

祁连山林草复合流域土壤温湿度时空变化特征^①

赵维俊^{1,2}, 刘贤德^{1,2}, 金 铭^{1,2}, 敬文茂^{1,2}, 王顺利^{1,2}, 任小凤^{1,2},
马 剑^{1,2}, 武秀荣^{1,2}

(1 甘肃省祁连山水源涵养林研究院, 甘肃张掖 734000; 2 甘肃省森林生态与冻土水文水资源重点实验室, 甘肃张掖 734000)

摘 要: 利用祁连山森林生态站设在祁连山排露沟流域的青海云杉林和草地气象观测场土壤温湿度观测资料, 采用对比分析及线性趋势等方法进行青海云杉林和草地 2 个不同下垫面土壤温湿度的时空特征分析。结果表明: 林草地土壤温度日变化表现为浅层(10 cm 和 20 cm 土壤深度)土壤温度呈正弦曲线变化, 深层(40、60、80 cm 土壤深度)土壤温度约呈直线变化。土壤温度年变化表现为林地土壤温度 7 月底达到最高值, 而后开始下降, 翌年 2 月上旬达到最低值; 草地土壤温度 7 月底达到最高值, 而后开始下降, 12 月中旬达到最低值; 林地封冻时长明显大于草地封冻时长。林草地土壤湿度日变化不受太阳辐射的影响。林地不同土层土壤湿度年动态变化趋势均一致, 呈现正弦曲线的变化规律; 草地在土壤结冻后和未消融期间, 土壤湿度较低且变化不明显; 其他时间土壤湿度变化明显。林地中, 除 40 cm 深度外, 其他深度土壤湿度均保持在相对稳定的范围内, 而且变化趋势基本一致。草地浅层土壤在土壤封冻前和解冻后, 土壤温湿度变化趋势相反, 封冻期间土壤温湿度亦保持在相对稳定的范围内, 温度变化明显, 湿度变化不明显; 其他土层土壤温湿度总体变化趋势一致。

关键词: 林草复合流域; 土壤温湿度; 时空变化; 祁连山

中图分类号: S152.6 **文献标识码:** A

地处世界第三极青藏高原北缘的祁连山山区是气候变化的敏感区域^[1], 受全球气候变化的影响, 近 50 年来祁连山地区气温显著上升, 平均气温倾向率为 $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ^[2]。气温的升高改变了森林生态系统原有的局地气候条件, 尤其对外界扰动十分敏感的土壤温湿度的影响及随后的一系列反馈, 直接影响到植被的变化过程^[3], 气候-土壤-植被形成相互作用的循环系统, 土壤水热变化作为土壤特性的重要参数一直受到重视^[4-5]。目前, 很多学者对祁连山区土壤水热变化进行了大量研究, 如胡健等人^[6]对祁连山排露沟流域海拔梯度上的乔灌木土壤表层 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 温湿度在海拔梯度上的变化规律进行了研究, 随海拔梯度增加, 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土层土壤湿度增加的幅度为 $0.027\text{ m}^3/\text{m}^3$ 和 $0.023\text{ m}^3/\text{m}^3$, 土壤温度降低的幅度分别为 0.32 和 0.28。牛赞等人^[7]对祁连山大野口流域青海云杉林分结构及其水热特征进行了分析, 林分水平结构、垂直结构和多度与土壤温湿度存在一定的关系。唐振兴等人^[8]分析了

土壤温湿度与主要气象因子的关系, 发现土壤温度的控制因子是气温、空气相对湿度, 湿度的受控因子为气温、饱和水汽压差和向上净辐射, 并且在月尺度上建立了土壤温度估算的经验模型。但这些研究较少涉及土壤水热在一定土壤剖面深度(林草根系最大深度)不同土层的日、年变化特征和地表植被状况如何影响土壤水热耦合关系? 因此, 深入研究气候变化背景下祁连山区局地小环境的土壤水热时空变化特征意义重大。

由于祁连山特殊的地理位置及其地貌特征和大面积的冻土存在, 其明显的空间异质性加上林草相间分布是祁连山水源流域最基本、最广泛的植被组合特征^[9], 使得土壤表层含有大量的水分在通过季节的冻结和消融过程中发生明显的变化规律, 这需要对土壤干湿状况和热量进行细致深入研究, 同时, 同一地区不同试验点土壤水热变化研究有助于比较研究和尺度转换的实现。为此, 本文利用祁连山森林生态站设在排露沟流域的青海云杉林和草地气象观测场一年

基金项目: 国家自然科学基金项目(91425301、31360201、41461004)、科技基础性工作专项(2014FY120700)、甘肃省自然科学基金项目(17JR5RG351)和国家林业局陆地生态系统定位研究网络项目(CTERN)资助。

作者简介: 赵维俊(1981—), 男, 甘肃靖远人, 博士, 副研究员, 主要从事森林与土壤生态研究。E-mail: zhaoweijun1019@126.com

的土壤温湿度数据资料,分析土壤 80 cm 深度范围内的温湿度时空变化特征,包括青海云杉林和草地不同土层的土壤温湿度的日变化和年变化以及不同土层土壤温湿度之间的耦合关系,以便更好地理解祁连山林地、草地的土壤水热时空变化规律和水热之间的协同作用,为研究亚高山地带森林生态系统微气候、土壤、植被、微地貌等地表原位地理环境过程提供参考依据。

1 研究区概况

研究区位于祁连山中段西水林区的排露沟流域(100°17' E, 38°24' N),流域总面积 2.85 km²,长 4.25 km,纵坡比降 1:4.2,海拔 2 600 ~ 3 800 m;年平均气温 -0.6 ~ 2.0℃,年平均蒸发量 1 052 mm,年平均日照时数 1 893 h,日辐射总量 110.28 kW/m²,年平均相对湿度为 60%^[10-11],属高寒半干旱山地森林草原气候^[12-13]。流域自然条件复杂,水热条件差异大,形成了多种具有明显垂直梯度的植被类型和土壤类型。海拔从低到高,植被类型依次为山地草原植被、山地森林草原植被、亚高山灌丛草甸植被、高山冰雪植被;土壤类型依次为山地栗钙土、山地灰褐土、亚高山灌丛草甸土、高山寒漠土。在各类土壤中山地灰褐土和亚高山灌丛草甸土是生长森林的土壤,山地灰褐土分布在海拔 2 600 ~ 3 300 m 地带,是乔木林的主要分布带;亚高山灌丛草甸土分布在海拔 3 300 ~ 3 800 m 亚高山地带,是湿性灌木林的主要分布带。建群种青海云杉呈斑块状或条状分布在实验区海拔 2 600 ~ 3 300 m 阴坡和半阴坡地带,与阳坡草地犬齿交错分布;灌木优势种有金露梅(*Potentilla fruticosa*)、

鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)和吉拉柳(*Salix gilashanica*)等,草本主要有珠牙蓼(*Polygonum viviparum*)、黑穗苔(*Carex atrata*)和针茅(*Stipa*)等。

2 研究方法

2.1 观测场布设

土壤温湿度自动观测系统分别位于祁连山森林生态系统定位研究站设在排露沟流域海拔 2 700 m 的青海云杉林和 2 570 m 半阳坡草地气象综合观测场内。其中,青海云杉林样地位于坡面的中下部,坡向 NE(北东),坡度为 23°(表 1),该样地林分密度为 1 152 株/hm²,林龄 96 a,郁闭度 0.55,平均树高 10.6 m,平均胸径 15.3 cm。林下灌木层主要由银露梅(*Potentilla glabra*)组成,盖度约 4%;草本层有大披针苔草(*Carex lanceolata*)、珠牙蓼(*Polygonum viviparum*)、藓生马先蒿(*Pedicularis muscicola*)等,盖度约 37%;苔藓层平均厚度为 8.44 cm,盖度约 30%。土壤为灰褐土,土层厚度约为 76 cm,表层容重 0.63 g/cm³,随土层深度的增加,其容重不断增加,但容重均小于 1.00 g/cm³;土壤的孔隙度和毛管孔隙度较大,有机质积累丰富。草地样地位于阳坡,坡向 SW(南西),坡度 10°,覆盖度为 72%,优势种为大针茅(*Stipa grandis*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、马蔺(*Iris ensata*)、狼毒(*Stellera chamaejasme*)等。土壤为栗钙土,土层厚度约为 80 cm,表层容重 1.10 g/cm³,随土层深度的增加,其容重不断增加,容重仍大于 1.00 g/cm³,可能源于母质层质地偏砂质,土壤孔性良好^[14-15]。

表 1 林地和草地气象观测场基本信息^[14]

Table 1 Basic information of meteorological observation fields of forestland and grassland

样地	植被类型	海拔(m)	坡度(°)	坡向	微地形	郁闭度(盖度)	冻土深度(cm)
林地	青海云杉林	2750	23	NE	凹坡面	0.55	211
草地	山地草原	2570	10	SW	凹坡面	(0.72)	154

2.2 土壤温湿度观测

所布设的青海云杉林和草地 2 个气象综合观测场土壤温湿度自动观测系统主要包括土壤温湿盐数据传感器(HydraProbe, 土壤温度传感器范围: -30 ~ 55, 单位: °C, 精度: ±0.1; 土壤湿度传感器范围: 干到饱和, 单位: 体积分数(%), 精度: ±0.03)及其数据采集器(Campbell CR3000), 数据传感器探头布设距离地面深度依次为: 10、20、40、60、80 cm。土壤温湿度的采集, 采用温湿度数据采集记录器控制温湿度传感器(HOBO), 利用 loggerNet 软件主界面进行存储的数据提出并按其数值、时间进行分析、绘图。

2 个观测场的土壤温湿度测定时间间隔均为 10 min 记录 1 次, 日变化及小时变化均按 10 min 测定值通过平均求得, 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。

2.3 数据处理和统计分析

本文采用 2014 年 6 月 1 日—2015 年 5 月 31 日整一年的观测数据。为了避免随机天气过程的影响, 文中采用的日数据是 2014 年 6 月 1 日—2015 年 5 月 31 日每日 0:00 数据; 小时数据选用了 2014 年 6 月 1 日—2015 年 5 月 31 日整点小时平均值^[4]。采用对比分析及线性趋势分析等方法分析祁连山青海云杉林

和草地土壤温湿度时空变化。所有数据均采用 Excel 进行制图,利用 SPSS 进行统计学分析。

3 结果与分析

3.1 林地和草地土壤温度的变化特征

3.1.1 土壤温度的日变化特征 对祁连山排露沟流域林地和草地土壤温度日变化进行了统计分析(图1),从图1可以看出,林地和草地土壤温度日动态变化趋势较为一致,在不同土壤深度的变化呈现出以下特点:浅层(10 cm 和 20 cm 深度)土壤温度呈正弦曲线变化,温度变化较为明显,且 10 cm 深度土壤

温度变化较 20 cm 深度明显;深层(40、60 和 80 cm 深度)土壤温度约呈直线变化,温度变化不明显,这 3 个深度土壤温度在林地中的变化幅度表现为 $60\text{ cm} > 80\text{ cm} > 40\text{ cm}$,在草地中的变表现为 $40\text{ cm} \approx 60\text{ cm} > 80\text{ cm}$ 。因此,太阳辐射的日变化影响深度至少在 20 cm 的深度。浅层土壤温度林地的最高值出现在 21:00 时左右,而草地最高值出现在 18:00 时左右;林地最低值出现在 11:00 时左右,而草地最低值出现在 9:00 时左右。从增温与降温来看,林地升温慢降温快,而草地升温快降温慢,林地和草地 20 cm 深度土壤温度位相均滞后于 10 cm 深度。

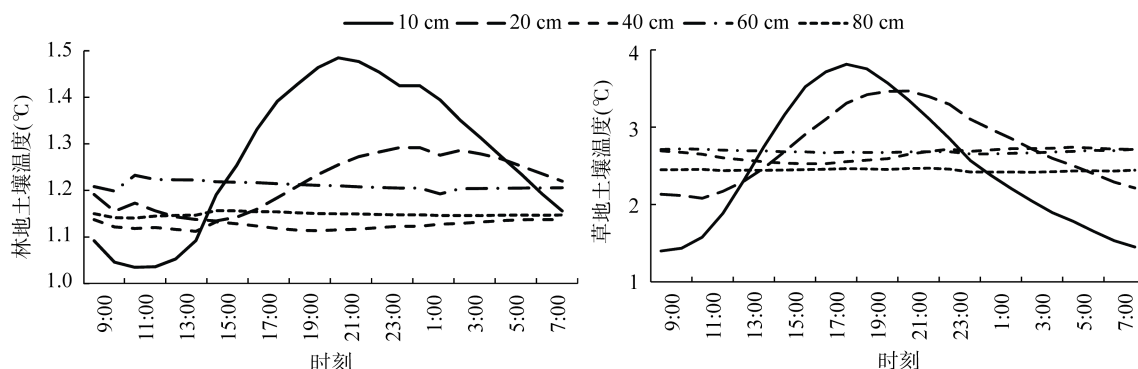


图1 林地和草地土壤温度日动态

Fig. 1 Daily changes of soil temperatures of forestland and grassland

3.1.2 土壤温度的年变化特征 对林地和草地土壤温度的年变化进行了分析(图2),从图2可以看出,林地和草地不同深度土壤温度年动态变化趋势均一致,均呈现正弦曲线变化规律,这与太阳辐射年际变化特征一致,说明太阳辐射变化至少影响到 80 cm 深度土壤温度。夏季林草地吸收的热量由地表向深层传送,冬季情况相反,林地土壤温度 7 月底达到最高值,而后开始下降,翌年 2 月上旬达到最低值;草地土壤温度 7 月底达到最高值,而后开始下降,12 月中旬达到最低值。受天气的影响,浅层土壤温度波动较大,

随土层深度的增加,深层土壤温度波动减小。林地从当年 6 月初至 10 月中旬和翌年 5 月上旬开始,草地从当年 6 月初至 9 月上旬和翌年 3 月上旬开始,随土层深度的增加,土壤温度均不断减小;其他时间,土壤温度随土层深度的增加其温度均不断升高。

林地和草地土壤温度在日变化尺度上随时间变化表现出明显的冻融特点。以刘帅等人^[16]对冻土季节冻融过程的划分为依据(当土壤日最高温度 >0 且土壤最低温度 <0 时,土壤为封冻期;当土壤日最高温度 >0 且土壤最低温度 <0 时,土壤为解

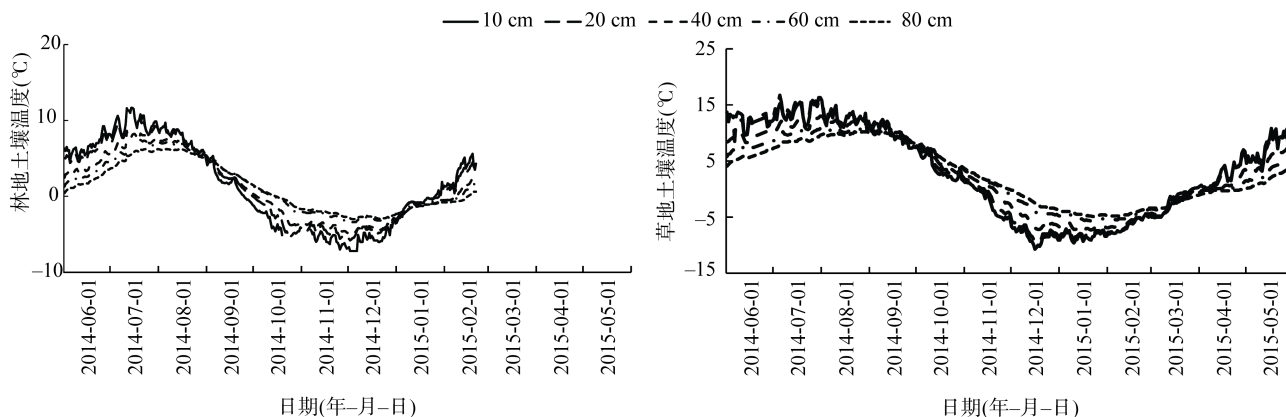


图2 林地和草地土壤温度年动态

Fig. 2 Yearly changes of soil temperatures of forestland and grassland

冻期)。林草地土壤不同土层进入封冻时长各不相同(表 2),土壤自上而下冻结,下层土壤冻结有一定的滞后,林地封冻时长明显大于草地封冻时长。

3.2 林地和草地土壤湿度的变化特征

3.2.1 土壤湿度的日变化特征 林地和草地土壤湿度的日动态变化趋势较为一致,而且土壤日变化较小或不明显(图 3)。相对而言,在不同深度土壤中,林地和草地 10 cm 和 20 cm 深度土壤湿度的变幅明显于其他深度,其他深度土壤湿度日变化非常小,基本不受太阳辐射日变化的影响。林地土壤湿度变幅大小表现为 10 cm>20 cm>40 cm>60 cm>80 cm;草地土壤湿度大小表现为 10 cm>40 cm>20 cm>60 cm>80 cm。此外,林地不同深度土壤湿度高于草地同一深度土壤

湿度。

表 2 林地和草地不同深度土壤的封冻和解冻时间
Table 2 Freezing and thawing time of different soil layers of forestland and grassland

样地	土壤深度 (cm)	封冻时间 (年-月-日)	解冻时间 (年-月-日)	封冻时长 (d)
林地	10	2014-11-07	2015-04-23	167
	20	2014-11-15	2015-04-27	163
	40	2014-11-18	2015-05-13	176
	60	2014-12-04	2015-05-17	164
	80	2014-12-05	2015-05-22	179
草地	10	2014-11-09	2015-03-26	137
	20	2014-11-14	2015-03-30	136
	40	2014-11-20	2015-04-07	138
	60	2014-11-26	2015-04-07	137
	80	2014-11-30	2015-04-29	150

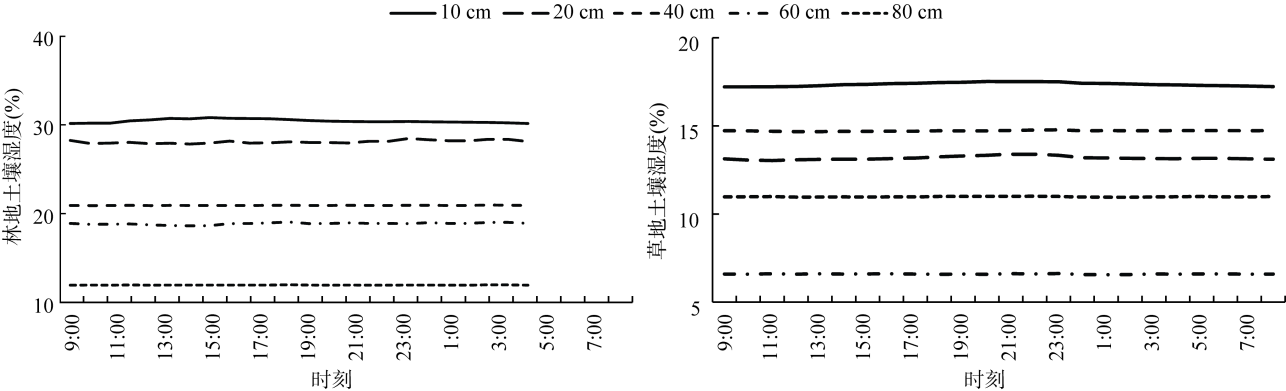


图 3 林地和草地土壤湿度日动态

Fig. 3 Daily changes of soil moistures of forestland and grassland

3.2.2 土壤湿度的年变化特征 从林地和草地土壤湿度年变化分析可以看出(图 4),总体上林地不同深度土壤湿度年动态变化趋势均一致,呈现正弦曲线的变化规律。林地土壤湿度 7 月底达到最高值,而后开始下降,翌年 2 月上旬达到最低值。在土壤未冻结前,土壤湿度在 10 cm 深度含水量最大,其次分别是 20 cm>60 cm>40 cm>80 cm;土壤冻结后未消融之前,10 cm 深度含水量亦最大,其次分别是 60 cm>20 cm>

80 cm>40 cm;土壤消融后,10 cm 深度含水量仍最大,其次分别是 20 cm>60 cm>40 cm>80 cm。在一年当中,林地 10 cm 深度土层始终为一个高含水层,湿度变化范围为 13%~32%,其次是 20 cm 和 60 cm,40 cm 和 80 cm 深度土层最低,这与林木的地上层结构(林冠截留)和林木根系深度有关(青海云杉林平均根长为 60 cm)。草地 10 cm 和 20 cm 深度土层在未冻结之前因受降雨等的影响,湿度表现出明显的突变特

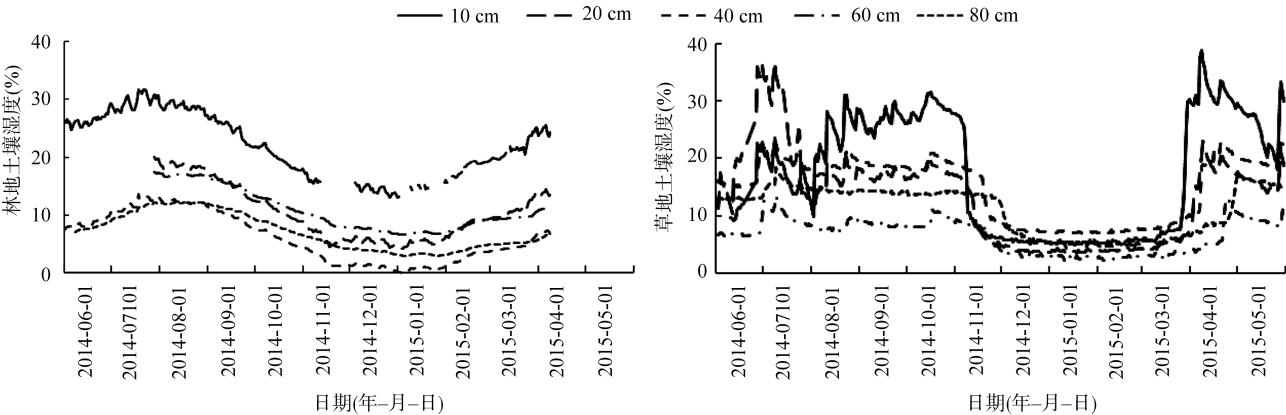


图 4 林地和草地土壤温度年动态

Fig. 4 Yearly changes of soil temperatures of forestland and grassland

点,而且其含水量也较高,其他深度土层的变化趋势均为一致。因地下水深,土壤湿度主要受大气降水的影响,试验期间草地生长季初期到末期,土壤湿度7月上旬达到最高值,其他时间湿度变化较为缓和且在同一水平线上;进入到土壤结冻和未消融期间,土壤湿度较低且变化不明显;到土壤解冻时,土壤因吸收

太阳辐射温度升高,土壤湿度增加。

3.3 林地和草地土壤温湿度耦合关系

对林地和草地一年间不同深度土壤温湿度进行了耦合分析(图5),从图5可以看出,林地和草地土壤温湿度相比较其在一年间的变化趋势不一致。林地中,不同深度土壤温湿度均保持在相对稳定的范围

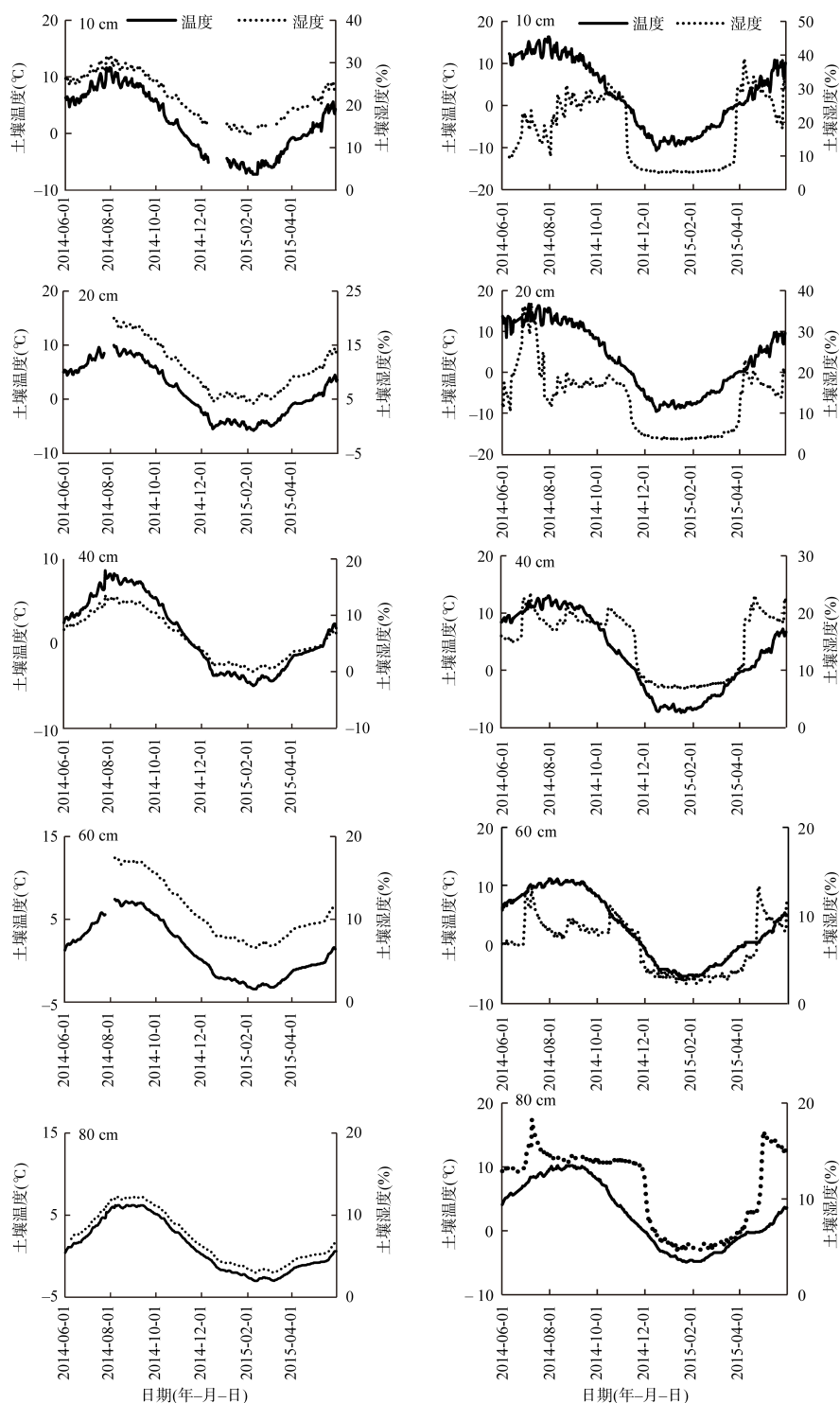


图5 林地和草地不同土层土壤温湿度耦合关系(图左为林地,图右为草地)

Fig. 5 Coupling relationship between temperatures and moistures in different soil depths of forestland (left) and grassland(right)

内,均呈正弦型的曲线变化规律,而且变化趋势基本一致,不同深度土壤温湿度 Pearson 相关系数均达到 0.99,相关性达到极显著水平($P < 0.01$),林地土壤温湿度之间具有良好的耦合关系。草地浅层(10 cm 和 20 cm 深度)土壤在进入封冻前,土壤温湿度呈相反的变化趋势,即当土壤温度降低时,土壤湿度升高;在土壤进入解冻后,土壤温湿度亦呈相反的变化趋势,即当土壤温度升高时,土壤湿度降低;土壤进入封冻后和解冻前,土壤温湿度保持在相对稳定的范围内,温度变化明显,湿度变化不明显;其他深度土壤温湿度变化趋势总体较为一致,在土壤进入封冻前和解冻后其温度变化较为缓和,而湿度变化较为明显。大体来看,土壤温湿度在封冻前同步降低,在解冻后同步升高;封冻期间,土壤温湿度亦保持在相对稳定的范围内,水热条件较为稳定。相关性分析表明,草地不同深度土壤温湿度之间极显著相关($P < 0.01$),其 Pearson 相关系数达到 0.638 以上,二者之间具有良好的耦合关系。

4 讨论

4.1 林地和草地土壤温度变化特征

土壤温度除了与区域性因素(海拔、经度、纬度)有关外,还与局地因素(地表覆盖、土壤质地、土壤湿度等)有关,特别是亚高山地带,土壤温度明显受局地因素的影响^[17]。本研究表明,两种典型下垫面条件下的林地和草地土壤温度时间尺度包括日变化、年变化均呈正弦型的曲线变化规律。空间尺度表现为在不同土层深度,林地和草地土壤温度日变化的影响深度为 20 cm,20 cm 以下土壤温度振幅变化很小,一方面与土壤湿度状况有关,土壤湿度大,则土壤温度变化幅度小;另外一个方面与土壤质地有一定的关系,林地和草地土壤石砾含量较大也是其明显的特点之一。该研究结果与地处青藏高原纳木错站、珠峰站和藏东南站 3 个典型下垫面的研究结果相似^[18]。林地和草地土壤温度年变化的影响深度达到了 80 cm 以下,而且其冻融过程呈现出明显的缓慢降温过程和迅速的升温过程的特点,即:非对称的缓冻速融的特点,原因是土壤在开始冻结的过程中要释放一定的潜热,一定程度上延迟冻结过程;消融开始时,冻土溶解,液态水增加,土壤导热性增加,加速消融,其变化特征与藏北高原高寒草地土壤冻融特点相似^[19]。另外,林地的土壤封冻时长比草地约多 30 d,主要原因一是林冠大幅降低了太阳辐射,二是林冠阻隔了热量与水汽交换,同时反射地面长波辐射^[20],该结果

及林地和草地的封冻时长与任璐等人^[21]利用冻土器测定的研究结果接近。

4.2 林地和草地土壤湿度变化特征

土壤湿度与大气降水、植被、土壤类型、气温等密切相关^[22-23]。祁连山排露沟流域林地和草地土壤湿度日变化不明显,主要原因是地处亚高山地带的山地森林有明显的季节冻结和消融过程,土壤中的水分具有白天消融、晚上冻结的特点,其过程有利于水分在土壤中的维持。研究结果与青藏高原纳木错站、珠峰站和藏东南站 3 个典型下垫面的研究结果相似^[18]。林地和草地不同深度土壤湿度的年变化规律大体相同而变化振幅不相同。夏季降雨多,土壤湿度表现为最大;秋季虽然植物生理活动减弱,需水量减少,但大气降水减少,土壤湿度不断减小;冬季因积雪覆盖加上冻土的作用,土壤湿度不明显。本文虽然对一年的土壤湿度进行了分析,但是土壤湿度传感器只能测定土壤中未冻结水的含量,冬季测定的土壤湿度不能正确代表土壤湿度的真实值。春季,随太阳辐射的增强,冻土和积雪融化,土壤湿度不断增加。另外,相比较而言,林地土壤湿度在夏季、秋季和冬季的变化较为缓和,草地的土壤湿度在夏季、秋季和冬季的变化较为剧烈,这与两种下垫面的植被覆盖有很大的关系。林地除了林冠对大气降水产生作用外,还包括苔藓枯落物层等的作用^[24],而草地结构较林地简单,对大气降水的作用减弱,进而直接影响了土壤含水量的明显变化。

4.3 林地和草地土壤温湿度之间的相互影响

土壤温度变化及热传递是影响土壤和大气水热交换的重要过程,而植被是决定这种变化和影响的因子之一^[25]。林地在一年当中的不同深度土壤湿度的变化趋势相同,土壤温度的升高或降低,导致了土壤湿度的增加或减少。以春季为例,随土壤温度的增加,土壤湿度亦升高,可能是林冠的遮阴作用和地被物苔藓层的作用,加上林地土壤湿度相对较大,土壤热容量较高,土壤温度不能提供足够的热量使水分挥发,直到夏季,土壤温度进一步升高,但此时是降雨季,因此土壤湿度不断增加,其具体原因有待于以后进一步地研究探讨。而草地浅层土壤温湿度在进入封冻前和解冻后呈相反的变化趋势,土壤温度的升高或降低,导致了土壤湿度的减少或增加。如在春季,随土壤温度的升高,草本处于萌芽或生长季的初期,植被覆盖度低,土壤中的水以气态的形式通过土壤孔隙进行挥发,导致土壤水分的减少。随土层深度的增加,二者之间的相互影响程度减弱,此研究结果与青

藏高原的巴塘高寒草甸土壤温湿度的相互作用规律相同^[4]。

本研究只考虑了一个年周期林地和草地土壤温湿度的变化情况,前期降雨事件直接影响着土壤湿度的变化,土壤湿度的变化进而影响土壤温度的变化,因此,在今后的土壤温度变化研究中,需要收集多年的数据来进行对比分析,从而提高结论的可信度。另外,在研究中,因为仪器工作或未知因素的影响,导致部分数据的缺失,这是在以后研究中应当改进的方面。

5 结论

祁连山排露沟流域分布的林地和草地土壤温度日变化和年变化具有各自的变化特点,林地和草地的10 cm和20 cm土壤深度温度日变化呈正弦曲线变化,40 cm、60 cm和80 cm土壤深度土壤温度日变化约呈直线变化;林地和草地土壤温度年变化均表现为7月底达到最高值,而后开始下降,其中林地翌年2月上旬达到最低值,而草地12月中旬就达到最低值;林地封冻时长明显大于草地封冻时长。

林地和草地土壤湿度日变化受太阳辐射的影响不明显;林地不同土层土壤湿度年动态变化趋势均一致,呈现正弦曲线的变化规律;草地在土壤结冻后和未消融期间,土壤湿度较低且变化不明显,其他时间土壤湿度变化明显。

林地中,除40 cm深度外,其他深度土壤温湿度均保持在相对稳定的范围内,而且变化趋势基本一致;草地浅层土壤在土壤封冻前和解冻后,土壤温湿度变化趋势相反,封冻期间土壤温湿度亦保持在相对稳定的范围内,温度变化明显,湿度变化不明显,其他土层土壤温湿度总体变化趋势一致;林地和草地土壤温湿度二者之间具有良好的耦合关系。

参考文献:

- [1] 汤懋苍,程国栋,林振耀. 青藏高原近代气候变化及对环境的影响[M]. 广州: 广州科技出版社, 1998: 261-329
- [2] 张耀宗. 近50年来祁连山地区的气候变化[D]. 兰州: 西北师范大学, 2009
- [3] 王俊峰, 吴青柏. 气温升高对青藏高原沼泽草甸浅层土壤水热变化的影响[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2010, 46(1): 33-39
- [4] 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度特征分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 635-642
- [5] 李超, 张凤荣, 王秀丽, 等. 土壤系统分类中土壤水热状况的确定方法及应用研究——以山西省为例[J]. 土壤, 2017, 49(1): 177-183
- [6] 胡健, 吕一河, 傅伯杰, 等. 祁连山排露沟流域土壤水热与降雨脉动沿海拔梯度变化[J]. 干旱区研究, 2017, 34(1): 151-160
- [7] 牛赞, 刘贤德, 王立, 等. 祁连山大野口流域青海云杉林分结构及其土壤水热特征分析[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3): 385-391
- [8] 唐振兴, 何志斌, 刘鹤. 祁连山中段林草交错带土壤水热特征及其对气象要素的响应[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 1056-1065
- [9] 王金叶, 田大伦, 王彦辉, 等. 祁连山林草复合流域土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 14-147
- [10] 张立杰, 赵文智, 何志斌, 等. 祁连山典型小流域降水特征及其对径流的影响[J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 776-777
- [11] 刘鹤, 赵文智, 何志斌, 等. 祁连山浅山区不同植被类型土壤水分时间异质性[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2390-2391
- [12] 赵维俊, 刘贤德, 金铭, 等. 祁连山青海云杉林叶片-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 477-489
- [13] 赵维俊, 敬文茂, 赵永宏, 等. 祁连山大野口流域典型灌丛植物与土壤中氮磷的化学计量特征[J]. 土壤, 2017, 49(3): 572-579
- [14] 任璐, 王顺利, 于澎湃, 等. 祁连山2种植被下冻土的季节变化及数值模拟[J]. 林业科学研究, 2016, 29(4): 596-602
- [15] 姜林. 祁连山西水林区典型土壤类型发生特性及系统分类研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2012
- [16] 刘帅, 于贵瑞, 浅沼顺, 等. 蒙古高原中部草地土壤冻融过程及土壤含水量分布[J]. 土壤学报, 2009, 46(1): 46-51
- [17] 王绍令, 丁永建, 赵林. 青藏高原局地因素对近地表面地温的影响[J]. 高原气象, 2001, 21(1): 85-89
- [18] 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] 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
- [20] 施婷婷, 郑兴波, 张丽波, 等. 植被对土壤热扩散特征的影响——以长白山阔叶红松林为例[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 3970-3978
- [21] 任璐, 王顺利, 于澎湃, 等. 祁连山2种植被下冻土的季节变化及数值模拟[J]. 林业科学研究, 2016, 29(4): 596-602
- [22] Vinnikov K Y, Robock A, Speranskaya N A, et al. Scales of temporal and spatial variability of midlatitude soil moisture[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1996, 101(D3): 7163-7174
- [23] 马柱国, 魏和林, 符淙斌. 中国东部区域土壤湿度的变化及其与气候变率的关系[J]. 气象学报, 2015, 58(3): 278-287
- [24] 王顺利, 王金叶, 张学龙, 等. 祁连山青海云杉林苔藓枯落物分布与水文特性[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5): 156-159
- [25] 施婷婷, 郑兴波, 张丽波, 等. 植被对土壤热扩散特征的影响——以长白山阔叶红松林为例[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 3970-3978

Spatio-temporal Change Characteristics of Soil Temperatures and Moistures in Forest and Grass Complex Basin in Qilian Mountains

ZHAO Weijun^{1,2}, LIU Xiande^{1,2}, JIN Ming^{1,2}, JING Wenmao^{1,2}, WANG Shunli^{1,2},
REN Xiaofeng^{1,2}, MA Jian^{1,2}, WU Xiurong^{1,2}

(1 Academy of Water Resources Conservation Forests in Qilian Mountains of Gansu Province, Zhangye, Gansu 734000, China;
2 Key Laboratory of Hydrology and Water Resources of Forest Ecology and Frozen Soil of Gansu Province, Zhangye, Gansu 734000, China)

Abstract: The data of soil temperatures and moistures in 10 minute interval in the meteorological observation field under *Picea crassifolia* forestland and grassland in the Pailugou basin of the Qilian Mountain Forest Ecological Station were analyzed with the methods of comparative analysis and linear trend. Results showed that daily soil temperatures showed sinusoidal changes in 10 cm and 20 cm soil depths and linear changes in 40 cm, 60 cm and 80 cm soil depths. Soil temperature reached the highest at the end of July and then began to decline both for forestland and grassland, reached the lowest in early February for forestland and in late December for grassland. Freeze-up period of forestland is longer than that of grassland. Solar radiation did not influence the daily change of soil moisture in forestland and grassland. Dynamic changes of soil moistures were coincident and all showed sinusoidal changes in different soil depths under forestland. Soil moisture was low and changed little during the freeze-up period but changed obviously in other time. In forestland, soil temperatures and moistures were kept in a relatively stable range and with the same change trend in different soil depths except in 40 cm soil depth. In grassland, soil temperature and moisture changed inversely before soil freeze-up and after soil thaw. During the freezing period, topsoil temperature and moisture were also kept in a relatively stable range, with obvious change in temperature but unobvious change in moisture, while soil temperatures and moistures changed consistently in other soil depths.

Key words: Forest and grass complex basin; Soil temperature and moisture; Spatial-temporal change; Qilian Mountains