

王良宇,何延波.2015.自动土壤水分观测数据异常值阈值研究.气象,41(8):1017-1022.

# 自动土壤水分观测数据异常值阈值研究<sup>\*1</sup>

王良宇 何延波

国家气象中心,北京 100081

**提 要:** 根据国家气象信息中心实时资料数据库读取的自动土壤水分监测资料,计算出各个测站相应的土壤容重、田间持水量、凋萎湿度数据。在具体的业务实践中,参照土壤最大吸湿量数值,将 6% 作为土壤相对湿度的低值异常阈值;参照土壤饱和含水量数值,将 190% 作为土壤相对湿度的高值异常阈值;参照土壤水分日变化特点,初步将 24 h 变化幅度 0.1% 作为 10 和 20 cm 土层土壤相对湿度监测异常的变化阈值。具体分析代表站实测土壤相对湿度随时间的变化幅度,认为在土壤水分上升过程中的小时之间变化幅度应小于土壤饱和含水量(%)与前一监测数据的差值;土壤相对湿度 > 100% 时的下降幅度应小于土壤饱和含水量(%)减去 95%;土壤相对湿度 ≤ 100% 时的下降幅度应小于 5%。

**关键词:** 土壤水分, 自动观测, 异常值阈值

**中图分类号:** P413

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.08.011

## Research on Outlier Threshold of Automatic Soil Moisture Observation Data

WANG Liangyu HE Yanbo

National Meteorological Centre, Beijing 100081

**Abstract:** According to the automatic soil moisture monitoring data read from the database of National Meteorological Information Centre (NMIC), the soil bulk density, field capacity and wilting moisture of each station are calculated. In the operational practice, according to the soil maximum hygroscopicity, the lowest threshold of the relative soil moisture is set to be 6%. According to the saturated soil moisture, the top threshold of the relative soil moisture is set to be 190%. According to the diurnal variation characteristics of the soil moisture, the diurnal variation amplitude of the relative soil moisture of 10 cm and 20 cm soil layer is set to 0.1%. The variation range of relative soil moisture with time of representative stations is analyzed. The results show that in the increasing stage of soil moisture, the variation amplitude between hours should be less than the difference of the saturated soil moisture (%) with the previous monitoring data. When the relative soil moisture is larger than 100%, the decline range should be less than the saturated soil moisture (%) minus 95%. And when the relative soil moisture is less than 100%, the decline range should be less than 5%.

**Key words:** soil moisture, automatic observation, outliers threshold

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306045 和 GYHY201106027)共同资助

2014 年 1 月 2 日收稿; 2014 年 10 月 30 日收修定稿

第一作者:王良宇,主要从事农业气象数据分析与应用研究. Email:wangly@cma.gov.cn

## 引言

2013年7月,中国气象局正式取消了人工测定土壤湿度业务。在土壤湿度观测与应用方面,自动土壤水分观测数据成为支撑各种相关业务、服务及科研的唯一数据资源。但土壤水分自动观测和传统的人工观测是两种完全不同的数据监测方法,自动观测数据有其固有的变化特征,监测过程中经常出现一些异于人工测定的“反常”数据。这些“反常”数据可能是土壤水分再分配过程中合理存在的,也可能是自动监测仪器自身故障引起。只有在数据应用分析之前尽可能多地区分并剔除这些不合理数据,才能减少异常数据对应用分析的干扰。为此,需要研究这些不合理数据的判定阈值,在数据管理层面利用这些阈值进行判断分析,出现异常时发出预警信息,提请分析人员重视,进而在具体业务服务中合理利用并充分发挥自动观测数据的优势。土壤相对湿度是指土壤含水量与田间持水量的百分比,以往大部分农业气象分析、服务指标多是用土壤相对湿度进行表示,常规农业气象业务中也多用土壤相对湿度进行分析服务;本文针对自动土壤水分观测产生的土壤相对湿度数据进行异常值分析,进而确定其异常值判定阈值,并对阈值应用方法进行初步探讨。

## 1 土壤水文、物理特性参数的选择与值域分布分析

田间持水量是表示土壤持水能力的一个重要的土壤水文特性数值,土壤容重是反映土壤物理性质的一个重要参数,凋萎湿度是植物有效水分下限和计算田间有效水分贮存量的必须参数(国家气象局,1993)。计算、分析具体站点各土层土壤的这些特征数据,对确定自动土壤水分观测数据异常值阈值有着非常重要的意义。

国家气象信息中心实时气象资料数据库(MDSS)为保障自动土壤水分观测数据的业务应用与服务需求,设计有独立的土壤水分观测要素表(RASMM),数据表字段内容包括测点10~200 cm深度按10 cm分层的土壤体积含水量、土壤相对湿度、土壤重量含水率、土壤有效水分贮存量。可以通过简单计算获得各监测站点当前业务中正在应用的土壤容重、田间持水量与凋萎湿度数值。

由于逐小时实时传收的自动土壤水分观测数据

没有经过专家的逐一审核,直接计算得到的数值难免会出现一些大小异常的情况;但通过业务验收的自动土壤水分观测站数据的主体质量是有保证的。本文通过统计计算值在设定连续值域上的分布情况,将分布站点极少的高、低值域限定值作为计算结果异常的判定阈值。

参照国家气象局(1993)提供的公式(1~3),可以计算出各个测点土壤的容重、田间持水量、凋萎湿度数值。

$$Q = w\rho \quad (1)$$

$$R = \left(\frac{w}{f_c}\right)100\% \quad (2)$$

$$u = \rho h(w - wk)10 \quad (3)$$

式中, $Q$ :容积含水率(单位:%); $\rho$ :土壤容重(单位: $g \cdot cm^{-3}$ ); $R$ :土壤相对湿度(单位:%); $w$ :土壤重量含水率(单位:%); $f_c$ :田间持水量(用重量含水率表示); $h$ :土层厚度(单位:cm); $u$ :有效水分贮存量(单位:mm); $wk$ :凋萎湿度(重量含水率表示)。

农作物的主要根层分布在0~50 cm,本文以20和50 cm土层数据为例,探讨田间持水量、土壤容重与凋萎湿度数值的区间分布情况。根据2013年6月18日从国家气象信息中心读取的1270个有效观测数据计算分析,自动土壤水分监测站20和50 cm土层土壤容重、田间持水量及凋萎湿度数值分布情况分别如图1~3所示。

图1中设定(0,0.1],(0.1,0.2],(0.2,0.3],..., (5.9,6.0]等60个分布区间,分别统计土壤容重数值分布在各个区间的站点数量,两条曲线分别显示20和50 cm土层土壤容重数值在各个值域区间

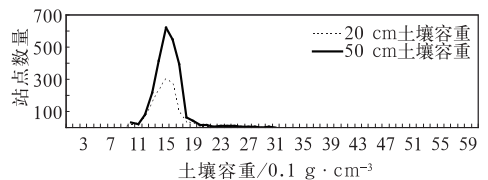


图1 20和50 cm土壤容重数值分布图  
Fig. 1 Distribution of soil bulk density in the layers of 20 cm and 50 cm

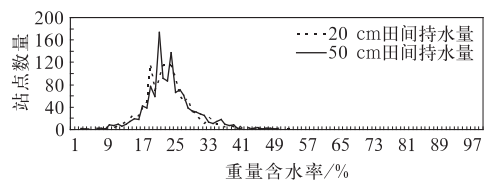


图2 20和50 cm田间持水量数值分布图  
Fig. 2 Distribution of field capacity in the layers of 20 cm and 50 cm

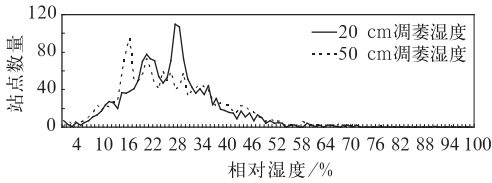


图3 20和50 cm调萎湿度数值分布图

Fig. 3 Distribution of wilting moisture in the layers of 20 cm and 50 cm

的分布情况。从图1可以看出,大部分站点(占总样本数的95%以上)的土壤容重数值在 $[1.0, 2.2]$ 范围内。

图2中设定 $(0, 1], (1, 2], (2, 3], \dots, (99, 100]$ 等100个分布区间,分别统计田间持水量数值分布在各个区间的站点数量,两条曲线分别显示20和50 cm土层土壤的田间持水量数值在各个值域区间的分布情况。从图2可以看出,大部分站点(占总样本数的95%以上)的田间持水量数值在 $[10, 41]$ 范围内。

图3中设定 $(0, 1], (1, 2], (2, 3], \dots, (99, 100]$ 等100个分布区间,分别统计调萎湿度数值分布在各个区间的站点数量,两条曲线分别显示20和50 cm土层以土壤相对湿度(%)表示的调萎湿度数值在各个值域区间的分布情况。可以看出,大部分站点(占总样本数的92%以上)的调萎湿度(相对湿度)数值在 $[8, 49]$ 范围内。

可以看出20和50 cm土层土壤容重、田间持水量及调萎湿度数值的值域范围基本一致,将 $[1.0, 2.2], [10, 41], [8, 49]$ 分别作为监测点一般土层通用的土壤容重、田间持水量及调萎湿度(相对湿度)数值的参考范围。

## 2 自动土壤水分观测数据的低值异常阈值

### 2.1 土壤最大吸湿量及其指标分析意义

根据水分在土壤中所受作用力及其物理状态的差异,可将土壤水分分为吸湿水、膜状水、毛管水和重力水4种类型。其中吸湿水主要取决于土壤表面积和空气相对湿度的大小,受到的土壤吸力一般为 $3 \times 10^6 \sim 1 \times 10^9$  Pa,需要在 $100 \sim 150^\circ\text{C}$ 的温度下进行长时间烘烤才能从土壤中散失(邹良栋,2010)。

在水汽饱和的空气中,土壤吸湿水达到最大值时的土壤含水率被称为吸湿系数或最大吸湿量,自然状态下的土壤含水量都在最大吸湿量以上。

具体站点的土壤最大吸湿量可以较为准确的测定,选择土壤最大吸湿量作为自动土壤水分监测的

低值异常阈值在业务上是可行的。

### 2.2 自动土壤水分观测低值异常阈值的确定

自动土壤水分观测数据中经常出现土壤相对湿度小于1%、2%、...等非常小值的情况,这些数据在理论上很难解释,只有将其滤去才能增加数据整体分析的可靠性;而滤去这些数据就需要确定自动土壤水分观测的低值异常阈值。

对于单个土壤水文、物理特性明确的站点来讲,土壤最大吸湿量可以准确测算,自动土壤水分观测低值异常阈值可以参照土壤最大吸湿量确定;但对于成百上千的自动土壤水分监测站而言,全部测定和计算有一定困难,目前中国气象局也没有该项业务要求;本文利用调萎湿度,采用文献提供的换算系数计算出土壤最大吸湿量的近似范围。

花子昌等(1980)认为调萎湿度可以用土壤最大吸湿量的1.5~2.0倍的土壤最大吸湿量来近似确定。李小刚(1993)通过实验分析认为,土壤调萎湿度与最大吸湿水含量间呈直线正相关关系,用最大吸湿水含量乘以1.5来代表调萎湿度。段兴武等(2008)通过回归分析,针对东北黑土建立了利用最大吸湿水(PWP)估算土壤调萎湿度(MH)的公式: $PWP=1.4742MH+0.6292$ 。

根据图3计算结果,自动土壤水分观测站以土壤相对湿度(%)表示的调萎湿度数值多在 $[8, 49]$ 范围内,调萎湿度数值小于8的站点占全部站点的2%左右。本文参照文献资料,采用“吸湿系数=调萎湿度 $\div$ 1.7”的方法,反算出自动土壤水分观测站点的土壤吸湿系数应该在 $[5, 29]$ 区间内。

实际上,土壤在自然情况下是难以将膜状水全部风干的,风干土的湿度是处于土壤吸湿系数与调萎湿度之间的一个数值。李保国等(2000)研究认为,调萎湿度约等于土壤风干湿度的1.34倍,照此算来风干土的湿度应该在 $[7, 39]$ 区间内。

综合以上分析结果,参考业务数据试验分析情况,可以将6%作为土壤相对湿度的下限阈值,土壤相对湿度低于6%时,监测仪器、环境或传输过程中出现问题的可能性大。

## 3 自动土壤水分观测数据的高值异常阈值

### 3.1 饱和含水量及其指标分析意义

土壤饱和含水量是指土壤孔隙全部充满水分时

的土壤含水量,此时土壤吸湿水、膜状水、毛管水和重力水全部达到饱和,代表土壤的最大蓄水能力。也是在灌溉、降雨时自动土壤水分监测仪理论上可以监测到的最大土壤湿度数值。

土壤空隙的数量一般用孔隙度来表示,是指土壤空隙的体积占土壤总体积的百分比,可以通过土粒密度和容重进行计算得出,具体公式为:

$$\text{土壤孔隙度}(\%) = 1 - \frac{\text{土壤容重}}{\text{土粒密度}} \times 100\% \quad (4)$$

具体测点的土壤孔隙度可以直接进行测定和计算,利用土壤饱和含水量数据作为自动土壤水分监测的高值异常阈值在理论上是可信的。

### 3.2 自动土壤水分观测高值异常阈值的确定

对于全国业务而言,获取每个测站分层的土壤饱和含水量是非常困难的,本文利用常规业务中可以得到的数据进行近似计算,确定土壤饱和含水量的值阈范围,进而确定自动土壤水分监测的高值异常阈值。

绝大多数矿物质土壤的土粒密度为  $2.6 \sim 2.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,常规工作中常取其平均数  $2.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (秦耀东,2003)。由此可以计算出各个自动土壤水分监测站点土壤水分饱和(土壤孔隙全部充满水分)时的土壤相对湿度。

图 4 中设定  $(0,1]$ ,  $(1,2]$ ,  $(2,3]$ ,  $\dots$ ,  $(274,275]$  275 个分布区间,分别统计土壤水分饱和时的相对湿度数值分布在各个区间的站点数量,图中的离散点表示各个值域区间上的站点数目。从中可以看出,区间  $(143,144]$ 、 $(144,145]$  上站点最多,分别为 44 和 28 个;有近 50% 的站点分布在区间  $(109,160]$  上;90% 的站点数值在 190% 以下。

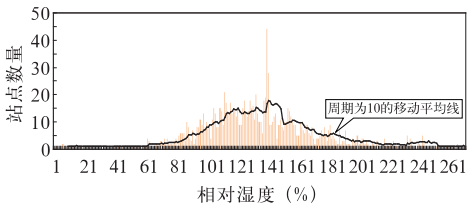


图 4 20 cm 土壤水分饱和时的土壤相对湿度分布图

Fig. 4 Distribution of soil relative humidity with saturated soil moisture in the layer of 20 cm

由于土壤密度采用统一参考值( $2.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )计算带来的误差,土壤容重换算产生的误差,以及少量自动土壤水分观测数据异常的影响,土壤孔隙度

的近似计算结果应该比真实数值的分布区间偏大。

从实际计算结果来看,有近 10% 的测点土壤水分饱和时的相对湿度数值分布在  $(0,100]$  区间,而土壤饱和含水量应该是大于田间持水量的,水分饱和时的相对湿度数值理应大于 100%,计算数据低值端出现明显的偏差是由于近似计算过程中的各种误差引起的。受同等误差因素的影响,在计算数据的高值端也应存在一个类似大小的不合理值域;如果除去高值端 10% 左右的可疑站点,190% 可以作为土壤相对湿度的高值异常阈值。

结合移动平均曲线(周期  $E=10$ )分析,土壤水分饱和时相对湿度数值的主体分布应在 190% 以下,真实站点出现土壤相对湿度大于 190% 的可能性不大。建议在实际业务中暂用 190% 作为土壤相对湿度的上限阈值,认为土壤相对湿度高于 190% 时,监测仪器、环境或传输过程中出现问题的可能性大。

## 4 监测数据的异常变化情况

### 4.1 土壤水分的逐日动态变化

太阳辐射、气温、风速等气象要素的日变化直接影响土壤水分的散失速度;同时也使浅层土壤温度  $(0 \sim 30 \text{ cm})$  呈现较为明显的日变化特点(范爱武等,2002;张静等,2007;花东来等,2012;黄飞龙等,2012)。温度变化会影响水的一些理化性质,如黏滞性、密度、表面张力等,进而影响土壤水分运动状态(冯宝平等,2002;王仰仁等,2010)。受土壤水分自身分配规律及气象要素逐日变化的影响,浅层土壤的相对湿度也必然会出现不同程度的动态变化。

选取河南郑州站 2013 年全年逐小时的土壤水分自动监测数据分析,10 和 20 cm 土层土壤相对湿度数据的日变化幅度较为明显(图 5):大部分时间的日变化幅度在  $0.3\% \sim 5.0\%$  之间,一日内变化幅度为  $0 (< 0.1\%)$  的日数很少;其中,10 cm 日变幅为

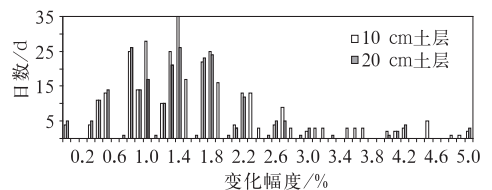


图 5 河南郑州站 2013 年 10~20 cm 土壤相对湿度日变化幅度分布图

Fig. 5 Distribution of soil relative humidity daily variation in the layer of 10-20 cm of Zhengzhou Station in 2013



0 的日期出现在 1 月的 16、20 和 31 日;20 cm 日变幅为 0 的日期共 27 d,全部出现在 1 月、2 月和 12 月。这些月是郑州站一年中最冷的时段,浅层地温很容易降到 0℃ 以下,自动土壤水分监测仪监测到的土壤水分日变化幅度趋近于 0 的现象可能与冬季土壤冻结有关。

由此可见,在现行业务传输数据的精度(0.1%)范围内,10~20 cm 土层在非冻结期内的相对湿度变化是可以逐日监测到的,如果自动土壤水分监测仪监测到的数据一日内没有变化,则说明数据监测、采集过程中出现了某种问题,需要及时解决。实践中可将非冻结土壤连续 24 h 的相对湿度变化幅度小于 0.1% 作为监测数据异常的阈值,如果 24 h 内监测数据没有变化,则可发出监测预警信息。

30~50 cm 土层土壤相对湿度的日变化幅度较小,难以在 0.1% 的数据精度内进行逐日的监测分析;但自动土壤水分监测仪输出数据的精度远比传输数据的精度要高,在一个完整的气象要素变化周期(24 h)内有可能监测到深层土壤的相对湿度变化情况。确定深层土壤相对湿度变化的异常阈值,还需要通过进一步的研究分析。

#### 4.2 土壤水分变化幅度的异常阈值

有文献研究(高燕虎等,2012),10~20 cm 土壤水分变化受环境影响变化最显著,雨季增墒期,土壤水分时间变化曲线上下振动频繁,振幅也较大。为了确定单位时间内的最大变幅数据,选择时段内有多次水分补充(降水或灌溉)的河南黄泛区土壤水分监测站,对其在 2013 年 6—9 月间 10 cm 土层逐小时的监测数据进行分析,数据动态变化情况如图 6 所示。

图 6 上方的曲线表示土壤相对湿度随时间的变化情况,可以看出曲线中多次出现快速上升的过程,

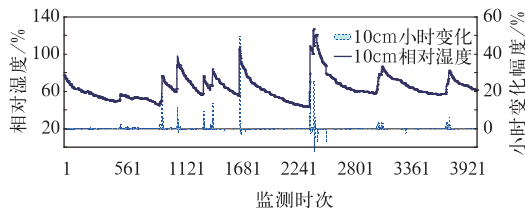


图 6 河南黄泛区站 2013 年 6—9 月 10 cm 土壤相对湿度动态变化图

Fig. 6 Dynamic variation of soil relative humidity in the layer of 10 cm at Huangfanqu Station from June to September 2013

应是受降水或灌溉的影响,土壤水分得到快速补充的情况下出现的。下降过程的变化速率随着土壤相对湿度的变低呈逐渐减小的趋势,土壤相对湿度 > 100% 时,由于土壤中的重力水下渗速度较快、加之水分充足时的蒸散量也较大,土壤水分变化速度较快;土壤相对湿度低于 100% 以后,大部分水分以毛管水的形式保持在土壤中,通过蒸散失去的水分还会在一定程度上得到毛管上升水的补充(何克瑾等,2007),下降速度逐渐变慢。

图 6 下方的柱状图表示小时间的变化幅度(%),整个时段内小时间变化率一般在[-1,1]区间内,占总体统计数据的 98%。土壤相对湿度迅速增加的最大值出现在 2013 年 8 月 8 日 18 时,上升值为 49.7%;土壤相对湿度迅速减低的最大值出现在 2013 年 8 月 24 日 17 时,下降值为-12.4%。

将不同等级土壤相对湿度的小时间变化幅度(当前时次减上一时次)制作成散点图(图 7),综合图 6、图 7 数据进行分析发现:

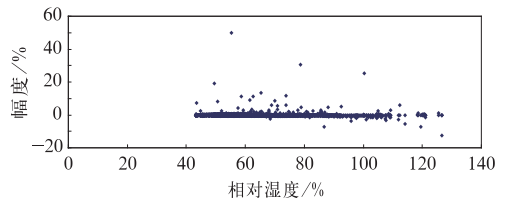


图 7 河南黄泛区站 2013 年 6—9 月 10 cm 土壤相对湿度小时间变化幅度分布图

Fig. 7 Hourly variation of soil relative humidity in the layer of 10 cm at Huangfanqu Station from June to September 2013

(1) 在土壤水分上升的监测过程中,几个大幅上升的时次(>10%)多出现在土壤相对湿度小于 50% 的时候。就变化幅度而言,一小时后上升的土壤含水量最高值也就是等于土壤饱和含水量;如果土壤干旱,由于初始湿度较低,在有足量水分(降雨、灌溉等)补充,小时后土壤达到饱和时,相对湿度的变化幅度就很大,但此过程的小时间变化幅度应小于土壤饱和含水量(%)与前一监测数据的差值。

(2) 在土壤水分下降的监测过程中,土壤相对湿度 ≤ 100% 时的下降幅度均小于 5%,2013 年 8 月 28 日 08 时土壤相对湿度出现 7.4% 的降幅是因为受当日 06 时、07 时资料缺失的影响,7.4% 实际是 05 时至 08 时 3 h 的变幅。在具体业务中,可以将 5% 作为土壤相对湿度下降的高值阈值。

(3) 在土壤水分下降的监测过程中,下降幅度较大( $>5\%$ )的时段全部出现在土壤相对湿度大于 $100\%$ 的区间;对于水分饱和的土壤,1 h后下降的土壤含水量低于田间持水量(土壤相对湿度 $100\%$ )的可能性不大,即便是土壤相对湿度略大于 $100\%$ 的土壤,小时内也难以再降低 $5\%$ ,使相对湿度达到 $95\%$ ;业务中可以尝试将土壤饱和含水量减去 $95\%$ 的差值作为土壤相对湿度下降的高值阈值。

10 cm 土层是土壤相对湿度变化最为敏感的层次,一方面水分容易得到灌溉、降水的补充,另一方面受到蒸散的影响也更为明显;一般情况下,深层土壤水分的变化幅度明显小于表层土壤。进行预警分析时,可参考该层数据变化的阈值限制,再根据预警应用的实际效果对具体阈值进行修正。

## 5 应用与思考

自动土壤水分观测数据异常值阈值研究的目的是针对业务监测数据进行实时的异常值判定分析,在数据管理阶段实现对监测数据的异常值预警分析,为在业务应用阶段针对实时数据的分析、服务提供支持。由于本文给出的阈值多是通过简化计算、统计、经验分析得来的,适用于较大区域内批量站点监测数值的简单预警分析,在针对具体测站进行预警应用时难免出现过高或过低的情况;真正达到严格的预警效果,还需要每个测站建立本站异常值阈值体系,并通过长序列的数据检验不断进行分析和订正。

本文确定的自动土壤水分观测数据异常值阈值,多反映理论上的极限分析数值,出现预警信号时不仅需要异常数据滤除,还需要对仪器自身进行检查分析。但异常值阈值对于监测结果在理论计算范围内的数值是否合理没有警示意义,缺乏对土壤水分再分配过程中变化规律的量化思考,真正意义上的数据质量控制还需要进一步的研究和分析。

本文分析的数据是小时内后 10 min 的平均监测数据,无法准确描述土壤水分再分配过程中的时刻状况。自动土壤水分监测的仪器端应该高精度存储每分钟的监测数据,分析这些数据可以及时发现监测仪器的运行故障,便于研究分析土壤水分再分配过程中的客观规律;数据监测异常时,可以在本地进行数据预警分析,使仪器自身具备一定的自我预警能力,能够主动发出预警信号,业务人员可以针对不同的预警信息及时采取必要的补救措施,确保整体监测数据的完整性和可靠性。

任何客观的监测数据都是有分析意义的,监测与传输过程中最好不要参照人工测墒的标准,将土壤相对湿度 $>100\%$ 的数值变更为 $100\%$ ;保留真实数据,有助于对土壤渍涝状况分析。保持土壤冻结期的监测数据,有助于在土壤冻融交替状态时对土壤水分的分布状况进行分析,对土壤冻结日期、冻结深度、解冻日期的确定,以及冬季土壤水分变化规律的研究都非常重要(郭海英等,2005;张谋草等,2007;陈晓燕等,2004)。

另外,在研究分析中发现,一天中傍晚前的数据数量较多,这可能与此时太阳能电池缺电的可能性较小、仪器工作状态相对较好有关;建议在进行区域分析时尽量选择这一时段的数据,此时影响水分散失的辐射条件逐渐减小,温度也较为接近一天的平均值,土壤水分(日时段)的时间代表性会更好一些。

## 参考文献

- 陈晓燕,叶建春,陆桂华,等. 2004. 全国土壤田间持水量分布探讨. 水利水电技术, 35(9): 113-116, 119.
- 段兴武,谢云,冯艳杰,等. 2008. 东北黑土区土壤凋萎湿度研究. 水土保持学报, 22(6): 212-216.
- 范爱武,刘伟,王崇琦,等. 2003. 不同环境条件下土壤温度日变化的计算模拟. 太阳能学报, 24(2): 167-171.
- 冯宝平,张展羽,张建丰,等. 2002. 温度对土壤水分运动影响的研究进展. 水科学进展, 13(5): 643-648.
- 高燕虎,吴春燕. 2012. 北京地区 3 种典型质地土壤水分变化规律. 安徽农业科学, 40(4): 2034-2036.
- 郭海英,马鹏里,杨兴国,等. 2005. 陇东黄土高原塬区冬小麦越冬期土壤水分损耗规律浅析. 土壤通报, 36(2): 165-168.
- 国家气象局. 1993. 农业气象观测规范(上卷). 北京:气象出版社.
- 何克瑾,费良军,尹娟,等. 2007. 均质土壤上升毛管水运动特性试验. 沈阳农业大学学报, 38(4): 581-585.
- 花东来,陈奇凌,李铭,等. 2012. 枣园滴灌下土壤水分含量日变化特征的研究. 安徽农业科学, (6): 3310-3313.
- 花子昌,王德蓉,胡毅. 1980. 农学基础与农业气象. 南京气象学院.
- 黄飞龙,李昕娣,黄宏智,等. 2012. 基于 FDR 的土壤水分探测系统与应用. 气象, 38(6): 764-768.
- 李保国,龚元石,左强,等. 2000. 农田土壤水的动态模型及应用. 北京:科学出版社.
- 李小刚. 1993. 甘肃集中旱地土壤颗粒组成及其对土壤水分常数的影响. 甘肃农业大学学报, 28(4): 376-379.
- 秦耀东. 2003. 土壤物理学. 北京:高等教育出版社.
- 王仰仁,李松敏,王文龙,等. 2010. 基于概念模型的麦田土壤水分动态模拟研究. 气象, 36(12): 102-108.
- 张静,张元明,周智彬,等. 2007. 古尔班通古特沙漠生物结皮影响下土壤水分的日变化. 干旱区研究, 24(5): 661-668.
- 张谋草,李宗葵,黄斌,等. 2007. 越冬期不同覆盖对土壤水分变化及黄花菜生长和产量的影响. 土壤通报, 38(4): 645-648.
- 邹良栋. 2010. 植物生长与环境. 北京:高等教育出版社.