

# 基于温度差监测西北地区的土壤相对湿度

王丽娟, 郭 锐, 王 玮, 王素萍, 沙 莎, 胡 蝶

(中国气象局 兰州干旱气象研究所/中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室/  
甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730020)

**摘 要:**在 2012 年黑河生态水文遥感试验(HiWATER)观测资料的基础上,结合卫星的地表温度产品计算观测点的垂直温度差及温度的日较差,并分析了不同时间尺度上温度差与浅层土壤相对湿度(包括土层深度 2 cm, 4 cm 和 10 cm 的土壤相对湿度)的相关性。为检验温度差在区域含水量监测中的效果,利用经度、纬度和海拔高度对气温进行插值。同时为消除温度的区域性差异,将各温度差进行归一化处理,最后将归一化后的垂直温度差区域分布与土壤相对湿度进行了对比。结果表明:在各温度差中,地表温度和气温计算的垂直温度差与浅层土壤相对湿度的相关性最好;在时间尺度上,温度差与浅层土壤相对湿度的相关系数随时间尺度的增加而增大;在各土层深度中,温度差与 4 cm 的浅层土壤相对湿度相关性更好;在气温插值中,在纬度和海拔高度基础上插值出的气温与实测值之间更为接近;区域尺度上,归一化后的垂直温度差有效地解决了地理位置和下垫面对垂直温度差的影响,可以很好地监测月尺度上土壤湿度的变化的情况。

**关键词:**HiWATER; 土壤相对湿度; 温度参数

**中图分类号:**P461

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2018)05-0330-07

## The Soil Water Content Monitoring Based on the Temperature Difference in the Northwest China

WANG Lijuan, GUO Ni, WANG Wei, WANG Suping, SHA Sha, HU Die

(Gansu Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster/Key Laboratory of Arid

Climatic Change and Disaster Reduction of CMA/Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:**Based on the HiWATER data in 2012, the vertical temperature difference (the difference between land surface temperature and air temperature) and the diurnal range of temperature on sites were calculated using the land surface temperature product of remote sensing, and then the correlations between the soil moisture (the 2 cm, 4 cm and 10 cm soil moisture) and temperature parameters on varied time scales were analyzed. In order to verify the monitoring ability of the temperature parameters, the air temperature of the study area was estimated using the longitude, latitude and altitude, and the temperature parameters were normalized to avoid the difference of geographical. Compared the normalized temperature parameters with the soil moisture, the result showed that among the temperature parameters, the correlation between the vertical temperature difference and soil moisture was the best. The correlation coefficient between the temperature parameters and soil moisture increased with the increase of time scale. In each soil depth, the temperature difference was better correlated with the soil moisture of 4 cm depth. In the air temperature interpolation, the air temperatures estimated by latitude and altitude was closer to the measured values. On the regional scale, normalized vertical temperature difference could effectively solve the influence of geographical and the underlying surface, and could well monitor the change of soil moisture on month scale.

**Keywords:**HiWATER, soil moisture, temperature parameter

土壤湿度作为陆面水资源形成、转化及消耗过程中的基本参数,是联系地表水和地下水的纽带,也是地表能量交换的重要参数。目前土壤湿度的遥感监

测指数主要可以分为两大类<sup>[1]</sup>:基于可见光和近红外建立的干旱指数、基于热红外建立的干旱监测指数。绿色植物由于受到水分的胁迫在可见光和近红外波

收稿日期:2017-11-02

修回日期:2017-12-04

资助项目:甘肃省气象局气象科研项目(GSMAMs2017-13);公益性行业(气象)科研专项(重大专项)(GYHY201506001-5);国家自然科学基金“半干旱区大气边界层湍流相干结构对地表能量平衡的贡献”(41375019)

第一作者:王丽娟(1986—),女,四川广安人,理学硕士,助理研究员,主要从事陆面及卫星遥感研究。E-mail:wanglijuan01@126.com

通信作者:郭锐(1963—),女,新疆乌鲁木齐人,学士,研究员,主要从事气候和卫星遥感研究。E-mail:guoni0531@126.com

段都会发生相应的变化,导致植被指数出现波动,所以利用植被指数可以反映植被水分的供需状况,间接反映干旱的程度。为便于区域监测效果的对比分析,Kogan 等<sup>[2]</sup>提出植被状态指数 VCI,并用其监测降水量的变化。但植被指数对水分胁迫具有滞后性和不敏感性,只有水分胁迫严重阻碍到作物生长时,植被指数才会有—定的显现<sup>[3]</sup>,所以,热红外在土壤水分监测中显示出其独特的优势。由于土壤水分的变化,热红外波段就会出现相应的波动,且也有研究表明当作物受到水分胁迫时冠层温度最早开始发生变化,基于这些研究者提出不少基于热红外的土壤水分监测指数。现在常用的主要有温度植被干旱指数 TVDI<sup>[4]</sup>、供水植被指数 WSVI<sup>[5]</sup>、温度状态指数 TCI<sup>[6]</sup>、植被健康指数 VHI<sup>[7]</sup>、热惯量<sup>[8]</sup>及作物缺水指数 CWSI<sup>[9]</sup>,而这些基于热红外发展的遥感监测指数基本都离不开地表温度。

而地表温度与土壤相对湿度相联系的往往是地表相对温差获得的。Idso 等曾经利用地表温度的日较差来监测土壤的水分状态<sup>[10]</sup>。张仁华等<sup>[11]</sup>也以腾冲坝地区为例,详细地阐述了地表温度与土壤相对湿度之间的变化关系,结果表明干土的地表温度差比湿土大,土壤表层温度差大于深层土壤,所以地表温度的日较差可以提取土壤相对湿度信息。王开存等<sup>[12]</sup>利用实测资料与遥感资料相结合,利用地表温度和气温等参数建立估算蒸散的回归模型,而蒸散作为地表能量平衡与水循环的关键因子,是土壤相对湿度监测

中的重要参数。所以,气温日较差也可以反映土壤相对湿度的变化。但值得注意的是,不论是气温还地表温度的日较差都还存在不完善之处,在不同时间段对比中,气温和地表温度的日较差没有考虑地表辐射能量的影响,同一地点随着入射能量的改变地表和气温的日较差会发生变化。而在同一时间段,气温和地表温度也会随着下垫面及气候类型而不同,这就使得温差在区域土壤相对湿度的监测中存在一定的局限性。所以,为使地表温度和气温可以监测区域土壤相对湿度,我们必须寻求一种方法可以使温差监测方法更加完善。

所以,本文利用 2012 年黑河流域的观测资料验证在不同时间尺度上不同温差组合与各深度土壤相对湿度的相关性,并利用温差监测陕甘宁地区的土壤相对湿度,利用农气站观测的土壤相对湿度验证监测效果。最后对监测的温差进行归—化处理,使得归—化后的温差指数可以监测区域尺度的土壤相对湿度变化,为该地区的干旱监测及防灾减灾提供可靠的依据。

## 1 研究区概况及所用资料

### 1.1 研究区简介

本文以陕甘宁地区为研究区,陕西、甘肃、宁夏三省简称陕甘宁地区,地处我们西北,年平均降水量由陕西的 580 mm 减至宁夏的 400 mm、甘肃的 300 mm,降水主要集中在夏季,且地域分布不均,昼夜温差大。3 个省的气候区划、地形分布及下垫面类型如表 1 所示。

表 1 陕西、甘肃、宁夏三省的气候类型、下垫面类型、地理位置及概况

| 省份 | 下垫面类型                    | 气候区划  | 地理位置及概况  |
|----|--------------------------|---|--|
| 陕西 | 陕南主要为森林覆盖区,中部为农耕地,北部为草地  | 整体属于大陆季风性气候,南北气候差异明显。延安以北为温带半干旱大陆性气候,延安为暖温带半湿润气候,延安以南山地为暖温带湿润气候,盆地北亚热带湿润气候              | 陕西地跨北温带和亚热带,省内气温分布由南向北逐步降低,年平均气温在 7~16℃,冬季南北温差最大,夏季南北温差较小。陕西整体呈现南北高中间低的地势特点,南边主要为秦巴山区,中间为关中平原,北边为陕北高原  |
| 甘肃 | 甘肃的东南主要为农耕地,中部为草地,西北部为荒漠 | 大部分地区属于大陆性温带季风气候。陇南南部河谷亚热带湿润区,陇南北部暖温带湿润区,陇中为温带半干旱、半湿润区,河西西部为暖温带干旱区,河西南部为高寒半干旱区,甘南为高寒湿润区 | 甘肃深居内陆,年平均气温在 0~16℃,各地气温因海拔不同而差别较大,日照充足,气温日较差大。降水分布不均,大致由东南向西北递减。地形上处于黄土高原、青藏高原和内蒙古高原三大高原交汇地带,境内地形复杂,海拔差异大,高山、盆地、平川、沙漠、戈壁、河谷等交错分布,地势自西南像东北倾斜 |
| 宁夏 | 宁夏的南部和中部主要为草地,北部为农耕地     | 属于典型的大陆性半湿润半干旱气候  | 宁夏地处西北内陆高原,气温日较差大、日照时间长、太阳辐射强,大部分地区昼夜温差可达 12~15℃,全年平均气温 5~9℃。处于黄土高原和内蒙古高原的过渡地带,地势南高北低,南部以流水侵蚀的黄土地貌为主,中部和北部以干旱剥蚀、风蚀地貌为主                       |

### 1.2 资料来源及处理

本文所使用的卫星资料为 2000 年 6 月—2015 年 8 月每日的地表温度产品 MOD11A1,首先利用 MRT 对遥感影像进行投影转换和拼接。再利用最邻近插值法得到 HiWTER 试验区内 13 个观测点的单点数据,并利用遥感产品自带的质量控制文件对遥感数据进行质量控制,在数据中剔除有降水的时段。在对遥感资料进行旬和月时间尺度合成时均采用最

大值合成法,即在给定时间段内的多景遥感影像中,取每个像元的最大值代表给定时间段内该像元的值。

本文所使用的观测资料为:2012 年 6 月—2012 年 8 月在黑河流域进行的“黑河生态水文遥感试验(HiWATER)<sup>[13-15]</sup>”观测的土壤体积分含水量、气温、红外地表温度等资料;土壤相对湿度资料采用的是陕甘宁地区 91 个农气站(Agricultural Meteorological Station,AMS)2000—2014 年各旬的观测数据;气温

主要使用的是陕甘宁地区 57 个气象观测站 (meteorological station, MS) 2000—2014 年每日的观测数据。站点分布不均, 主要分布在陕西中部、甘肃东部和中部, 陕西北部和甘肃西北部站点较为稀少, 尤其是甘肃西北部仅 1 个农气站和 3 个气象观测站, 宁夏的站点分布较为均匀。从各类下垫面看, 站点主要分布在草地和农耕地区, 其他下垫面站点分布较少。

## 2 估算模型介绍

在近地面主要使用的是地表温度 LST 和近地层空气温度  $T_a$ , 所以我们主要计算以下几种温度差: 地表温度的日较差 (记为 DLSTR)、气温的日较差 (记为 DTAR) 和垂直温度差 (记为 LATR)。地表温度日较差定义为一天中最高地表温度值与最低地表温度值之间的差值; 气温日较差定义为一天中最高气温值与最低气温值之间的差值, 而垂直温度差则定义为地表温度与近地层 2 m 高处气温的差值。由于垂直温度差与地理位置及下垫面密切相关, 即在干旱区垂直温度差始终大于同期湿润地区的垂直温度差, 这就导致在使用垂直温度差监测土壤湿度时, 如果研究区较大, 那么就可能出现干旱区的垂直温度差始终处于干旱状态, 而湿润区始终处于湿润状态, 这就不能明确地反映研究区土壤湿度的变化情况。所以, 我们对 LATR 进行归一化处理, 即:

$$NLATR = \frac{LATR - LATR_{\min}}{LATR_{\max} - LATR_{\min}} \quad (1)$$

式中: NLATR 为归一化处理后的垂直温度差, 即归一化垂直温度差指数;  $LATR_{\max}$  和  $LATR_{\min}$  为长时间序列中 LATR 的最大和最小值。从 NLATR 定义出发, 当 LATR 值越小, LATR 就越接近于  $NLATR_{\min}$ ; NLATR 值就越小, 土壤就越湿润; 反之, 当 LATR 就越偏离  $NLATR_{\min}$ , NLATR 值就越大, 土壤就越干燥。值得注意的是, 利用 LATR 监测土壤湿度最重要的一个前提就是温度, 包括地表温度和气温的变化主要由土壤相对湿度引起, 而不是由于下垫面发生变化或入射能量的变化所导致。

## 3 结果与分析

### 3.1 温差与土壤体积含水量的相关性分析

在不同时间尺度上温差与浅层土壤体积含水量的相关性如表 2 所示。其中, 在日时间尺度上, 温度日较差是指一天中测得的最高温度减去最低温度; 在旬和月时间尺度上, 旬和月的温度日较差是将获取的日时间尺度上温度日较差进行算术平均得到; 即旬和月时间尺度上的温度日较差都是以日时间尺度上计算的温度日较差值为基础进行算数平均得到的, 是日时间尺度上日较差在旬和月时间段内的均值。

在利用气温 ( $T_a$ ) 和地表温度 (LST) 计算的温度日较差和垂直温度差中, 垂直温度差与浅层土壤体积含水量相关性最好, LST 日较差与浅层土壤体积含水量的相关性次之。不同土层深度土壤体积含水量相比, 温度差与 4 cm 土壤体积含水量的相关性最好, 与 2 cm 土壤体积含水量的相关性次之, 但 3 个深度的土壤体积含水量与温度差之间的相关系数均通过了 0.01 的显著性检验。不同时间尺度对比发现, 随着时间尺度的增大, 温度差与浅层土壤体积含水量的相关性是增加的。这主要是因为 LST 主要反映的是下垫面浅层的特征, 所以温差与 10 cm 的土壤体积含水量相关性最差, 而土壤表层的水分变化相对较快, 且影响因素也较多, 所以温差与 2 cm 土壤体积含水量的相关性不及温差与 4 cm 土壤体积含水量的相关性显著。随着时间尺度的增大, 水分和温差都有了相适应的过程, 可以减少水分骤变引起的温差监测误差, 所以大时间尺度上温差与浅层土壤体积含水量的相关性更好。

图 1 给出了在不同时间尺度上垂直温度差与不同深度土壤体积含水量的对比。分析发现, 在日时间尺度上, 当土壤体积含水量超过 40% 或低于 5% 的情况下, 垂直温度差将不随土壤体积含水量的变化而变化。这主要是因为当土壤体积含水量大于 40% 时, 土壤处于不缺水的状态, 水分将不再是温度变化的主导因; 而当土壤体积含水量小于 5% 时, 土壤处于极端干燥的状态, 水分对温差的影响极弱, 可以忽略不计。所以在这两种极端情况下, 垂直温度差对土壤水分的监测将会失效。土壤水分经过旬和月时间尺度上的平均以后, 土壤水分的变化将变得平缓, 极端情况下的土壤水分状态大幅度减少, 所以旬和月时间尺度上温差与土壤体积含水量的相关性优于日时间尺度。

### 3.2 气温插值的真实性检验

在研究区的 57 个站点中, 根据地理位置的不同选取 30 个站点的值进行回归建模, 利用剩余 27 个站点的值对模型进行检验。利用纬度 lon、经度 lat 和海拔高度 alt 进行插值 (如表 3 所示) 得到的各旬气温与实测值相比, 相关系数、均方根误差分别如图 2A 和图 2B 所示。对比 4 种模型可以发现, 基于经度、纬度、海拔高度和基于纬度、海拔高度进行插值得到的气温与实测值之间的相关系数都比较高, 各旬的相关系数均保持在 0.85 及以上, 且均方根误差最小, 除冬季外, 其他旬的均方根误差均在 1℃ 以下。所以, 在研究区推荐使用这两种方法估算区域尺度上的气温值。本文以基于纬度和海拔高度进行插值的方法得到区域尺度上的气温值为例, 进行相关温度参数的计算, 用于监测研究区区域尺度上土壤相对湿度的变化。

表 2 不同时间尺度上温差与不同深度土壤体积分含水量的相关分析

| 参数指数  | 2 cm 土壤体积分含水量 |       |       | 4 cm 土壤体积分含水量 |       |       | 10 cm 土壤体积分含水量 |       |       |
|-------|---------------|-------|-------|---------------|-------|-------|----------------|-------|-------|
|       | 日             | 旬     | 月     | 日             | 旬     | 月     | 日              | 旬     | 月     |
| DLSTR | -0.58         | -0.67 | -0.69 | -0.53         | -0.71 | -0.74 | -0.44          | -0.53 | -0.57 |
| DTAR  | -0.04         | -0.02 | -0.15 | -0.01         | -0.02 | -0.14 | 0.04           | 0.05  | 0.01  |
| LATR  | -0.64         | -0.74 | -0.74 | -0.65         | -0.76 | -0.78 | -0.52          | -0.54 | -0.60 |

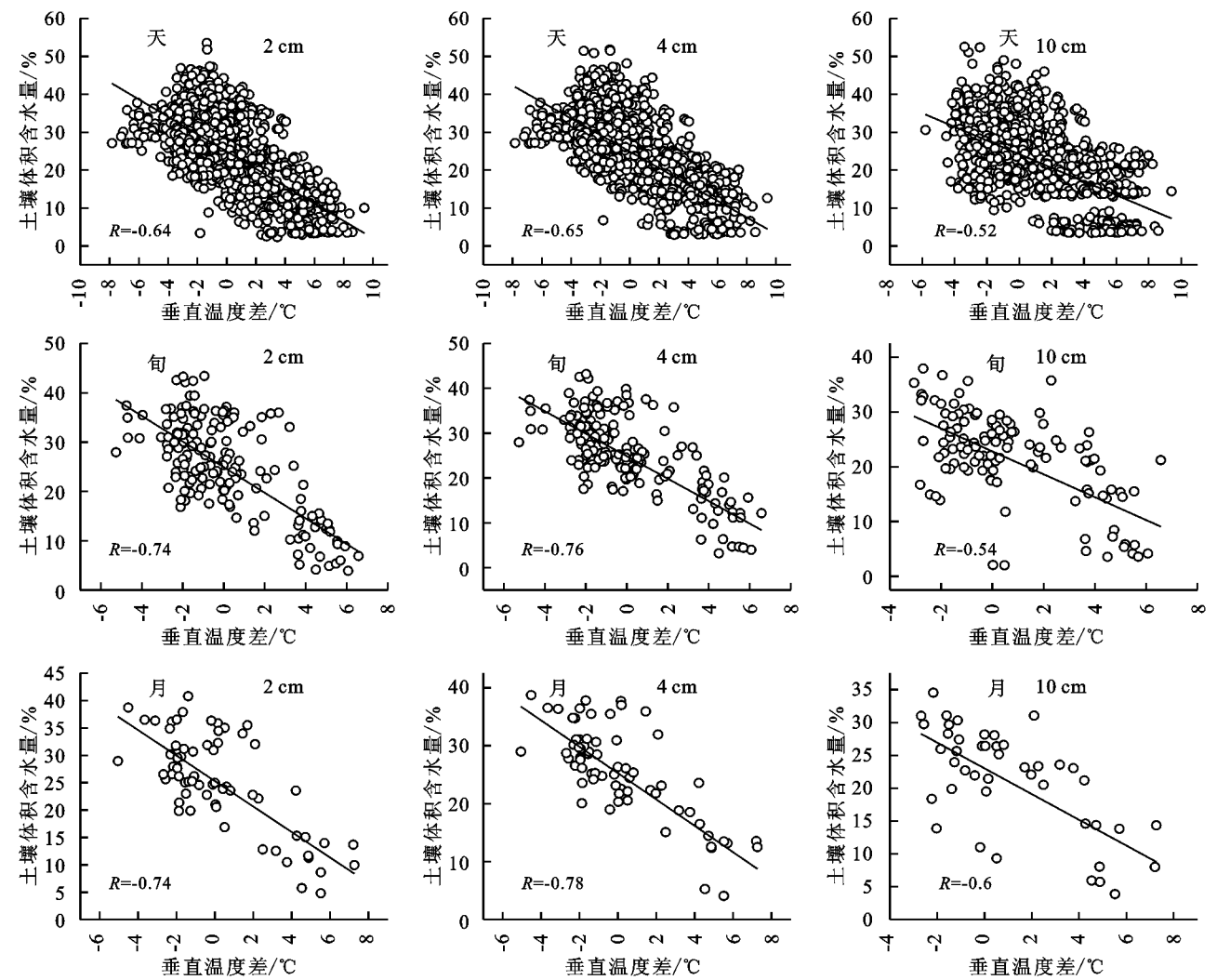


图 1 垂直温度差(LATR)与土壤体积分含水量的相关图

研究区内各点的气温插值结果分析可得,气温插值偏差最大的季节分布在冬季,而整个夏季气温插值的偏差都相对较小,所以图 3 给出了 11 月第 3 旬和 6 月第 3 旬的气温插值结果对比及区域分布图,分析气温区域插值结果的合理性。从整体上看,无论是冬季还是夏季,插值得到的气温区域分布是合理的,在海拔较大的区域,尤其是接近青藏高原的区域气温较低,在纬度较低且海拔也较低的区域气温相对较高。如图所示,冬季插值偏差较大的点主要集中在气温较低的部分,特别是气温低于 0℃ 的情况下,模型对气温值估算偏高;而从气温的区域分布图看,11 月第 3 旬,气温主要都分布在 0℃ 以下,所以,模型对研究区冬季的气温估算整体是偏高的。在 6 月的第 3 旬,模型插值结果与实测值之间的偏差较小,均方根误差仅

为 0.6℃,研究区气温主要分布在 5~25℃。

表 3 陕甘宁地区气温插值方法

| 插值方法序号 | 表达式   |
|--------|---|
| 1      | $Ta_1=a_0+a_1\cdot lat+a_2\cdot lon$              |
| 2      | $Ta_2=b_0+b_1\cdot lat+b_2\cdot lon+b_3\cdot alt$ |
| 3      | $Ta_3=c_0+c_1\cdot lat+c_2\cdot alt$              |
| 4      | $Ta_4=d_0+d_1\cdot lon+d_2\cdot alt$              |

3.3 温差对土壤相对湿度的监测结果

获取的农气站土壤相对湿度资料中只包含有 10 cm 的土壤相对湿度,无法获取大范围内 4 cm 深度的土壤相对湿度资料。由于观测资料的限制,接下来垂直温度差对土壤相对湿度的监测结果分析部分将使用 10 cm 土壤相对湿度。

表 4 给出了 2000—2014 年 3—11 月玛曲和西峰两

个农气站垂直温度差、归一化垂直温度指数与 10 cm 土壤相对湿度距平的相关系数。对比发现,归一化垂直温度差指数与 10 cm 土壤相对湿度的相关性在原来的基础上有显著提高,尤其是在植被低矮或裸土比例较大的春季和秋季。且不同下垫面垂直温度差与 10 cm 土壤相对湿度距平在各时期的相关性存在很大差异,这主要与各区域种植的作物有关。玛曲站为牧草种植区,由于牧草较为低矮,4—8 月归一化垂直温度差指数与 10 cm 土壤相对湿度距平的相关性都较好。牧草刚开始生长的 4—5 月归一化垂直温度差指数与 10 cm 土壤相对湿度距平的相关性最好。西峰站属于种植冬小麦和玉米的雨养农业区,3 月冬小麦返青至 6 月中旬冬小麦成熟,

由于植被覆盖,归一化垂直温度差指数与 10 cm 土壤相对湿度距平相关性较差。6 月下旬至 7 月下垫面主要为冬小麦收割之后的裸土和玉米,由于裸土区域范围较大,这一时期归一化垂直温度差指数与 10 cm 土壤相对湿度距平的相关性较好。8 月至 9 月上旬,由于玉米覆盖面积增加,归一化垂直温度差指数与 10 cm 土壤相对湿度距平的相关性降低。在 9 月中旬玉米收割之后,下垫面近似为裸土,归一化垂直温度差指数与 10 cm 土壤相对湿度距平的相关性达到最好。结果表明:归一化垂直温度差指数监测 10 cm 土壤相对湿度距平主要适用于裸土或稀疏植被覆盖区,对植被覆盖较好的下垫面监测效果较差。

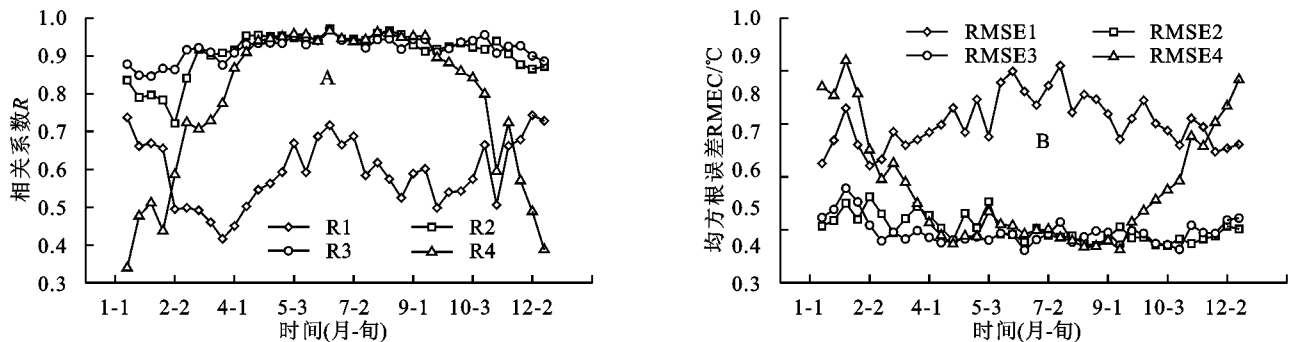


图 2 气温插值的相关分析

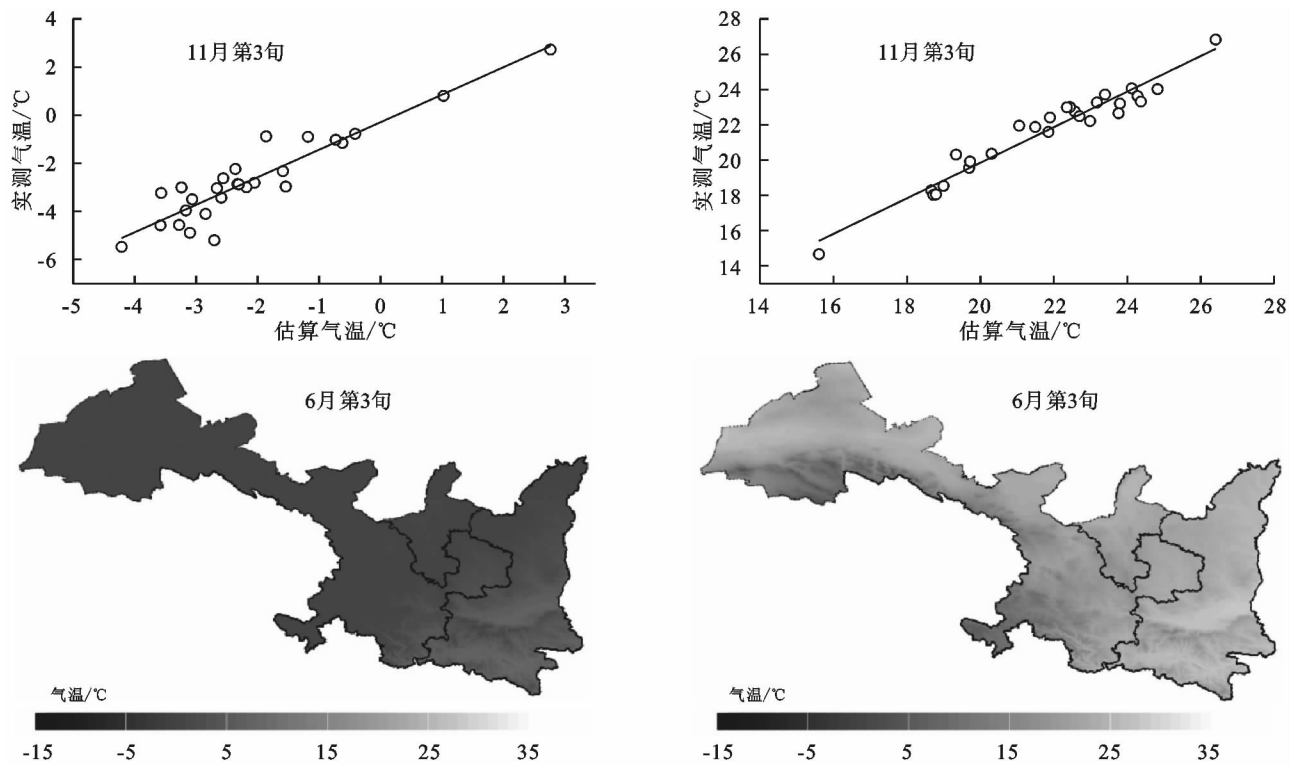


图 3 2009 年气温插值与实测值对比及插值结果的区域分布

图 4 给出 2009 年夏季月尺度的土壤相对湿度距平和归一化垂直温度差指数区域分布。6—8 月,陕甘宁地区土壤缺水范围逐渐减小,且缺水严重的地区由东向西转移。

对比土壤相对湿度距平与归一化垂直温度差指

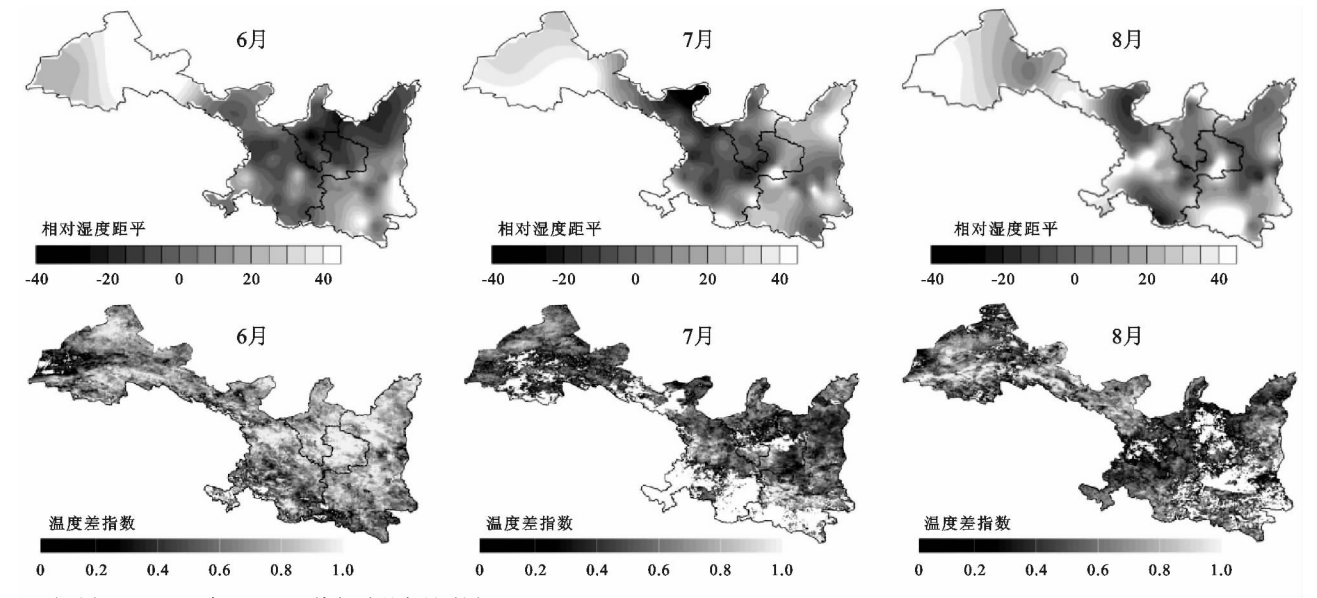
数分布图可以发现,归一化垂直温度差指数对缺水较为严重的地区(土壤相对湿度距平值 $<-10\%$ )的区域监测较为准确,而对土壤相对湿度距平值在 0 左右的区域监测结果不太理想。同样,在甘肃省的西部地区,归一化垂直温度差指数与土壤相对湿度距平的区

域分布存在很大差异,这仍然与前面提及的理由相同,在甘肃省的西部地区缺乏观测站点,所以土壤相对湿度距平在该地区的区域分布结果可信度较低,对该地区不做讨论。

表 4 不同站点垂直温度差、归一化垂直温度差指数与 10 cm 土壤相对湿度距平的相关分析

| 时间站点                          | 3 月   | 4 月    | 5 月    | 6 月    | 7 月     | 8 月   | 9 月     | 10 月    | 11 月  |
|-------------------------------|-------|--------|--------|--------|---------|-------|---------|---------|-------|
| 垂直温度差与 10 cm 土壤相对湿度的相关系数      |       |        |        |        |         |       |         |         |       |
| 玛曲站                           | —     | -0.56* | -0.36  | -0.20  | -0.49   | -0.41 | -0.03   | -0.10   | —     |
| 西峰站                           | -0.14 | -0.22  | -0.39  | -0.47  | -0.03   | -0.19 | -0.05   | -0.27   | -0.44 |
| 归一化垂直温度差指数与 10 cm 土壤相对湿度的相关系数 |       |        |        |        |         |       |         |         |       |
| 玛曲站                           | —     | -0.57* | -0.52* | -0.26  | -0.63*  | -0.49 | -0.82** | -0.10   | —     |
| 西峰站                           | -0.35 | -0.23  | -0.36  | -0.51* | -0.66** | -0.32 | -0.37   | -0.72** | -0.16 |

注: \* 代表通过了 0.05 的显著性水平检验; \*\* 表示通过了 0.01 的显著性水平检验。



注:图(b1)—(b3)与 10 cm 土壤相对湿度距平图(a1)—(a3)。  
图 4 月尺度上归一化垂直温度差指数的区域分布

4 结论

(1) 不同的温差组合中,垂直温度差与浅层土壤体积含水量的相关性最好,相关系数随时间尺度的扩大而增大;且垂直温度差与 4 cm 深度的土壤体积含水量相关性优于其与其他深度含水量的相关性。

(2) 利用纬度和海拔高度进行插值得到的研究区气温与实测之间的相关系数最高,各旬的相关系数均保持在 0.85 及以上,且均方根误差最小,除冬季外,其他旬的均方根误差均在 1℃ 以下。

(3) 垂直温度差与土壤相对湿度呈负相关,但垂直温度差和土壤相对湿度都受下垫面和地理位置的影响,所以利用归一化垂直温度差指数与土壤相对湿度距平进行对比分析,结果显示归一化垂直温度差指数可以很好地监测月尺度的土壤相对湿度距平。

致谢:感谢“黑河生态水文遥感试验(HiWATER)”提供数据支持。

参考文献:

[1] 郭锐,王小平. 遥感干旱应用技术进展及面临的技术问

题与发展机遇[J]. 干旱气象,2015,33(1):1-18.

[2] Kogan F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas [J]. International Journal of Remote Sensing, 1990,11(8):1405-1419.

[3] 郭锐,陈添宇,雷建勤,等. 利用 NOAA 卫星可见光和近红外资料估算甘肃省东部农田土壤湿度[J]. 应用气象学报,1997,8(2):212-218.

[4] 沙莎,郭锐,李耀辉,等. 我国温度植被旱情指数 TVDI 的应用现状即问题简述[J]. 干旱气象,2014,21(1):127-134.

[5] Gillies R R. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover [J]. Remote Sensing Reviews, 1994,9(1):161-173.

[6] Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection[J]. Advances in Space Research, 1995,15(11):91-100.

[7] Kogan F. World droughts in the new millennium from AVHRR-based vegetation health indices [J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 2013, 83(48):557-563.

[8] 张仁华. 土壤含水量的热惯量模型及其应用[J]. 科学通报,1991,36(12):924-927.

- [9] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. *Water Resources Research*, 1981,17(4):1133-1138.
- [10] Idso S B, Schmugge T J, Jackson R D, et al. The utility of surface temperature measurements for the remote sensing of surface soil water status[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975,80(21):3044-3049.
- [11] 张仁华. 定量热红外遥感模型及地面试验基础[M]. 北京:科学出版社,2009,233-243.
- [12] Wang K, Wang P, Li Z, et al. A simple method to estimate actual evapotranspiration from a combination of net radiation, vegetation index, and temperature[J]. *J Geophys Res*, 2007,112:D15107.
- [13] Liu S, Xu Z, Song L, et al. Upscaling evapotranspiration measurements from multi-site to the satellite pixel scale over heterogeneous land surfaces[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2016,230:97-113.
- [14] Xu Z, Liu S, Li X, et al. Intercomparison of surface energy flux measurement systems used during the Hi-WATER-USOEXE[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013,118(23):140-157.
- [15] Liu S M, Xu Z W, Wang W Z, et al. A comparison of eddy-covariance and large aperture scintillometer measurements with respect to the energy balance closure problem[J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2011,15(4):1291-1306.

(上接第 318 页)

- [15] 郭渠,程炳岩,孙卫国,等. 长江上游地区可利用降水量的气候特征[J]. *湖泊科学*,2011,23(1):112-121.
- [16] Takahashi Hiroichiro. The calculation method of monthly average temperature, precipitation and evaporation[J]. *Synoptic(Japan)*,1979,26(12):759-763.
- [17] 高桥浩一郎. 根据月平均气温、月降水量推算蒸散量[J]. *气象科技*,1979,26(12):48-50.
- [18] 吴立君,葛朝霞,曹琨,等. 西北地区可利用年降水量趋势分析及预测[J]. *人民黄河*,2011,33(12):51-55.
- [19] 葛朝霞,曹丽青,薛梅,等. 近 50 a 来南疆气候变化对可利用降水量的影响[J]. *河海大学学报:自然科学版*,2010,38(1):6-9.
- [20] 旦木仁加甫. 中长期水文预报与 SPSS 应用[M]. 郑州:黄河水利出版社,2011.
- [21] 陈守煜. 中长期水文预报综合分析理论模式与方法[J]. *水利学报*,1997(8):15-21.

(上接第 324 页)

- [9] 韩振宇,周天军. APHRODITE 高分辨率逐日降水资料在中国大陆地区的适用性[J]. *大气科学*,2012,36(2):361-373.
- [10] 刘少华,严登华,王浩,等. 中国大陆流域分区 TRMM 降水质量评价[J]. *水科学进展*,2016,27(5):639-651.
- [11] 田苗,李卫国. 基于 TRMM 遥感数据的旱涝时空特征分析[J]. *农业机械学报*,2015,46(5):252-257.
- [12] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[J]. *Proceedings of the 8 th Conference on Applied Climatology*. Boston, Ma; American Meteorological Society, 1993,17(22):179-183.
- [13] 黄晚华,杨晓光,李茂松,等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58 a 演变特征[J]. *农业工程学*,2010,26(7):50-59.
- [14] 王丹云,吕世华,韩博,等. 近 30 年黄土高原春季降水特征与春旱变化的关系[J]. *高原气象*,2017,36(2):395-406.
- [15] Hurst H E. Long term storage capacity of reservoirs[J]. *Trans American Society of Civil Engineers*, 1951,116(12):776-808.
- [16] 刘琳,徐宗学. 西南地区旱涝特征及其趋势预测[J]. *自然资源学报*,2014,29(10):1792-1801.
- [17] 孙东永,黄强,王义民. 基于 V/S 分析的河川径流长记忆性研究[J]. *水力发电学报*,2011,30(6):178-182.
- [18] 邬长福,涂志刚,万佳威,等. 基于 R/S 分析与 V/S 分析的滑坡变形趋势判断及稳定性研究[J]. *水电能源科学*,2015,33(1):111-114.

(上接第 329 页)

- [27] Trenberth K E, Hoar T J. The 1990—1995 El Nino-Southern Oscillation Event; Longest on Record [J]. *Geophysical Research Letters*, 1996,23(1):57-60.
- [28] Kiladis G N, Van Loon H. The Southern Oscillation. Part VII: Meteorological Anomalies over the Indian and Pacific Sectors Associated with the Extremes of the Oscillation[J]. *Monthly Weather Review*, 1988,116(1):120-136.
- [29] 胡姝,孙立尹,李英. 热带气旋结构和强度变化研究进展[J]. *气象与环境学报*,2014,30(4):91-98.
- [30] 王坚红,曾喻,彭模,等. 中国南部沿海暴雨东风波特征及 SST 影响机制研究[J]. *大气科学学报*,2017,40(3):333-345.
- [31] 湛芸,施能. 厄尔尼诺/南方涛动与我国秋季气候异常[J]. *热带气象学报*,2003,19(2):137-146.