

# 柴达木盆地土壤温湿度变化特征及相关关系分析

韩璐, 陈辉, 陈同同, 付阳阳, 李阳

(河北师范大学 资源与环境科学学院, 河北省环境演变与生态建设实验室, 石家庄 050024)

**摘要:**通过对 2010 年 7 月至 2011 年 6 月一个年周期的土壤温湿度资料进行分析, 得出柴达木盆地四个采样点的土壤温湿度的变化特征及相互关系, 并初步探讨变化原因。结果表明: 四采样点(格尔木、诺木洪、德令哈和大柴旦)土壤温度变化具有相似性, 浅层土壤(10, 30 cm)温湿度的日变化剧烈, 深层(50, 70, 90 cm)变化相对平稳; 四样点土壤温度在观测年内呈近似正弦曲线, 在 8 月份达到年最高值, 1 月份达到年最低值。在 2 月至 3 月之间不同深度土壤温度基本相同; 土壤湿度存在积累期和衰减期日循环变化, 土壤水分每日收支状况基本保持动态平衡; 不同采样点土壤湿度季节变化趋势基本一致但也存在着各自特殊性, 季节振幅: 大柴旦 > 德令哈 > 诺木洪, 极值月份出现的时间略有差异。土壤温度与湿度之间相互影响, 存在明显的相关关系。

**关键词:**土壤温度; 土壤湿度; 变化特征; 柴达木盆地

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)06-0166-08

## Variations of the Soil Temperature and Moisture in Qaidam Basin and Their Relationship

HAN Lu, CHEN Hui, CHEN Tongtong, FU Yangyang, LI Yang

(College of Resources and Environment Sciences, Hebei Normal University, Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Shijiazhuang 050024, China)

**Abstract:** Through the data analysis of soil temperature from July 2010 to June 2011, we can conclude the variations of soil temperature and moisture in the four sampling sites (Golmud, Nuomuhong, Delingha and Da Qaidam) of Qaidam Basin, and come to the preliminary discussion on the reasons for such changes. Results show that the four sampling sites have similarity in terms of the daily variation of soil temperature. The temperature of shallow soil (10, 30 cm) changes dramatically daily, and the daily temperature variation of deeper soil layers (50, 70, 90 cm) is relatively stable. The soil temperatures of four sites in observation years show the approximate shape of a sine curve, which reaches the highest in August and the lowest in January. In February and March, the temperatures in different depths of soil are basically the same; analysis from the day of the soil moisture changes can be divided into two stages: accumulation and attenuation. The daily energy budget of soil moisture keeps the dynamic balance. The seasonal soil moisture change pattern is similar. But each sampling site has its own relative characteristic. The amplitude of soil moisture decreased in the order: Da Qaidam > Delingha > Nuomuhong, and extremum appearance time is different. There is a significant correlation between soil temperature and soil moisture.

**Keywords:** soil temperature; soil moisture; variation characteristics; Qaidam Basin

全球变化和区域响应引起的主要的反应之一是地球气候系统的变化。在陆—气系统相互作用的过程中, 下垫面状况影响着各种尺度的天气变化乃至大

气环流状况<sup>[1]</sup>。土壤是天气变化的能量调节器, 它的能量储放会对长期天气变化产生重大影响<sup>[2]</sup>。土壤温度作为一种重要的热量资源, 是土壤热收支和热属

性共同作用的结果,也是直接限制植物分布的重要生态因子。土壤湿度直接反映陆地表面水分收支状况和陆—气间的能量迁移转化,从而引起土壤反照率、土壤热学性质和植被状况等的变化。

土壤是一个复杂的、开放的系统,由于地区气候条件、生态环境以及土壤理化性质不同,因而不同地区的土壤温度时空变化具有特殊性。近年来,国内外学者们对土壤温湿度的变化趋势、区域分异、影响因素等方面进行了综合性研究<sup>[3-4]</sup>。我国目前对土壤温湿度的日变化、年变化特征研究多集中在典型区域上,如对天山北坡军塘河流域<sup>[5]</sup>、黄河源玛多县<sup>[6]</sup>、藏北高原<sup>[7-9]</sup>等。

青藏高原海拔高,幅员辽阔,土壤较干旱,对全球环境变化响应比其他地域灵敏<sup>[10]</sup>。受大气环流和高原地形的制约,青藏高原形成了独特的水热状况地域组合<sup>[11]</sup>。柴达木盆地位于青藏高原东北边缘,南靠昆仑山,北依祁连山,西临阿尔金山,是典型的内陆干旱高原盆地<sup>[12]</sup>。在全球气候变化背景下,深入了解柴达木盆地不同深度的土壤温湿度的高低及动态演变规律,为认识柴达木盆地陆—气系统相互作用、生物对土壤温湿度变化的响应以及干旱区生态建设提供科学依

据。为此,本文就柴达木盆地土壤温湿度的时空变化特征以及土壤温湿度之间的相互关系进行分析。

## 1 研究区概况

研究区位于柴达木盆地,属于典型的高原大陆性气候,气候干旱,降水稀少,多集中在夏季,年降水量自东南部的 200 mm 递减到西北部的 15 mm,蒸发量远大于降水量。日照时间长,太阳辐射强,土壤多为荒漠沙土,质地粗糙,土壤松散、孔隙度大,土壤养分较低,生物作用微弱<sup>[13]</sup>,生态环境非常脆弱。

由于柴达木盆地深居内陆,生态环境相对脆弱,这里植被种类少,生长季短,优势种为抗旱能力较强的荒漠灌丛,灌丛高度 50 cm 左右,总盖度 10%~25%,主要植物为:盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、合头草(*Sympegma regelii*)、驼绒藜(*Ceratoides latens*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、麻黄(*Ephedra sinica*)和少量怪柳(*Tamarix ramosissima*)、琵琶柴(*reaumuria soongorica*)。我们选取了 4 个具有代表性的采样点,即格尔木、诺木洪、德令哈和大柴旦,研究其土壤温湿度的时空变化特征。各点的位置及概况如下表:

表 1 各采样点概况

采样点	经纬度	海拔 高度/m	2010 年平均 气温/℃	1981—2010 年 平均气温/℃	2010 年 降水总量/mm	1981—2010 年 平均降水量/mm	土壤 类型
格尔木	36°20'44.04"N 95°05'25.98"E	2889	7.0	5.8	106.9	45.2	灰棕漠土
诺木洪	36°22'49.26"N 96°24'36.06"E	2858	6.2	5.3	149.0	51.7	灰棕漠土
德令哈	37°20'56.9"N 98°17'02.5"E	2971	5.6	4.4	312.9	202.9	棕钙土
大柴旦	37°51'17.94"N 95°23'46.98"E	3321	3.8	2.5	147.0	92.8	栗钙土

## 2 数据的采集及处理

2010 年 6 月于德令哈、大柴旦、格尔木和诺木洪四采样点埋设了 Decagon 公司生产的土壤水分测定仪(EM50/EM50 R),传感器型号为 EC-TM water content/temperature,探头埋藏在 10, 30, 50, 70, 90 cm 五个不同深度,每小时自动采集记录土壤温度和体积含水量数据,记录时间均为北京时间,该系统的运行环境温度为-40~60℃。土壤湿度测定的原理为:测定仪发射出一定频率的电磁波,根据电磁波在介质中的传播速度来测试介质的介电常数,土的介电常数对土中体积含水量非常敏感,进而获得介质在冻

结状态和未冻结状态下的各种参数<sup>[14]</sup>。因此,在冬季存在季节性冻土时,也可实现土壤水分和温度的同步测量<sup>[15]</sup>。文中所用土壤湿度均为体积含水量,即土壤中液体的体积占土壤总体积的百分数。气温数据来源于 <http://rp5.ru/>。在四个采样点中,收集到 2010 年 7 月 1 日至 2011 年 6 月 30 日这一观测区间诺木洪地区日平均气温数据,大柴旦和格尔木采样点为每 3 个小时的气温变化数据,而德令哈为每 6 个小时的气温数据。

在野外土壤温度及含水量测定过程中,由于雨雪天气过程造成传感器探头与土壤接触部位产生孔隙,土壤温度数据出现空值,体积含水量数据出现空值或

者负值等无效数据。德令哈未出现无效数据,而其他三个采样点负值和空值较多,数据处理时将这些无效数据删除。对剩余有效数据进行预处理,把不同日期同一时刻观测值进行累加,然后求平均,即为这一个年观测周期的平均日变化;把同一日期不同时刻的观测值累加后求平均,即为这一日期的土壤温湿度值。本文将对2010年7月1日至2011年6月30日这一年周期的土壤温湿度变化特征及相互关系做初步探讨。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤温度日变化

受太阳辐射周期性日变化的影响,气温以及土壤温度会有相应的周期性日变化。图1给出了四个采样点气温以及不同深度的土壤温度在一年观测周期

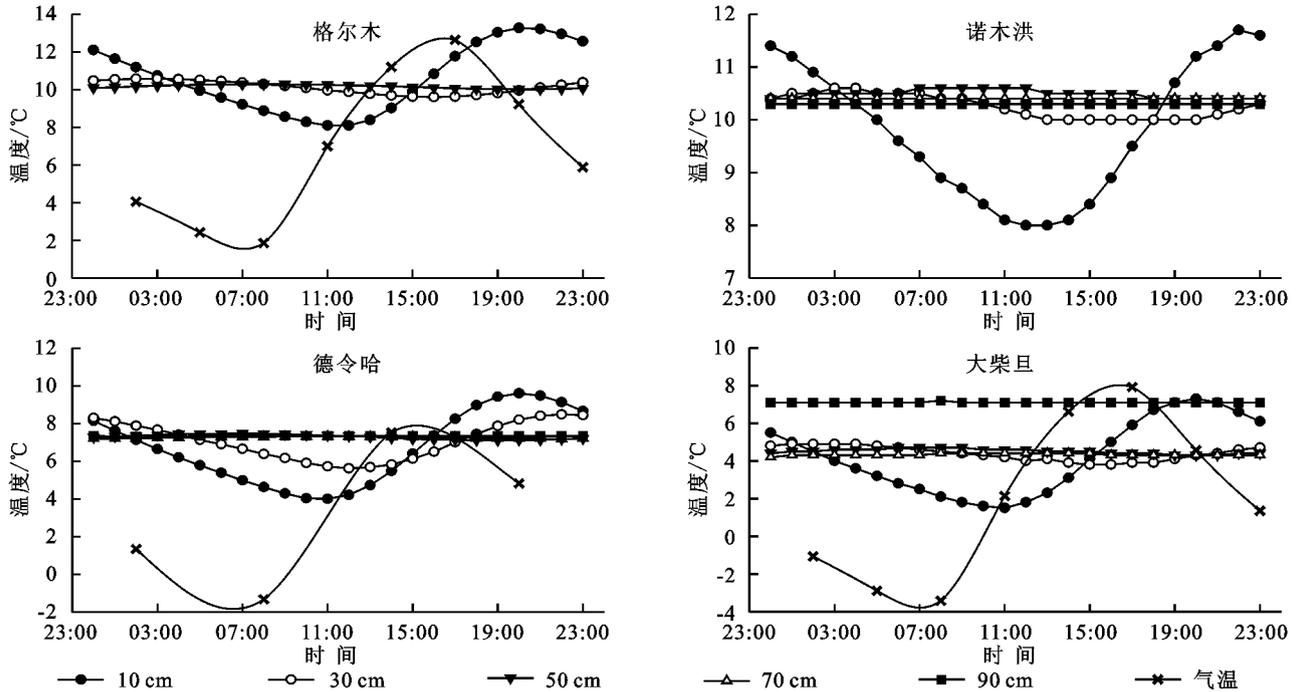


图1 四采样点不同深度土壤温度日变化

许多学者对于干旱区土壤温度特征分析表明;由浅到深土壤温度日变化的位相逐渐滞后,具有明显的时滞效应。曹兴<sup>[16]</sup>、李玉霖<sup>[17]</sup>、黄洁<sup>[18]</sup>等分别对古尔班通古特沙漠腹地、科尔沁沙地和南疆腹地土壤温度变化特征进行研究,得出土壤温度日变化随深度的增加,位相逐渐后延,极值温度出现的时间具有自上而下滞后的特征。虽然各站点同深度土壤温度相对净辐射均存在明显的滞后效应,但是每一个站点的滞后时间是不同的,这与土壤的水、汽条件,土壤的质地(沙土、粉砂和黏土的混合比例),土壤的结构和孔隙度,土壤的热学性质(土壤热容量和热导率)等因素有很大的关系<sup>[19]</sup>。

对比四个样点可以看出,诺木洪地区土壤温度日

上的平均日变化。从图中可以看出,浅层土壤温度日变化与当地气温变化趋势相似,都呈现近似正弦曲线的变化,但土壤温度变化的位相均比气温滞后。土壤热量向下传播需要时间,所以随着深度增加,振幅越小,位相越后。各采样点10 cm土壤温度在11时达到最低,在20至22时左右到达最高,比最高气温出现时间落后4个小时左右。落后的原因是,最高气温出现时,表层土壤热量积累并未达到最大值。气温逐渐降低时,10 cm左右的表层土壤仍然会有热量积累,土壤温度继续上升,约20时左右10 cm土壤中热量积累达到最大,土壤温度达到最高。之后,表层土壤得到的热量开始减少,土壤失热多于收入,10 cm土壤温度逐渐降低,直至次日11时前后,10 cm土壤因连续失热出现温度最低值。

变化幅度较小,10 cm处为3.7℃,其他深度变化幅度均在0.4℃以内。其他三点日变化幅度较大,10 cm处为5.1~5.6℃,其他深度变化幅度在0.1~2.9℃范围内波动。大柴旦地区由于海拔较高,气温较低,各层土壤温度均低于其他三样点。由此可见,各样点土壤温度动态日变化存在差异。这是由于各样点的气候条件、地理位置、植被覆盖状况、土壤质地和干湿程度等影响因子不同,地表接收太阳辐射以及热量从土壤表层向下传输的导热速率就有相应的差异,致使各样点土壤温度日变化表现出各自的特征<sup>[20]</sup>。

土壤温度比气温的日变化曲线波动平缓(图1),说明土壤温度日较差小,且土层深度愈深,日温差愈小。

10 cm 处土壤温度日变化最为明显,30 cm 处变化幅度逐渐减弱,而 30 cm 深度以下的土壤温度变化微弱。90 cm 为恒温层,土壤温度几乎没有日变化。这是由于,土壤具有滤波性,短周期的日变化对浅层土壤温度影响较大,长周期的气温变化才可能影响到深层土壤。

### 3.2 土壤温度的季节变化

表 2 给出了四采样点不同深度的土壤温度季节变化,8 月初各层土壤达到最高温,1 月份为最低温。土壤最高温出现的时间由浅层向深层延迟 1 d 左右,

表 2 四采样点不同深度土壤最高、最低温及出现时间

土层 深度/cm	格尔木		诺木洪		德令哈		大柴旦	
	最高温/ 出现时间	最低温/ 出现时间	最高温/ 出现时间	最低温/ 出现时间	最高温/ 出现时间	最低温/ 出现时间	最高温/ 出现时间	最低温/ 出现时间
10	30.8℃/2010.8.1	-10.5℃/2011.1.17	27.8℃/2010.8.1	-8.1℃/2011.1.17	29.0℃/2010.8.1	-9.6℃/2011.1.5	27.8℃/2010.8.1	-13.8℃/2011.1.17
30	26.2℃/2010.8.1	-5.4℃/2011.1.18	26.0℃/2010.8.1	-4.6℃/2011.1.18	28.1℃/2010.8.1	-8.1℃/2011.1.17	25.3℃/2010.8.1	-11.0℃/2011.1.19
50	24.1℃/2010.8.1	-3.8℃/2011.1.31	25.0℃/2010.8.2	-2.9℃/2011.1.19	24.8℃/2010.8.2	-5.3℃/2011.1.22	23.8℃/2010.8.2	-9.2℃/2011.1.19
70	22.5℃/2010.8.3	—	23.7℃/2010.8.3	-1.9℃/2011.1.29	23.3℃/2010.8.3	-4.3℃/2011.1.23	22.5℃/2010.8.3	-8.9℃/2011.1.23
90	—	—	22.2℃/2010.8.3	-0.8℃/2011.2.1	21.7℃/2010.8.3	-3.0℃/2011.2.1	21.6℃/2010.8.3	-8.1℃/2011.1.31

图 2 显示四采样点气温的季节变化比土壤温度变化剧烈,随土层深度增加,四采样点土壤温度曲线的振幅减小,因为受太阳辐射作用逐渐减弱。夏季土壤温度的垂直梯度较大,而在冬夏季转换时期深层土壤温度的梯度变化很小,在 2 月至 3 月之间不同深度土壤温度趋于相似,即不同深度土壤在这一时期温度基本相同,几乎不存在垂直方向上的温度变化,与杨梅学<sup>[9]</sup>、赵逸舟<sup>[21]</sup>等人的研究结果一致。这是由于北半球夏季地面接收较多的太阳辐射,而释放较少的长波辐射,净辐射为正,致使表层土壤温度升高,能量由浅层向深层传递。而冬季地表接收较少的太阳辐射而释放较多的长波辐射,净辐射为负,表层土壤温度开始降低。此时表层土壤能量逐渐减少,但是土壤温度依旧大于深层,依然存在由浅到深的能量传递,深层土壤温度依次升高。这一状态持续一段时间后,深层土壤温度继续升高至与地表温度趋于一致。这样在垂直方向上土壤温度几乎不存在能量的流动,浅层和深层土壤在一段时间内处在相似的温度环境中。

### 3.3 土壤湿度的日变化

土壤湿度是地区水分平衡的重要因子。由于 10 cm 以下的土壤湿度日变化较为微弱,土壤湿度的日变化在浅层土壤的表现较为明显,本文选取了采样点 10 cm 深度的土壤体积含水量分析土壤湿度的日变化特征及规律(图 3)。由于格尔木样点土壤含水量数值缺失严重,故只对大柴旦、德令哈、诺木洪三样点进行土壤湿度分析。

而最低温出现的时间由浅层向深层滞后时间较长。四采样点中,大柴旦各层土壤温度年较差最大,10 cm 处土壤温度年较差达到 41.6℃。大柴旦采样点纬度较高,且位于山坡位置,各层土壤温度波动较其他三处显著;诺木洪各层土壤温度年较差变化幅度最小,这是由于其纬度较低,位于绿洲附近,地表植被状况较好,太阳辐射透过植被冠层时发生衰减,土壤获得较少的太阳辐射,同时植被的存在降低了土壤冷却程度,所以该地区各层土壤温度季节变化较小。

三样点 10 cm 土壤湿度值由高到低分别为:大柴旦、德令哈、诺木洪。三点 10 cm 土壤湿度日变化存在相似性,均呈现出近似正弦曲线的周期性波动,但是波动范围和极值位置相差较大,大柴旦和德令哈的极值位置相同,最大值出现在 20:00,最小值出现在 10:00 至 11:00 之间,而诺木洪峰值出现比上述两样点晚两个小时。变化幅度表现为大柴旦>德令哈>诺木洪,振幅分别为 3.1%,1.1%,0.1%。各样点 10 cm 土壤湿度日平均增湿率小,积累期与衰减期大致在 12 h 左右,土壤水分收支状况基本保持动态平衡。其中诺木洪样点 10 cm 土壤湿度<6%,处于十分干旱状态。随着气温升高,表层土壤水分开始蒸发,下垫面越来越干燥,土壤湿度逐渐衰减,达到最大干旱程度后,随着气温的降低,表层土壤水分蒸发效应减弱,水分收入大于消耗,土壤湿度进入积累期,这就是土壤湿度的日循环过程。

### 3.4 土壤湿度的季节变化

不同季节土壤水热状况的变化较大,土壤湿度起伏波动明显。图 4 为 2010 年 7 月 2011 年 6 月三采样点(诺木洪、大柴旦和德令哈)不同深度土壤湿度月均值和月降水总量的变化。三地降水呈显著的季节性变化,6—9 月份为雨季,占全年降水量的 90%左右,而枯水期由 11 月延续至次年 5 月,年内降水分配极为不均。雨季集中降水不仅会增加土壤湿度,还对土壤水分蒸发有抑制作用,有利于表层土壤水的保留。冬季降水量与蒸发量都较小,故而冬季降水对

土壤湿度的影响微弱。各样点土壤湿度极值出现的时间略有差异,存在着各自的特殊性,但整体的季节变化趋势基本一致。在时间序列上看,诺木洪和

德令哈各层土壤湿度在7月份达到最高,而大柴旦在8月份土壤湿度最高。季节振幅:大柴旦>德令哈>诺木洪。

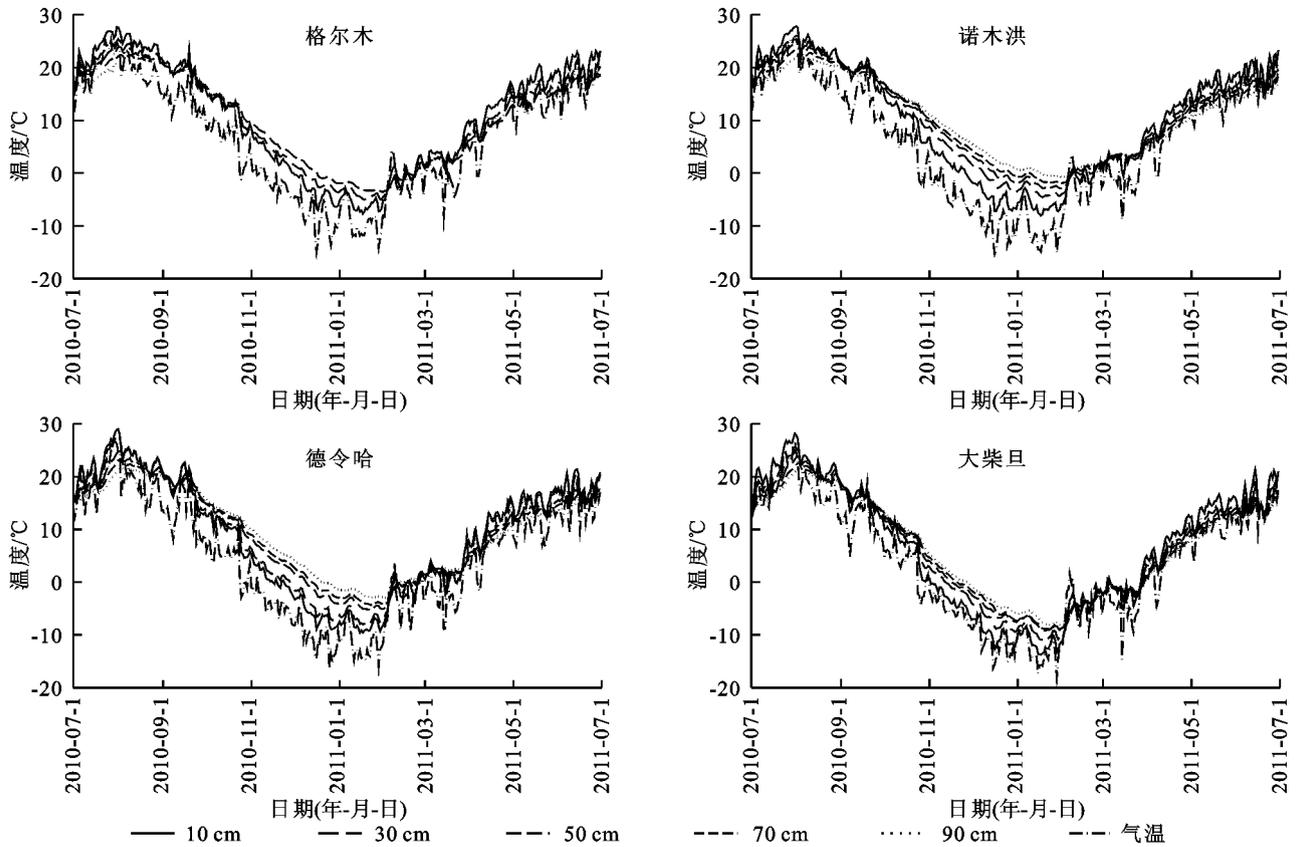


图2 四采样点土壤温度的季节变化

土壤湿度的季节变化具有周期性。各样点在1月份达到土壤湿度的最低值。之后随着温度的升高,土壤水分逐渐消融,各层土壤开始增湿,土壤湿度进入积累期。浅层土壤(10 cm)在4—5月份出现微弱的下降趋势,因为柴达木盆地位于东亚季风、南亚季风以及高原季风的交汇地带<sup>[22]</sup>,春季多大风,且气温回升快,土壤水分蒸发进入大气,并向大气输送水汽<sup>[23]</sup>,这是土壤湿度变化对气候的积极促进作用。各样点的降水主要集中在夏季(6月,7月,8月),土壤湿度对降水事件存在明显的响应,在6月,7月各层土壤湿度增大趋势十分明显。大柴旦地区2010年夏季降水相对较多,因此对表层土壤湿度影响较大。由此可见,土壤湿度对柴达木盆地气候季节变化既有激发促进作用,又有被动响应机制<sup>[24]</sup>。8月初,虽有降水对土壤水分的补给,但土壤水分蒸发强烈,土壤湿度开始衰减。至9月份,德令哈和大柴旦的10 cm浅层土壤湿度降幅较大,分别为8.3%和7.4%,而10 cm以下的土壤降幅相对较小,而诺木洪各层土壤湿度降幅不一,总体降幅均不大,70 cm处最大,达到3.58%,而90 cm处最小为1.25%。因为诺木洪样

点土壤湿度峰值绝对值以及土壤湿季到达之前的初始值相对较小。10月之后,随着土壤温度的下降,各层土壤缓慢减湿,整体降幅相对稳定。直至次年1月土壤湿度降到最低值,至此,土壤湿度完成一个周期的季节变化。

影响土壤湿度的因素复杂多样,土壤理化性质、质地和结构、土壤温度、大气降水、植被覆盖以及人类活动等因素<sup>[25]</sup>都会不同程度的影响土壤湿度。对于极端干旱的柴达木盆地而言,土壤湿度的季节变化受降水量和土壤温度的影响显著。根据上述分析得出,土壤湿度在湿季受降水事件的影响显著,在干季受土壤温度的影响较大。这与万国宁<sup>[26]</sup>等对青藏高原中部地区的研究基本一致。

## 4 讨论

土壤温度变化能够直接影响土壤水分运移过程,同时土壤水的热性质也对土壤温度的变化也有着重要影响,土壤温湿度之间相互影响,具有一定的相关性。为认识柴达木盆地土壤温湿度的变化规律,探讨土壤温度与土壤湿度之间的关系,本文采用多种类型

曲线进行拟合,并以相关系数作为主要指标,选择最适关系式,对不同深度土壤温度和湿度的相关关系进行探讨。由于格尔木样点土壤含水量数值缺失严重,不作土壤温度与湿度关系的讨论。

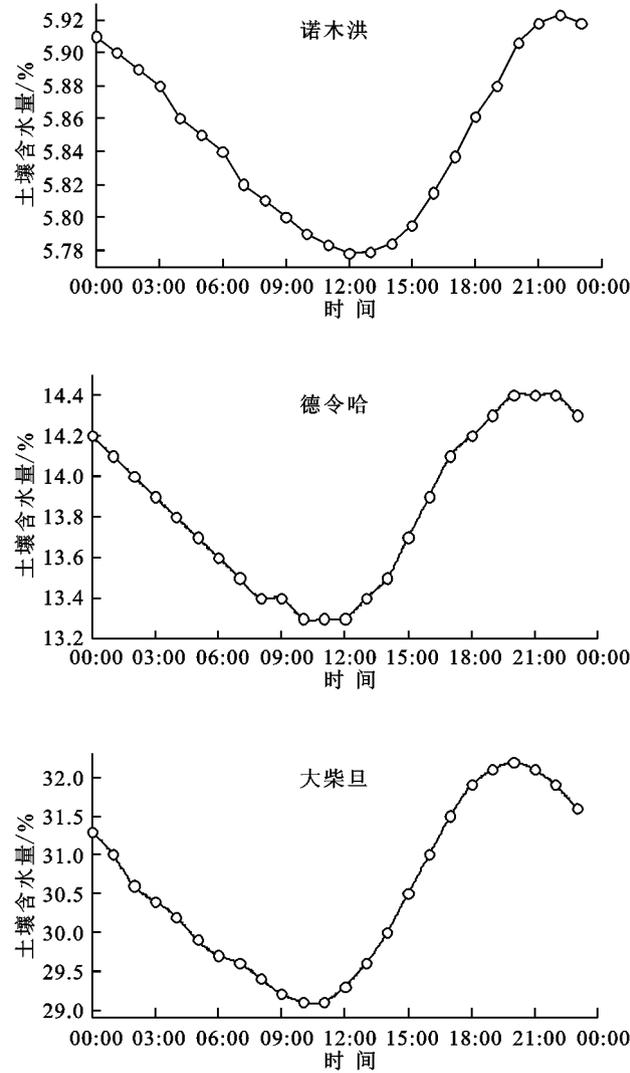


图 3 诺木洪、德令哈、大柴旦三点 10 cm 土壤湿度日变化

诺木洪、德令哈、大柴旦三点土壤温度与湿度(体积含水量)密切相关(图 5),均通过  $p < 0.05$  显著性检验,说明土壤湿度与温度相互影响。其中诺木洪采样点各深度土壤温度与湿度之间为二次函数关系,呈抛物线增减变化,即土壤温度随土壤湿度增大而增加至极大值后,又随湿度增大而降低。呈现这种变化趋势的主要原因为:水的体积热容量大于土壤体积热容量,当天气状况稳定,即不存在大气降水补给土壤水时,土壤体积含水量越高,土壤的体积热容量越大,土壤温度越高,表现为土壤湿度与温度的正相关关系,直到土壤温度与湿度的关系达到抛物线的最大值;随着夏天雨季到来,土壤水通过降水补给,土壤湿度增大,降水对太阳辐射的削减作用使土壤温度能够吸收的热量减少,加之地表水分蒸发吸收较多的土壤热

量,造成湿度大的土壤温度小,土壤湿度和温度之间呈现负相关关系,即随着土壤湿度的增大土壤温度降低。对土壤温湿度相关关系的已有研究<sup>[27]</sup>也表明,夏季土壤温度和湿度之间表现为负相关关系,其他季节土壤温度与湿度呈显著正相关。

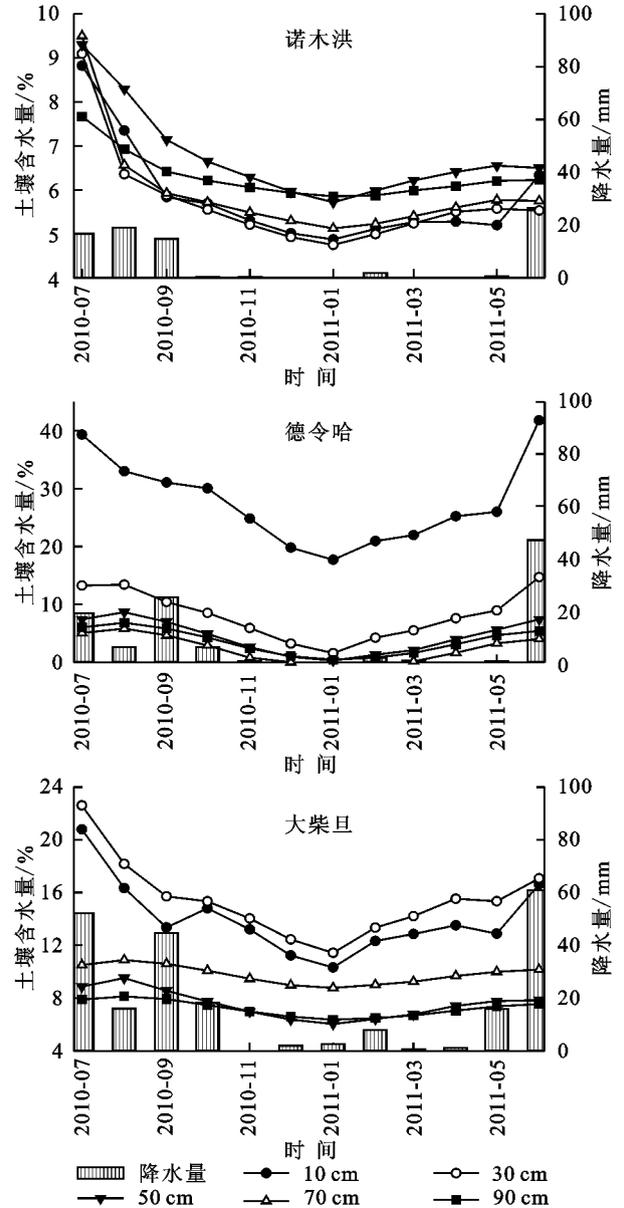
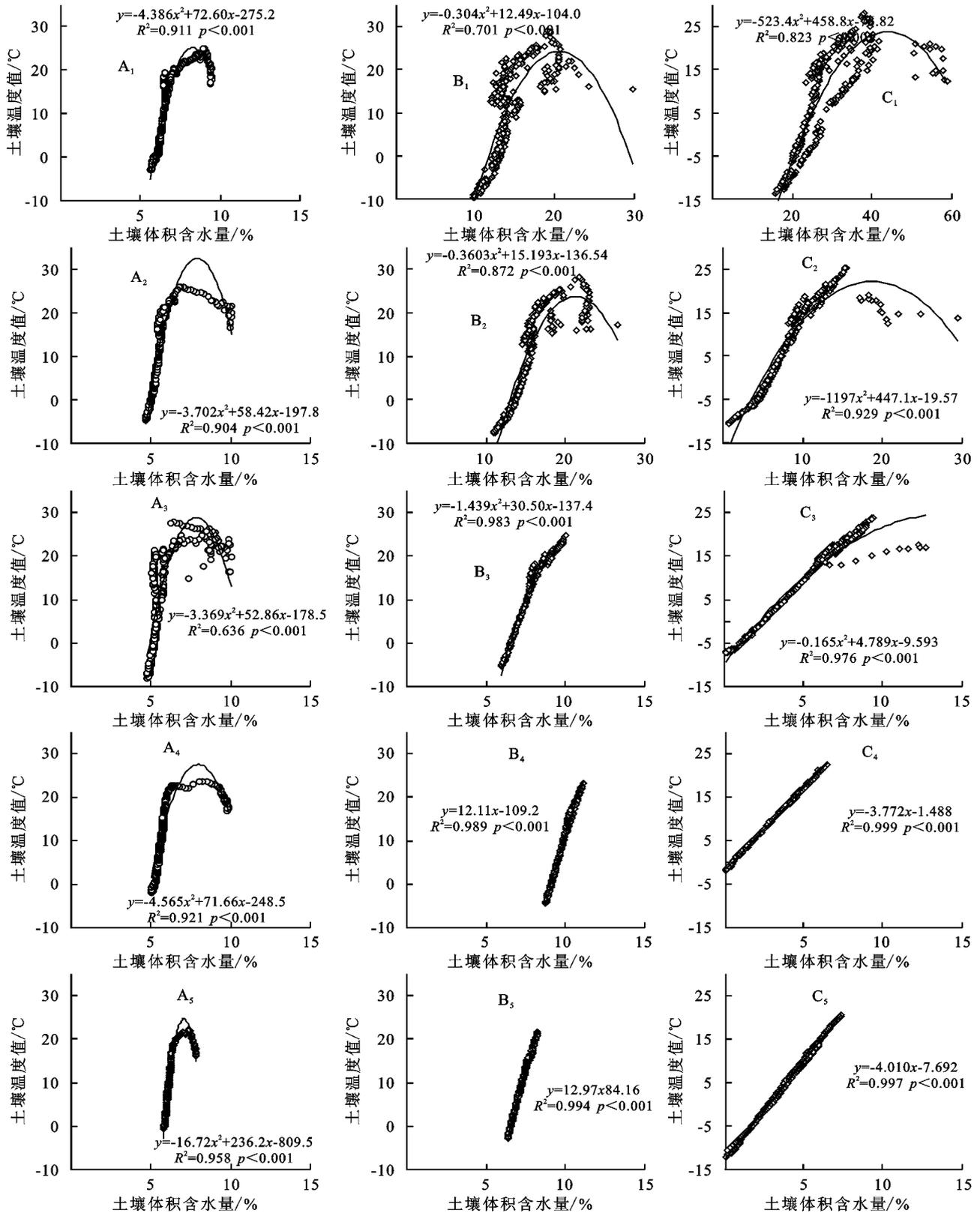


图 4 诺木洪、德令哈、大柴旦三样点降水及不同深度土壤湿度季节变化

德令哈和大柴旦两采样点浅层土壤(10, 30, 50 cm)温度与湿度关系与诺木洪相似,呈二次函数增减变化。而深层土壤(70, 90 cm)温度与湿度呈线性相关,即湿度越大温度越高。因为德令哈和大柴旦两地深层土壤(70, 90 cm)温湿度的变化受大气环境及地表蒸发的影响微小,单从热容量方面分析,土壤体积含水量越高,土壤的体积热容量越大,土壤温度越高。由上述讨论可见,土壤的湿度状况与温度变化的相关关系是较为显著的。



注: A、B、C 分别代表诺木洪、德令哈和大柴旦, 数字 1—5 依次代表 10、30、50、70 和 90 cm 深度。

图 5 诺木洪、德令哈、大柴旦三采样点土壤温度与湿度关系

## 5 结论

(1) 四样点一年中不同深度土壤温度的日变化分析表明, 浅层土壤(10、30 cm)温度的日变化剧烈,

而深层土壤日变化则相对平稳, 整体随时间呈正弦曲线变化。土壤温度变化随着深度增加, 振幅越小, 位相越后。

(2) 四样点各深度土壤温度季节变化呈近似正

弦曲线趋势,在8月份达到峰值,1月份达到谷值。在2月至3月之间不同深度土壤温度相差微小,几乎不存在各层之间的能量流动。

(3) 浅层土壤湿度的日变化较为明显,样点间10 cm土壤湿度日变化具有一定的相似性,存在一个积累期和衰减期的日循环。

(4) 土壤湿度季节变化具有周期性,诺木洪和德令哈各层土壤湿度在7月份达到最高,而大柴旦在8月份土壤湿度最高。季节振幅:大柴旦>德令哈>诺木洪。柴达木盆地土壤湿度在湿季受降水的影响明显,在干季受土壤温度的影响较大。

(5) 四点土壤温度与湿度(土壤体积含水量)密切相关,土壤湿度影响土壤温度变化幅度和变化趋势。诺木洪样点各深度土壤温度与湿度之间表现为二次函数关系,德令哈和大柴旦两采样点浅层土壤(10,30,50 cm)温度与湿度关系与诺木洪相似,呈二次函数增减变化。而深层土壤(70,90 cm)温度与湿度呈线性相关。

土壤温湿度变化是受多种因素影响的复杂变化过程,在研究土壤温湿度特征的同时,要对各影响因子进行全面的、具体的分析,并找出其主导因子,综合认识土壤温度变化规律。本研究只考虑了一个年周期的土壤温度变化的情况,而2010年相对往年降水量多,降水直接影响着土壤湿度,进而影响土壤温度。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。本文的气温数据来源于网站下载,且数据没有与逐时土壤温湿度数据完整对应,这是在以后研究中应当改进的方面。

#### 参考文献:

- [1] Meier M F, Dyrgerov M B. How Alaska affects the world[J]. *Science*, 2002,297(5580):350-351.
- [2] 戴加洗. 青藏高原气候[M]. 北京:气象出版社,1990.
- [3] Hu Q, Feng S. A daily soil temperature dataset and soil temperature climatology of the contiguous United States [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2003, 42(8): 1139-1156.
- [4] Chudinova S M, Frauenfeld O W, Barry R G, et al. Relationship between air and soil temperature trends and periodicities in the permafrost regions of Russia [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2006, 111(F2):1-15.
- [5] 杨绍富,刘志辉,闫彦,等. 融雪期土壤湿度与土壤温度、气温的关系[J]. *干旱区研究*, 2008,25(5):642-646.
- [6] 陈海存,李晓东,李凤霞,等. 黄河源玛多县退化草地土壤湿度变化特征[J]. *干旱区研究*, 2013,30(1):35-40.
- [7] 杨梅学,姚檀栋,丁永建,等. 藏北高原 D 110 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.
- [8] 杨梅学,姚檀栋, Toshio KOIKE. 藏北高原土壤温度的变化特征[J]. *山地学报*, 2000,18(1):13-17.
- [9] 杨梅学,姚檀栋. 藏北高原土壤温度的日变化[J]. *环境科学*, 1999,20(3):5-8.
- [10] 郑度,林振耀,张雪芹. 青藏高原与全球环境变化研究进展[J]. *地质前缘*, 2002,9(1):95-102.
- [11] 吴绍洪,尹云鹤,郑度,等. 青藏高原近 30 年气候变化趋势[J]. *地理学报*, 2005,60(1):3-11.
- [12] 徐浩杰,杨太保. 1981—2010 年柴达木盆地气候要素变化特征及湖泊和植被响应[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(6):868-879.
- [13] 刘育民. 柴达木盆地砂地土壤的发育[J]. *土壤通报*, 1962,3(4):45-48
- [14] 杨梅学,姚檀栋,王绍令,等. 藏北高原土壤的温湿特征 [J]. *地理研究*, 1999,18(3):312-317
- [15] 张波,刘志辉. 土壤冻结期湿度特征研究及其表层模拟 [J]. *水土保持通报*, 2014,34(3):247-251.
- [16] 曹兴,陈荣毅,杨举芳,等. 沙漠腹地秋季地温变化特征及其与气温的关系[J]. *干旱气象*, 2011,29(4):433-438.
- [17] 李玉霖,崔建垣. 科尔沁沙地风沙土地温特征及其分析 [J]. *中国沙漠*, 2000,20(1):42-44.
- [18] 黄洁,金莉莉,李振杰,等. 南疆沙漠腹地地温变化特征 [J]. *干旱区资源与环境*, 2013,27(1):148-153.
- [19] 李振朝,韦志刚,刘蓉,等. 黄土高原典型塬区土壤热状况研究[J]. *干旱区地理*, 2012,35(5):778-786.
- [20] 段若溪,姜会飞. 农业气象学[M]. 北京:气象出版社, 1990.
- [21] 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.
- [22] 牛光明. 近 5000 年来柴达木盆地东南缘风成沉积记录的冬季风演化[D]. 兰州:兰州大学,2009.
- [23] Meixue Y, Tandong Y, Xiaohua G, et al. The soil moisture distribution, thawing-freezing processes and their effect on the seasonal transition on the Qinghai - Xizang (Tibetan) plateau[J]. *Asian Earth Sci*, 2003,21 (5):457-465.
- [24] Meixue Y, Tandong Y, Xiaohua G, et al. Diurnal freeze/thaw cycles of the ground surface on the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(1): 136-139.
- [25] 王磊,文军,韦志刚,等. 中国西北区西部土壤湿度及其气候响应[J]. *高原气象*, 2008,27(6):1257-1266.
- [26] 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.
- [27] 陈海存,李晓东,李凤霞,等. 黄河源玛多县退化草地土壤湿度变化特征[J]. *干旱区研究*, 2013,30(1):35-40.