

藏北高寒草原土壤温度变化与冻融特征

李卫朋^{1, 2, 3}, 范继辉¹, 沙玉坤^{1, 3}, 陈有超^{1, 3}, 孙建⁴, 程根伟¹

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 山地表生过程与生态调控重点实验室, 四川 成都 610041;

2. 西华师范大学国土资源学院, 四川 南充 637002; 3. 中国科学院大学, 北京 10049;

4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘 要: 冻融是藏北高寒区重要的自然环境特征和表生过程, 冻融过程中土壤水分和热量迁移及其温湿度的时空分布特征对生态系统具有重要的意义。利用青藏高原申扎站高分辨土壤温度数据资料, 对土壤温度不同时间尺度的变化特征, 特别是冻融过程中土壤温度日和季节尺度变化特征进行分析。结果表明: 观测期内, 日尺度和月尺度上气温与土壤温度整体变化趋势具有一致性, 但土壤温度变化相对缓和, 且随着深度的增加, 这种平缓趋势和时滞愈加明显; 土壤温度冬春季变幅剧烈, 反应了冻融过程对土壤温度的显著调节作用; 小时尺度上, 土壤温度昼夜变化过程大致呈现正弦波型, 随深度增加, 振幅减小, 峰谷变化相位滞后延长。研究可为该区域生态、土壤、植被、微气候、微地貌等地表原位地理环境过程研究提供相关依据。

关键词: 藏北高原; 高寒草地; 冻融循环; 土壤水热过程

中图分类号: Q948, S152

文献标志码: A

冻结、消融交替现象(即冻融过程)是寒区基本自然特征之一, 一定程度上也是寒区的主导自然条件, 对寒区或寒区表生过程, 如水文过程、土壤过程、碳/氮循环等地球化学过程、生态过程以及局地甚至大尺度的气象与气候过程都有着重要的调控作用。青藏高原冰冻、消融交替过程中土壤水分和热量迁移过程的连续变化及其温湿时空分布特征对于高原生态系统变化具有非常重要的意义^[1-4]。相关学者已在青藏高原不同地区开展了大量土壤水分、土壤温度及其冻融过程相关的研究工作。例如, 杨梅学等基于 GAME - Tibet 所获得的资料得到了藏北高原土壤温湿的日变化^[5]、年变化^[6]、空间变化^[7]特征, 并分析了冻融过程在干湿季转换、热量分布变化中的作用; 王澄海等^[8]分析了高原土壤季节消融中感、潜热的贡献, 土壤湿度和高原湿季的相关性及冻土的年际变化的异常特征; 杨健, 马耀明^[9]对比了

不同下垫面下纳木错站、珠峰站和藏东南站 2007 年土壤温湿度的观测资料, 结果显示: 土壤温度的年变化和年平均的日变化趋势基本相同, 与太阳辐射变化特征一致; 在某一深度都有一个高含水层, 土壤消融(冻结)使土壤湿度迅速增大(减小), 但具体冻结深度和冻结时间上差别较大; 下垫面特征、土壤的冻结消融及其物理性质的差异是不同的土壤湿度变化的主要影响因素。王根绪等^[10-12]研究表明活动层开始冻结过程、开始融化过程时间及冻结持续时间是随着植被盖度变化而变化。

中国科学院申扎高寒草原与湿地生态系统观测试验站(以下简称申扎站)近年来开展了大量的高寒草地和高寒湿地观测试验, 已有一系列研究成果先后陆续发表^[13-21]。研究中发现藏北高原水文过程及其相关的生态、土壤、植被、微气候、微地貌等陆面过程均与高寒区独特土壤冻融交替及其水热调控

收稿日期(Received date): 2014 - 03 - 09; 改回日期(Accepted): 2014 - 05 - 15。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(31070405)、中国科学院西部行动计划项目(KZCX2 - XB3 - 08)和西华师范大学校基金项目(12A024)资助。[Supported by the National Natural Science Foundation of China (31070405), the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (KZCX2 - XB3 - 08), and the foundation of China West Normal University(12A024).]

作者简介(Biography): 李卫朋(1983 -), 男, 陕西蓝田人, 博士研究生, 主要从事水文水资源和生态水文研究。[Li Weipeng(1983 -), male, born in lantian of the Shanxi Province, candidate for Ph D, mainly engaged in research on hydrology and water Resources, and ecohydrology.]
E-mail: wplienli@163.com

效应紧密关联。然而土壤水分、土壤温度及其冻融过程在局地尺度上,受下垫面复杂性的影响,区域性差异亦极为显著。那么相对于青藏高原乃至藏北其它地区,申扎站所在地区冻融过程具体有什么特征?其土壤温湿度变化是否具有代表性?有待于加以证实。对此,该区域鲜有系统的土壤水热原位观测数据和相关研究。本文针对温度这一反映土壤冻融(即土壤水分相变)过程中热量传递的重要指标,利用申扎站 2010-08-08 T00:00—2011-07-30 T23:00 整点逐时高分辨的草原土壤温度原位观测数据,分析了 10~100 cm 深度土壤温度的日、月和小时尺度的变化特征,特别是冻融过程中土壤温度变化的基本特征,以便更好地理解藏北高原地气水热交换特点及其变化特征,为该区域生态、土壤、植被、微气候、微地貌等地表原位地理环境过程研究提供参考依据。

2 研究区域与方法

2.1 研究区概况

相关研究依托位于藏北的申扎站。申扎站($30^{\circ}57'N$, $88^{\circ}42'E$)隶属申扎县($30^{\circ}10' \sim 32^{\circ}10'N$, $97^{\circ}40' \sim 89^{\circ}48'E$),海拔 4 675 m,位于西藏中部、冈底斯山和藏北第二大湖色林错之间,地势较缓,该地区丘陵、高山和盆地相间分布,属藏北高原腹地南羌塘高原中部大湖盆密集区(图 1),是内陆高原亚寒带季风半干旱气候环境和冻融、风蚀等环境过程极为

独特的生态地域单元,拥有全球独一无二的高寒草原与湿地生态系统。该地区空气稀薄、低温、多风、日照时间长、干旱少雨且分布不均。年均温为 $0^{\circ}C$, 1 月的平均气温为 $-10.1^{\circ}C$, 7 月的平均气温为 $9.6^{\circ}C$ 。年降雨量为 300 mm,降雨主要发生在 5—9 月。年均太阳辐射为 2 915.5 h。高寒草原占草地面积 20%,高寒草地的植被盖度约为 40%,优势种为紫花针茅(*Stipa purpurea*)和苔草(*Carex moorcroftii*),伴生种为火绒草(*Stellera chamaejasme* Linn.)、狼毒(*Leontopodium alpinum*)和棘豆(*Oxytropis microphylla*)^[22-24]。

2.2 研究方法

观测点位于申扎站气象观测站附近的草原样地上,该区地形平坦,植被稀疏。所布设的高寒土壤温湿度观测系统主要包括土壤温湿度数据传感器(Smart Temp Sensor, S-TMB-M006; Soil Moisture-EC-5, S-SMC-M005)及其数据采集器(HOBO Weather Logger),数据传感器探头布设距离地面深度依次为:10 cm、20 cm、40 cm、60 cm、80 cm、100 cm。土壤温湿度的采集,采用美国 Onset 公司生产的 HOBO 温湿度数据采集记录器控制温湿度传感器,该数据采集记录器可测量温湿度参数并按照预定的时间间隔将其储存在内部存储器中,在完成记录功能后,与计算机连接,便可利用 HOBOware Pro 应用软件(用于设定单位元、存储周期、采样周期、读取数据并显示测量数据及其变化曲线等)将存储的数据提出并按其数值、时间进行分析、绘图。气象

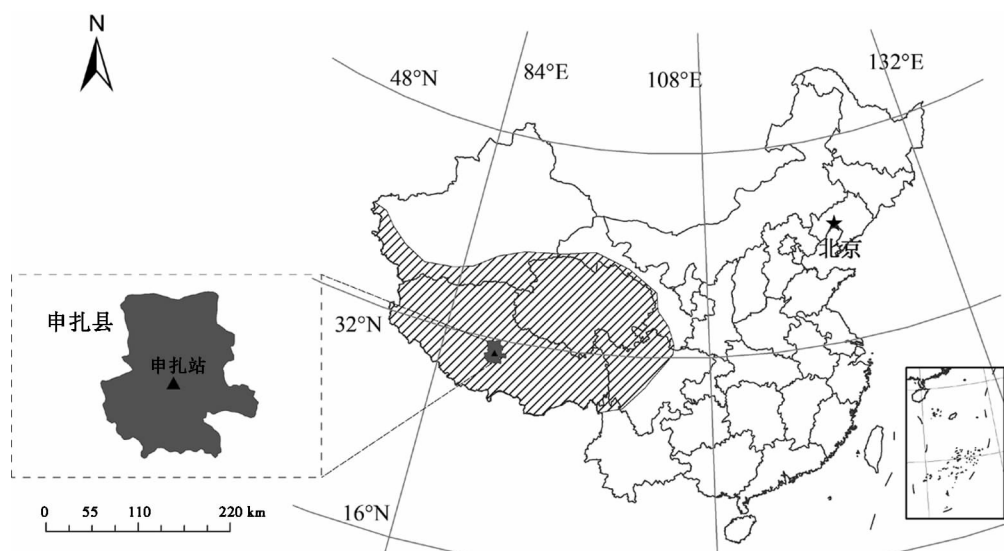


图 1 观测站位置

Fig. 1 Location of observation site

数据,采用的是申扎气象观测站的日气温数据。2010-08-08—2011-07-30共357 d的气温,以及同时段地下10 cm、20 cm、40 cm、60 cm、80 cm、100 cm的整点逐时土壤温度观测值。

在正式观测之前,已对观测试验数据进行了检验,证实观测数据可靠。一年四季的日数据以及各月的日数据都是通过每小时整点观测数据进行平均得到的。每个代表月份选取代当月每日对应时刻温度值的算术平均值组成一个24 h的日变化过程来表征该月温度的昼夜变化过程。

3 结果与分析

3.1 季节土壤温度变化过程

图2为申扎站2010-08-08—2011-07-30共357 d的日气温及其地下10 cm、20 cm、40 cm、60 cm、80 cm、100 cm的不同深度的土壤温度日均值变化序列。通过月平均气温及其对应时段的土壤温度可进一步简化分析,如图3,就一年内不同月份而言(表1),气温和不同观测深度的土壤温度均在8月达到一年中的最高值,且土壤温度随深度增加自上而下依次递减;气温与10 cm、20 cm、40 cm、60 cm、80 cm、100 cm深处土壤温度分别为10.50℃、14.66℃、14.34℃、13.93℃、13.56℃、13.33℃和12.86

℃;随后开始下降,至9月各观测深度月均土壤温度极为接近,土壤温度梯度为0.051℃/cm;10月,温度梯度已经发生逆转,土壤温度上低下高,且由上而下土壤温度下降幅度和速率依次降低;12月温差最大,温度梯度达到最大值,为0.0781℃/cm;至1月气温和10 cm、20 cm和40 cm深处土壤月均温都降到一年中的最低值,分别为-8.58℃、-6.48℃、-5.47℃和-3.48℃;而60 cm、80 cm和100 cm处土壤月均温要滞后到2月才达到最低值,分别为-2.64℃、-2.05℃和-1.41℃。3月各观测深度月均土壤温度再次靠近,温度梯度低达0.0005℃/cm;40 cm以上土壤温度梯度再次发生逆转,随后温度自地表至地下深部逐步升高,土壤温度又成为上高下低的格局,至7~8月又达到各层土壤温度峰值。至此,气温和土壤温度完成了-一个年周期的更替变化。10 cm、20 cm、40 cm、60 cm、80 cm、100 cm深处月均土壤温度与月均气温的相关系数分别为1.00、0.99、0.97、0.94、0.91和0.87,反应了气温对土壤温度的重要影响,而且随着深度的增加这种影响在逐渐减弱。

选取10~100 cm深处月均气温和月均土壤温度最高的8月、月均土壤温度梯度逆转开始降低的9月、月均气温和月均土壤温度最低的1月,月均土壤温度梯度开始回转变暖的3月四个特征月,对比

表1 月气温、土壤温度月平均值的季节变化过程

Table 1 Analyses on the variation of monthly air temperature and monthly soil temperature

月	T	T-10 cm	T-20 cm	T-40 cm	T-60 cm	T-80 cm	T-100 cm	温度梯度/(℃/cm)
8	10.50	14.66	14.34	13.93	13.56	13.33	12.86	0.020 0
9	8.30	12.11	12.01	11.99	11.89	11.87	11.65	0.005 1
10	2.10	7.54	7.88	8.62	9.00	9.34	9.54	0.022 2
11	-3.03	0.33	1.17	2.74	3.66	4.42	5.14	0.053 5
12	-8.39	-5.28	-3.81	-1.26	0.07	0.96	1.75	0.078 1
1	-8.58	-6.48	-5.47	-3.48	-2.26	-1.32	-0.38	0.067 8
2	-7.46	-4.75	-4.33	-3.28	-2.64	-2.05	-1.41	0.037 1
3	-3.87	-0.85	-1.27	-1.36	-1.33	-1.09	-0.90	0.000 5
4	-0.83	3.18	2.22	0.87	0.12	-0.05	-0.15	0.037 0
5	4.87	9.64	8.62	7.02	5.89	5.21	4.26	0.059 9
6	7.43	11.48	10.83	9.84	9.10	8.63	7.89	0.040 0
7	10.26	14.49	13.79	12.89	12.14	11.65	10.91	0.039 7
变异系数/%	772.96	170.10	158.78	134.55	123.19	113.03	104.56	62.20
地温-气温相关系数		1.00	0.99	0.97	0.94	0.91	0.87	

注:加粗字体表示该列最大值;加粗倾斜字体表示该列最小值

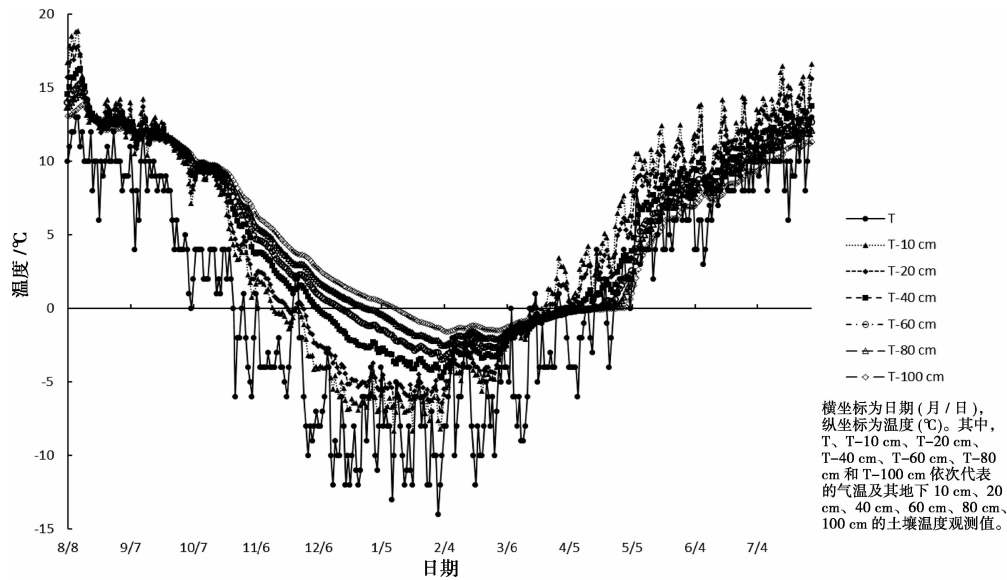


图 2 日气温及其日均土壤温度值的变化

Fig. 2 Variation of daily air temperature and daily soil temperature

每月日气温和日均土壤温度的变异系数(表 2)发现,整体上气温的变异系数高于土壤温度,土壤温度变异系数随深度增大而减小。8 月为无冻期,气温整体维持在较高的水平,土壤温度自上而下变异系数在减小,10 cm 处土壤温度变异系数略大于气温变异系数;9 月整体上变异系数同步减小;1 月,整体温度变异系数都比较大,特别是 40 cm、60 cm 和 100 cm 温度变异系数呈明显逐步增大;3 月表层 10 cm、20 cm 土壤温度变异系数剧增,超过了气温变异系数,反映了强烈的日冻融过程对表层土壤温度的显著影响,同时接近 0℃ 的温度值一定程度上也会造成变异系数偏大。

上述分析表明:在观测期内,日尺度和月尺度上,气温与土壤温度的整体变化趋势无异,同时,相对于气温的较大波动振幅,土壤温度变化明显缓和得多,而且随着深度的增加,这种平缓趋势越明显;但值得一提的是,土壤温度在春季温度梯度较大,反应了冻融过程对土壤温度的显著影响。因而,需要

进一步土壤温度在小时尺度上的昼夜变化情况。

3.2 土壤昼夜温度变化过程

基于图 3 变化,考虑小时尺度上随机天气过程的影响,选取 8 月、9 月、1 月、3 月四个特征月,对其土壤温度昼夜变化过程进行进一步分析。为消除随机天气过程的影响,对各点不同深度土壤温度进行处理:记录时段同一时刻不同日期的值进行累加,然后求平均,即为消除随机天气过程(如云等)后的该时刻的平均值,得到表 3、图 4。由表 3、图 4 可见,8 月,就变化最为显著的 10 cm 土壤温度而言,峰值在 18:00,为 22.35℃;谷值在 10:00,为 11.61℃;振幅为 5.37℃,变异系数为 23.29%;20 cm 深处峰值约滞后 5 h 至 23:00,为 18.39℃;谷值时滞相对较小,在 12:00,为 13.38℃;振幅为 2.51℃,变异系数为 10.55%;40 cm 深处峰值在次日 4:00~6:00,维持为 14.84℃;谷值在 17:00,为 14.15℃;振幅为 0.35℃,变异系数为 1.68%;60 cm 以下至 100 cm 土壤温度变异系数依次为 0.48%、0.15%、0.12%,

表 2 日均气温和日均土壤温度的变异系数

Table 2 The coefficient of variation (CV) of daily air temperature and daily soil temperature /%

月	T	T-10 cm	T-20 cm	T-40 cm	T-60 cm	T-80 cm	T-100 cm
8	14.86	15.69	13.63	9.76	7.66	6.19	4.65
9	23.92	9.40	7.78	5.38	4.14	3.52	2.89
1	-28.67	-13.18	-11.36	-15.07	-27.13	-51.93	-162.20
3	-75.09	-201.36	-100.46	-60.53	-48.45	-48.07	-40.58

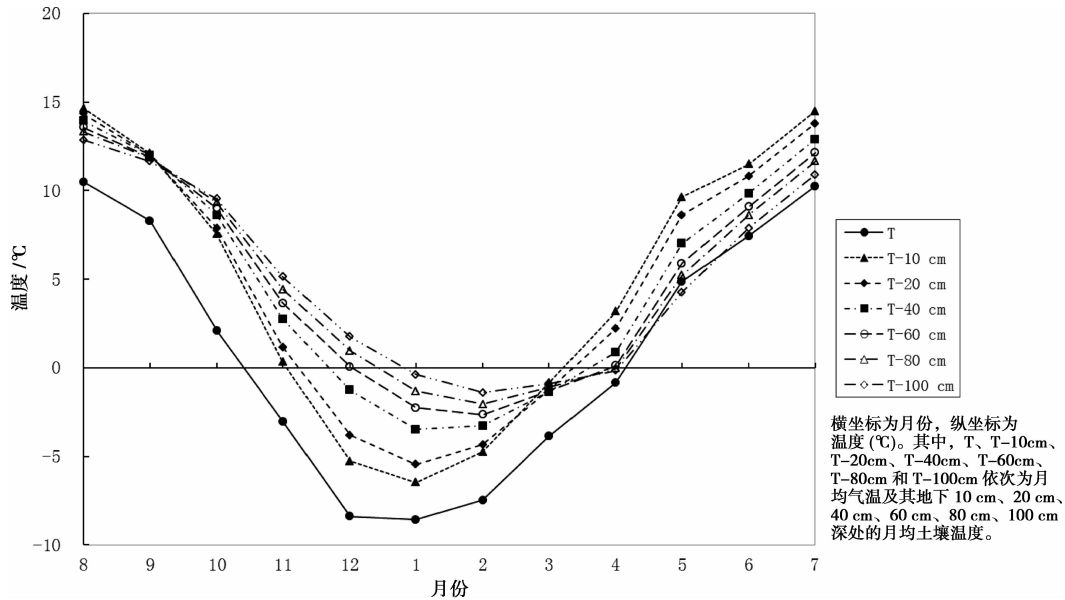


图 3 气温、土壤温度月平均值的季节变化过程

Fig.3 Variation of monthly air temperature and monthly soil temperature

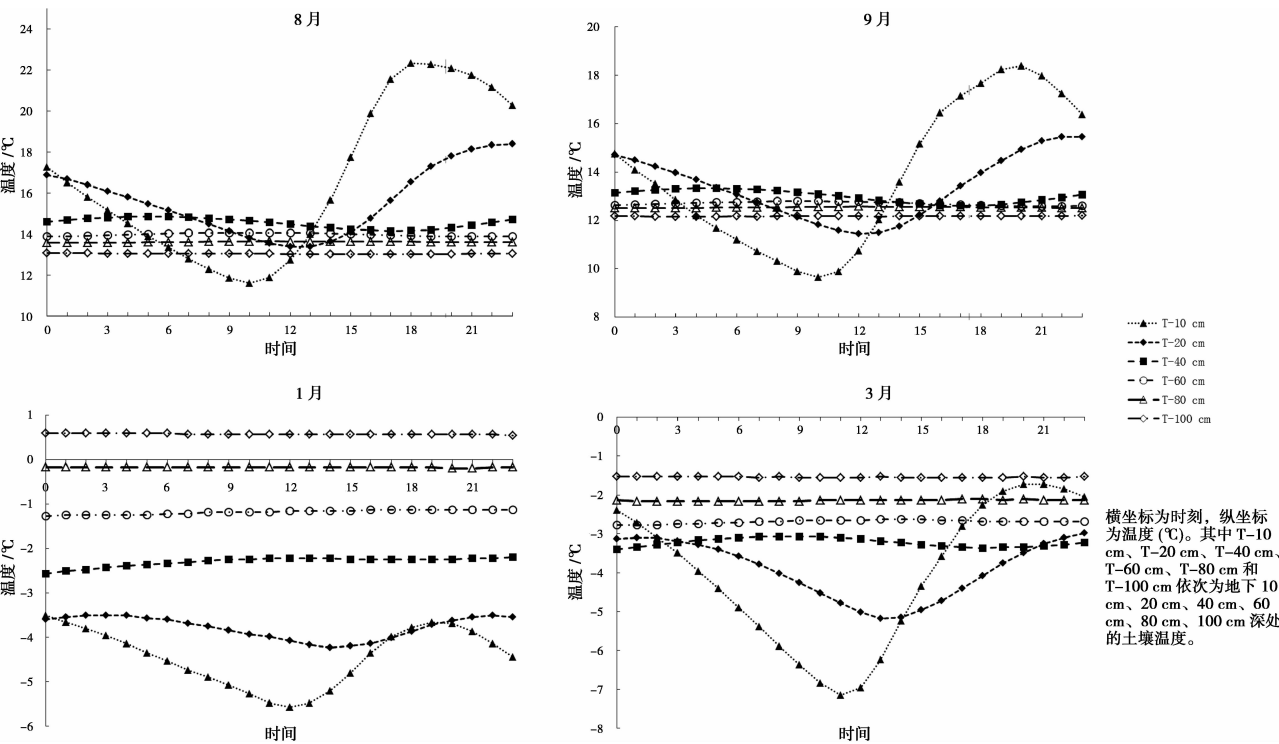


图 4 不同季节主要月份土壤温度的日变化过程

Fig. 4 Variation of hourly air temperature and hourly soil temperature

变化幅度很小,基本上全天维持在 13℃左右。可以看到降温过程比较缓慢,增温过程迅速。这可能与降温过程土壤水分蒸散减弱对热量散失的抑制有关。9月与8月的变化基本情况类似不大,主要表现为温度整体有所降低。1月,最明显的特征就是

10 cm 和 20 cm 的上部土壤温度基本上一整天都低于底层土壤温度。10 cm 土壤温度峰值出现在 0:00,为 -3.51℃;谷值在 12:00,为 -5.57℃;振幅为 1.03℃,变异系数为 -14.90%;20 cm 深处变化比较平缓,峰值出现在 2:00~4:00,为 -3.51℃;谷值

时滞相对较小,在 14:00,为 -4.23°C ;振幅为 0.36°C ,变异系数为 -6.74% ;40 cm 深处峰值在 23:00,为 -2.19°C ;谷值在 0:00,为 -2.57°C ;振幅为 0.19°C ,变异系数为 -4.54% ;60 cm 以下至 100 cm 土壤温度变化不大,基本上全天维持在 $-1.3 \sim -0.5^{\circ}\text{C}$ 。3 月,10 cm 土壤温度峰值在 20:00~21:00,为 -1.73°C ;谷值在 11:00,为 -7.16°C ;振幅为 2.71°C ,但因温度整体偏低,变异系数高达 -45.65% ;20 cm 深处变化比较平缓,峰值出现在 23:00,为 -2.98°C ;谷值时滞相对较小,在 13:00,为 -5.17°C ;振幅为 1.10°C ,变异系数为 -19.25% ;40 cm 以下至 100 cm 土壤温度变化不大,基本上全天维持在 $-3.4 \sim -1.5^{\circ}\text{C}$ 。整体而言,除了近地表 10 cm、20 cm 深处,土壤温度在一日之内的变幅相对较小,同时冻融过程中,土壤温度变异性都在增大,表层更为明显,在消融阶段变异性最强。

3.3 土壤水分冻结变化

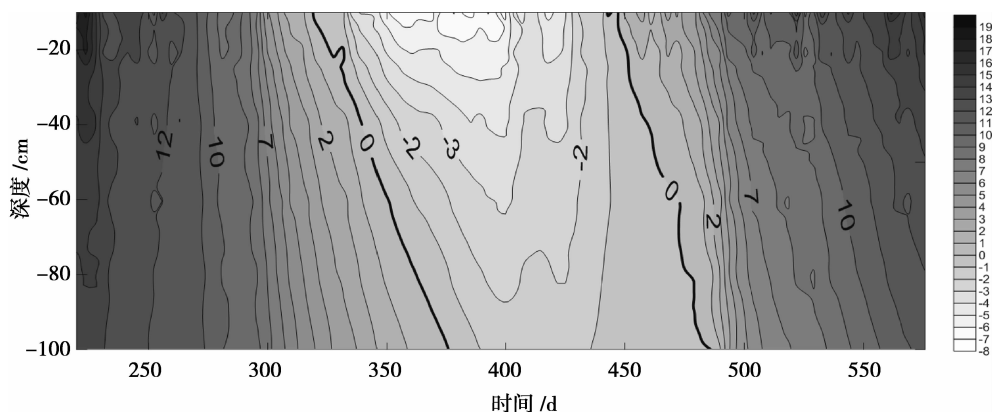
一般地近似认为 0°C 为冻结温度。通过统计日均土壤温度(图 2)发现,地下 10 cm 深处土壤冻结的时间最早,为 11 月 15 日;20 cm 深处次之,11 月 29 日;40 cm 深处,12 月 6 日;60 cm 深处次之,12 月 17 日;80 cm 深处,12 月 29 日;最后冻结的是 100 cm 深处,为次年 1 月 11 日;地下 10 cm 深处土壤消融的时间也最早,次年 3 月 25 日;20 cm 深处次之,为次年 3 月 27 日;40 cm 深处,4 月 4 日;60 cm 深处为次年 4 月 19 日;80 cm 深处,为次年 4 月 20 日;最后消融的也是 100 cm 深处,为次年 5 月 2 日;地下 10~100 cm 深处的冻结消融时间段为 11 月 15 日至来年 5 月 2 日长达 168 d。冻结过程需要 57 d,消

融过程只需要 28 d;活动层封冻状态持续时间为 73 d。

土壤温度等值线变化(图 5)可以进一步直观反映土壤冻融过程中冻结深度(0°C 等温线可近似代表冻结深度变化)及其随时间变化过程—冻结范围(0°C 等温线与时间轴所包围面积,高于 0°C 部分为未冻结土壤温度变化过程,低于 0°C 部分为冻结土壤温度变化过程)。图中 0°C 等温线并未闭合,显然,100 cm 以上土壤温度观测基本可满足地表生态、土壤过程研究的要求,但远未到达活动层冻结范围的底部。

4 讨论与结论

就全年而言,以 8 月为代表的无冻期,气温整体维持在较高的水平,土壤温度自上而下变异系数在减小,气温的变化趋势基本与土壤相同且低于所有土壤层温度,从上至下土壤温度依次降低,主要是因为夏季土壤的热量来源主要为太阳辐射;9 月逐渐进入冻结时期,土壤各层位温度梯度发生逆转,整体上变异系数同步减小,主要因为太阳直射点南移,以至于来自太阳辐射的热量已低于来自地下的热量;1 月,整体温度变异系数都比较大,特别是 40 cm、60 cm 和 100 cm 温度变异系数明显增大;结合表 2、表 3,发现其温度变幅并不大,主要因为其温度绝对值过低造成的。反映了单纯变异系数在反映小数值变化方面的局限性,因而需与振幅等参数结合起来,才能更好刻画变量的变化状况。3 月表层 10 cm、20 cm 土壤温度变异系数剧增,并超过气温变异系数,



横坐标为儒略日(即以 2010-01-01 为参照,从 2010-08-08—2011-07-30),纵坐标为土壤深度(cm);灰度越浅,温度越低。其中, 0°C 等温线(加粗黑色线条)可代表冻结深度变化过程

图 5 土壤温度等值线图

Fig. 5 Isothermal diagram diurnal ground temperature

冻融过程温度变化本来就大,再加上气温忽冷忽热使得土壤温度变异系数整体变大,尤其表层最为明显。3 月后,土壤各层温度梯度又变回上高下低,主要是因为太阳辐射逐渐增强的结果;同时不难发现,整个冻融过程呈现显著的缓冻速融的非对称现象,其原因可能是冻结过程中液态含水量逐渐减少,冰晶增多,隔水层逐渐发育,热传递减缓,同时冻结释放一定的潜热,这样可能会延长冻结过程;相应地,消融过程中,随着冰晶逐渐减少,液态水含量逐渐增加,土壤导热性增强,一定程度加速了消融过程。对于土壤温度变化的昼夜过程,除了近地表(10 cm)处,土壤温度在一日之内的变幅相对较小。冻融过程中,小时尺度土壤温度变异性都在增大,表层更为明显,特别是在消融阶段。土壤温度在季节和昼夜变化特点与杨梅学等^[25-26]在藏北其他地区的研究相似,温度昼夜变化基本也都呈正弦曲线型,一天只有一个峰值和一个谷值,且随着深度增加,振幅减小,大多数地点 60 cm 以下已基本上看不到明显的时间变化。

从图 5 申扎站地下土壤温度变化特点可以看出,冬季土壤的零度等温线深度明显超过 1 m,在 2 m 以上,因此要完全实现该地这土壤冻结层的观测必须有 2 m 以上的深度才能比较好的掌握地下冻结土壤层的温湿度变化。

通过以上分析,得出以下结论:

1. 就月尺度而言,10 cm、20 cm、40 cm、60 cm、80 cm、100 cm 深处土壤温度与气温的相关系数分别为 1.00、0.99、0.97、0.94、0.91 和 0.87,反映了气温对土壤温度的重要影响,而且随着深度的增加这种影响在逐渐减弱。土壤温度季节变化同时受太阳辐射和气温的变化影响明显,且随着深度的增加,温度变化振幅逐渐趋于平缓,而时滞逐渐拉大。

2. 在冻融期,水的相变成为影响土壤温度的又一影响因素。温度变化影响土壤水分冻融过程,同时冰晶(固态水)、未冻水(液态水)的对比关系可以影响土壤热传导过程,反过来冻融过程对土壤温度变化过程起到加速或延缓作用,增大了土壤温度的变异系数。这种影响在消融阶段表现的更为明显。

藏北高原冻融过程中的土壤温度研究,很大程度上受长时间序列的观测短缺的限制,同时,土壤水分与土壤温度如何相互反馈共同影响冻融过程需要通过土壤水分数据协同分析,同时需要增加土壤温度观测深度。另外,复杂的高原下垫面上,降水和

低温等极端恶劣条件对长时间序列观测数据的稳定性有很大的考验,不同观测点比较研究也是本研究下一步迫切需要拓展的工作。

致谢 本文在实验调查阶段得到了申扎站王小丹研究员、鲁旭阳副研究员的支持,野外工作得到了吴建波博士和一多先生等的协助,成文及修改过程中得到了广西大学杨云川博士的宝贵意见和建议,在此一并表示感谢。

参考文献(References)

- [1] Yang Meixue, Yao Tandong. A review of the study on the impact of snow cover in the Tibetan Plateau on Asian Monsoon [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(2):14-19 [杨梅学, 姚檀栋. 青藏高原雪盖对亚洲季风影响进展[J]. 冰川冻土, 1998, 20(2):14-19]
- [2] Li Shuxun, Nan Zhuotong, Zhao Lin. Impact of freezing and thawing on energy exchange between the system and environment [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(2):109-115 [李述训, 南卓铜, 赵林. 冻融作用对系统与环境间能量交换的影响[J]. 冰川冻土, 2002, 24(2):109-115]
- [3] Wu Qingbai, Shen Yongping, Shi Bin. Relationship between frozen soil together with its water-heat process and ecological environment in the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(3):250-255 [吴青柏, 沈永平, 施斌. 青藏高原冻土及水热过程与寒区生态环境的关系[J]. 冰川冻土, 2003, 25(3):250-255]
- [4] Gao Rong, Zhong hailing, Dong Wenjie, et al. Impact of snow cover and frozen soil in the Tibetan Plateau on Summer Precipitation in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(2):254-260 [高荣, 钟海玲, 董文杰, 等. 青藏高原积雪、冻土对中国夏季降水影响研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(2):254-260]
- [5] Yang Meixue, Yao Tandong, Hirose Nozomu, et al. Daily freeze-thaw cycle of surface soil of Qinghai-Tibet 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]
- [6] Wan Guoning, Yang Meixue, Wang Xuejia, et al. Variation in soil moisture at different scale of BJ site on the central Tibet 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]
- [7] Yang Meixue, Yao Tandong, Toshio Koike. The latitude and elevation effects of the ground temperature distribution in northern Tibet Plateau [J]. Mountain Research, 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度效应和高度效应[J]. 山地学报, 1999, 17(4):329-332]
- [8] 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、湿度变化在高原干湿季转换中的作用[J]. 高原气象, 2007, 26(4): 677-685]
- [9] Hu Hongchang, Wang Genxu, Wang Yibo, et al. Response of soil heat-water processes to vegetation cover on the typical permafrost and seasonally frozen soil in the headwaters of the Yangtze and Yellow Rivers [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(2):242-250 [胡宏昌, 王根绪, 王一博, 等. 江河源区典型多年冻土和季节冻土区水热过程对植被盖度的响应[J]. 科学通报, 2009, 54(2):242-250]
- [10] Cheng Huiyan, Wang Genxu, Wang Yibo, et al. Variation of soil temperature and water moisture of seasonal frozen soil with different vegetation coverage in the source region of the Yellow River, China [J]. Journal of Lanzhou University: Nature Sciences, 2008, 44(2):15-21 [程慧艳, 王根绪, 王一博, 等. 黄河源区不同植被类型覆盖下季节冻土冻融过程中的土壤温湿空间变化[J]. 兰州大学学报:自然科学版, 2008, 44(2):15-21]
- [11] Cheng Huiyan, Wang Genxu, Hu Hongchang, et al. The variation of soil temperature and water content of seasonal frozen soil with different vegetation coverage in the headwater region of the Yellow River, China [J]. Environmental geology, 2008, 54(8):1755-1762
- [12] Wang Genxu, Li Yuanshou, Wu Qingbai, et al. Impacts of permafrost changes on alpine ecosystem in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 49(11):1156-1169
- [13] Lu Xuyang, Yan Yan, Fan Jihui, et al. Dynamics of above-and below-ground biomass and C, N, P accumulation in the alpine steppe of Northern Tibet [J]. Journal of Mountain Science, 2011, 8(5):838-844
- [14] Lu Xuyang, Fan Jihui, Yan Yan, et al. Gross Nitrification and Denitrification in Alpine Grassland Ecosystems on the Tibetan Plateau [J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2012, 44(2):188-196
- [15] Fan Jihui, Cao Yingzi, Yan Yan, et al. Freezing-thawing cycles effect on the water soluble organic carbon, nitrogen and microbial biomass of alpine grassland soil in Northern Tibet [J]. African Journal of Microbiology Research, 2012, 6(3):562-567
- [16] Sun Jian, Cheng Gengwei, Li Weipeng. Meta-analysis of relationships between environmental factors and aboveground biomass in the alpine grassland on the Tibetan Plateau [J]. Biogeosciences, 2013, 10(3):1707-1717
- [17] Sun Jian, Cheng Gengwei, Li Weipeng, et al. On the variation of NDVI with the principal climatic elements in the Tibetan Plateau [J]. Remote Sensing, 2013(5):1894-1911
- [18] Cai Yanjiang, Wang Xiaodan, Ding Weixin, et al. Potential short-term effects of yak and Tibetan sheep dung on greenhouse gas emissions in two alpine grassland soils under laboratory conditions [J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49(8):1215-1226
- [19] Wu Jianbo, Hong Jiangtao, Wang Xiaodan, et al. Biomass partitioning and its relationship with the environmental factors at the alpine steppe in Northern Tibet [J]. PLoS ONE, 2013, 8(12):1-8
- [20] Cai Yanjiang, Wang Xiaodan, Ding Weixin, et al. Effects of freeze-thaw on soil nitrogen transformation and N₂O emission: a review [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(5):1033-1043 [蔡延江, 王小丹, 丁维新, 等. 冻融对土壤氮素转化和 N₂O 排放的影响研究进展[J]. 土壤学报, 2013, 50(5):1033-1043]
- [21] Du Ziyin, Cai Yanjiang, Wang Xiaodan, et al. Research progress on the effects of soil freeze-thaw on plant physiology and ecology [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(1):1-9 [杜子银, 蔡延江, 王小丹, 等. 土壤冻融作用对植物生理生态影响研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(1):1-9]
- [22] Chen Tao, Yang Wunian, Xuyao. Research on the dynamic change of the grassland degradation in Shenzha County with RS and GIS Technology [J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition, 2011, 36(5):134-139 [陈涛, 杨武年, 徐瑶. 基于 RS 和 GIS 的藏北地区草地退化动态监测与驱动力分析——以申扎县为例[J]. 西南师范大学学报:自然科学版, 2011, 36(5):134-139]
- [23] Lu Xuyang, Fan Jihui, Yan Yan, et al. Soil water soluble organic carbon under three alpine grassland types in Northern Tibet, China [J]. African Journal of Agricultural Research, 2011, 6(9):2066-2071
- [24] Sun Jian. Study on the biomass characteristics and their allocation mechanism in Tibetan Alpine Grassland [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013 [孙建. 西藏高寒草地植被生物量及其分配机制研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2013]
- [25] 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):6-9 [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):6-9]
- [26] Yang Meixue, Yao Tandong, Ding Yongjian, et al. The daily variation of the soil temperature in different seasons at site D110 in the northern part of Xizang Plateau [J]. Scientia Geographica Sinica, 1999, 19(6):570-574 [杨梅学, 姚檀栋, 丁永建, 等. 藏北高原 D110 点不同季节土壤温度的日变化特征[J]. 地理科学, 1999, 19(6):570-574]

Soil Temperature Variation and Thaw-freezing Cycle in the Alpine Cold Steppe, Northern Tibetan Plateau

LI Weipeng^{1, 2, 3}, FAN Jihui¹, SHA Yukun^{1, 3}, CHEN Youchao^{1, 3}, SUN Jian⁴, CHENG Genwei¹

*(Key Laboratory of Mountain Environment Evolution and Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment,
Chinese Academy of Sciences, Chengdu, 610041, China;*

2 Land and Resources College, China West Normal University, Nanchong 637002, China;

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

*4 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research,
Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China)*

Abstract: Thaw-freezing cycle is the primary environment character and land surface processes in the alpine cold region, such as Northern Tibetan Plateau. The variation of soil temperature and soil moisture underground during the thaw-freezing processes are of great significance to ecosystems. The soil temperature, the basic effecting factor of the thaw-freezing cycle, was studied at Xainza at hourly to monthly scale, to offer references for the scientific research such as ecology, soil, land cover, microclimate, microtopography on the Northern Tibetan Plateau. The results showed that the variation of soil temperature was similar to that of air temperature at daily to monthly scale for their robust correlation, while the soil temperature varied in a more slowly style with time-delays, which enhanced with the depth. Also, the soil temperature got strong coefficient of variation (CV) values during thaw phrase, indicating the effect of freezing-thawing processes on temperature. At hourly scale, the soil temperature varied in sine waves style, with the waves smoothed and delayed gradually for the increase of depth.

Key words: Northern Tibetan Plateau; alpine cold grassland; thaw-freezing cycle; hydrological and thermal processes