSAT3, Campbell	$\pm 0.4 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$	3 m	10 Hz
	CO ₂ /H ₂ O	Li-7500, LI-COR	$\pm 0.01 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$	3 m	10 Hz
	甲烷	Li-7500, LI-COR	$\pm 1\%$	3 m	10 Hz
气象梯度塔	风速	05103_L, Campbell	$\pm 0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	2, 5, 10 m	30 min
	空气温度	HMP45C, Vaisala	$\pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$	2, 5, 10 m	30 min
	空气湿度	HMP45C, Vaisala	$\pm 3\%$	2, 5, 10 m	30 min
	降水	T-200B, Geonor	$\pm 0.1 \text{ mm}$	1.5 m	30 min
	雪深	SR50, Campbell	$\pm 1 \text{ cm}$	2 m	30 min
	短波辐射	CM3, Kipp&Zonen	$\pm 5\%$	2 m	30 min
	长波辐射	CG3, Kipp&Zonen	$\pm 10\%$	2 m	30 min
	土壤温度	105T, Campbell	$\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$	-5, -10, -20 cm	30 min
	土壤含水量	CS616, Campbell	$\pm 2.5\%$	-5, -10, -20 cm	30 min
	土壤热通量	HFP01SC, Hukseflux	$\pm 3\%$	-5, -10, -20 cm	30 min
	活动层	土壤温度	105T, Campbell	-5, -10, -20, -50, -70, -90, -105, -140, -175, -210, -240, -280, -300, -320, -360 cm	30 min

红外气体分析仪观测得到风速、温度、CO₂、H₂O 等数据,通过 EddyPro 软件对观测数据进行野点值去除、二次坐标旋转倾斜校正、频率响应校正、超声虚温的侧向风校正、WPL 修正、质量控制等得出感热和潜热^[18,25,33]。

气象梯度法是根据莫宁-奥布霍夫相似性理论,通过风速、位温、空气比湿廓线公式计算感热与潜热^[18,34],由于 2 m 和 5 m 的气象数据计算的结果质量较好,故本次研究中使用 2 m 和 5 m 的气象梯度数据。

SHAW 模型由 Flerchinger 等^[35](1989 年)开发,被广泛用于模拟土壤冻融过程中系统各层的水热特征和能量变化。它不仅考虑植被冠层、积雪覆盖、土壤层,还考虑了残留物层对土壤冻融的影响,因此不同于其他的陆面过程模型。总体上 SHAW 模型模拟的通量变化趋势与涡动观测值相一致,能较好地反映出唐古拉、西大滩地区湍流通量的变化(表 2)。

1.3.2 净辐射和地表土壤热通量

净辐射由气象塔观测的辐射四分量计算获得,即:净辐射=短波向下辐射-短波向上辐射+长波向下辐射-长波向上辐射;地表土壤热通量是通过 5 cm 土壤热通量和一维热传导方程线性插值获得^[21,31]。

1.3.3 地表冻融指数

根据 Frauenfeld 等^[36]和 Wu 等^[37]的相关约束条

表2 SHAW 模型湍流通量模拟效率参数
Table 2 Turbulent flux simulation performance statistics of SHAW model

站点	统计参数	感热/(W·m ⁻²)	潜热/(W·m ⁻²)
TGL	RMSE	22.36	32.53
	MAE	17.79	23.91
XDT	RMSE	16.64	35.19
	MAE	13.22	25.27

注: RMSE 为均方根误差, MAE 为平均绝对误差。

件,将每年 7 月 1 日至次年 6 月 30 日作为地表冻结指数计算周期,每年 1 月 1 日至 12 月 31 日作为地表融化指数计算周期,以确保整个冻结期和融化期的负温和正温均得到计算。由于观测场地植被稀疏低矮,地面温度由陆面温度近似获得,其中陆面温度是基于 Stefan-Boltzmann 定律利用向上和向下的长波辐射数据估算得出^[34]。

2 结果与讨论

2.1 气象要素变化特征

图 2 显示唐古拉和西大滩气温、地气温差、降水量、土壤含水量以及风速的年际变化及趋势,可以看出:唐古拉和西大滩两个站点的年平均气温分别以 0.03 °C·a⁻¹和 0.11 °C·a⁻¹的速率呈波动上升趋势。两站点的地气温差亦呈波动上升趋势且变化速率基本一致,升温率分别为 0.11 °C·a⁻¹和 0.10 °C·a⁻¹。唐古拉和西大滩年降水量均呈减小趋

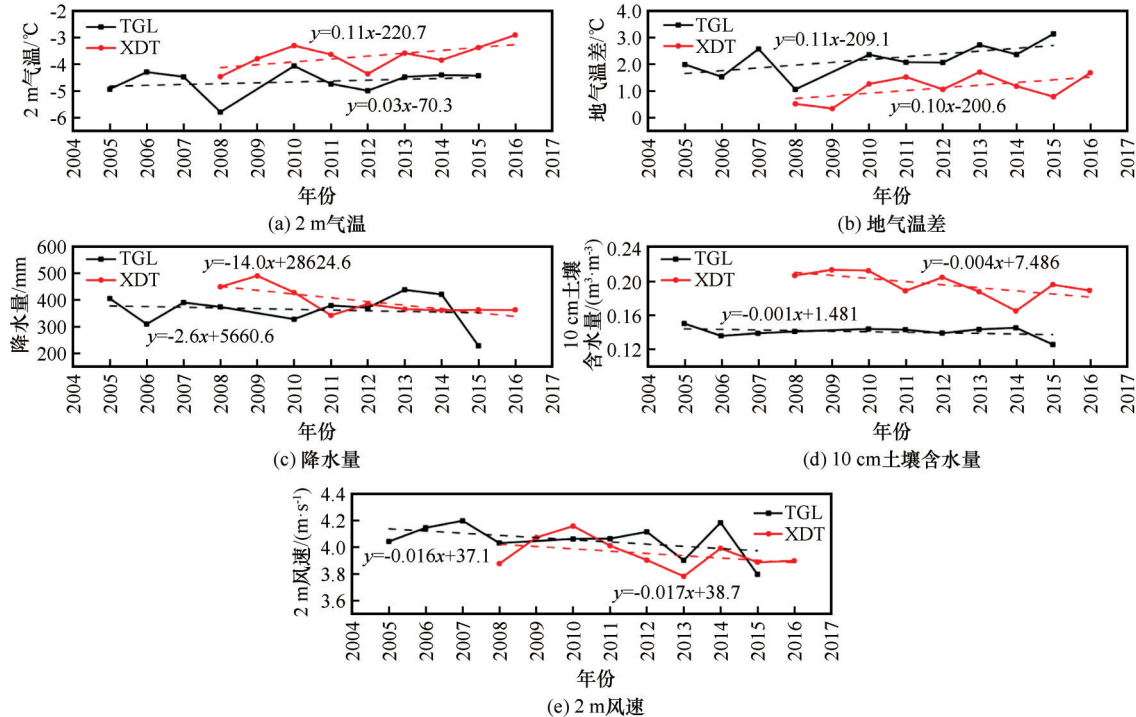


图2 2005—2016年唐古拉(TGL)和西大滩(XDT)各气象要素变化特征
Fig. 2 The variation characteristics of meteorological elements in Tanggula and Xidatan during 2005—2016

势,变化速率分别为 $-2.6\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $-14.0\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,唐古拉年降水量在2012年前变化较缓,随后变化剧烈,并在2015年出现最小值(226.9 mm);而西大滩年降水量在2012年前变化幅度较大,2012年后则趋于平缓。10 cm土壤含水量均有微弱减小,这与降水量变化密切相关。两站年均风速均呈下降趋势且变化速率相当,分别为 $-0.016\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $-0.017\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。总体上,唐古拉和西大滩站各气象要素呈现气温、地气温差在增加,降水量、10 cm土壤含水量和风速

在减少的趋势。这与先前在唐古拉和西大滩的研究结果基本一致^[32],但不同于高原整体降水量增加^[38-39]的已有研究结果,这与研究时段和区域范围的不同有关。

2.2 地表能量通量年际变化

图3为青藏高原多年冻土区唐古拉和西大滩净辐射、感热、潜热以及地表土壤热通量的年平均变化特征。由图可知,2005年以来两站净辐射均呈波动上升趋势,其中唐古拉上升趋势尤为明显,大

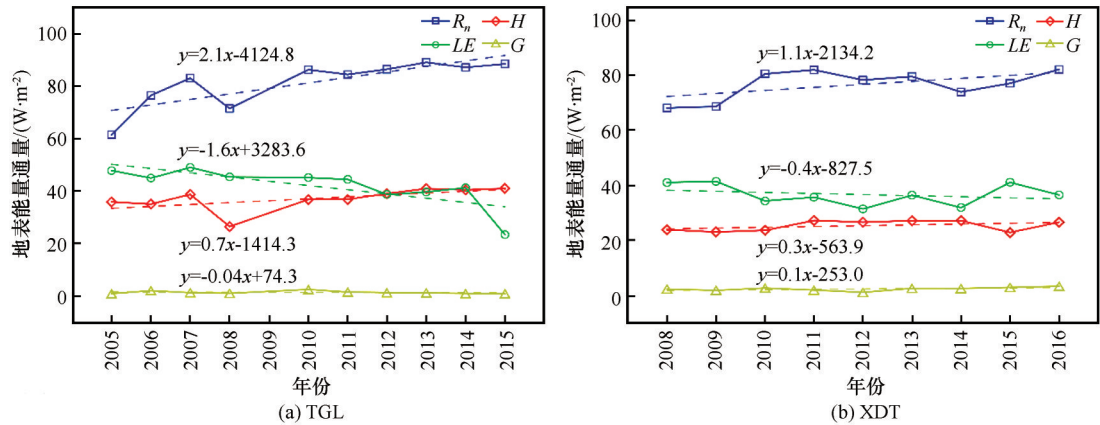


图3 2005—2016年唐古拉(TGL)和西大滩(XDT)年平均地表能量通量变化特征
(R_n 为净辐射, H 为感热, LE 为潜热, G 为地表土壤热通量,下同)

Fig. 3 The interannual variations of surface energy fluxes at TGL and XDT sites from 2005 to 2016 (R_n is net radiation, H is sensible heat flux, LE is latent heat flux, and G is ground soil heat flux, similarly below)

约每年增加 $2.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 西大滩净辐射平均每年增加 $1.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。唐古拉和西大滩感热随净辐射增加亦呈缓慢增加趋势。唐古拉感热 2008 年前缓慢升高, 受 2008 年净辐射、地气温差低值的影响, 感热在 2008 年迅速下降至 $26.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 随后又缓慢增加, 其变化速率为 $0.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 西大滩感热变化较平稳, 以 $0.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速率缓慢增加。两站潜热则呈下降趋势, 唐古拉下降趋势最明显, 平均每年可减少 $1.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 并在 2015 年降至最低值, 这与 2015 年降水量显著减少有关; 西大滩潜热下降趋势较缓, 平均每年仅减少 $0.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; 地表土壤热通量的变化幅度较小, 唐古拉地表土壤热通量平均每年减小 $0.04 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 虽呈微弱的减小趋势, 但其年均值均为正值, 表明能量由地表向下输送, 下层土壤吸热; 西大滩地表土壤热通量亦为正值且呈增加趋势, 平均每年增加 $0.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。总体上, 两站 2005 年以来净辐射、感热呈增大, 潜热呈减小, 地表土壤热通量呈不明显变化趋势。已有研究表明, 高原自 1980 年以来, 感热呈现减弱趋势^[7,40], 而在 2000 年后逐渐转变为增加趋势, 潜热逐渐转变为减小趋

势^[33,39,41-44], 这与本文研究结果一致。

两站地表能量通量与气象要素之间的相关关系基本一致(表 3)。净辐射与气温、地气温差均呈正相关, 其中与地气温差的相关性更好; 感热与净辐射相似, 与气温呈正相关, 但与地气温差的相关性更显著 ($P<0.01$), 相关系数分别为 0.883 和 0.768, 而潜热与降水量、10 cm 土壤含水量亦呈正相关关系, 与降水量的相关系数分别为 0.618 和 0.490, 与 10 cm 土壤含水量的相关系数为 0.736 ($P<0.05$) 和 0.435, 其中唐古拉潜热与降水量、10 cm 土壤含水量的相关性更显著。地表土壤热通量与气温的相关性较好, 相关系数分别为 0.500 和 0.753 ($P<0.05$)。积雪的高反照率和低导热率亦是影响地表能量通量的关键因素^[31], 研究表明, 高原积雪与感热呈显著负相关^[45], 且高原自 1990s 末积雪呈减少趋势^[46-47]。高原积雪的减少使得地表反照率减小, 短波辐射、地气温差增强, 可能进一步改变了由地气温差贡献的感热的变化^[45,48]。可以看出, 气候环境变化对地表能量通量有重要作用, 这是导致感热和潜热变化的原因之一。

表 3 地表能量通量与气象要素的相关系数
Table 3 The correlation coefficients between surface energy fluxes and meteorological elements

站点	能量通量/($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	气温/ $^{\circ}\text{C}$	地气温差/ $^{\circ}\text{C}$	降水/mm	10 cm 土壤含水量/($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$)	风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
TGL	R_n	0.524	0.642*	-0.155	-0.409	-0.161
	H	0.716*	0.883**	-0.013	-0.175	-0.151
	LE	-0.159	-0.577	0.618	0.736*	0.734*
	G	0.500	-0.171	-0.215	0.065	0.305
XDT	R_n	0.629	0.876**	-0.737*	-0.259	-0.043
	H	0.021	0.768*	-0.702*	-0.705*	-0.337
	LE	0.039	-0.580	0.490	0.435	-0.131
	G	0.753*	0.335	-0.261	-0.317	-0.117

注: *和**分别代表通过了 0.05 和 0.01 的显著性检验。

2.3 地表能量通量季节变化

图 4 为 2011 年唐古拉、西大滩日平均地表能量通量的变化状况, 由图 4 可看出两站地表能量通量的年内变化趋势基本一致。冬季净辐射较小, 土壤含水量较小, 此时净辐射主要转化为感热, 潜热相对较小; 春季净辐射增大, 土壤开始融化, 植被有所生长, 但土壤含水量还较低, 使得感热迅速增大并在 4 月达到最大值, 两站感热最大日均值分别为 $102.9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $74.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 此时潜热较小。夏秋季唐古拉、西大滩净辐射日均值达到最大值, 分别为 $216.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $231.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 随着季风爆发, 降

水量明显增多, 两站 5—10 月份降水量占全年的 92% 以上, 土壤含水量迅速增加, 植被生长旺盛, 地表蒸发强烈, 潜热迅速增大, 并在 7 月份达到最大值, 而感热则有所减小。地表土壤热通量与净辐射变化相似, 但其变化幅度较小。

对比两站结果可知(表 4): 2011 年唐古拉净辐射、感热和潜热年均值均高于西大滩, 而地表土壤热通量年均值低于西大滩。唐古拉和西大滩净辐射年均值分别为 $84.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $82.1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 前者略高于后者, 原因在于唐古拉海拔高于西大滩, 而纬度低于西大滩, 其全年接收到的太阳辐射较西大滩

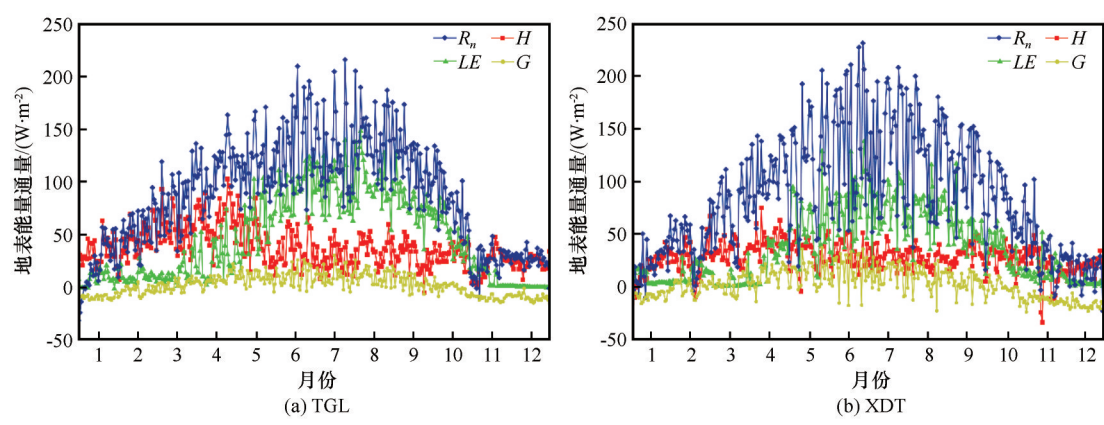


图4 2011年唐古拉(TGL)和西大滩(XDT)地表能量通量日平均变化
Fig. 4 The diurnal average variations of surface energy fluxes at TGL and XDT in 2011

表4 2011年唐古拉(TGL)和西大滩(XDT)地表能量通量季节特征
Table 4 The seasonal characteristics of surface energy fluxes at TGL and XDT

站点	季节	$R_n/(W\cdot m^{-2})$	$H/(W\cdot m^{-2})$	$LE/(W\cdot m^{-2})$	$G/(W\cdot m^{-2})$
TGL	冬季	30.8	36.0	8.6	-8.0
	春季	101.4	54.5	33.1	6.1
	夏季	135.5	33.5	95.1	10.7
	秋季	68.5	27.1	42.6	-2.7
	年均	84.4	36.9	44.5	1.7
XDT	冬季	26.7	19.1	7.6	-7.1
	春季	98.4	36.4	29.9	8.5
	夏季	134.9	28.6	73.3	12.6
	秋季	69.7	23.9	31.2	-4.7
	年均	82.1	27.3	35.7	1.9

注：冬季为2010年12月至2011年2月。

多;此外,2011年夏秋季西大滩积雪日较多,占全年积雪日的50%,导致西大滩净辐射波动剧烈;而唐古拉积雪日相对较少,波动较小,因而唐古拉净辐射年均值较大。唐古拉和西大滩感热年均值分别为36.9 W·m⁻²和27.3 W·m⁻²。感热主要受地气温差影响,地气温差越大,感热越大。唐古拉地气温差年均值为2.1℃,西大滩为1.5℃,唐古拉地气温差高于西大滩,从而导致唐古拉感热相对较大。两站潜热年均值分别为44.5 W·m⁻²和35.7 W·m⁻²,唐古拉潜热年均值高于西大滩。分析发现潜热与降水量密切相关,降水量越多,地表蒸发作用越强,潜热越大。唐古拉2011年降水量为377.9 mm,西大滩2011年降水量为341.1 mm,唐古拉年降水量更多,地表蒸发作用更强,因而潜热相对更大。唐古拉地表土壤热通量年均值较低于西大滩,两站年均值分别为1.7 W·m⁻²和1.9 W·m⁻²。这是由于两站土壤导热率相差不大,而西大滩土壤温度梯度大于唐古拉,2~10 cm年平均温度梯度绝对值分别为

6.1℃·m⁻¹和1.6℃·m⁻¹,因此西大滩地表土壤热通量大于唐古拉。以上分析表明:唐古拉和西大滩地表能量通量年内变化趋势基本一致,湍流通量冬春季主要以感热为主,夏秋季节主要以潜热为主。海拔、纬度、坡向、土壤冻融过程、积雪、降水、植被等因素对多年冻土区地表能量分配有重要影响。

2.4 地表能量收支与活动层变化

2.4.1 土壤热通量对地表冻融指数的影响

地表土壤热通量是影响下伏土壤水热变化最重要的能量,直接作用于活动层,影响冻融过程,最直观的反映就是土壤温度的变化^[49]。唐古拉地表温度由2005年的-2.9℃升高到2015年的-1.3℃,升高了1.6℃;西大滩地表温度由2008年的-4.0℃升高到2016年的-1.2℃,升高了2.8℃,两站地表温度均有明显升高。通过计算唐古拉、西大滩地表冻融指数可知(图5):2005—2016年两站冻结指数均呈显著下降趋势,变化速率分别为-41.7℃·d·a⁻¹和-36.1℃·d·a⁻¹。两站融化指数均

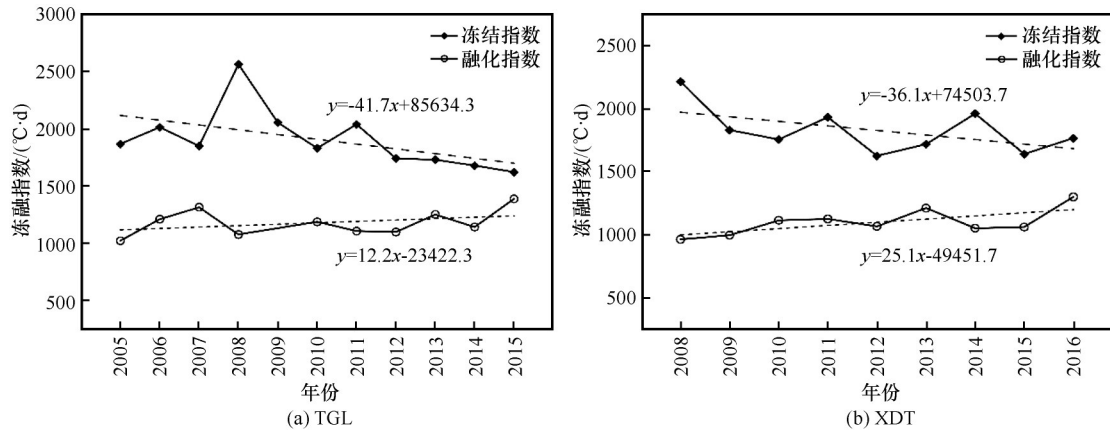


图5 唐古拉(TGL)和西大滩(XDT)地表冻融指数变化

Fig. 5 The variations of surface freezing-thawing indices in TGL and XDT

呈缓慢上升趋势,增长速率分别为 $12.2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $25.1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

图6为两站地表冻融指数与地表土壤热通量的相关性,可看出两站地表冻结指数均随地表土壤热通量的增加而减少,融化指数均随地表土壤热通量的增加而增加。地表土壤热通量越大,土壤吸收的能量越多,土壤温度逐渐升高,负值逐日温度绝对

值减小,正值逐日温度绝对值增大,从而导致冻结指数下降,融化指数上升。相比较而言,西大滩地表融化指数与地表土壤热通量的相关性更好,这与土壤温度梯度密切相关。土壤热通量与温度梯度成正比,温度梯度越大,土壤热通量越大。西大滩土壤温度梯度较唐古拉大,地表土壤热通量较高,与融化指数关系更好。

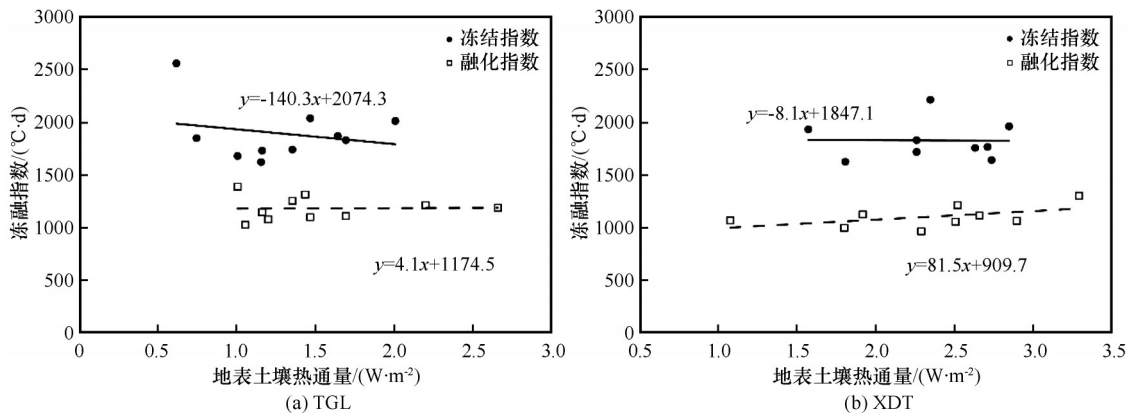


图6 唐古拉和西大滩地表冻融指数与地表土壤热通量的相关

Fig. 6 Correlations between surface freezing-thawing indices and surface soil heat flux at the Tanggula and Xidatan sites

2.4.2 土壤热通量对活动层的影响

图7为唐古拉和西大滩活动层厚度变化以及活动层厚度与地表土壤热通量的相关性,可以看出两站活动层厚度均呈增加趋势,且随着地表土壤热通量的增大而增厚。2006—2015年唐古拉活动层厚度显著增加,由328 cm增加到404 cm,平均每年增加8.9 cm。而西大滩活动层厚度增加速率较缓,由121.2 cm增加到133.1 cm,平均每年仅增加1.6 cm。这是由于西大滩站点位于高原多年冻土区北部边界,多年冻土温度较高,土壤内部水热交换较强,较多的能

量消耗在土壤水分相变热过程中,从而导致其厚度增加缓慢^[32],与现有研究得出低温多年冻土区较高温多年冻土区活动层厚度变化明显的结论相一致^[16]。唐古拉和西大滩的活动层厚度均随着地表土壤热通量的增大而增厚,这表明土壤热通量与活动层厚度之间关系密切。Li等^[50]的研究也表明土壤热通量与活动层厚度之间呈正相关,并统计得出青藏公路两侧土壤热通量增加 $1\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,活动层厚度增加24 cm。

图8为融化期间地表土壤热通量积累量与活动层融化深度的变化,可以看出活动层融化深度

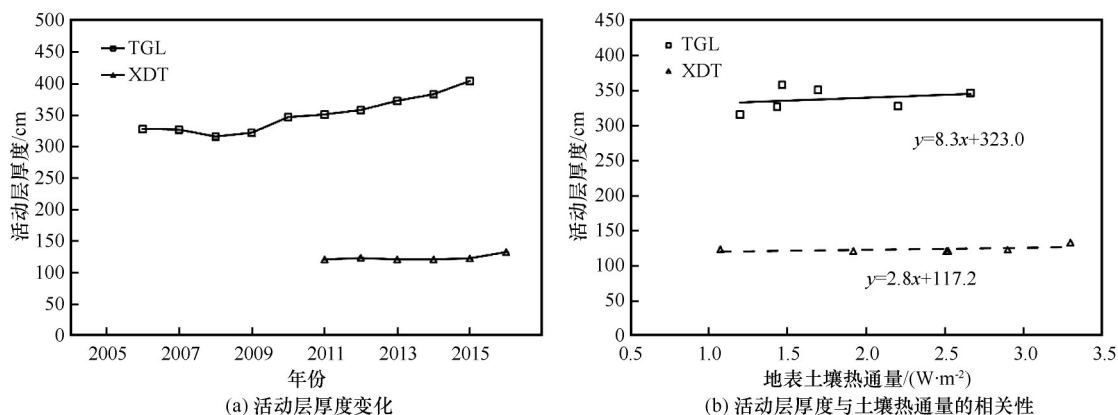


图7 唐古拉(TGL)和西大滩(XDT)活动层厚度变化以及活动层厚度与土壤热通量的相关性
Fig. 7 The variations of the active layer thickness and correlations between the active layer thickness and soil heat flux at the TGL and XDT sites

随着地表土壤热通量积累量的增大而加深,土壤热通量积累量越大,活动层融化深度越深,两者之间存在显著的线性关系。对比两站结果可知,西大滩土壤水热交换较强,使得土壤热通量积累量

与融化深度之间的斜率较小。以往的研究也表明不同下垫面活动层融化深度随地表能量的积累而增大,也可用乘幂关系来表示两者之间的关系^[10,49]。

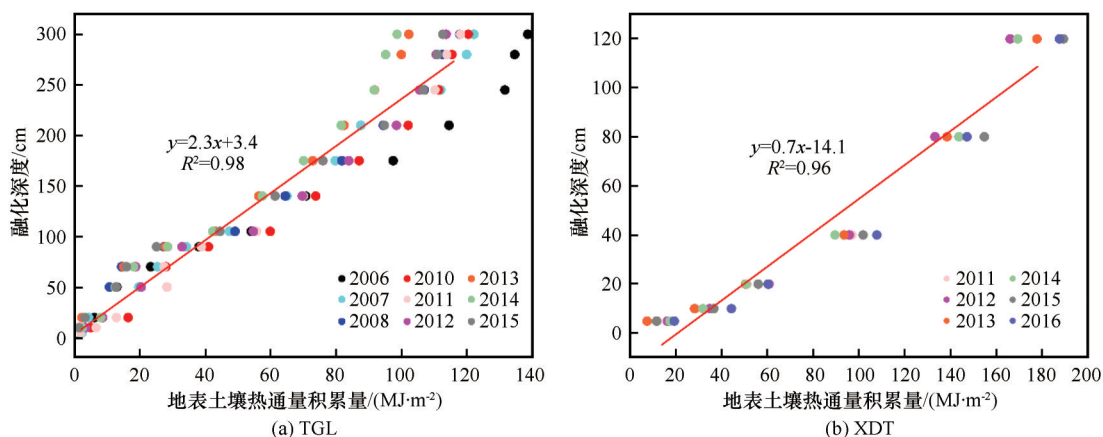


图8 地表土壤热通量积累量对活动层融化深度的影响(融化期间)
Fig. 8 The impact of surface soil heat flux on the active layer thawing depth

总之,地表能量收支过程与多年冻土活动层水热过程相互作用,互为影响。一方面,地表土壤热通量是影响活动层水热变化的重要能量项,地表土壤热通量的增加,会使得地表融化指数增大,冻结指数减小,与此同时活动层厚度加深,活动层融化深度与土壤热通量积累量呈线性变化趋势。另一方面,多年冻土活动层的季节冻结和融化过程会改变土壤的水热传性质。当土壤冻结时,水力传导系数急剧下降,由于冰的热传导率大约是水的4倍,土壤的热特性也随之改变。活动层冻融循环过程中,秋冬季水分冻结放热而春夏季冰融化吸热减小地表土壤温度的年变幅,同时影响地表雨水和雪融

水的入渗^[51]。其相变导致液态水分的变化进而影响到土壤蒸发和植被蒸腾,乃至生态环境。而地表参数,例如,植被、积雪等^[48,52]的改变又会作用于地表能量收支过程。随着气候变暖,地表土壤热通量增大,活动层厚度加深,每年会有越来越多的水热相变参与到活动层冻融循环中,多年冻土在气候系统中的调节作用也会越来越强。

3 结论

通过分析高原多年冻土区地表能量通量长时间变化规律及其对活动层的影响,初步得到以下主要结论:

(1)唐古拉和西大滩气温、地气温差在 2005—2016 年呈升高趋势,而降水量、10 cm 土壤含水量、风速呈减少趋势。

(2)年际尺度上,唐古拉和西大滩气温和地气温差的增加对净辐射与感热的增强有所贡献,而降水量的减少导致潜热减弱。季节上,唐古拉和西大滩冬春季节主要以感热为主,夏秋季节主要以潜热为主,其变化主要受到海拔、纬度、坡向、土壤冻融过程、降水、植被以及积雪等因素的影响。

(3)能量收支过程是活动层厚度变化的重要影响因子。随着地表土壤热通量增大,地表土壤热通量积累量增多,土壤温度升高,地表融化指数增大,冻结指数减小,活动层厚度加深,融化期间地表土壤热通量积累量与活动层融化深度呈线性变化。

参考文献(References):

- [1] Qiu J. China: the third pole[J]. *Nature*, 2008, 454(7203): 393-396.
- [2] Immerzeel W W, Bierkens M F P. Asian water towers: more on monsoons—response[J]. *Science*, 2010, 330(6004): 585.
- [3] Gu Lianglei, Yao Jimin, Hu Zeyong, et al. Comparison of the surface energy budget between regions of seasonally frozen ground and permafrost on the Tibetan Plateau[J]. *Atmospheric Research*, 2015, 153: 553-564.
- [4] Yanai M, Li Chengfeng, Song Zhengshan. Seasonal heating of the Tibetan Plateau and its effects on the evolution of the Asian summer monsoon[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 1992, 70(1B): 319-351.
- [5] Ye Duzheng, Wu Guoxiong. The role of the heat source of the Tibetan Plateau in the general circulation[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1998, 67(1/2/3/4): 181-198.
- [6] Duan Anmin, Wu Guoxiong, Liu Yimin, et al. Weather and climate effects of the Tibetan Plateau[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2012, 29(5): 978-992.
- [7] Yang Kun, Wu Hui, Qin Jun, et al. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: A review [J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 112: 79-91.
- [8] Zou Defu, Zhao Lin, Sheng Yu, et al. A new map of permafrost distribution on the Tibetan Plateau [J]. *The Cryosphere*, 2017, 11(6): 2527-2542.
- [9] Pavlov A V. Current changes of climate and permafrost in the Arctic and sub-Arctic of Russia[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1994, 5(2): 101-110.
- [10] Ma Junjie, Li Ren, Liu Hongchao, et al. The surface energy budget and its impact on the freeze-thaw processes of active layer in permafrost regions of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2022, 39(1): 189-200.
- [11] Ma Di, Luo Siqiong, Guo Donglin, et al. Simulated effect of soil freeze-thaw process on surface hydrologic and thermal fluxes in frozen ground region of the Northern Hemisphere[J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2021, 13(1): 18-29.
- [12] Ge Jun, Yu Ye, Li Zhenchao, et al. Impacts of freeze/thaw processes on land surface energy fluxes in the permafrost region of Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(3): 608-620. [葛骏, 余晔, 李振朝, 等. 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*, 2016, 35(3): 608-620.]
- [13] Chen Boli, Luo Siqiong, Lü Shihua, et al. Land surface characteristics in soil freezing and thawing process on the Tibetan Plateau based on community land model[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(4): 760-770. [陈渤黎, 罗斯琼, 吕世华, 等. 基于 CLM 模式的青藏高原土壤冻融过程陆面特征研究[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(4): 760-770.]
- [14] 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.]
- [15] Ding Yongjian, Zhang Shiqiang, Wu Jinkui, et al. Recent progress on studies on cryospheric hydrological processes changes in China[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5): 690-702. [丁永建, 张世强, 吴锦奎, 等. 中国冰冻圈水文过程变化研究新进展[J]. *水科学进展*, 2020, 31(5): 690-702.]
- [16] Cheng Guodong, Zhao Lin, Li Ren, et al. Characteristic, changes and impacts of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2783-2795. [程国栋, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响[J]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2783-2795.]
- [17] Ma Yaoming, Su Zhongbo, Koike T, et al. On measuring and remote sensing surface energy partitioning over the Tibetan Plateau: from GAME/Tibet to CAMP/Tibet [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2003, 28(1/2/3): 63-74.
- [18] Yao Jimin, Zhao Lin, Ding Yongjian, et al. Surface energy budget in the Tanggula region on the Tibetan Plateau, 2005 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(1): 119-124. [姚济敏, 赵林, 丁永建, 等. 2005 年青藏高原唐古拉地区地表能量收支状况分析[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(1): 119-124.]
- [19] Zhou Youwu, Qiu Guoqing, Guo Dongxin, et al. *Geocryology in China*[M]. Beijing: Science Press, 2000: 1-62. [周幼吾, 邱国庆, 郭东信, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-62.]
- [20] Li Ren, Zhao Lin, Ding Yongjian, et al. The effect of global radiation budget on seasonal frozen depth in the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(3): 422-430. [李韧, 赵林, 丁永建, 等. 青藏高原总辐射变化对高原季节冻土冻结深度的影响[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(3): 422-430.]
- [21] Yao Jimin, Zhao Lin, Gu Lianglei, et al. The surface energy budget in the permafrost region of the Tibetan Plateau [J]. *Atmospheric Research*, 2011, 102(4): 394-407.
- [22] Xiao Yao, Zhao Lin, Li Ren, et al. Seasonal variation characteristics of surface energy budget components in permafrost regions of northern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(5): 1033-1039. [肖瑶, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原腹地高原多年冻土区能量收支各分量的季节变化特征[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(5): 1033-1039.]
- [23] Yang Meixue, Yao Tandong, Hirose Nozomu, et al. Diurnal freeze-thaw cycles of the ground surface on the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(16): 1974-1976. [杨梅学, 姚檀栋, Hirose Nozomu, 等. 青藏高原表层土壤的日冻融循环[J]. *科学通报*, 2006, 51(16): 1974-1976.]

- [24] Zhang Mingli, Wen Zhi, Xue Ke, et al. Surface energy budget analysis in permafrost region of Beiluhe area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(9): 134-138. [张明礼, 温智, 薛珂, 等. 北麓河地区多年冻土地表能量收支分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(9): 134-138.]
- [25] Liu Yitian, Yao Jimin, Zhao Lin, et al. Surface energy processes during freeze-thaw cycle in Tanggula permafrost region of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(4): 1073-1082. [刘艺阆, 姚济敏, 赵林, 等. 青藏高原唐古拉多年冻土区冻融循环过程中的能量平衡特征[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(4): 1073-1082.]
- [26] Zhang Guoqing, Yao Tandong, Xie Hongjie, et al. Estimating surface temperature changes of lakes in the Tibetan Plateau using MODIS LST data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(14): 8552-8567.
- [27] Kuang Xingxing, Jiao J J. Review on climate change on the Tibetan Plateau during the last half century[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(8): 3979-4007.
- [28] Hu Guojie, Zhao Lin, Wu Xiaodong, et al. Evaluation of reanalysis air temperature products in permafrost regions on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 138(3/4): 1457-1470.
- [29] Duan Anmin, Xiao Zhixiang, Wu Guoxiong. Characteristics of climate change over the Tibetan Plateau under the global warming during 1979—2014[J]. *Climate Change Research*, 2016, 12(5): 374-381. [段安民, 肖志祥, 吴国雄. 1979—2014年全球变暖背景下青藏高原气候变化特征[J]. *气候变化研究进展*, 2016, 12(5): 374-381.]
- [30] Zhao Lin, Zou Defu, Hu Guojie, et al. Changing climate and the permafrost environment on the Qinghai-Tibet (Xizang) Plateau[J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2020, 31(3): 396-405.
- [31] Yao Jimin, Gu Lianglei, Yang Cheng, et al. Estimation of surface energy fluxes in the permafrost region of the Tibetan Plateau based on *in situ* measurements and the surface energy balance system model[J]. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(13): 5783-5800.
- [32] Zhao Lin, Zou Defu, Hu Guojie, et al. A synthesis dataset of permafrost thermal state for the Qinghai - Tibet (Xizang) Plateau, China[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 4207-4218.
- [33] Zheng Huixuan, Hu Zeyong, Sun Genhou, et al. The bulk transfer coefficient and characteristics of surface heat source on alpine grassland at Naqu[J]. *Plateau Meteorology*, 2019, 38(3): 497-506. [郑汇璇, 胡泽勇, 孙根厚, 等. 那曲高寒草地总体输送系数及地面热源特征[J]. *高原气象*, 2019, 38(3): 497-506.]
- [34] Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. *Atmospheric physics*[M]. Beijing: Peking University Press, 2003: 62-250. [盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. *大气物理学*[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 62-250.]
- [35] Flerchinger G N, Saxton K E. Simultaneous Heat and Water Model of a freezing snow-residue-soil system I. theory and development[J]. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(2): 565-571.
- [36] Frauenfeld O W, Zhang Tingjun, McCreight J L. Northern Hemisphere freezing/thawing index variations over the twentieth century[J]. *International Journal of Climatology*, 2007, 27(1): 47-63.
- [37] Wu Tonghua, Zhao Lin, Li Ren, et al. Recent ground surface warming and its effects on permafrost on the central Qinghai-Tibet Plateau[J]. *International Journal of Climatology*, 2013, 33(4): 920-930.
- [38] Yang Kun, Ye Baisheng, Zhou Degang, et al. Response of hydrological cycle to recent climate changes in the Tibetan Plateau[J]. *Climatic Change*, 2011, 109(3): 517-534.
- [39] Xie Jin, Yu Ye, Liu Chuan, et al. Characteristics of surface sensible heat flux over the Qinghai-Tibetan Plateau and its response to climate change[J]. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(1): 28-42. [解晋, 余晔, 刘川, 等. 青藏高原地表感热通量变化特征及其对气候变化的响应[J]. *高原气象*, 2018, 37(1): 28-42.]
- [40] Duan Anmin, Wu Guoxiong. Weakening trend in the atmospheric heat source over the Tibetan Plateau during recent decades. part I: observations[J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(13): 3149-3164.
- [41] Yan Xiaoqiang, Hu Zeyong, Sun Genhou, et al. Characteristics of long-term surface heat source and its climate influence factors in Nagqu alpine meadow[J]. *Plateau Meteorology*, 2019, 38(2): 253-263. [严晓强, 胡泽勇, 孙根厚, 等. 那曲高寒草地长时间地面热源特征及其气候影响因子分析[J]. *高原气象*, 2019, 38(2): 253-263.]
- [42] Yu Wei, Liu Yimin, Yang Xiuqun, et al. The interannual and decadal variation characteristics of the surface sensible heating at different elevations over the Qinghai-Tibetan Plateau and attribution analysis[J]. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(5): 1161-1176. [于威, 刘屹岷, 杨修群, 等. 青藏高原不同海拔地表感热的年际和年代际变化特征及其成因分析[J]. *高原气象*, 2018, 37(5): 1161-1176.]
- [43] Wang Huan, Li Dongliang. Impacts of decadal variability in sensible heat over the Tibetan Plateau on decadal transition of summer precipitation over dominant regions of monsoon rainfall band in Eastern China since the early 2000s[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(2): 412-426. [王欢, 李栋梁. 21世纪初青藏高原感热年代际增强对中国东部季风雨带关键区夏季降水年代际转折的影响[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(2): 412-426.]
- [44] Zhang Lu, Wang Hui, Shi Xingdong, et al. Characteristics and causes of surface sensible heat trend transition in central and eastern Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2020, 39(5): 912-924. [张璐, 王慧, 石兴东, 等. 青藏高原中东部地表感热趋势转折特征及成因分析[J]. *高原气象*, 2020, 39(5): 912-924.]
- [45] Fan Guangzhou, Lü Shihua, Hua Wei, et al. New progress in the study of the land-atmosphere interaction and its effect over the Tibetan Plateau[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2021, 11(4): 64-71. [范广洲, 吕世华, 华维, 等. 青藏高原地-气水热交换特征及影响研究综述[J]. *气象科技进展*, 2021, 11(4): 64-71.]
- [46] Wang Ting, Li Zhaoguo, Lü Shihua, et al. Study on the effects of snow cover on heat transport in land surface processes over Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2019, 38(5): 920-934. [王婷, 李照国, 吕世华, 等. 青藏高原积雪对陆面过程热量输送的影响研究[J]. *高原气象*, 2019, 38(5): 920-934.]
- [47] Xu Wenfang, Ma Lijuan, Ma Minna, et al. Spatial - temporal variability of snow cover and depth in the Qinghai - Tibetan Plateau[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(4): 1521-1533.
- [48] Wang Hui, Zhang Lu, Shi Xingdong, et al. Some new changes of the regional climate on the Tibetan Plateau since 2000[J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(8): 785-796. [王慧, 张璐, 石兴东, 等. 2000年后青藏高原区域气候的一些新变化

- [J]. 地球科学进展, 2021, 36(8): 785-796.]
- [49] Li Ren, Zhao Lin, Ding Yongjian, et al. Impact of surface energy variation on thawing processes within active layer of permafrost[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1235-1242. [李韧, 赵林, 丁永建, 等. 地表能量变化对多年冻土活动层融化过程的影响[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1235-1242.]
- [50] Li Ren, Zhao Lin, Ding Yongjian, et al. Temporal and spatial variations of the active layer along the Qinghai-Tibet Highway in a permafrost region[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(35): 4609-4616.
- [51] Sun Shufen. Parameterization Study of Physical and Biochemical Mechanism in Land Surface Processes[M]. Beijing: China Meteorology Press, 2005: 1-73. [孙淑芬. 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, 2005: 1-73.]
- [52] Li Wenjing, Luo Siquong, Hao Xiaohua, et al. Observations of east Qinghai-Xizang Plateau snow cover effects on surface energy and water exchange in different seasons[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(3): 455-471. [李文静, 罗斯琼, 郝晓华, 等. 青藏高原东部不同季节积雪过程对地表能量和土壤水热影响的观测研究[J]. 高原气象, 2021, 40(3): 455-471.]

The surface energy budget process and preliminary analysis of its impact on the active layer in the permafrost region of the Qinghai-Tibet Plateau

LIU Jinke^{1,2}, YAO Jimin¹, GU Lianglei³, LI Ren¹, WU Xiaodong¹, WU Tonghua¹,
XIE Changwei¹, ZOU Defu¹, QIAO Yongping¹, HU Guojie¹,
XIAO Yao¹, SHI Jianzong¹

(1. Cryosphere Research Station on the Qinghai-Tibet Plateau, State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. 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, China)

Abstract: Based on the data observed from the meteorology gradient tower, eddy covariance system and the active layer from 2005 to 2016 at the Tanggula (TGL) and Xidatan (XDT) sites in the permafrost region of the Qinghai-Tibet Plateau, the long-term variations of surface energy fluxes and its impact on the active layer under the background of climate change were analyzed by using the eddy covariance method, the gradient method and the Simultaneous Heat and Water (SHAW) model. The results were as follows: From 2005 to 2016, the air temperature and the air-ground temperature difference increased, while the annual precipitation, the 10 cm soil moisture and the wind speed decreased at the Tanggula and Xidatan sites. The net radiation and sensible heat flux showed an increasing trend, while the latent heat flux showed a decreasing trend, the surface soil heat flux had no obvious change. The seasonal variations of surface energy fluxes were obvious in Tanggula and Xidatan, but there are regional differences in energy fluxes due to the influence of altitude, latitude, aspect, surface freezing-thawing process, precipitation and underlying surface conditions. In Tanggula and Xidatan, the surface freezing indices were negatively correlated with soil heat flux, while the thawing indices and the active layer thickness were positively correlated with soil heat flux. The surface soil heat flux accumulation was linearly increasing with the thawing depth.

Key words: interannual variation; meteorological elements; surface energy budget; surface freezing/thawing index; the active layer thickness; Qinghai-Tibet Plateau

(责任编辑: 李双洋)