

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0037

Zhuoga, Luobu, Basang Quzhen. Distribution characteristics of soil temperature and moisture in the middle region of Nagqu over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(6):1704-1717. [卓嘎, 罗布, 巴桑曲珍. 青藏高原那曲中部土壤温湿分布特征[J]. 冰川冻土, 2021, 43(6):1704-1717.]

青藏高原那曲中部土壤温湿分布特征

卓嘎^{1,2,3}, 罗布⁴, 巴桑曲珍⁵

(1. 中国气象局成都高原气象研究所拉萨分部, 西藏拉萨 850000; 2. 青藏高原大气环境科学研究所, 西藏拉萨 850000;
3. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川成都 610072; 4. 西藏自治区气象台,
西藏拉萨 850000; 5. 林芝市气象局, 西藏林芝 860000)

摘要: 青藏高原土壤水热状况对气候变化和植被退化方面的研究具有重要意义, 土壤湿度的准确刻画还会影响到数值预报模式对当地及其下游地区降水的模拟能力。为此, 采用中国科学院那曲高寒气候环境观测研究站安多观测点2014年1—12月的土壤温度、土壤湿度观测资料以及同期安多气象站观测数据, 分析了青藏高原那曲中部不同深度土壤温湿度的分布特征及其与气温、降水量等气象要素的关系。结果表明: 土壤温度在浅层为正弦曲线, 随着土壤深度的增加, 曲线逐渐接近直线。土壤升温迅速而降温过程缓慢。封冻和解冻日期随土壤深度的增加而推迟, 封冻期逐渐缩短。不同层次土壤湿度日内变化较小。月变化呈单峰型结构, 峰值和谷值基本出现在8月和12月。土壤湿度上升速率较下降速率缓慢。区域尺度上GLDAS-NOAH资料显示出类似的变化特征。土壤湿度在一年中的变化不一致, 但土壤温湿度呈显著正相关。浅层土壤的温度梯度明显大于深层; 浅层土壤湿度最大, 中间层较大, 深层土壤湿度最小。随着干季向湿季的转换, 由于太阳辐射的增加, 非绝热加热呈增加的趋势。土壤湿度与气象要素在不同时段的相关性存在一些差异, 但总体上土壤湿度与气温、降水量和相对湿度呈正相关, 与风速、日照时数相关性不显著。

关键词: 青藏高原; 土壤温湿度; 分布特征

中图分类号: S152 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)06-1704-14

0 引言

青藏高原独特的高寒环境已经成为影响东亚乃至全球气候系统的重要因素。高原地区分布着范围较广的多年冻土、冰川、湖泊以及河流。在陆-气相互作用中, 作为连接陆地与大气之间的浅层地表土壤水热状况对大气环流、气候变化、高原热力效应、植被退化以及冻土退化等方面具有重要作用^[1]。其中, 土壤湿度在气候变化中的作用仅次于甚至超过了SST(海表面温度)的作用^[2]。气候变化也通过陆-气相互作用对土壤温湿度的变化特征产生深刻的影响, 尤其在高原积雪融化和土壤冻融的季节, 季节性冻融过程直接影响着高原地气间的能

量和水分循环^[3]。因此, 研究青藏高原地区土壤中水分与热量传输, 对进一步认识陆-气相互作用和短期气候预测具有重要意义。

部分野外观测站点的建立、卫星遥感反演技术以及数值模式的发展, 极大地促进土壤温湿度时空分布特征及其与区域气候变化相互关系的认识。青藏高原地区平均土壤温度比周边地区低, 北部比南部低^[4]。杨梅学等^[5-7]分析了高原中部那曲附近的土壤温湿度时空变化特征, 认为土壤湿度在季节转换中具有一定作用^[8]。土壤温度由地表向深层逐渐呈滞后效应, 随着土壤深度的增加, 其振幅减小, 相位滞后^[9]。羌塘高原南部土壤温度与土壤含水量

收稿日期: 2019-12-04; 修订日期: 2020-06-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41765012); 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室开放基金项目(SZKT201907); 2019年西藏自治区科技计划项目“西藏主要地表特征科学考察及研究”; 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0103; 2019QZKK0304)资助

作者简介: 卓嘎, 正高级工程师, 主要从事青藏高原气候变化及其影响研究. E-mail: zhuoga2013@yahoo.com

的变化趋势具有一致性^[10],且冻融过程对土壤温度有着显著的调节作用。对于青藏高原的土壤湿度而言,高湿区域基本位于高原南部^[11-13],存在外围土壤相对较湿、中部较干的特征,这可能与高原南部边缘的降水较多有关。不同替代资料^[14-16]的分析结果也表明高湿区域基本位于高原南部,土壤湿度大值区由东南向西北递减。高原中、东部的表层土壤湿度呈正弦曲线,深层几乎无变化,土壤湿度日振幅随深度的增加而逐渐衰减,高原主体土壤湿度随着土壤温度的上升而显著增加^[17-19]。王澄海等^[20]进一步探讨了土壤湿度在冻融条件下与高原干湿季转换和湿季降水的联系,而张娟等^[21]对青藏高原高寒草甸生态系统进行了土壤水热变化研究。

许多学者对土壤湿度的卫星产品和再分析资料在高原地区的适用性做了细致分析。Yang等^[22]、Lu等^[23]、Qin等^[24]认为陆面同化系统和陆面模式能较好地反映青藏高原近地面层的土壤湿度区域状况。Su等^[25]认为 AMSR-E 产品在青藏高原寒冷地区和非冻融期的使用表现出很大的不确定性。但是,反演算法的改进使得 AMSR-E 土壤湿度产品更加接近实测值^[26]。Van der Velde等^[27]发现在高原地区反演资料 SSM/I RETRIEVALS 比 AMSR-E 效果好。SMAP、ESA CCISM 产品^[28-29]与实测土壤湿度接近且优于陆面模式结果。此外,陆面同化数据产品 GLDAS^[30]低估了高原中部表层土壤湿度,并且显示出青藏高原土壤湿度空间分布与降水有一定程度的不一致^[31]。师春香等^[32]认为 CLDAS2.0 的大气驱动数据,使用 NOAH-MP 陆面模式能够很好地模拟中国区域土壤湿度的时间变化。借助数值模式,王澄海等^[33-34]、张世强等^[35]、赵林等^[36]较好地模拟出了高原陆面的土壤温湿度特征以及土壤水热过程,发现模拟值与实测值存在一定差别。陈海山等^[37]、熊明明等^[38]、丁旭^[39]检验和评估了 CLM3.0 模式对高原土壤温湿度的模拟能力。

研究表明,土壤湿度在蒸发过程中的持续性对全球范围内的温度、降水都有显著影响^[2,40]。周玉淑等^[41]揭示了青藏高原不同层次地温异常产生的低频波,可能会影响长江中下游地区的降水。春季的感热加热异常信号可能通过土壤温度和湿度的“记忆”以及非绝热加热局地环流的正反馈过程得到维持,并影响夏季的气候^[42]。Namias^[43]最早发现土壤湿度的季节性异常对大气的季节变化有重要作用。Rowntree等^[44]指出干(湿)土壤可使未来气

温升高(降低)、降水减少(持续)。Yeh等^[45]认为增加土壤含水量将使降水增加,气温降低。Chow等^[46]认为高原春季土壤偏湿,夏季长江流域降水增加,南部降水减少,而王瑞等^[47]指出高原春季土壤偏湿,使得华北和华南多雨,江淮少雨。卓嘎等^[12]认为高原春季土壤湿度与长江中下游降水基本呈负相关。左志燕等^[48]给出了土壤湿度影响局地降水的物理机制,认为土壤湿度对局地降水存在相反的影响。李登宣等^[49]指出高原不同地区、不同深度春季土壤湿度与中国东部夏季降水的相关特征不同。这些研究均表明高原土壤湿度的气候效应具有显著的区域性。

综上所述,以往多数研究采用再分析数据或者卫星产品探讨青藏高原土壤温湿度产品适用性及其对中国东部降水的数值模拟和影响,从观测事实上来分析青藏高原土壤水热变化特征及其与气候关系的研究相对较少,尤其对高原腹地土壤温湿度的不同时间尺度、不同层次特征及其水热结构、土壤湿度与热量通量变化等缺乏分析。为此,采用高原中部安多观测点的土壤温湿度观测数据和同期安多气象站气象要素观测资料,分析高原中部土壤温湿度的分布特征,土壤湿度与地气间热量、气象要素的相关性,这有利于加深对土壤湿度与气候变化关系的认识。

1 数据与方法

西藏自治区那曲市安多县地处青藏高原的腹地,平均海拔 5 200 m,境内湖泊分布较广,由于降水少,河流水量小且多为内流区域的河流。东、西部分别为亚寒带半湿润、半干旱气候区,是典型的草甸带,发育着多种类型的高草草地。土壤多为砂壤土和砂土,蓄水性较差,肥力较低,多呈碱性反应。安多县自然灾害较多,其中干旱、雪灾、草原鼠虫害、冰雹、雷暴等对牧业生产影响严重,同时草场沙漠化、退化进程明显。年平均气温为 $-2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量 435 mm,年日照时数近 3 000 h,平均风速 $4.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。文中温湿度观测点位于距安多县城西 7 km 处的安多县帕那乡三村,观测点地理位置为 $91^{\circ}37'\text{ E}$ 、 $32^{\circ}14'\text{ N}$,海拔 4 696 m。地处安多草原,草原面积占藏北草原的 1/2 强,可利用草原面积为 4.5 万 km^2 ,主要植物是矮嵩草、小嵩草、披针草、紫花针茅等。

野外观测数据来源于中国科学院那曲高寒气候环境观测研究站安多观测点,主要使用了土壤温

湿度数据。土壤温度观测采用了日本 Datamark 公司 Pt100 探头,土壤湿度观测采用了美国 Imko 公司 Trime EZ 探头,详情见表 1。土壤温湿度的测定深度为 5 cm、10 cm、20 cm、40 cm、80 cm 和 160 cm,测定间隔为每 30 min 采集 1 次。文中选用 2014 年 1 月

1 日—12 月 31 日一年的观测数据进行土壤温湿特征分析。小时变化、日变化及月变化均按 30 min 测定值通过平均求得。日数据为每日 48 个观测时次的平均值,小时数据选用 2014 年 1 月 1 日—12 月 31 日的各个时次 365 天数据的平均值。

表 1 监测仪数据采集传感器参数

Table 1 Parameters of the data acquisition sensors

采集项目	型号	生产厂家	观测精度	观测深度/cm
土壤温度	Pt100	Datamark(日本)	$\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$	5、10、20、40、80、160
土壤湿度	Trime EZ	Imko(美国)	$\pm 0.003\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$	5、10、20、40、80、160

美国国家航空航天局(NASA)提供了 GLDAS 中 4 个陆面模式(NOAH、CLM、VIC、MOSAIC)模拟得到的全球土壤水分产品。邓明珊等^[50]的研究表明,上述四套陆面模式资料中,GLDAS-NOAH 模式资料在青藏高原的适用性较好。因此,选取 NOAH 模式(分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$)2014 年 1 月 1 日—12 月 31 日逐 3 小时的数据开展土壤温湿度的分析,土壤层次为 0~10 cm、10~40 cm、40~100 cm、100~200 cm。文中利用双线性插值方法将 NOAH 的格点资料插值到安多观测点所在的经纬度,得到该资料在安多观测点的逐 3 小时、逐日、逐月数据。由于逐 3 小时数据无法准确反映日内变化特征且表层土壤温湿度变化最为显著,下面对比分析 NOAH 模式资料与安多观测点表层(0~10 cm)观测数据相同时间尺度(月和全年逐日)数据,以了解安多观测点对高原中部土壤温湿度变化特征的刻画能力及其区域代表性。

气象资料选用安多气象站(距离安多观测点 6 km)同期逐日观测的平均气温、降水量、日照时数、地面温度、风速等数据。反映陆面过程中非绝热加热中的感热通量计算公式为

$$SH = C_p \rho C_h V (T_s - T_a) \quad (1)$$

式中:SH 为感热通量; C_p 为空气的等压比热; ρ 为近地面大气密度; C_h 为感热通量的大气总体热力输送系数; V 为地面风速; T_s 为地表温度; T_a 为气温。

潜热通量计算公式^[51]为

$$F_L = \beta L_E C_E U_s (q_{gs} - q_a) \quad (2)$$

式中: F_L 为潜热通量; L_E 为潜热系数; C_E 为潜热通量的大气总体输送系数; U_s 为 10 m 高度的风速; q_{gs} 和 q_a 分别为地表土壤的饱和比湿和 10 m 处空气的比湿; β 为地面湿度有效参数,即土壤实际蒸发和可能蒸发的比例系数。

2 土壤温湿度的变化特征

2.1 土壤温度的时间变化特征

从逐时观测数据[图 1(a)]可以看出,土壤温度总体上呈单峰结构,浅层为正弦曲线,随着土壤深度增加,曲线逐渐接近直线。其中 5 cm 土壤温度峰值出现在 16:00 左右,为 $8.34\text{ }^{\circ}\text{C}$,谷值出现在 09:00 左右,为 $-2.47\text{ }^{\circ}\text{C}$,升温过程迅速而降温过程相对缓慢。10 cm 土壤温度峰值变化幅度明显小于 5 cm,温度为 5 cm 的 1/2 左右,峰值出现在 19:00,谷值出现在 10:00,升温过程也快于降温过程。在 20 cm 及以下土壤深度,单峰型结构逐渐趋于平缓,峰值出现在 22:00,谷值出现在 12:00。随着深度增加,极值出现时间滞后,到更深层次,土壤湿度变化基本趋于直线,土壤逐时变化幅度很小且各层温差减小。土壤温度变化与气温密切相关,浅层土壤温度受地表随机天气过程的影响较大,白天地面由于吸收太阳辐射而增温,土壤温度的升温和降温过程相对较剧烈,昼夜温差偏大。到了夜间,由于地表热辐射而冷却,下层相对上层相位滞后,说明太阳辐射随着深度增加,对土壤温度的影响越来越小。

在月变化尺度上,无论浅层或深层,土壤温度均呈单峰型结构[图 1(b)],与太阳辐射的年内变化一致。5 cm 土壤温度的峰值出现在 7 月 ($11.88\text{ }^{\circ}\text{C}$),10 cm、20 cm、40 cm 和 80 cm 峰值出现在 8 月,说明太阳辐射的年内变化可以影响到 40 cm 甚至 80 cm 的土壤温度,160 cm 峰值出现在 9 月。40 cm 以上深度谷值均出现在 1 月,80 cm 和 160 cm 谷值出现在 2 月,5 cm 谷值为 $-8.75\text{ }^{\circ}\text{C}$,随着深度增加,位相后移,谷值逐渐增加,160 cm 谷值为 $-1.84\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

从全年逐日土壤温度[图 1(c)]曲线可见,各层

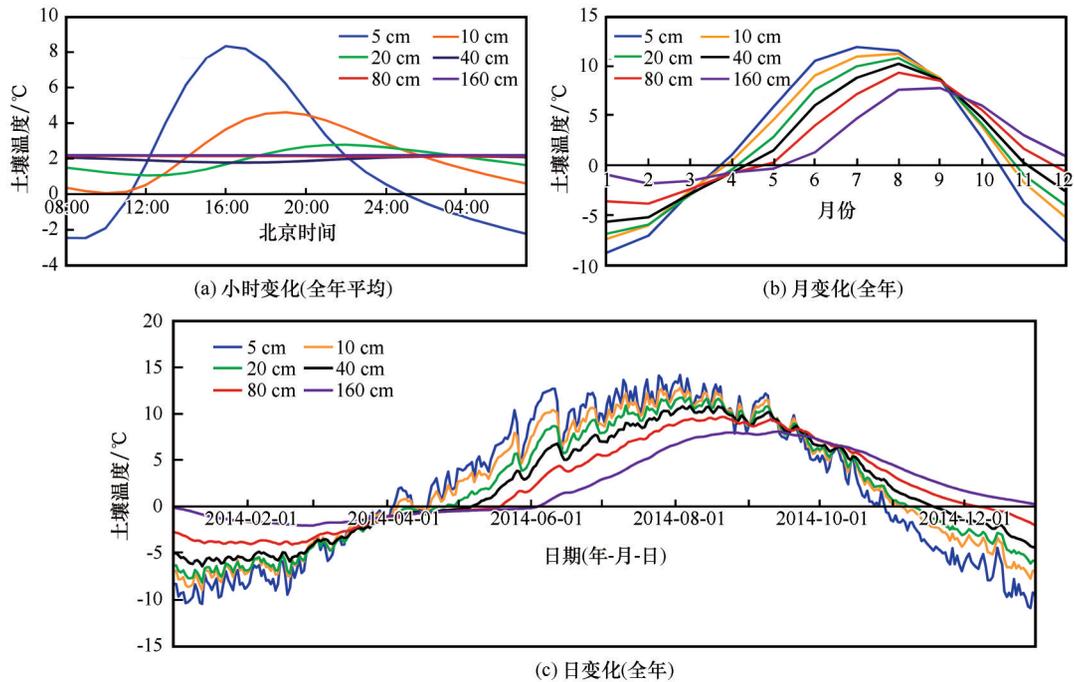


图1 不同深度土壤温度的小时(a)、月(b)和日(c)变化

Fig. 1 Hourly (a), monthly (b) and daily (c) variation of soil temperature at depth of 5 cm, 10 cm, 20 cm, 40 cm, 80 cm and 160 cm

次土壤温度均呈近似正弦式的周期性变化,土壤温度从3月下旬开始上升,7月或8月达到峰值,9月逐渐下降,直至12月或1月达到谷值,这与太阳辐射的年内变化特征一致,表明升温过程慢于降温过程,即消融要慢于冻结过程,反映出高原地区比较漫长的低温期。浅层地表受天气影响较大,无论升温或降温都比深层迅速,浅层土壤温度的波动较大,土壤温度的季节性变化随着深度增加而减少,反映出太阳辐射向下传输量越来越少。

土壤冻结(融化)释放(吸收)的相变潜热会引起地表能量的变化,而土壤冻结和融化的时间差异会影响相变过程。为此,以土壤温度持续大于 0°C 开始的时间作为土壤解冻的时间,土壤温度出现持续小于 0°C 的时间作为土壤封冻的时间,统计了不同层次土壤解冻和封冻日期(表2)。春季,随着气温升高,高原土壤开始解冻,5 cm和10 cm解冻日期分别为4月19日和4月20日,20 cm解冻日期为4月26日,40 cm深度以下解冻日期为5月或6月。即随着土壤深度的增加,解冻日期推迟,下层土壤解冻有一定的滞后,这可能与春夏季造成冻土融化的热量从地表向深层输送有关。从4月到9月中旬,不同层次土壤温度均呈上升趋势,随着土壤深度的增加,土壤温度越来越低,浅层土壤温度高于深层。秋季土壤开始进入封冻时期,5 cm的封冻日期为10

表2 不同层次土壤解冻和封冻日期

Table 2 Freezing and thawing date at depth of 5 cm, 10 cm, 20 cm, 40 cm, 80 cm and 160 cm

深度/cm	解冻日期 (月-日)	封冻日期 (月-日)	封冻期/d
5	04-19	10-29	171
10	04-20	11-05	165
20	04-26	11-08	168
40	05-07	11-19	168
80	05-20	12-08	163
160	06-04	01-01	154

月29日,10 cm、20 cm和40 cm封冻日期均在11月,80 cm和160 cm封冻日期分别在12月8日和1月1日。随着土壤深度的增加,封冻日期也推迟。表层土壤温度降低速率明显快于深层土壤,进入冬季以后,浅层土壤温度低于深层,土壤热量开始从深层向地表传输。5 cm封冻时间最长,160 cm封冻时间最短,随着土壤深度增加,封冻期基本呈逐渐缩短的特征。这一结论与藏北高原和青藏公路沿线土壤温度的研究结果^[8,20]基本一致,土壤温度在10月下旬冻结,4月中旬土壤从上层开始消融,到5月上旬40 cm深处的土壤开始消融,160 cm消融时间比那曲(5月中旬)偏晚,但总体土壤冻结时间长达6个月左右。

2.2 土壤湿度的时间变化特征

不同层次土壤湿度日内变化[图2(a)]呈较为一致的变化规律,土壤湿度的逐时变化较小,5 cm 土壤湿度从 11:00 以后明显开始上升,至 19:00 达到峰值之后,开始缓慢下降,在 10:00 达到谷值,10 cm 层土壤湿度日内变化特征与 5 cm 层比较相似,但其峰值变化幅度明显小于 5 cm 层,增加较

5 cm 缓慢。不同层次土壤湿度峰值、谷值出现的时间基本一致,20 cm 以下深度土壤湿度没有显著的日内变化特征,尤其 160 cm 土壤湿度基本接近直线。这与赵逸舟等^[17]指出的高原中部和东部土壤湿度振幅随着深度的增加而衰减,表层土壤湿度呈正弦曲线而深层没有变化的分布特征接近一致。

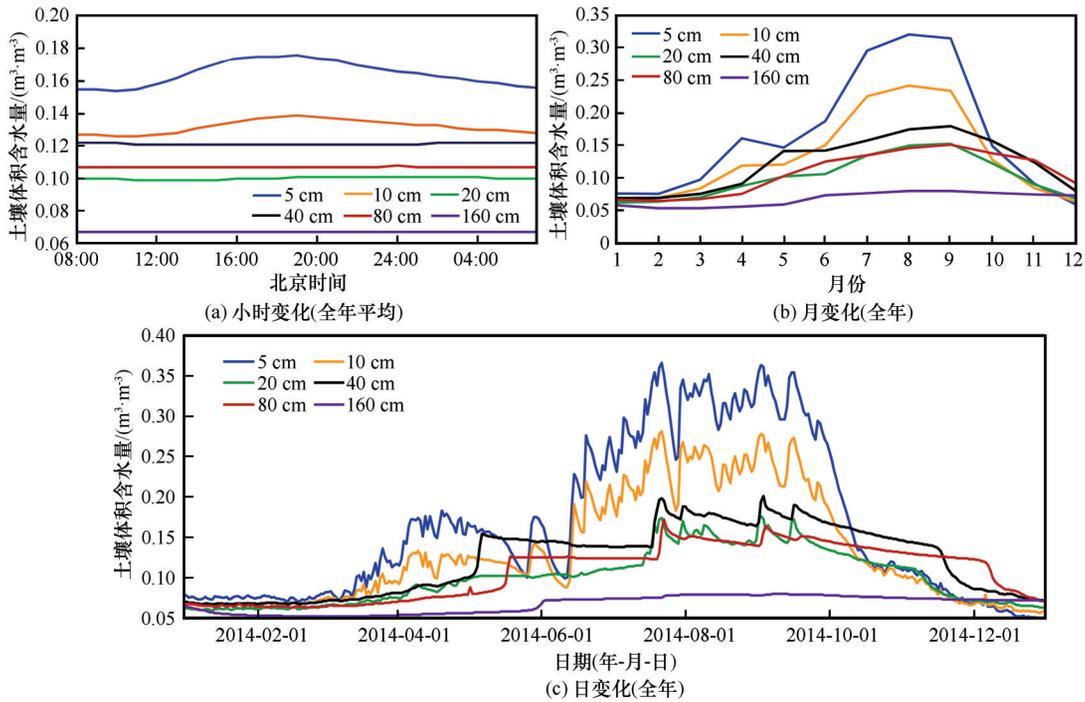


图2 不同深度土壤湿度的小时(a)、月(b)和日(c)变化

Fig. 2 Hourly (a), monthly (b) and daily (c) variation of soil moisture at depth of 5 cm, 10 cm, 20 cm, 40 cm, 80 cm and 160 cm

土壤湿度的月变化曲线[图2(b)]表明,5 cm 和 10 cm 层土壤湿度呈单峰型结构,峰值出现在 8 月,谷值出现在 12 月。土壤湿度的变化趋势与土壤温度的变化基本相似,春季气温升高,高原积雪和冻土融化,4 月土壤湿度开始增加,随着雨季来临,土壤湿度呈急剧增加趋势,8 月达到峰值,9 月高原雨季结束后,土壤湿度逐渐减小。20 cm 以下深度土壤湿度峰值出现在 9 月,谷值基本出现在 2 月(除了 20 cm 出现在 1 月)。

在全年逐日土壤湿度[图2(c)]曲线可见,各层次土壤湿度变化趋势接近一致(160 cm 除外),3 月下旬开始冻土逐渐消融,土壤湿度增加,尤其从 5 月开始受季风降水影响,表层土壤湿度继续增加,7 月达到峰值,8 月以后土壤湿度逐渐减小,10 月开始冻结,土壤湿度减小,1 月达到谷值,一直持续到 3 月,

完成一年的循环周期。土壤湿度上升过程较下降缓慢。从不同层次分布来看,与土壤温度变化不一致的是,40 cm 和 80 cm 土壤湿度值要高于 20 cm 土壤湿度,160 cm 湿度最低,且变化幅度和波动不明显。夏季土壤湿度最高,春秋季节次之,冬季土壤湿度最低。

2.3 土壤湿度的垂直分布特征

土壤湿度在一年中的变化趋势不尽一致(图 3),土壤进入封冻以后,土壤湿度保持在相对稳定的范围内,并且变化趋势比较相似。从 4 月中旬到 9 月下旬,土壤湿度在总体逐渐增加的变化趋势下,两者增减幅度不同,土壤湿度增加比较缓慢,有些时段土壤温度升高时,对应土壤湿度降低。其中在春季和秋季转换时期,土壤湿度的变化和偏差最为明显,秋季向冬季转换时,土壤湿度迅速

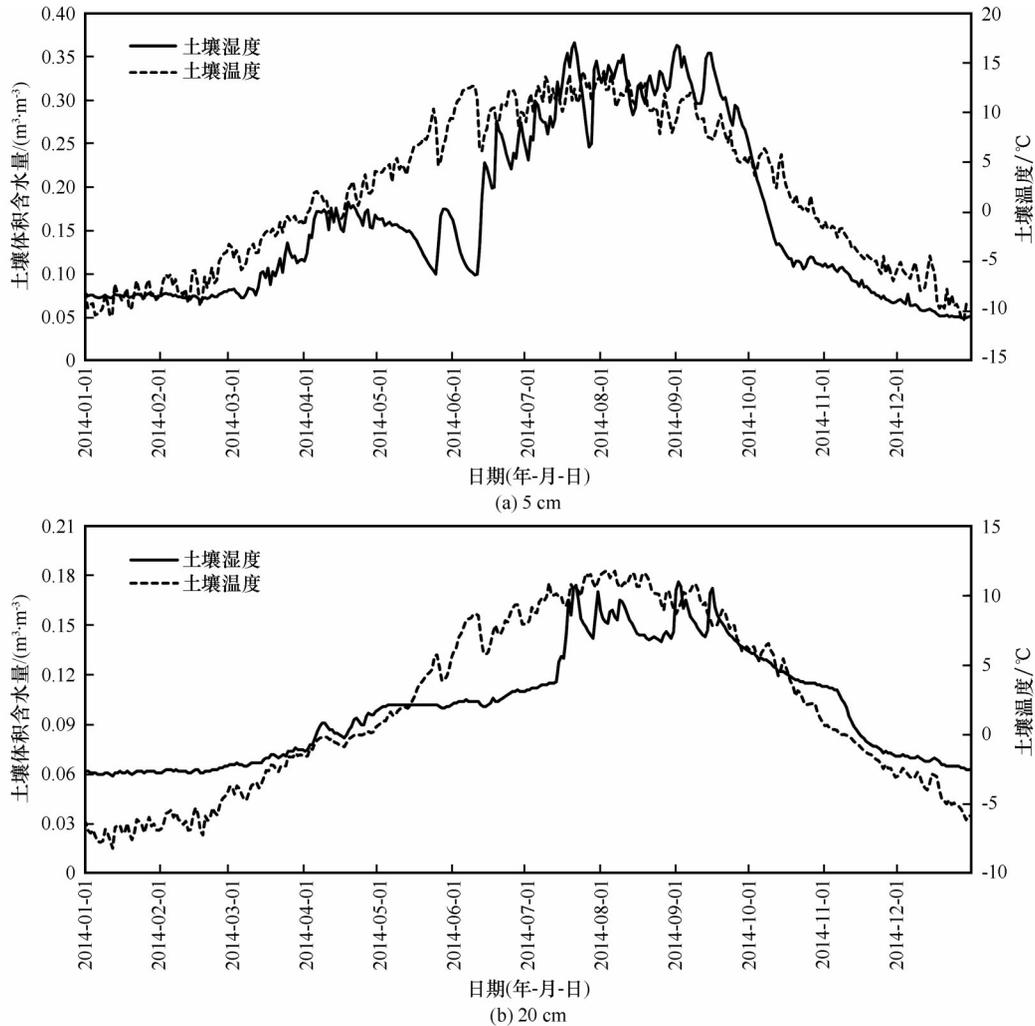


图3 5 cm(a)和20 cm(b)土壤温湿度的全年变化

Fig. 3 Daily variation of soil moisture and soil temperature at depth of 5 cm (a) and 20 cm (b) in a whole year

降低,进入封冻状态,从冬季向春季转换时,土壤湿度逐渐增加,进入解冻状态。5 cm[图3(a)]和20 cm[图3(b)]的土壤温湿度变化表明,5 cm土壤温度上升和下降趋势较20 cm显著,5 cm土壤湿度在春季、尤其是雨季后增加比较迅速,20 cm土壤湿度增加比较缓慢,且全年逐日变化幅度较5 cm要小。不同层次土壤温湿度的相关系数表明,无论是浅层或深层,土壤温湿度均呈显著正相关,各层次的相关系数分别为:0.854(5 cm),0.884(10 cm),0.924(20 cm),0.934(40 cm),0.931(80 cm)和0.899(160 cm),相关系数均通过了显著性水平检验($P < 0.001$),说明土壤由浅至深,土壤温湿度变化趋势更加一致。但是,80 cm和160 cm土壤温湿度的相关系数有所减小。这可能是由于到了土壤深层,土壤温湿度趋于比较稳定,土壤湿度受土壤温度的影响相对较小。

由土壤水热时空剖面分布(图4)可见,11月至次年3月土壤自地表往下开始冻结,其中浅层冻结的速率较快,深层冻结滞后于浅层,至1月土壤自上而下整层基本处于冻土阶段,土壤浅层的温度梯度明显大于深层,深层土壤温度变化接近一致。在4—5月间土壤温度梯度接近于零,这可能是在融化过程中土壤将浅层吸收的热量绝大部分用于水的相变造成的,土壤融化期内温度波会在地层内传播^[52]。自5月之后,各层土壤温度最大值出现的时间随深度增加而滞后,与李林等^[53]对青海土壤温度的研究结果一致。这种变化规律由上下土壤层内的热量交换过程决定。土壤湿度高值基本集中在高原雨季的6—9月,因为降水增多有利于土壤湿度增加,冬半年湿度较小。冬季土壤表面热量损失多,深层土壤中的热量逐渐向地表输送,地温随着深度增加而增加,而夏季正好相反。20 cm以上土

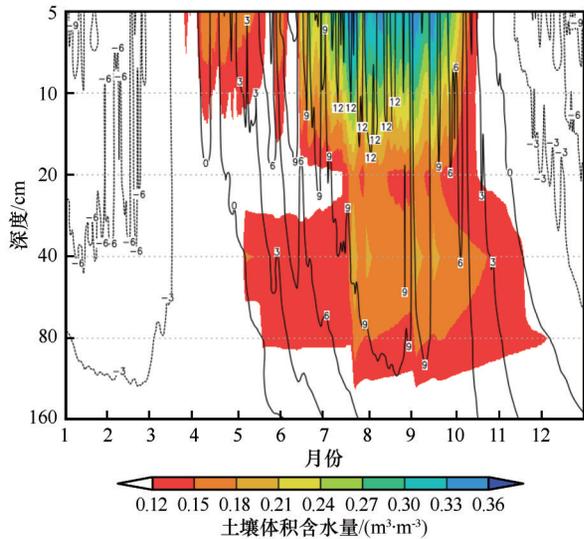


图4 土壤温湿度分布时空剖面图(实线和虚线为土壤温度(°C),阴影区为土壤体积含水量高于 $0.12 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 的区域)
Fig. 4 Spatio-temporal profiles of daily soil temperature and moisture (The solid line and dashed line refers to soil temperature, and shadowed area refers to regions where soil moisture larger than $0.12 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)

壤湿度表现为土壤湿度高值区,40~80 cm在8—10月土壤湿度存在一个较高含水层,体现出5~10 cm土壤湿度最大,20 cm开始湿度逐渐减小,40~80 cm湿度较大,160 cm湿度最小的垂直结构,160 cm层即使在雨季也没有多少土壤含水量。与高原整体土壤湿度浅层到中间层增加,随着深度增加而急剧减小的变化^[13]存在差异,说明了高原地区土壤湿度的区域性特征。

2.4 GLDAS数据反映的土壤温湿度特征

为验证安多观测点土壤温湿度观测数据的可靠性及区域代表性,下面主要对比分析0~10 cm GLDAS-NOAH资料与土壤温湿度观测数据的差异。NOAH资料的月和全年逐日土壤温度变化特征(图略)表明,除不同土壤层次峰值和谷值在量值上存在一定差异外,两套资料揭示的土壤温度月变化特征和量值比较接近,即浅层和深层土壤温度均呈单峰型结构,从浅到深土壤温度峰值均出现在7—9月,谷值出现在12月至次年3月,且谷值随深度逐渐增加。全年逐日土壤温度也与安多观测点观测数据类似,呈现正弦式的周期变化。即土壤温度从4月初开始上升,在6月达到峰值,10月逐渐下降。随着深度增加,土壤温度下降位相逐渐后移,但也在12月或1月达到谷值。全年逐日变化体现出升温过程慢于降温过程的特征,

而NOAH资料揭示的升温 and 降温时间均滞后于安多观测数据。

NOAH资料的月和全年土壤湿度变化特征(图略)表明,该资料对安多观测点土壤湿度的逐月模拟能力在量值上有一定的低估,但能够较好地刻画表层土壤湿度的逐月变化。NOAH资料和观测数据的土壤湿度均在7—9月达到全年最大值。与观测资料相反,NOAH资料将安多观测点春季土壤湿度的相对大值模拟成了相对小值区。NOAH资料对安多观测点逐日土壤湿度尤其是表层土壤湿度的模拟能力较强,基本能够再现表层春、冬季节土壤冻融和夏季多雨两个阶段的土壤湿度变化特征,而在量值上对安多观测点各层土壤湿度有一定的低估,尤其是对表层土壤湿度更加显著,偏差可达到 $0.01 \sim 0.05 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 。

从土壤温湿度的空间分布(图5)来看,土壤温度[图5(a)]呈从东南向西北递减的空间分布特征。安多观测点位于高原中部,日平均值处于5~10°C的区域内,安多观测点的表层土壤温度能够很好地代表高原中部的温度状况。为了进一步验证安多观测点的代表性,计算了区域内逐格点上的表层土壤温度方差,以期反映土壤温度的年内变化幅度。可以看出,安多观测点虽然处于土壤温度由西北向东南逐渐上升的过渡区域,但其变化幅度与周围环境的变化幅度比较接近,日均值和方差分布特征均表明,安多观测点能够很好地代表高原中部表层土壤温度的空间分布特征。类似地,土壤湿度[图5(b)]也具有从东南向西北递减的分布特征,安多观测点日平均值处于 $0.15 \sim 0.20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 的土壤湿度带上,并且那曲中部位于年内变化较为剧烈的区域,表层土壤湿度和方差分布均能较好地反映高原中部区域的土壤湿度分布特征。

3 土壤湿度与气象要素的关系

为了分析土壤季节性消融过程中地表能量的变化,计算了2014年安多观测点感热通量和潜热通量的逐日变化(图6)。可以看出,随着干季向湿季的转换,由于太阳辐射的增加,非绝热加热总体呈增加的趋势,尤其是在春季增加特别显著,反映了气温增加与地表蒸发过程的加强。6月以后,随着雨季到来,降水量增加,地表土壤湿度增大,潜热通量呈逐渐增加的趋势,而且略大于感热通量。10月以后,土壤水分减少,潜热减小幅度明显大于感热,

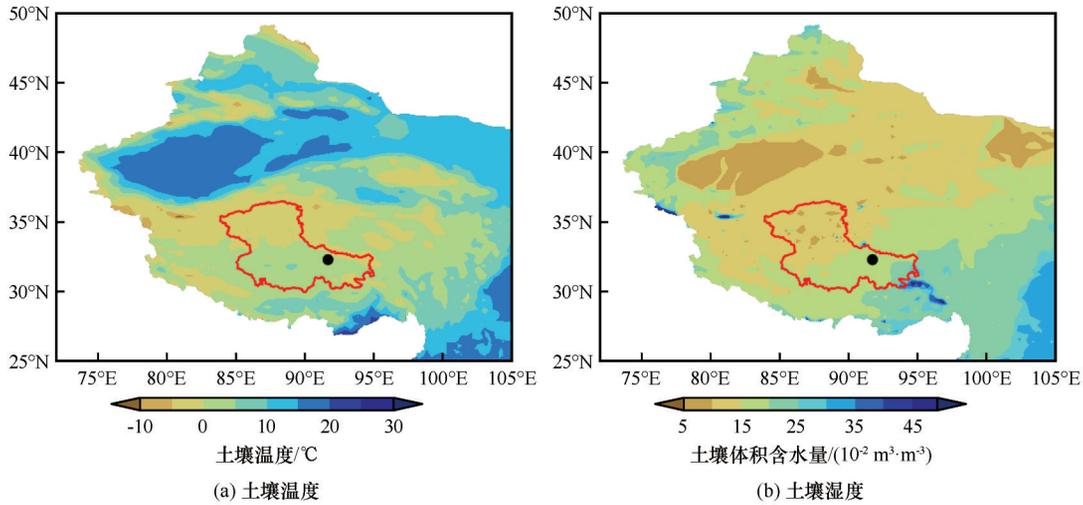


图5 表层(0~10 cm)日平均土壤温度(a)和土壤湿度(b)的空间分布(红线区域为那曲市)

Fig. 5 Distribution of averaged daily soil temperature (a) and moisture (b) at the depth of 0 ~ 10 cm (The area with red line refers to Nagqu Prefecture)

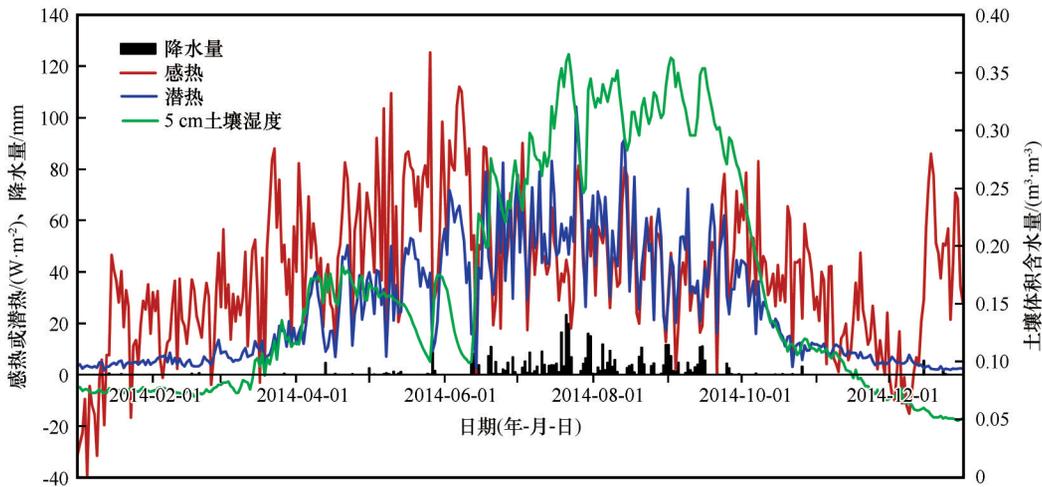


图6 感热通量、潜热通量、降水量和5 cm 土壤湿度的全年变化

Fig. 6 Daily variation of sensible heat, latent heat, precipitation and soil moisture at depth of 5 cm in a whole year

体现了高原土壤消融期土壤水分对感热、潜热变化的重要作用。

为了在统一标准下进行分析,将各气象要素(除降水外)进行标准化处理,可以发现(图7),安多站点的降水主要集中在5—9月。从其他气象要素的变化来看,在季风爆发前期(5月上旬至6月中旬),各要素变化幅度为全年最大,特别是在5月25—28日和6月12—15日两次降水过程前期的1~5天内,变化非常明显,即随着日照时数的增加,气温和地温明显升高,表层土壤蒸发增强导致土壤湿度显著减小,气温的上升也使相对湿度明显减小,加之地温的增加幅度明显大于空气温度,导致温度垂直梯度增大,大气不稳定性增加。在局地蒸发增强、温度扰动加强情况下有利于引起第二类热成风螺旋度的上升,

这样在湿热旋转效应下带来明显的降水过程。在季风爆发前期,高原腹地这种气象要素变化特征是否具有普遍性,以及这种变化特征对于亚洲季风爆发是否具有指示作用还有待于深入分析。

土壤湿度和气象要素的滑动相关(图8)表明,安多站点1月至4月初,土壤湿度与平均、最高、最低气温[图8(a)]呈比较显著的正相关,通过了显著性水平检验($P < 0.10$),与地表温度、相对湿度、降水(雪)、风速、日照时数[图8(b)]相关不显著。此时间段内气温的升高能够引起高原融冻过程的加剧,冰雪和冻土融化能够造成土壤湿度的增加。土壤季节性消融之后,4—5月土壤含水量逐渐增加,随着气温和地表温度的升高,土壤水分通过蒸发作用将水汽输送到大气中,表现为土壤湿度与平均、最

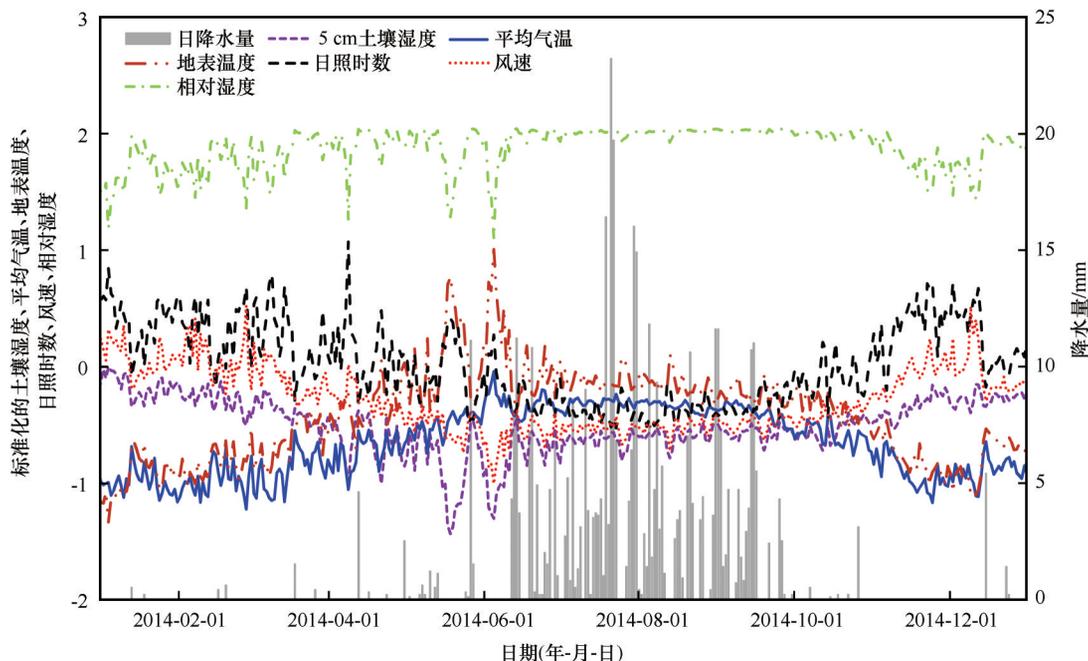


图7 标准化的5 cm土壤湿度、气温、地表温度、日照时数、风速、相对湿度和降水量的全年变化

Fig. 7 Daily variation of standardized soil moisture at depth of 5 cm, air temperature, land surface temperature, sunshine duration, wind speed, relative humidity and precipitation

高气温呈负相关,与相对湿度呈正相关。土壤湿度与最低气温、地表温度、风速、日照时数、降水量的相关不显著。而在6—9月,随着雨季到来和降水量增加,土壤湿度与降水量、相对湿度呈正相关,而与气温、地表温度、风速和日照时数的相关性不显著。随着雨季结束,高原进入秋、冬季节,土壤湿度与气温、地表温度为较好的正相关,表现为一个正反馈过程。总体来看,一年中不同时段里,土壤湿度与气温等气象要素存在不同程度的正负相关,在冬半年较干的季节,土壤湿度与平均、最高、最低气温为正相关,在夏半年较湿润的季节,土壤湿度与降水量、相对湿度为正相关,而与地表温度、风速、日照时数的相关不显著。

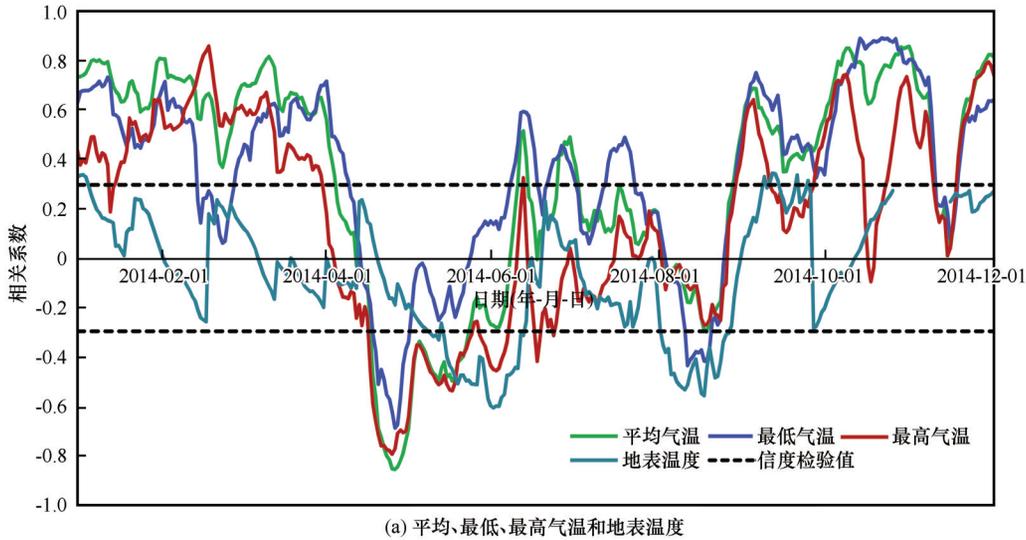
为进一步了解土壤湿度与降水量的关系,参考王澄海等^[20]的分析方法,选取高原湿季前,土壤湿度变化较大的4月、5月土壤湿度和降水量数据计算了超前滞后相关(图9)。结果发现,土壤湿度在超前降水19~27天时有较显著的负相关,通过了显著性水平检验($P < 0.1$),其中,最大相关系数出现在超前25天($-0.28, P < 0.05$),即土壤湿度在一定程度上可以作为降水发生的超前信号。在土壤湿度滞后于降水0~10天内具有非常显著的正相关,通过了 $P < 0.01$ 的显著性水平检验,体现出了降水后对土壤湿度增加的影响。

4 结论

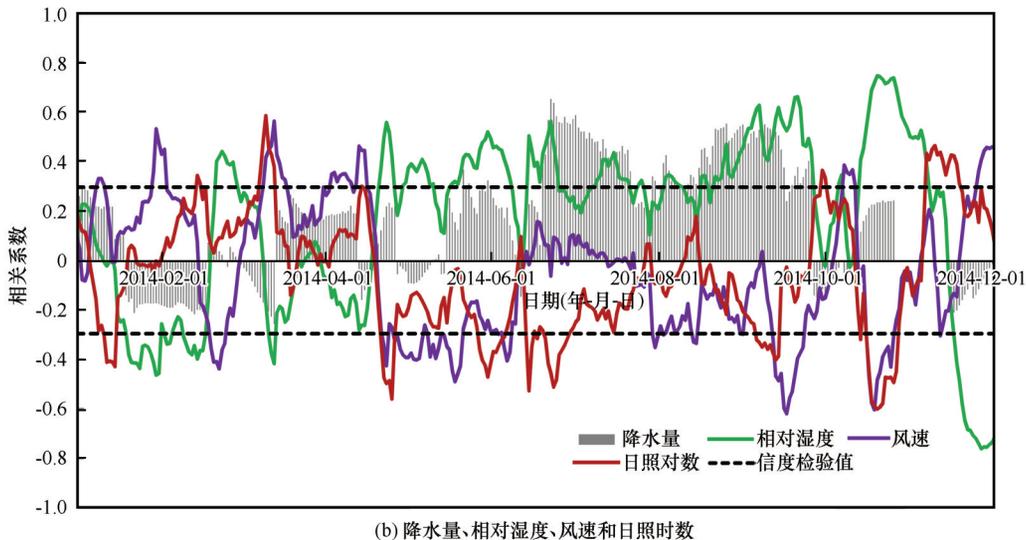
根据安多观测点的土壤温湿度观测数据以及同期安多气象站的气象资料,分析了青藏高原中部土壤的水热分布特征,揭示了土壤湿度与气温、日照时数等气象要素的相关性。主要结论如下:

(1)土壤温度总体上呈单峰结构,浅层为正弦曲线,随着土壤深度的增加,曲线逐渐接近直线。土壤温度升温迅速而降温过程缓慢,解冻和封冻日期随深度推迟,封冻期呈逐渐缩短的特征。不同层次土壤湿度日内变化较小。月变化呈单峰型结构,峰值和谷值基本出现在8月和12月,土壤湿度上升速率较下降速率缓慢。区域尺度上利用GLDAS-NOAH资料分析显示出类似的变化特征。

(2)土壤温湿度在一年中的变化不一致,但土壤温湿度呈显著正相关。土壤浅层的温度梯度明显大于深层;土壤湿度的垂直结构表明,浅层湿度最大,中间层次较大,深层土壤湿度最小。随着干季向湿季的转换,由于太阳辐射的增加,非绝热加热总体呈增加的趋势。土壤湿度与气象要素的关系随着季节存在着一定的差异,但总体上土壤湿度与平均、最高、最低气温、降水量和相对湿度呈正相关,与风速、日照时数相关不显著。表层土壤湿度超前降水15天内呈显著正相关,表明土壤湿度在一定程度上可作为降水预测的超前信号。



(a) 平均、最低、最高气温和地表温度



(b) 降水量、相对湿度、风速和日照时数

图8 5 cm深度土壤湿度与平均、最低、最高气温、地表温度(a),降水量、相对湿度、风速和日照时数(b)的滑动相关(滑动长度为30天)

Fig. 8 Moving-correlation between soil moisture at depth of 5 cm and air temperatures, land surface temperature (a), precipitation, relative humidity, wind speed and sunshine duration (b) (30-day moving length)

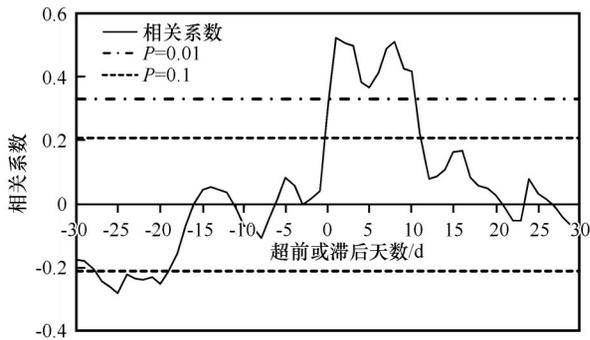


图9 5 cm深度土壤湿度和降水量的时滞相关

Fig. 9 Time-lagged correlation between soil moisture at depth of 5 cm and precipitation

本文初步展示了安多站点的水热变化特征。但是,不同站点存在着极大的时空分布差异,并且

高原草地土壤冻融特征及影响机理、浅层土壤温度及水分发生变异、植被盖度、海拔和坡向等均影响着土壤温湿度的分布特征,有待于今后结合更多实况观测资料进一步分析。

致谢:文中安多站点的土壤温湿度数据和气象观测资料分别来源于中国科学院那曲高寒气候环境观测研究站安多观测点和西藏自治区气象信息中心。胡泽勇研究员和谷良雷副研究员对土壤温湿度的资料处理及分析提出了许多宝贵的建议,在此表示感谢。

参考文献 (References):

[1] Zhang Wengang, Li Shuxun, Pang Qiangqiang, et al. Variation characteristics of soil temperature over Qinghai-Xizang Pla-

- teau in the past 45 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(11): 1151-1159. [张文纲, 李述训, 庞强强, 等. 近45年青藏高原土壤温度的变化特征分析[J]. *地理学报*, 2008, 63(11): 1151-1159.]
- [2] Shukla J, Mintz Y. The influence of land-surface evapotranspiration on Earth's climate[J]. *Science*, 1982, 215: 1498-1501.
- [3] Yang Meixue, Yao Tandong, Nozomu H, et al. Daily freeze-thaw cycle of topsoil in Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(16): 1974-1976. [杨梅学, 姚檀栋, Nozomu H, 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.]
- [4] Yang Nan, Fan Guangzhou. Analysis of soil temperature variation over the Qinghai-Xizang Plateau from 2000 to 2016[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2019, 41(9): 40-51. [杨楠, 范广洲. 2000-2016年青藏高原土壤温度变化特征分析[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(9): 40-51.]
- [5] Yang Meixue, Yao Tandong, Ding Yongjian, et al. The diurnal variation of the soil temperature in the northern part of Tibetan Plateau[J]. *Environmental Science*, 1999, 20(3): 5-8. [杨梅学, 姚檀栋, 丁永建, 等. 藏北高原土壤温度的日变化[J]. *环境科学*, 1999, 20(3): 5-8.]
- [6] Yang Meixue, Yao Tandong, Koike T. The latitude and elevation effects of the ground temperature distribution in northern Tibet Plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 1999, 17(4): 329-332. [杨梅学, 姚檀栋, 小池俊雄. 藏北高原土壤温度分布的纬向效应和高度效应[J]. *山地学报*, 1999, 17(4): 329-332.]
- [7] Yang Meixue, Yao Tandong, Wang Shaoling, et al. The features of soil temperature and moisture on northern Tibetan Plateau[J]. *Geographical Research*, 1999, 18(3): 312-317. [杨梅学, 姚檀栋, 王绍令, 等. 藏北高原土壤温湿特征[J]. *地理研究*, 1999, 18(3): 312-317.]
- [8] Yang Meixue, Yao Tandong, He Yuanqing. The role of soil moisture-energy distribution and melting-freezing processes on seasonal shift in Tibetan Plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 2002, 20(5): 553-558. [杨梅学, 姚檀栋, 何元庆. 青藏高原土壤水热分布特征及冻融过程在季节转换中的作用[J]. *山地学报*, 2002, 20(5): 553-558.]
- [9] Han Binghong, Zhou Bingrong, Sun Ying, et al. The characteristics of soil temperature variations and heat exchange in freeze-thaw period over southern alpine grasslands in Qinghai Province[J]. *Climate Change Research*, 2018, 14(5): 456-464. [韩炳宏, 周秉荣, 孙瑛, 等. 青海南部冻融区高寒草地土壤温度变化及热量传输特征[J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14(5): 456-464.]
- [10] Li Weipeng, Fan Jihui, Sha Yukun, et al. Soil temperature variation and thaw-freezing cycle in the alpine cold steppe, northern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, 32(4): 407-416. [李卫朋, 范继辉, 沙玉坤, 等. 藏北高寒草原土壤温度变化与冻融特征[J]. *山地学报*, 2014, 32(4): 407-416.]
- [11] Shi Lei, Du Jun, Zhou Kanshe, et al. The temporal-spatial variations of soil moisture over the Tibetan Plateau during 1980-2012[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(5): 1241-1248. [石磊, 杜军, 周刊社, 等. 1980-2012年青藏高原土壤湿度时空演变特征[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(5): 1241-1248.]
- [12] Zhuoga, Deji Zhuoma, Nima Ji. Distribution of soil moisture over the Qinghai-Tibetan Plateau and its effect on the precipitation in June and July over the mid-lower reaches of Yangtze River basin[J]. *Plateau Meteorology*, 2017, 36(3): 657-666. [卓嘎, 德吉卓玛, 尼玛吉. 青藏高原土壤湿度分布特征及其对长江中下游6、7月降水的影响[J]. *高原气象*, 2017, 36(3): 657-666.]
- [13] Zhuoga, Chen Tao, Gesang. Distribution and variation of soil moisture over the Tibetan Plateau and its typical areas[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology*, 2017, 9(4): 445-454. [卓嘎, 陈涛, 格桑. 青藏高原及其典型区域土壤湿度的分布和变化特征[J]. *南京信息工程大学学报*, 2017, 9(4): 445-454.]
- [14] Wang Jing, Qi Li, Wu Zhiwei, et al. Applicability analysis of soil moisture from multiple substitute data in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(2): 371-381. [王静, 祁莉, 吴志伟, 等. 多套土壤湿度替代资料在青藏高原的适用性分析[J]. *高原气象*, 2018, 37(2): 371-381.]
- [15] Cui Yuanyuan, Qin Jun, Jing Wenqi, et al. Applicability evaluation of merged soil moisture in GLDAS and CLDAS products over Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(1): 123-136. [崔园园, 覃军, 敬文琪, 等. GLDAS和CLDAS融合土壤水分产品在青藏高原地区的适用性评估[J]. *高原气象*, 2018, 37(1): 123-136.]
- [16] Fan Keke, Zhang Qiang, Shi Peijun, et al. Evaluation of remote sensing and reanalysis soil moisture products on the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(9): 1778-1791. [范科科, 张强, 史培军, 等. 基于卫星遥感和再分析数据的青藏高原土壤湿度数据评估[J]. *地理学报*, 2018, 73(9): 1778-1791.]
- [17] Zhao Yizhou, Ma Yaoming, Ma Weiqiang, et al. Variations of soil temperature and soil moisture in northern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(4): 578-583. [赵逸舟, 马耀明, 马伟强, 等. 藏北高原土壤温湿变化特征分析[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(4): 578-583.]
- [18] Yang Jian, Ma Yaoming. Soil temperature and moisture features of typical underlying surface in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(4): 813-820. [杨健, 马耀明. 青藏高原典型下垫面的土壤温湿特征[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(4): 813-820.]
- [19] Wan Guoning, Yang Meixue, Wang Xuejia, et al. Variations in soil moisture at different time scales of BJ site on the central Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(2): 286-293. [万国宁, 杨梅学, 王学佳, 等. 青藏高原中部BJ站土壤湿度不同时间尺度的变化[J]. *土壤通报*, 2012, 43(2): 286-293.]
- [20] Wang Chenghai, Shang Dacheng. Effect of the variation of the soil temperature and moisture in the transition from dry-season to wet-season over northern Tibet Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2007, 26(4): 677-685. [王澄海, 尚大成. 藏北高原土壤温湿变化在高原干湿季转换中的作用[J]. *高原气象*, 2007, 26(4): 677-685.]
- [21] Zhang Juan, Sha Zhanjiang, Xu Weixin. Variations of alpine meadow soil temperature and moisture in Batang, Yushu region of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(3): 635-642. [张娟, 沙占江, 徐维新. 青藏高原玉树地区巴塘高寒草甸土壤温湿特征分析[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(3): 635-642.]
- [22] Yang Kun, Watanabe T, Koike T, et al. Auto-calibration system developed to assimilate AMSR-E data into a land surface model for estimating soil moisture and the surface energy budget[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2007, 85A: 229-242.
- [23] Lu Hui, Koike T, Yang Kun, et al. Improving land surface

- soil moisture and energy flux simulations over the Tibetan Plateau by the assimilation of the microwave remote sensing data and the GCM output into a land surface model[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 17: 43-54.
- [24] Qin Jun, Zhao Long, Chen Yingying, et al. Inter-comparison of spatial upscaling methods for evaluation of satellite-based soil moisture [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 523 (1) : 170-178.
- [25] Su Zhongbo, Wen Jun, Dente L, et al. The Tibetan Plateau observatory of plateau scale soil moisture and soil temperature (Tibet-Obs) for quantifying uncertainties in coarse resolution satellite and model products[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(7): 2303-2316.
- [26] Xie Qiuxia, Menenti M, Jia Li. Improving the AMSR-E/NASA soil moisture data product using in-situ measurements from the Tibetan Plateau [J/OL]. *Remote Sensing*, 2019, 11 (23) [2020-02-23]. <https://doi.org/10.3390/rs11232748>.
- [27] Van der Velde R, Salama M S, Rellarin T, et al. Long term soil moisture mapping over the Tibetan Plateau using special sensor microwave[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 10(5): 6629-6667.
- [28] Li Chengwei, Lu Hui, Yang Kun, et al. The evaluation of SMAP enhanced soil moisture products using high-resolution model simulations and in-situ observations on the Tibetan Plateau [J/OL]. *Remote Sensing*, 2018, 10 (4) [2020-02-23]. <https://doi.org/10.3390/rs10040535>.
- [29] Cheng Meilin, Zhong Lei, Ma Yaoming, et al. A study on the assessment of multi-source satellite soil moisture products and reanalysis data for the Tibetan Plateau [J/OL]. *Remote Sensing*, 2019, 11 (10) [2020-02-23]. <https://doi.org/10.3390/rs11101196>.
- [30] Chen Yingying, Yang Kun, Qin Jun, et al. Evaluation of AMSR-E retrievals and GLDAS simulations against observations of a soil moisture network on the central Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118 (10) : 4466-4475.
- [31] Meng Xianhong, Li Ruiqing, Luan Lan. Detecting hydrological consistency between soil moisture and precipitation and changes of soil moisture in summer over the Tibetan Plateau [J]. *Climate Dynamics*, 2018, 51: 4157-4168.
- [32] Shi Chunxiang, Jiang Lipeng, Zhu Zhi, et al. Simulation and assessment of soil moisture in China based on CLDAS2.0 driving data[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2018, 46(4): 231-236. [师春香, 姜立鹏, 朱智, 等. 基于CLDAS2.0驱动数据的中国区域土壤湿度模拟与评估[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(4): 231-236.]
- [33] Wang Chenghai, Shi Rui. Simulation of the land surface processes in the western Tibetan Plateau in summer[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(1): 73-81. [王澄海, 师锐. 青藏高原西部陆面过程特征的模拟分析[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(1): 73-81.]
- [34] Wang Chenghai, Shi Rui, Zuo Hongchao. Analysis on simulation of characteristic of land surface in western Qinghai-Xizang Plateau during frozen and thawing [J]. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(2): 239-248. [王澄海, 师锐, 左洪超. 青藏高原西部冻融期陆面过程的模拟分析[J]. *高原气象*, 2008, 27(2): 239-248.]
- [35] Zhang Shiqiang, Ding Yongjian, Lu Jian, et al. Simulative study of water-heat process in the Tibetan Plateau (II) : soil temperature [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(1): 95-99. [张世强, 丁永建, 卢健, 等. 青藏高原土壤水热过程模拟研究(II): 土壤温度[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(1): 95-99.]
- [36] Zhao Lin, Li Ren, Ding Yongjian. Simulation on the soil water-thermal characteristics of the active layer in Tanggula Range [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(6) : 930-937. [赵林, 李韧, 丁永建. 唐古拉地区活动层土壤水热特征的模拟研究[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(6): 930-937.]
- [37] Chen Haishan, Xiong Mingming, Sha Wenyu. Simulation of land surface processes over China and its validation: Part I: soil temperature [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2010, 30(5) : 621-630. [陈海山, 熊明明, 沙文钰. CLM3.0对中国区域陆面过程的模拟试验及评估 I: 土壤温度[J]. *气象科学*, 2010, 30(5): 621-630.]
- [38] Xiong Mingming, Chen Haishan, Yu Miao. Simulation of land surface processes over China and its validation: Part II: soil moisture [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2011, 31(1) : 1-10. [熊明明, 陈海山, 俞淼. CLM3.0对中国区域陆面过程的模拟试验及评估 II: 土壤湿度[J]. *气象科学*, 2011, 31(1): 1-10.]
- [39] Ding Xu. The numerical simulation study of soil moisture and soil temperature [D]. Chengdu: Chengdu University of Information Technology, 2018. [丁旭. 青藏高原土壤湿度和土壤温度的数值模拟研究[D]. 成都: 成都信息工程大学, 2018.]
- [40] Koster R D, Suarez M J. Relative contributions of land and ocean processes to precipitation variability [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, 100 (D7) : 13775-13790.
- [41] Zhou Yushu, Gao Shouting, Deng Guo, et al. Effect of the winter/spring soil temperature of the Tibetan Plateau on the summer precipitation over the mid-lower reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2002, 25(5): 611-619. [周玉淑, 高守亭, 邓国, 等. 青藏高原冬春季地温异常对长江中下游夏季旱涝影响的研究[J]. *南京气象学院学报*, 2002, 25(5): 611-619.]
- [42] Li Xiuzhen, Tang Xuze, Li Shihua, et al. Impact of the spring sensible heat flux over the Tibetan Plateau on summer rainfall over east China and its role in rainfall prediction [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2018, 76(6) : 930-943. [李秀珍, 唐旭紫, 李施华, 等. 春季青藏高原感热对中国东部夏季降水的影响和预测作用[J]. *气象学报*, 2018, 76(6): 930-943.]
- [43] Namias J. Surface-atmosphere interactions as fundamental causes of droughts and other climatic fluctuations [M]// *Changes of climate: proceedings of the Rome symposium organized by UNESCO and the World Meteorological Organization*. Paris: UNESCO, 1963: 345-359.
- [44] Rowntree P R, Bolton J R. Simulation of the atmospheric response to soil moisture anomalies over Europe [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1983, 109(461) : 501-526.
- [45] Yeh T C, Wetherald R I, Manabe S. The effect of soil moisture on the short-term climate and hydrology change: a numerical experiment [J]. *Monthly Weather Review*, 1984, 112(2) : 474-490.
- [46] Chow K C, Chan J C L, Shi X, et al. Time lagged effects of spring Tibetan Plateau soil moisture on the monsoon over China in early summer [J]. *International Journal of Climatology*, 2008, 28(1) : 55-67.
- [47] Wang Rui, Li Weiping, Liu Xin, et al. Simulation of the impacts of spring soil moisture over the Tibetan Plateau on sum-

- mer precipitation in China[J]. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(6): 1233-1241. [王瑞, 李伟平, 刘新, 等. 青藏高原春季土壤湿度异常对我国夏季降水影响的模拟研究[J]. *高原气象*, 2009, 28(6): 1233-1241.]
- [48] Zuo Zhiyan, Zhang Renhe. The relationship between China eastern summer precipitation and spring soil moisture[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(14): 1722-1724. [左志燕, 张人禾. 中国东部夏季降水与春季土壤湿度的联系[J]. *科学通报*, 2007, 52(14): 1722-1724.]
- [49] Li Dengxuan, Wang Chenghai. The relation between soil moisture over the Tibetan Plateau in spring and summer precipitation in the eastern China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(1): 89-99. [李登宣, 王澄海. 青藏高原春季土壤湿度与中国东部夏季降水之间的关系[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(1): 89-99.]
- [50] Deng Mingshan, Meng Xianhong, Ma Ying, et al. Analysis on soil moisture characteristics of Tibetan Plateau based on GLDAS[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2018, 36(4): 595-602. [邓明珊, 孟宪红, 马英, 等. 基于GLDAS产品的青藏高原土壤湿度特征分析[J]. *干旱气象*, 2018, 36(4): 595-602.]
- [51] Li Guoping, Duan Tingyang, Gong Yuanfa, et al. A composite study of the surface fluxes on the Tibetan Plateau[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(4): 453-460. [李国平, 段廷扬, 巩远发, 等. 青藏高原近地层通量特征的合成分析[J]. *气象学报*, 2002, 60(4): 453-460.]
- [52] Xia Kun, Luo Yong, Li Weiping. Simulation of freezing and melting of soil on the northeast Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(20): 2145-2155. [夏坤, 罗勇, 李伟平. 青藏高原东北部土壤冻融过程的数值模拟[J]. *科学通报*, 2011, 56(22): 1828-1838.]
- [53] Li Lin, Zhu Xide, Wang Qingchun, et al. Mapping and analyses of permafrost change in the Qinghai Plateau using GIS[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(3): 320-328. [李林, 朱西德, 汪青春, 等. 青海高原冻土退化的若干事实揭示[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(3): 320-328.]

Distribution characteristics of soil temperature and moisture in the middle region of Nagqu over the Tibetan Plateau

Zhuoga^{1,2,3}, Luobu⁴, Basang Quzhen⁵

(1. Lhasa Branch of Chengdu Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Lhasa 850000, China;

2. Tibet Institute of Plateau Atmospheric and Environmental Sciences, Lhasa 850000, China; 3. Heavy Rain

and Drought-Floods Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province,

Chengdu 610072, China; 4. Tibet Meteorological Observatory, Lhasa 850000, China;

5. Nyingchi Meteorological Bureau, Nyingchi 860000, Tibet, China)

Abstract: The soil hydrothermal condition plays a significant role on the study of climate change and vegetation degradation and so forth over the Tibetan Plateau. The accurate characterization of soil moisture will also influence the simulation capability of precipitation in local and its downstream areas. Therefore, with soil temperature and soil moisture measurements at Amdo site of Nagqu Station of Plateau Climate and Environment, Chinese Academy of Sciences, and meteorological data at Amdo Meteorological Station during January to December 2014, this paper investigated the distribution of soil temperature and soil moisture along with their relationship with meteorological factors such as air temperature and precipitation in the middle region of Nagqu over the Tibetan Plateau. Results show that: The soil temperature exhibited sinusoid variation at shallow layer, then the curve is gradually close to straight line with the depth of soil. The soil temperature rose rapidly and the cooling process was quite slow. The freezing and thawing date were delayed with the depth of the soil while the freeze-up period was gradually shortened. The intra-day variation of soil moisture was small at different depths. The monthly variation indicated the structure of single peak, and the maximum and minimum values basically appeared in August and December, respectively. The rate of soil moisture increase was much slower than the decreasing process. The regional distribution derived from GLDAS-NOAH was similar to the variation of observation. The variation tendency of soil temperature and soil moisture was not consistent in one year, though there was close positive relationship between them. The temperature gradient of the shallow layer was obviously larger than the deep layer. The soil moisture of shallow layer was largest, followed by the middle layer, and the moisture was smallest at deep layer. With the transition from dry season to wet season, non-adiabatic heating increased due to the increase of solar radiation. The relationship of soil moisture to meteorological factors varied with different periods, but generally soil moisture was positively correlated with air temperature, precipitation and relative humidity while without obvious relationship with wind speed and sunshine duration.

Key words: Tibetan Plateau; soil temperature and soil moisture; distribution characteristics

(责任编辑: 孟宪红; 编辑: 武俊杰)