

DOI: 10.5846/stxb201612292695

车宗玺,李进军,汪有奎,丁国民,李世霞,邸华,车宗彩,潘欣,毛志明,郭朝霞.祁连山西段草地土壤温度、水分变化特征.生态学报,2018,38(1): 105-111.

Che Z X, Li J J, Wang Y K, Ding G M, Li S X, Di H, Che Z C, Pan X, Mao Z M, Guo Z X. Characteristics of soil temperature and water content variation in the western Qilian Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 105-111.

祁连山西段草地土壤温度、水分变化特征

车宗玺^{1,*}, 李进军¹, 汪有奎¹, 丁国民¹, 李世霞¹, 邸 华¹, 车宗彩¹, 潘 欣¹, 毛志明¹, 郭朝霞²

1 甘肃祁连山国家级自然保护区管理局, 张掖 734000

2 兰州大学草地农业科技学院, 兰州 730000

摘要: 研究土壤水热要素对合理预测祁连山气候变化特征及建立气候预警系统有重要意义。采用 18 套土壤温、湿度自动记录仪(HOBOU30)对祁连山西段草地进行 3a 连续定位监测,旨在探索分析该区土壤水热变化特征,阐明土壤水热互作效应及耦合机制。表明:1)冷期(1—3,11—12月)占全年的 42%,暖期(4—10月)占 58%;7月前土壤均温随月份增大而增大,月份增大 1月土壤均温增大 3.53℃,水分增大 3.23%;7月后随月份增大而减小,月份增大 1月土壤均温降低 4.73℃,水分下降 2.55%。2)日变化 16:00前土壤均温为 7.45℃,水分为 16.26%,16:00后均温为 9.1℃,水分为 16.79%,16:00后比前均温高 1.65℃,水分高 0.54%。3)土温、水分与海拔均呈线性正相关,前者差异显著($P < 0.05$),后者不显著($P > 0.05$)。4)土温逐层(0—120 cm)平均递增 0.07℃,水分递减 0.58%;土温与土层深度呈显著线性正相关($P < 0.05$, $R^2 = 0.99$),水分呈显著线性负相关($P < 0.05$, $R^2 = 0.97$)。5)该区土温与水分呈显著线性负相关。因此,祁连山西段草地土温变幅较小,水分变幅大,两者在空间上变化均呈二次函数,时间上均呈一次函数。

关键词: 土壤温度;土壤水分;变化特征;草地;祁连山西段

Characteristics of soil temperature and water content variation in the western Qilian Mountains

CHE Zongxi^{1,*}, LI Jinjun¹, WANG Youkui¹, DING Guoming¹, LI Shixia¹, DI Hua¹, CHE Zongcai¹, PAN Xin¹, MAO Zhiming¹, GUO Zhaoxia²

1 Gansu Qilian Mountains National Nature Reserve Authority, Zhangye 734000, China

2 College of Grassland Science and Technology of Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: It is important to study the characteristics of soil water and heat to reasonably predict climate change effects and to establish an early climate warning system for the Qilian Mountains. In this study, 18 soil temperature and humidity dataloggers (HOBOU30) were used to monitor a grassland over a continuous three-year period in the western Qilian Mountains. Our aim was to explore the characteristics of soil water and heat exchange in this area and to clarify the soil water-heat interaction effect and coupling mechanism. The results showed that 1) the cold period (November to March) accounted for 42% of the year and the warm period (April to October) for 58%. As time passed, average soil temperature and water content increased monthly by 3.53°C and 3.23%, respectively, before July and decreased monthly by 4.73°C and 2.55%, respectively, after July. 2) Average daily soil temperature and water content were 6.45°C and 16.26%, respectively, before 16:00, and 9.1°C and 16.79%, respectively, after 16:00; thus, these values were 1.65°C and 0.54%

基金项目: 国家自然科学基金项目(31260141);甘肃省科技支撑计划项目(1604FKCG117)

收稿日期: 2016-12-29; **网络出版日期:** 2017-09-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chezongxi@126.com

higher after 16:00 than they were before. 3) Soil temperature ($P < 0.05$) and water content ($P > 0.05$) were linearly positively correlated with altitude. 4) As soil depth increased (0—120 cm), average soil temperature increased by 0.07°C for each soil depth, and average soil water content decreased by 0.58% for each soil depth. Soil temperature and soil depth were significantly positively linearly correlated ($P < 0.05$, $R^2 = 0.99$), and water content and soil depth were significantly negatively linearly correlated ($P < 0.05$, $R^2 = 0.97$). 5) Soil temperature and soil water content were negatively correlated. Therefore, the western Qilian Mountains exhibited small variation in soil temperature and large variation in water content, and both soil temperature and soil water content had a quadratic relationship with spatial variation and a linear relationship with temporal variation.

Key Words: soil temperature; soil water content; variation characteristic; western grassland; Qilian Mountains

祁连山是我国著名的高大山系之一,地处欧亚大陆中心,位于青藏、蒙新、黄土高原交汇地带,受青藏高原和蒙新荒漠气候的双重影响,气候垂直差异明显^[1]。该区气候恶劣,沙尘天气频繁,导致土壤水分和温度的互作效应受限,特别是水热因素限制着陆地生态系统群落生产力^[2],这些影响可能会改变植物生长速率,进而对植被生产力和碳汇功能产生一定影响。草地土壤水热动态过程和变化机制是陆面过程的重要研究内容^[3],越来越多的研究侧重于通过地表空间变化过程来分析预测大气过程。草地土壤水热变化缺乏长期连续定位观测资料,利用土壤温湿度探头长期连续观测可以解决陆面的空间水热变化,Porporato 等^[4]研究认为土壤水分、温度既是气候-植被-土壤属性等综合因素的影响结果,也是决定植被水分供给的关键因素,是生态水文过程研究的重要切入点,Randal 等^[5]利用 12 种耦合模型进行模拟,结果表明土壤水热对大气降水存在反馈作用,是气候变化的预报指标。

近年来,关于祁连山林地、草地土壤温度和水分特征研究已较多,对山区土壤水热过程有了一定认识^[6]。如刘鹤等^[7]研究了祁连山浅山区不同植被类型的土壤水分在典型生长季期间的空间异质性,发现山区土壤水分时间变异系数最大值并不在表层;党宏忠等^[8]就青海云杉林土壤水分特征进行了探讨,根据土壤水分的动态变化将其分为活跃-调节-传输-蓄水 4 个层次;王金叶等^[9]对祁连山排露沟流域不同土壤类型分析了土壤水分状况,认为亚高山灌丛草甸土持水能力最强,水文特性最好。康尔泗等^[10]对祁连山区水分过程进行了综述,提出后续研究的重点和难点在于研究山区森林草地生态系统在山区水文循环中的作用以及在保护山区生态与环境中的作用和意义。虽然在区域或全球尺度上对地表土壤水热与大气的相互关系已有较多模拟结果^[11],但相关结果并不适合气象要素变化剧烈的祁连山。其次祁连山长期连续定位观测资料较少,以人工观测为主,表现为观测密度低、观测时间短、观测频率不高等特点,而且数据连续性不强,得出结论较差,同时缺乏土壤水热与气象要素综合同步观测,诸多因素均制约了对祁连山土壤水热特征的深入研究。本文重点分析如下问题:(1)利用长期连续定位监测数据分析该区土壤温度、水分变化特征,揭示土壤温度、水分在时间、空间格局上的演变规律;(2)建立土壤温度、水分相关关系,阐明土壤温度和水分耦合机制及互作效应。

1 研究区概况

研究区位于甘肃祁连山国家级自然保护区祁丰林区($39^{\circ}12'45.8''\text{N}$; $99^{\circ}02'23.9''\text{E}$),流域面积 10.8 km^2 ,长 20.4 km ,海拔 $2500\text{—}4000\text{ m}$,该流域阳坡、半阳坡为山地干草原,阴坡或半阴坡为斑块森林和草原景观,森林总面积 1.68 km^2 ,覆盖率为 27.3%,年均气温 $-0.6\text{—}2.5^{\circ}\text{C}$ ^[12],年降水量 322.6 mm ,年蒸发量 1051.7 mm ,年平均相对湿度 50%。

研究区内植被因地形和气候的差异形成明显的垂直分布带,阴坡或半阴坡呈斑块状分布有青海云杉(*Picea crassifolia*),零星分布有祁连圆柏(*Sabina przewalskii*);阳坡或半阳坡分布有典型草地。本实验样地位于阳坡或半阳坡不同海拔的典型草地上进行试验监测。草本种类主要包括:克氏针茅(*Stipa krylovii* Roshev)、红砂(*Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim.)、合头草(*Sympegma regelii* Bunge)、驼绒藜(*Ceratoides latens* (J. F.

Gmel.) *RevealetHolmgren*)、芨芨草 (*Achnatherum splendens*) 等。土壤类型主要以山地灰褐土、亚高山灌丛草甸土和山地草原栗钙土为主,平均厚度 0.8—2.0 m,土层较薄,以粉沙块为主,成土母质主要是泥炭岩、砾岩、紫红色沙页岩等,pH 值 7.0—8.0,仪器观测点布设在海拔 2700、2800、2900、3000、3100、3200 m 的草地上。样地基本情况见表 1。

表 1 不同海拔样点参数信息表
Table 1 The different altitude information table

海拔 Altitude/m	东经 East longitude	北纬 North latitude	坡度 Grade/(°)	坡向 Exposure	草本盖度 Grass coverage/%	草本均度 Herbs are degrees	均温/°C Average temperature	平均含 水量/% Average moisture	降水量/mm Precipitation	土壤类型 Soil type
2700	99°02'23.9"	39°12'45.8"	18	EN	90	15.2±0.3	6.77±0.1	13.4±0.2	285.2±0.2	栗钙土
2800	99°02'59.7"	39°12'42.3"	21	WN	95	18.1±0.1	4.64±0.3	9.18±0.3	228.4±0.1	栗钙土
2900	99°02'49.9"	39°12'42.0"	25	WN	82	23.2±0.5	5.63±0.2	14.9±0.2	307.1±0.3	栗钙土
3000	99°02'34.3"	39°12'33.1"	28	EN	86	20.4±0.8	8.91±0.4	9.8±0.3	325.6±0.4	栗钙土
3100	99°02'19.1"	39°12'30.1"	24	EN	78	12.3±0.2	7.16±0.1	16.29±0.6	348.2±0.5	栗钙土
3200	99°02'12.0"	39°12'28.5"	30	EN	69	10.1±0.3	6.93±0.3	11.29±0.1	356.2±0.2	栗钙土

表中值为平均值±标准误

2 研究方法

2.1 实验仪器

在祁丰林区黄草坝(2700 m)、红山(2800 m)、大火烧(2900 m)、冰沟(3000 m)、水泉掌(3100 m)、野牛山(3200 m)选择典型的草地埋设美国 HOB0U30 土壤温湿度自动记录仪,进行长期定位监测。同一海拔根据不同坡向(阳坡、半阳坡、阴坡)布设 3 套自动仪器,总共 18 套,分别对不同海拔土层深度 0—10、10—20、20—40、40—60、60—80、80—100、100—120 cm 安装温度(ST)和水分(SW)探头,监测土壤温度和水分变量,数据采集步长均为 10 min,连续监测 3a(2012 年 6 月—2015 年 6 月),总共获取数据量为 1555200 组。

数据采集方法:半年采集一次,采集时首先安装 HOB0U30 软件,对软件进行设置,包括采集地点、数据监测步长、土壤温度水分层次顺序设定、单位矫正、数据的保存设定、电池电量设定等;其次启动 HOB0U30 进行观测,观测时若指示灯 1 秒闪烁一次,且为绿色,表示数据监测正常;再次,盖好数采箱,对数采箱进行防寒、防潮处理,保证仪器连续正常工作。

2.2 数据处理与分析

将 HOB0U30 的土壤温度和水分观测数据按照每月、每天、每小时进行平均处理,从 7:00 到 19:00 为一天进行数据整理,对监测 3 a 的数据利用 EXCEL 2010 软件计算,获取均值参数,对参数利用 SPSS 21.00 软件进行统计分析。文中数据均统计为平均结果进行分析,非单次或短期数据。数据处理采用如下公式:

$$\text{逐日平均处理: } \bar{A}_{\text{day}} = \frac{\sum a}{48} \quad (1)$$

式中, \bar{A}_{day} 表示处理后的逐日观测因子, a 为变量观测值, $\sum a$ 为变量观测值求和。

$$\text{逐月平均处理: } \bar{A}_{\text{month}} = \frac{\sum a}{48M} \quad (2)$$

式中, \bar{A}_{month} 表示处理后逐月观测因子, a 为变量观测值, M 为变量观测时段所处月份的天数, $\sum a$ 为变量观测值求和。

3 结果分析

3.1 土壤温度和水分的月变化特征

图 1 反映了祁连山西段草地土壤温度、水分月动态变化特征,对土壤温度、水分与月份进行显著性、拟合

回归分析,表明两者与月份均有较强显著性,经检验均有 $P < 0.05$;两者月动态变化趋势为二次多项式变化关系,关系式为:

$$y_T = -0.6702x^2 + 9.2962x - 20.413 \quad (R^2 = 0.89) \quad (1)$$

$$y_w = -0.5073x^2 + 6.7941x - 4.7136 \quad (R^2 = 0.81) \quad (2)$$

回归决定系数 R^2 均在 0.8 以上,说明两者变化趋势更接近于二次曲线。许多研究认为土壤均温在 0°C 以下的时期为一年冷期, 0°C 以上时期为暖期。单独从图 1 来看,5 个月(1—3、11—12 月)土壤均温在 0°C 以下,即冷期为 5 月,占全年 42%;7 个月(4—10 月)均温在 0°C 以上,即暖期为 7 个月,占全年的 58%,可见该区暖期时间大于冷期。土壤均温最高值出现在 7 月,为 14.29°C ,7 月前,土壤温度随月份增加而增加,月份增大 1 月,土壤均温增大 3.53°C ;7 月后,随月份的增大而减小,月份增大 1 月,土壤均温减少 4.73°C ,可见 7 月后土壤均温递减速率大于 7 月前,说明 7 月后该区土壤温度下降较快,模型(1)可以有效验证该结论。单独从图 1 看,土壤水分的峰值也出现在 7 月,7 月以前随着雨季的逐渐来临,土壤水分随月份的增大而增大,月份增大 1 月,土壤水分平均增大 3.23% ;7 月后土壤水分随月份的增大而减小,月份增大 1 月,土壤水分平均减小 2.55% ,7 月前土壤水分的平均递减速率大于 7 月后,可以利用模型(2)检验。

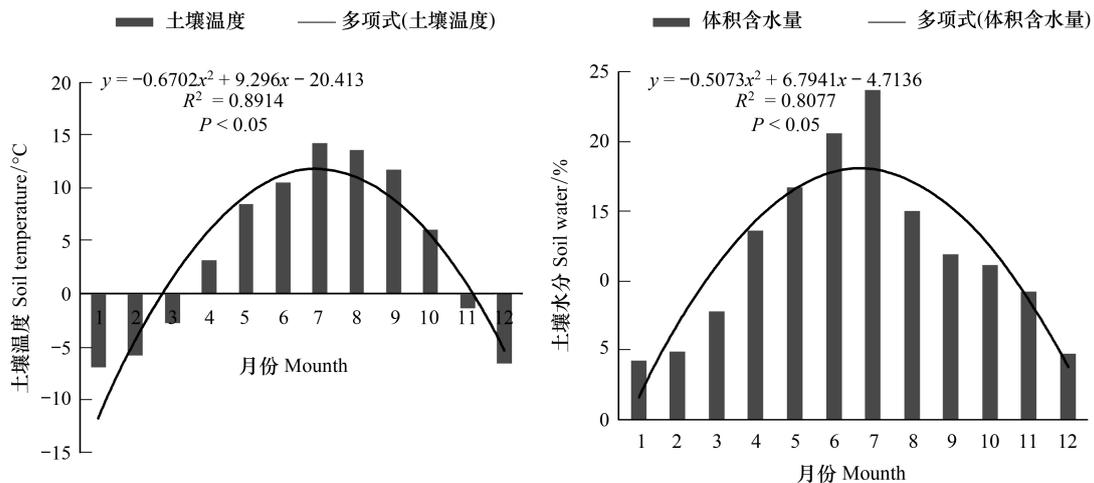


图 1 祁连山西段草地土壤温度、水分季节动态变化

Fig.1 Soil temperature and moisture seasonal dynamic changes in west section of Qilian Mountain

3.2 土壤温度和水分的日变化特征

图 2 为土壤温度、水分日变化规律,表明土壤温度与时间(7:00—19:00)有较强显著性($P < 0.05$),两者变化趋势呈二次多项式 $y = 1.408x^2 - 8.6517x + 9.0207$,回归系数 R^2 为 0.47;(b) 表明土壤水分与时间变化也呈二次多项式,相关性不强,差异不显著($P > 0.05$)。16:00 土壤温度最高,12:00 最低,7:00 土温随时间的增加而增大,16:00 达到峰值,然后随时间的增大而减小。水分 7:00—12:00 随时间的增加而下降,13:00—15:00 随时间的增加而增大,16:00 出现最小峰值,为 10.01%。水分日变化不大,75%的水分含量在 16.39%—16.54% 之间,25%水分含量小于 16%。总之,日变化表现为:16:00 以前土壤平均温度为 7.45°C ,平均水分为 16.26%,16:00 以后平均温度为 9.1°C ,平均水分为 16.79%,16:00 以后比以前土壤均温高 1.65°C ,水分高 0.54%。

3.3 土壤温度和水分的空间变化特征

3.3.1 土壤温度和水分海拔变化

通过对土壤温度、土壤水分与海拔的显著性及回归拟合分析,表明土壤温度与海拔有线性正相关关系 $y = 0.0023x$,随海拔的升高而增大,两者差异显著($P < 0.05$);土壤水分与海拔也有正相关关系 $y = 0.1623x + 11.909$,差异不显著($P > 0.05$),如图 3 和表 2 所示。3000 m 土壤温度最高,坡向为东坡,坡位为中坡,东坡为阳坡,光照充足,日照时数比其他海拔均高,导致地表热量增大;再次 3000 m 以下植被覆盖度大,草本高度均

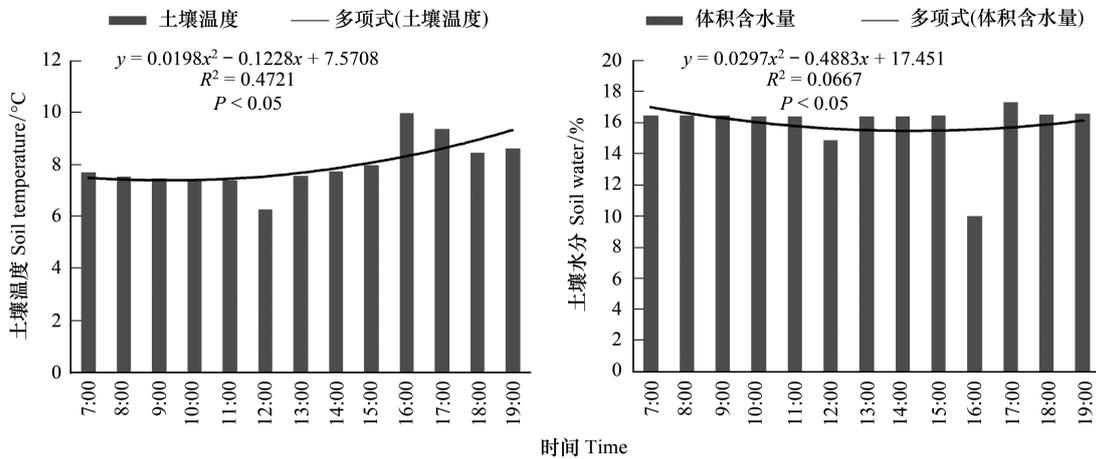


图 2 祁连山西段草地土壤温度、水分日变化

Fig.2 Soil temperature and moisture diurnal variation in west section of Qilian Mountain

在 0.6 m (草地已禁牧 3 a) 以上, 为半阳坡, 日照时数小, 光照较弱, 地表热量较小, 土壤温度较低。该结论与祁连山中部青海云杉林内土壤温度随海拔变化结论相反, 青海云杉林内土壤温度随海拔的升高而降低, 主要受地形、坡向等综合因素作用的结果。土壤水分沿海拔有缓慢波动增加趋势, 两者相关性不强, 水分 3100 m 为最高其值为 16.29%, 2800 m 为最低其值为 9.18%, 整个海拔差异不大。

3.3.2 土壤温度、水分的土层变化

图 4 反映了祁连山西段草地土壤温度、水分的垂直变化情况, 对不同深度的土壤温度和水分进行了回归拟合及显著性检验, 结果表明: 土壤温度与土层深度有线性正相关关系 ($y = 0.0661x + 6.5414$), 决定系数较高 ($R^2 = 0.99$), 差异显著 ($P < 0.05$), 土壤温度随土层深度的增大而增加, 土层增加一层, 土壤平均温度增加 0.065℃。水分与土层深度有线性负相关关系 ($y = -0.6251x + 13.679$), 决定系数也较高 ($R^2 = 0.97$), 差异显著 ($P < 0.05$), 水分随土壤深度的增大而减小, 土层增加一层, 水分平均减少 0.58%。

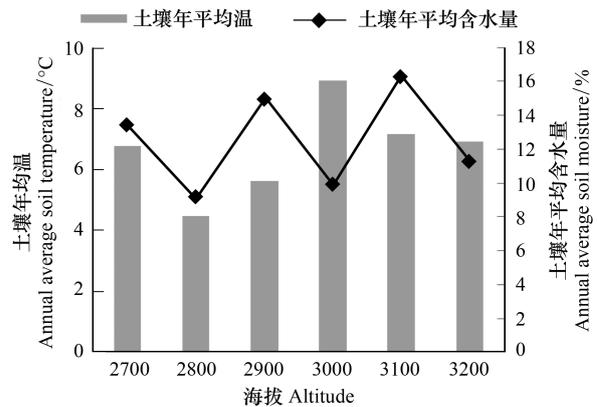


图 3 祁连山西段草地不同海拔土壤温度、水分的变化

Fig.3 The variations of soil temperature and moisture in different altitude in west section of Qilian Mountain

表 2 土壤温度、水分在海拔梯度上的显著性分析

Table 2 The significant analysis of soil temperature and moisture on different altitude

海拔 Altitude	土壤水分/% Soil water	土壤温度/℃ Soil temperature	海拔 Altitude	土壤水分/% Soil water	土壤温度/℃ Soil temperature
2700	13.4±0.61bcd	6.8±0.09c	3000	9.8±1.32ab	8.9±0.02e
2800	9.2±1.12a	4.6±0.01a	3100	16.3±0.39d	7.2±0.03d
2900	14.9±0.83cd	5.6±0.02b	3200	11.3±0.97abc	6.9±0.07c

表中值为平均值±标准误, 同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)

3.4 土壤温度和水分的关系

图 5 是祁连山西段草地土壤温度和土壤水分的关系回归拟合, 表明土壤温度和水分有线性负相关关系, 随土壤温度的增大水分呈线性递减, 递减程度差异显著 ($P < 0.05$)。土壤温度为 6.62℃ 时, 水分最大, 为

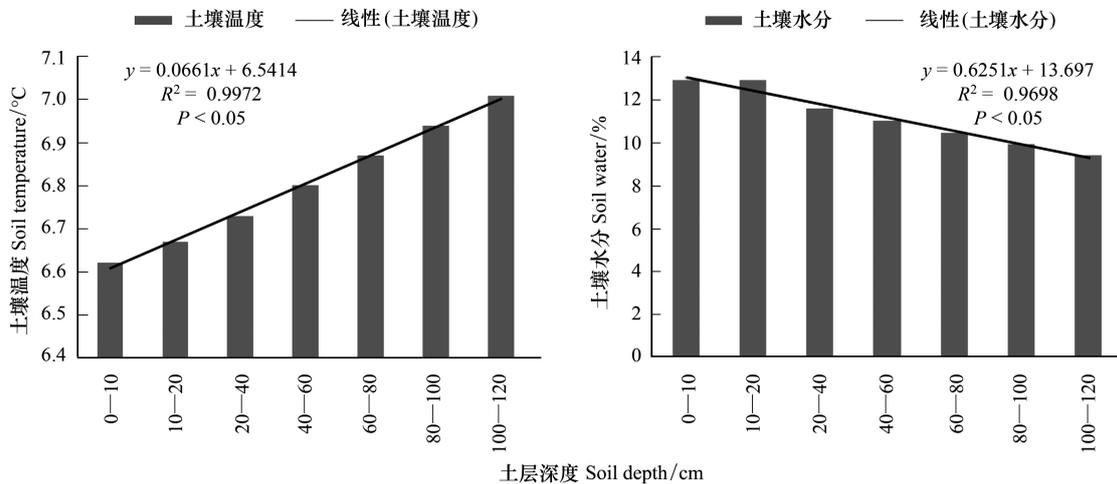


图4 祁连山西段草地不同深度土壤温度、水分的变化

Fig.4 The variations of soil temperature and moisture in different depth in west section of Qilian Mountain

12.92%；土壤温度达到 7.01 °C 时，水分最小，为 9.45%；温度从 6.62°C 增加到 7.01 °C，增加了 0.39 °C，水分从 12.92% 减少到 9.45%，减少了 3.47%。该区土壤温度的平均增加率为 5.56%，水分平均递减率为 26.88%。表明在适宜的环境条件下降低土壤温度是提高土壤水分的必要措施，通过降低气温来控制土壤温度，达到增加土壤水分的目的。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文利用土壤温湿度自动记录仪 (HOB0U30) 对土壤温度、水分变化进行了为期 3a 的长期连续定位监测，分析土壤温度、水分的变化特征，以及两者在时间、空间格局上的演变规律；建立土壤温度、水分相关关系，阐明两者的耦合机制及互作效应。主要得出如下结论：

1) 该区一年冷期占全年的 42%，暖期占 58%，暖期时间长于冷期；7 月以前土壤平均温度增大 3.53°C，水分平均增大 3.23%；7 月以后，土壤温度平均减小 4.73°C，水分平均减小 2.55%；7 月以后土壤温度的平均递减速率大于 7 月以前土壤温度的平均递增速率，7 月以前土壤水分的平均递减速率大于 7 月以后土壤水分的平均递减速率。

2) 日变化以 16:00 为临界点，16:00 以前土壤平均温度为 7.45°C，平均水分为 16.26%，16:00 以后平均温度为 9.1°C，平均水分为 16.79%，16:00 以后比以前土壤均温高 1.65°C，水分高 0.54%。

3) 土壤温度与海拔有线性正相关关系，两者的显著性较强 ($P < 0.05$)；土壤水分与海拔有线性正相关关系，两者的显著性不强 ($P > 0.05$)。

4) 土壤温度与土层深度 (0—120 cm) 具有显著的线性正相关 ($P < 0.05$, $R^2 = 0.99$)，水分与土层深度有显著的线性负相关 ($P < 0.05$, $R^2 = 0.97$)，土壤温度平均递增 0.065°C，水分平均递减 0.58%。

5) 土壤温度与水分呈显著的线性负相关。

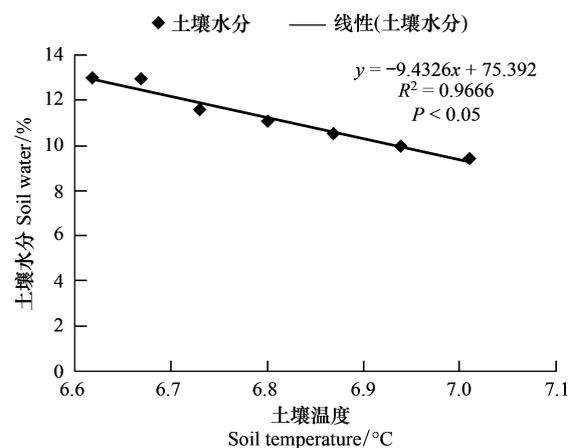


图5 祁连山西段草地土壤温度与水分相关性

Fig.5 The correlation of soil temperature and moisture in west section of Qilian Mountain

4.2 讨论

(1) 该区一年冷期占全年的 42%, 暖期占 58%, 暖期时间长于冷期; 已有研究^[13]表明土壤温度在 0℃ 以下的时段为冷期, 0℃ 以上的时段为暖期。随气候变暖, 祁连山区冷期逐渐缩短, 暖期逐渐延长。该结论利用 18 套自动仪器在不同海拔、不同坡向连续监测 3 a 采用均值法对数据进行分析得出的结果, 7 月以前土壤平均温度增大 3.53℃, 水分平均增大 3.23%; 7 月以后, 土壤温度平均减小 4.73℃, 水分平均减小 2.55%。影响土壤温度最主要的气象因子应该是气温和降水, 土壤温度与气温的变化基本类似, 但比气温具有滞后性, 气温增加, 地面净辐射热通量增大, 地表温度迅速升高, 地下温度相应升高。影响土壤水分的因素主要有光照、坡位、坡向、植被盖度等^[14], 本研究应在自动仪器附近同时监测不同海拔的气温和降水, 根据气温和降水的变化来分析地温的变化会更有意义。

(2) 闫文德等^[15], 曾士余等^[16]研究了不同森林小气候特征, 表明土壤温度由于温度变化迟滞效应, 日变化和月变化与太阳辐射或气温变化不同步, 气温对太阳辐射强度的敏感性比土壤温度高, 水分日变化、月变化较小, 与该研究结论一致, 更进一步表明土壤水分与植物生长影响大。

(3) 土壤温度与海拔有线性正相关关系。关于祁连山的许多研究结论均表明土壤温度随海拔的升高有降低趋势, 这些研究大部分是指青海云杉林区^[17]。该文出现结论相反的情况, 其主要原因有: 第一, 祁连山降水从东到西逐渐减少, 日照时数逐渐增大, 导致土壤水分亏缺, 蒸发增大, 土壤逐渐干化; 第二, 该区海拔越高, 单位面积草本生物量小, 光照越好, 太阳辐射强度越强, 地温较高, 低海拔由于地形复杂, 光照不足, 太阳辐射强度较低, 因此, 地温相对较低。第三, 施雅风院士认为祁连山气候由暖湿向暖干方向发展, 尤其是祁连山西段草地高海拔更为明显, 土壤干化严重, 土壤温度较高, 水分含量较小。

(4) 在 0—120 cm 土壤深度范围内, 土壤温度与土层深度有显著的线性正相关 ($P < 0.05$, $R^2 = 0.99$), 水分与土层之间具有显著的线性负相关 ($P < 0.05$, $R^2 = 0.97$)。表层土壤温度和水分受光照和降水影响较大, 随层次的增加, 温度和水分趋于稳定, 坡向不同结果各异, 一般情况下阳坡或半阳坡表现为表层温度较高, 随层次的增加温度有下降趋势, 水分则相反, 表层较低, 随深度增加土壤水分有增大趋势; 阴坡或半阴坡表现为表层温度、水分均较低, 随土层深度增加温度和水分均有增大趋势。

参考文献 (References):

- [1] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature*, 1990, 348(6298): 232-234.
- [2] Ingestad T. Plant growth in relation to nitrogen supply. *Ecological Bulletins*, 1981.
- [3] Rashid G H, Schaeffer R. Seasonal variation in the nitrogen mineralization and mineral nitrogen accumulation in two temperate forest soils. *Pedobiologia*, 1988, 31: 391-396.
- [4] Porporato A, D'Odorico P, Laio F, Ridolfi L, Rodriguez-Iturbe I. Ecohydrology of water-controlled ecosystems. *Advances in Water Resources*, 2003, 25(8/12): 1335-1348.
- [5] Brooks J R, Meinzer F C, Coulombe R, Gregg J. Hydraulic redistribution of soil water during summer drought in two contrasting Pacific Northwest coniferous forests. *Tree Physiology*, 2002, 22(15/16): 1107-1117.
- [6] 彭少麟, 李跃林, 任海, 赵平. 全球变化条件下的土壤呼吸效应. *地球科学进展*, 2002, 17(5): 705-713.
- [7] 刘鹤, 赵文智, 何志斌, 张立杰. 祁连山浅山区不同植被类型土壤水分时间异质性. *生态学报*, 2008, 28(5): 2389-2394.
- [8] 党宏忠, 赵雨森, 陈祥伟, 李进军, 达光文, 朱有文. 祁连山青海云杉林地土壤水分特征研究. *应用生态学报*, 2004, 15(7): 1148-1152.
- [9] 王金叶, 田大伦, 王彦辉, 王顺利. 祁连山林草复合流域土壤水分状况研究. *中南林学院学报*, 2006, 26(1): 1-5.
- [10] 康尔泗, 程国栋, 宋克超, 金博文, 刘贤德, 王金叶. 河西走廊黑河山区土壤-植被-大气系统能量平衡模拟研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(6): 544-551.
- [11] 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. *生态学报*, 2012, 32(4): 1056-1065.
- [12] 王春燕, 陈球波, 袁坤, 李光明, 杨礼富, 王真辉. 橡胶林土壤呼吸速率及其与土壤温湿度的关系. *土壤学报*, 2013, 50(5): 974-983.
- [13] 朱凤荣, 胡海波, 杨文睿. 江苏丘陵区柞林土壤温度与水分特征. *湖南农业科学*, 2013, 52(1): 39-42.
- [14] 张鹏, 张涛, 陈年来. 祁连山北麓山体垂直带土壤碳氮分布特征及影响因素. *应用生态学报*, 2009, 20(3): 518-524.
- [15] 闫文德, 田大伦. 樟树人工林小气候特征研究. *西北林学院学报*, 2006, 21(2): 30-34.
- [16] 曾士余, 朱劲伟, 冯宗炜, 陈楚莹, 张家武, 邓仕坚. 杉木人工林辐射状况的初步分析. *生态学杂志*, 1985, 4(5): 19-23.
- [17] 赵传燕, 别强, 彭焕华. 祁连山北坡青海云杉林生境特征分析. *地理学报*, 2010, 65(1): 113-121.