

张蕾,吕厚荃,王良宇,2017. 土壤水分观测历史数据集奇异值分析与校正[J]. 气象,43(2):189-196.

# 土壤水分观测历史数据集奇异值分析与校正<sup>\*</sup>

张 蕾 吕厚荃 王良宇

国家气象中心,北京 100081

**提 要:** 针对中国 247 个农业气象土壤水分观测站点 1981—2010 年逐旬土壤重量含水量、逐年田间持水量、凋萎湿度和土壤容重,考虑地区气候特点和土壤质地,依据土壤水分极值和水文常数关系理论,制定了土壤水分观测历史数据集质量控制方法,对土壤水分数据奇异值进行分析与校正。结果表明:土壤水分观测历史资料中,奇异值问题可以归结为人工录入误差、多地段水文常数混用误差和年际变化异常;土壤重量含水量数据异常问题归结为小于风干土含水量和大于理论饱和含水量的极端情况。通过对历史数据集质量控制后,可以对土壤水分观测数据进行有效推广应用,为针对土壤水分的研究提供重要科学基础。

**关键词:** 土壤重量含水量,田间持水量,凋萎湿度,容重,奇异值

**中图分类号:** P49

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.02.006

## Analysis and Calibration of Singular Historical Observed Data of Manual Soil Water

ZHANG Lei LÜ Houquan WANG Liangyu

National Meteorological Centre, Beijing 100081

**Abstract:** In terms of mass water content, field capacity, wilting moisture, and bulk density at 247 agricultural meteorological observing stations during 1981—2010 in China, effective quality control method of these data is applied according to climatic characteristics and soil texture as well as the theory of extreme values and relationship in soil hydrological constants. Analysis and calibration of singular historical observation data of manual soil water are conducted through each station and are presented in this paper taking typical stations as examples. As the base detective conditions, mass water content ranging in 0—50% and varying less than 30% during every two depths, field capacity ranging from 10% to 40% and varying less than 20%, wilting moisture ranging from 1% to 13% and varying less than 10%, bulk density ranging from  $0.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  to  $2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  and varying less than  $0.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  are considered as credible data. Through typical analysis, errors of soil hydrological constants can be divided into three categories including the error of manual record, reduplicative observation and yearly obvious variation. Similarly, errors of mass water content exceeds proper ranges with minimum value of air dried soil moisture content and maximum one of saturated water content. One effective observation series of manual soil water can be obtained through quality control and applied for better understanding and scientific researches.

**Key words:** mass water content, field capacity, wilting moisture, bulk density, singular value

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306045)资助

2015 年 12 月 28 日收稿; 2016 年 9 月 19 日收修定稿

第一作者:张蕾,主要从事农业气象灾害预警与风险评估. Email:leizhang@cma.gov.cn

通信作者:吕厚荃,主要从事农业气象灾害监测预报评估及土壤水分监测预报研究. Email:lvhq@cma.gov.cn

## 引 言

作为土壤的组成部分和重要参数,土壤含水量和水文常数关系到农田可利用水分、作物栽培方式及其生长适宜度(蒲金涌等,2008;云文丽等,2014)。土壤含水量可以反映农田土壤水分和气候环境变化(杨永辉等,2004;李巧萍等,2007),水文常数是反映土壤物理性质的重要特征值(梁金凤等,2010;Rodríguez-Lado et al,2015),可以反映土壤、水分与植物之间相互关系,是土壤水分有效程度的重要参数。在土壤含水量、水文常数之间,存在着相互制约、相互影响(曹国栋等,2013;孔晓民等,2014)。由于历史土壤水分观测数据是由人工观测的,精确度存在一定不确定性,因而进行土壤水分数据质量控制,确保数据的可靠性是进一步分析土壤水分数据的基础。

目前,已有不少学者利用历史土壤水分观测数据集进行科学研究,主要集中在针对土壤水分本身和间接应用两方面。有效土壤水分资料的应用,可以掌握土壤水分分布变化规律(孙丞虎等,2005;张文君等,2008),进行旱涝监测预警和制定灌溉制度(Cammalleri et al,2015;Li et al,2015)。作为重要参数之一,土壤水分数据对陆面模式(郑婧等,2009;毛伏平等,2015;李倩和孙淑芬,2015)、数值天气预报系统和气候模式(佟华等,2006;张文君等,2012;Dillon et al,2016)、农田水分管理建模(毛飞等,2000;王仰仁等,2010)具有重要意义。历史土壤水分观测资料均采用烘干称重法测得,是目前最具权威的观测方法(国家气象局,1993),通过该方法获得土壤水分数据精度较高,也被作为其他土壤水分监测方式的对照(杨直毅和樊军,2009;黄飞龙等,2012;王良宇等,2014)。人工土壤水分资料以纸质形式记录,在统一进行数字化过程中经过初步控制,但还没有对该数据集的精细质量控制方法。因此,本文针对近 30 年中国人工土壤水分观测资料,依据观测数据特点,结合不同地区土壤质地、土壤水分极值及水文常数理论,制定了人工土壤水分观测资料的质量控制方案,对奇异值进行分析与校正,以期获得适用而可靠的土壤水分资料。

## 1 材料与方 法

### 1.1 资料来源

本文所用的中国农业气象土壤水分数据集来源

于国家气象信息中心,包括全国 247 个农业气象土壤水分观测站点(图 1)1981—2010 年 0~10(1991 年之前分 0~5、5~10 cm)、10~20、20~30、30~40、40~50 cm 各深度层次的土壤重量含水量、田间持水量、凋萎湿度、土壤容重等,土壤重量含水量观测的时间分辨率为旬(逢 8、18、28 日),单位为 0.1%;田间持水量、凋萎湿度、土壤容重时间分辨率为年,单位分别为 0.1%、0.1%、0.01 g·cm<sup>-3</sup>。该数据集是在中国气象局气象档案馆存档的纸质《土壤水分观测记录年报表(农气表-2)》数字化后形成的电子文件的基础上,通过对数据进行格式检查、界限值检查、垂直一致性检查等进行了质量控制后得到的,具有一定的质量保证,但仍存在一定可疑性,需要结合农田实际观测、土壤质地及水文常数相关理论依据进行精细化质量控制。

### 1.2 土壤水文常数奇异值检测方法

按照《农业气象观测规范》(国家气象局,1993),固定地段一般 5~10 年进行土壤水文、物理特性的测定,测定前应记载:地段土壤农业水文、物理特性测定日期;地段名称、号码;土壤剖面在观测地段中的位置及其离道路、河流、林缘等自然体和建筑物的距离;地势、地段小地形;植被种类及其生长状况。观测的差异使土壤水文特性误差受到时间、地域、环境、地势和植被的影响。

在土壤水分数据集数字化过程中,已经经过初步的质量检测:(1)界限值检查:0<田间持水量≤35%、0<凋萎湿度≤13%、0<土壤容重≤1.7 g·cm<sup>-3</sup>为可信数据;(2)垂直一致性检查:田间持水量层间差<10%、凋萎湿度层间差<10%、土壤容重层间差<0.4 g·cm<sup>-3</sup>为可信数据,超出则为可疑。根

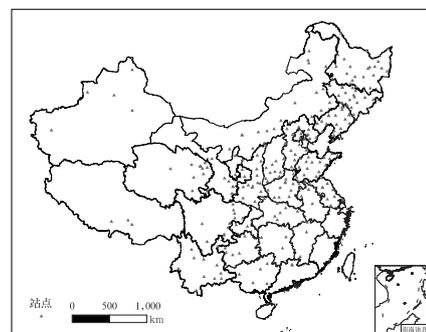


图 1 中国农业气象土壤水分观测站点

Fig. 1 Distribution of agricultural meteorological observing stations in China

据各类土壤水分常数参考阈值(Dan et al, 1976),显然由于土壤质地的差异(表1),不同土壤水文常数差异明显,因而需要结合地区土壤特点和水文常数理论重新设定土壤水文常数的检测依据。

表1 土壤水文常数参考阈值(Dan et al, 1976)

Table 1 Threshold values of soil hydrological constants (Dan et al, 1976)

土壤类型	容重/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	田间持水量/%	凋萎湿度/%
砂土	1.60	5	2
壤砂土	1.55	8	4
砂壤土	1.50	14	5
壤土	1.40	18	8
黏壤土	1.30	30	22
黏土	1.20	40	30

通过统计不同深度层次的土壤水文常数站点分布信息(图2a, 2b, 2c),可以发现田间持水量、凋萎湿度、土壤容重的分布范围较为集中,结合不同土壤类型的水文常数阈值范围,将土壤水文常数质量检查依据设定为:(1)界限值检查: $10\% < \text{田间持水量} \leq 40\%$ 、 $1\% < \text{凋萎湿度} \leq 13\%$ 、 $0.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} < \text{土壤容重} \leq 2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 为可信数据;(2)垂直一致性检查:田间持水量层间差 $< 20\%$ 、凋萎湿度层间差 $<$

$10\%$ 、土壤容重层间差 $< 0.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 为可信数据,超出则为可疑。

对可疑的土壤水文常数数据需要进一步分析,依据土壤田间持水量、凋萎湿度与容重呈负相关关系(付晓莉等, 2008; 李卓等, 2010)以及不同地区土壤类型来界定土壤水文常数的可靠性。

### 1.3 土壤重量含水量奇异值检测方法

土壤重量含水量在数字化质量控制中,检测依据为 $0 < \text{土壤重量含水量} \leq 100\%$ 、层间差 $< 26\%$ 。经站点分布信息(图2d)分析,将土壤重量含水量检查依据调整为 $0 < \text{土壤重量含水量} \leq 50\%$ 、层间差 $< 30\%$ ,对超出范围的土壤重量含水量数据进行奇异值分析。

#### 1.3.1 土壤重量含水量理论下限

在目前土壤水分监测中,自然风干土的含水量是土壤水分的最小值,介于土壤最大吸湿量与凋萎湿度之间。据研究人员发现凋萎湿度近似于土壤最大吸湿量的1.5~2.0倍(花子昌等, 1980),约等于土壤风干湿度的1.34倍(李保国等, 2000)。这里,考虑到不同地区土壤样本的复杂性,用凋萎湿度除

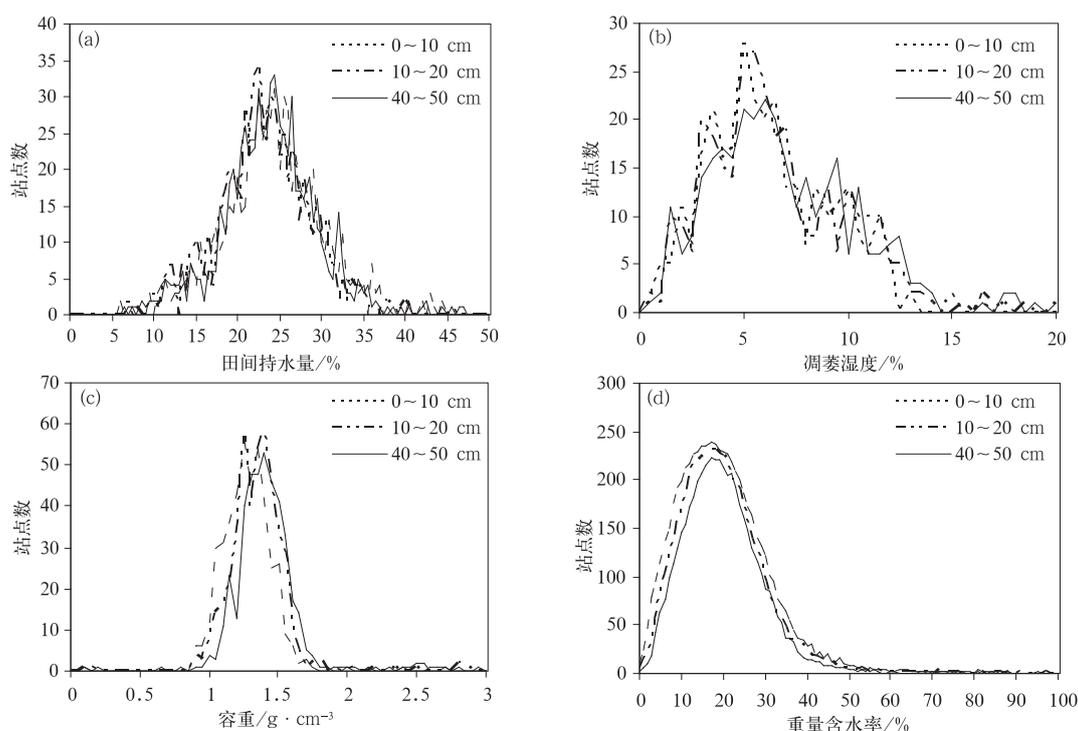


图2 田间持水量(a)、凋萎湿度(b)、容重(c)和重量含水量(d)站点分布信息

Fig. 2 Distribution of stations in field capacity (a), wilting moisture (b), bulk density (c) and mass water content (d)

以 1.5 作为自然风干土的土壤湿度,土壤湿度数值小于该极小值时认为异常。

### 1.3.2 土壤重量含水量理论上限

当土壤孔隙全部充满水时,土壤含水量达到最大,称为土壤饱和含水量,即土壤吸湿水、膜状水、毛管水和重力水均达到饱和,是可以监测到的最大土壤湿度。土壤饱和时的含水量可以用土壤孔隙度( $f$ ,单位:%)来表征,通过土粒密度( $\rho$ ,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )和容重( $svw$ ,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )计算得到:

$$f = \left(1 - \frac{svw}{\rho}\right) \times 100\% \quad (1)$$

实际应用中,大多数矿物质土壤的密度为  $2.6 \sim 2.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  (秦耀东,2003;王良宇和何延波,2015)。考虑监测的有效性,土壤密度采用  $2.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,土壤湿度高于式(1)计算得到的饱和含水量时,认为数据异常。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水文常数奇异值分析

土壤水文常数是表征土壤质地的重要参数,各种质地的土壤水文常数间存在着对应关系。从不同深度层次的田间持水量-土壤容重、凋萎湿度-土壤容重、田间持水量-凋萎湿度的对应关系来看(图 3~图 5),存在可疑或异常数据:(1)田间持水量、凋萎湿度、土壤容重数值为 0 的异常数据,经查看原始数据存在缺失;(2)土壤水文常数之间关系图中,超出数据检查可信数据范围的可疑数据,需要进行一一比对。以田间持水量-土壤重量关系为例, $10\% < \text{田间持水量} \leq 40\%$  和  $0.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} < \text{土壤容重} \leq 2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  框定为可信数据,超出范围的可疑点

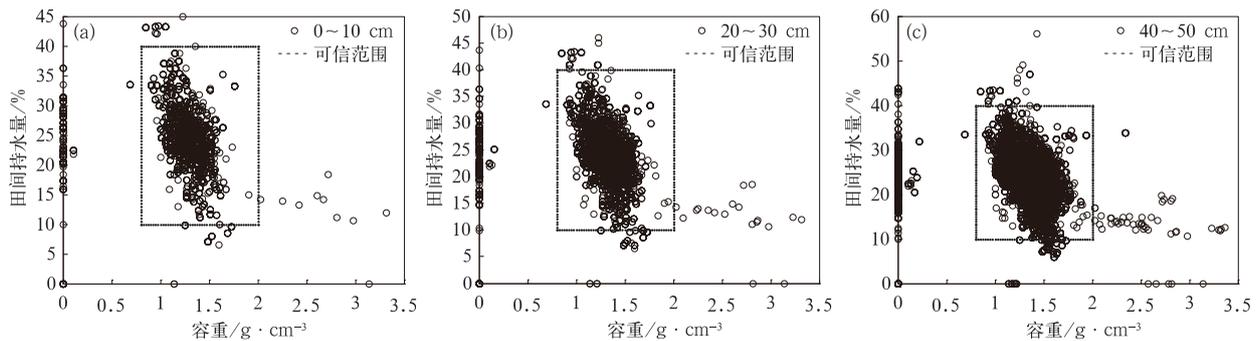


图 3 田间持水量-土壤容重对应关系

(a) 0~10 cm, (b) 20~30 cm, (c) 40~50 cm

Fig. 3 Relationship between field capacity and bulk density at depths of 0-10 cm (a), 20-30 cm (b) and 40-50 cm (c)

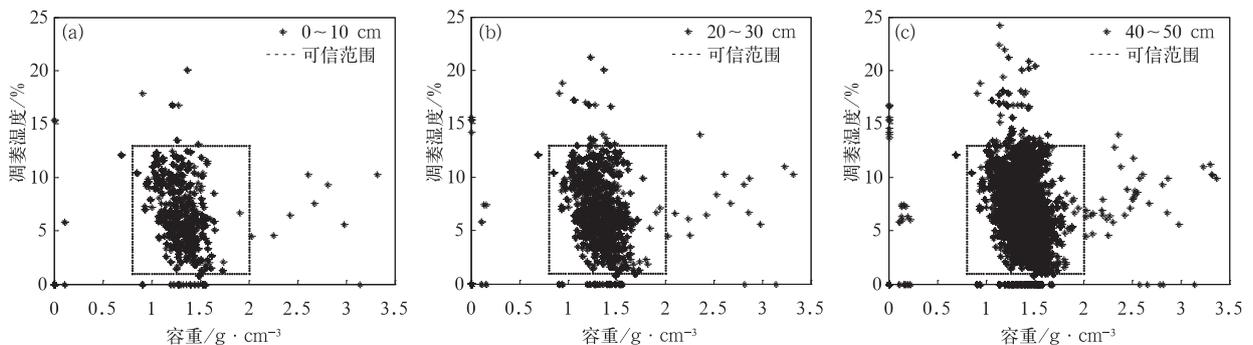


图 4 凋萎湿度-土壤容重对应关系

(a) 0~10 cm, (b) 20~30 cm, (c) 40~50 cm

Fig. 4 Relationship between wilting moisture and bulk density at depths of 0-10 cm (a), 20-30 cm (b) and 40-50 cm (c)

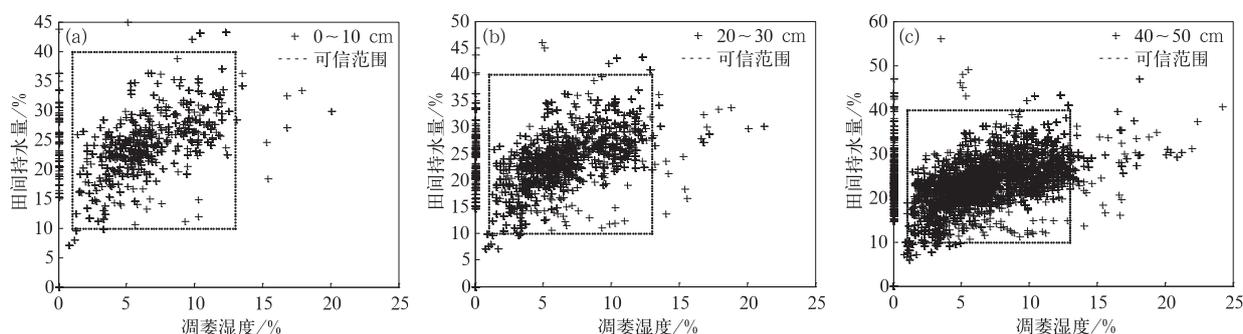


图5 田间持水量-凋萎湿度对应关系

(a) 0~10 cm, (b) 20~30 cm, (c) 40~50 cm

Fig. 5 Relationship between field capacity and wilting moisture at depths of 0—10 cm (a), 20—30 cm (b) and 40—50 cm (c)

需进一步分析(图3)。归结起来,土壤水文常数异常可以由三种数据问题造成,并通过典型站数据进行例证。

### 2.1.1 人工录入误差

以陕西洛川为例,从田间持水量与土壤容重的关系来看(图6a),存在两个明显的分布区域,且分布形式相似,通过对比田间持水量与土壤容重的数据,可以发现该站2005和2008年两年田间持水量和土壤容重的数据是互换的,对数据重新进行交互替换后两者存在明显的负相关关系(图6b),与理论实际相符。

从江苏丹徒10~20 cm田间持水量与凋萎湿度对应关系(图6c),2004年田间持水量(13.6%)低于凋萎湿度(14.0%),明显是错误的,通过对各年田间持水量与凋萎湿度比对并结合土壤容重数据分析发现,存在错误的原因是2004年田间持水量与土壤容重的数值相互替换,从而间接导致田间持水量低于

凋萎湿度。

### 2.1.2 多地段水文常数混用误差

以黑龙江青岗为例(图7a),2003年0~10 cm田间持水量有两个观测值(33.2%和30.9%),33.2%与前后时段的数值一致,因此田间持水量选取33.2%。另外,1982—1984年田间持水量与1985—2010年有差异,但通过分析发现可能由站点迁移造成的,数据应用正常。同样,黑龙江海伦0~10 cm凋萎湿度(图7b)在2003年存在两个值,分别为12.0%和8.9%,与2004—2010年比对,12.0%是可靠的凋萎湿度值。

### 2.1.3 年际变化异常

以陕西延安0~50 cm各层土壤容重时间变化(图8a)为例,1982年土壤容重明显大于其余年份,经比对,该站各年田间持水量、凋萎湿度变化幅度均较小,可见1982年土壤容重数值存疑,且通过分析土壤质地可以发现延安地区以壤土为主,理论土壤

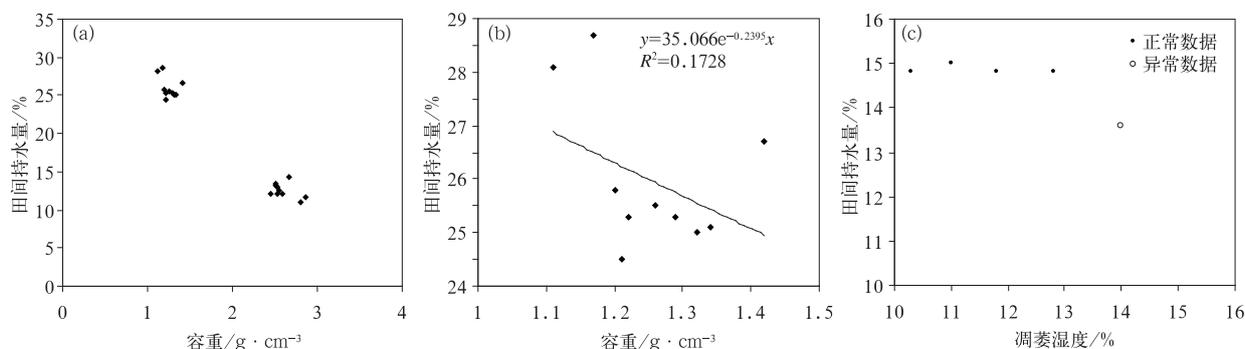


图6 陕西洛川田间持水量与土壤容重修订前(a)、后(b)关系对比,江苏丹徒田间持水量与凋萎湿度关系(c)

Fig. 6 Comparison of field capacity and bulk density before amendment (a) and after amendment (b) in Luochuan, Shaanxi, and the relationship between field capacity and wilting moisture in Dantu, Jiangsu

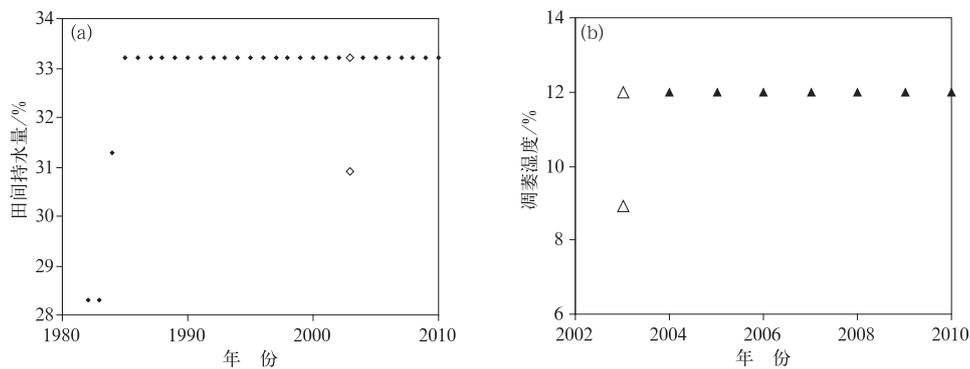


图 7 黑龙江青岗 0~10 cm 田间持水量(a), 海伦 0~10 cm 凋萎湿度(b)随时间的变化  
Fig. 7 Temporal variation of 0-10 cm field capacity in Qinggang (a) and wilting moisture in Hailun (b), Heilongjiang

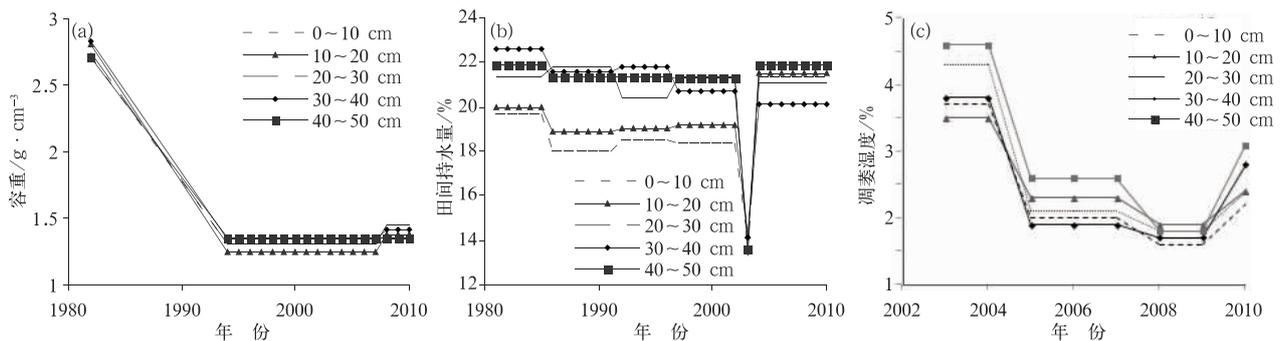


图 8 陕西延安土壤容重(a)、吉林长岭田间持水量(b)、辽宁海城凋萎湿度(c)随时间的变化  
Fig. 8 Temporal variation of bulk density in Yan'an of Shaanxi (a), field capacity in Changlin of Jilin (b) and wilting moisture in Haicheng of Liaoning (c) respectively

容重应该为  $1.3 \sim 1.5 g \cdot cm^{-3}$ , 而 1982 年土壤容重值大于  $2.7 g \cdot cm^{-3}$ , 显然该数值是错误的, 因 1983—1993 年无观测数据, 因此可以将该年土壤容重数据删除。

以吉林长岭 0~50 cm 田间持水量为例, 2003 年数值明显低于(图 8b)其余年份, 经与土壤容重、凋萎湿度对比发现, 2003 年田间持水量数值与 1997—2003 年土壤容重数值完全一致, 可见田间持水量数值明显错误, 且由于地块迁移, 2004 年之后土壤容重数值发生变动, 为了保持数据变动一致性, 2003 年田间持水量数值用 2002 年数值替换。

而从辽宁海城凋萎湿度变化看(图 8c), 虽然年际间变化大, 但与田间持水量、土壤容重进行比对, 由于固定地段变动大的缘故, 均存在对应的年际间波动, 可见数据应用正常。

## 2.2 土壤重量含水量奇异值分析

由于各地气候条件和土壤质地的差异, 土壤重量含水量变化较大, 对可疑土壤重量含水量数据进行比对分析, 界定小于风干土壤含水量、高于理论饱

和含水量的湿度数据为异常。

### 2.2.1 小于风干土含水量

以黑龙江汤原站为例, 1990 年 7 月 18 日 10~20 cm 土壤湿度仅为 0.02%(图 9), 明显低于其余时段不同深度层次的土壤湿度(15%~30%), 通过计算该站 10~20 cm 的风干土含水量为 6.3%, 明显高于 7 月 18 日观测值, 因此该时段土壤湿度值出现错误。

### 2.2.2 大于理论饱和含水量

以贵州正安为例, 2008 年 0~50 cm 逐层土壤重量含水量均超过 100%(图 10), 明显高于 2009—2010 年的正常数值(10%~30%); 通过计算得到 0~50 cm 逐层理论饱和含水量分别为 51.1%、50.4%、49.2%、46.2%、44.6%, 显然低于 2008 年土壤含水量。经与 2009—2010 年数值比对发现, 将 2008 年土壤湿度的数值除以 10 之后的土壤湿度是正常合理的。

以黑龙江抚远 0~20 cm 土壤重量含水量(图 11)为例, 1981—1985 年有 94 旬(共 126 旬)土壤重量含水量超过初始设置的可信范围(50%), 通

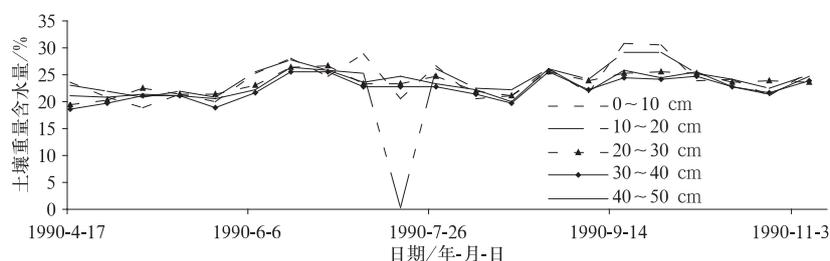


图 9 黑龙江汤原土壤重量含水量逐旬变化

Fig. 9 Dekad variation of soil mass content in Tangyuan, Heilongjiang

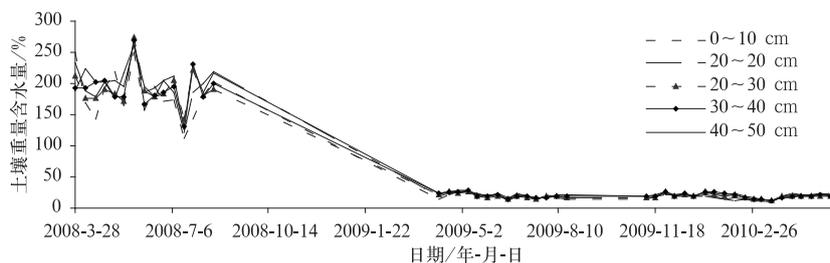


图 10 同图 9, 但为贵州正安

Fig. 10 Same as Fig. 9, but in Zheng'an, Guizhou

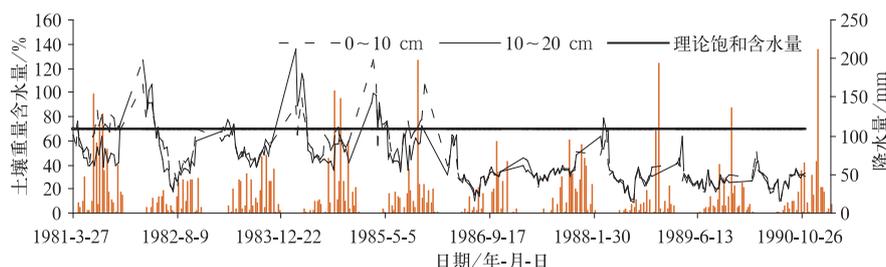


图 11 同图 9, 但为黑龙江抚远

Fig. 11 Same as Fig. 9, but in Fuyuan, Heilongjiang

过计算得到该站 0~20 cm 土壤理论饱和含水量为 70.8%, 对于 50%~70% 范围内的数据, 由于该站土壤为粘土且经常存在土壤过湿现象, 尤其是在春季, 因而认为该范围内的数据是应用正常的; 通过分析逐旬的降水量, 对于土壤重量含水量超出饱和含水量的时段, 其旬降水量均较小, 因此认定该数据异常。

### 2.3 数据质量分析

经过土壤水文常数和重量含水量的奇异值分析

(表 2), 土壤水文常数出现人工录入误差、多地段水文常数混用误差和年际变化异常的站点分别有 10、32 和 56 个, 分别占全国农业气象土壤水分观测站的 4.05%、12.96% 和 22.67%; 出现异常的站次(即出现次数)分别为 246、162、178 次, 分别占总站次的 2.87%、1.89%、2.07%。土壤重量含水量小于风干土含水量、大于理论饱和含水量的站点分别有 66 和 24 个, 分别占全国的 26.72% 和 9.72%; 出现站次分别有 129 和 3482 次, 分别占 0.10% 和 2.65%。

表 2 土壤水分数据奇异值数据统计分析

Table 2 Station statistics of singular historical observation data

	水文常数			重量含水量	
	人工录入误差	多地段水文常数混用误差	年际变化异常	小于风干土含水量	大于理论饱和含水量
站点/个	10	32	56	66	24
异常站次占全国站次比率/%	4.05%	12.96%	22.67%	26.72%	9.72%
站次/次	246	162	178	129	3482
异常站次占全国站次比率/%	2.87%	1.89%	2.07%	0.10%	2.65%

### 3 结论与讨论

本文在数字化土壤水分历史数据的基础上,依据数据分布特点、土壤质地、极值和水文常数理论等方法,对各站点土壤水分数据进行奇异值分析。土壤水文常数质量检测依据为:10% < 田间持水量 ≤ 40%、层间差 < 20%、1% < 凋萎湿度 ≤ 13%、层间差 < 10%、 $0.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  < 土壤容重 ≤  $2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、层间差 <  $0.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  为可信数据。依据水文常数理论及不同质地土壤理论范围,进一步分析可疑数据,数据异常问题可以归结为:人工录入误差、多地段水文常数混用误差和年际变化异常。

依据站点分布信息,将土壤重量含水量可信范围设定为(0, 50%]、层间差 < 30%,数据异常归结为小于风干土含水量和大于理论饱和含水量的极端情况。

在实际土壤水分质量控制过程中,需要对每个站土壤重量含水量、水文常数变化规律进行分析,重点关注可疑数据。由于不同地区气候条件、土壤质地的差异,土壤水分数据的合理范围有差异,而且并不是所有超出可信范围的数据均是异常,只是认为该数据可疑。结合实际应用,通过逐步比对可疑数据才能验证数据准确性,对异常数据进行校正,保留应用正常的的数据,例如,辽宁海城站虽然土壤凋萎湿度年变化较大,但通过与土壤质地、水文常数及实际土壤水分含量的比对,认定该数据是合理的,只是由于该站固定地段变化较频繁所致。

通过对土壤水分观测历史数据集质量的细化分析和校正,大大提高了土壤水分数据的准确性和可信度,便于土壤水分资料更好地应用和推广,为针对土壤水分的研究提供了重要的科学基础。

### 参考文献

曹国栋,陈接华,夏军,等,2013. 玛纳斯河流域扇缘带不同植被类型下土壤物理性质[J]. 生态学报,33(1):195-204.

付晓莉,邵明安,吕殿青,2008. 土壤持水特征测定中质量含水量、吸力和容重三者间定量关系II:原状土壤[J]. 土壤学报,45(1):50-55.

国家气象局,1993. 农业气象观测规范(上卷)[M]. 北京:气象出版社.

花子昌,王德蓉,胡毅,1980. 农学基础与农业气象[M]. 南京: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[J]. 气象,38(6):764-768.

孔晓民,韩成卫,曾苏明,等,2014. 不同耕作方式对土壤物理性状及玉米产量的影响[J]. 玉米科学,22(1):108-113.

李保国,龚元石,左强,等,2000. 农田土壤水的动态模型及应用[M]. 北京:科学出版社.

李倩,孙菽芬,2015. 陆面过程模型中垂直非均匀土壤的水分传输及

相变的模拟[J]. 大气科学,39(4):827-838.

李巧萍,丁一汇,董文杰,2007. 土壤湿度异常对区域短期气候影响的数值模拟试验[J]. 应用气象学报,18(1):1-11.

李卓,吴普特,冯浩,等,2010. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. 土壤学报,47(4):611-620.

梁金凤,齐庆振,贾小红,等,2010. 不同耕作方式对土壤性质与玉米生长的影响研究[J]. 生态环境学报,19(4):945-950.

毛飞,张光智,周丽,2000. 冬小麦区土壤水分预报和灌溉决策系统的业务应用[J]. 气象,27(6):36-39,57.

毛伏平,张述文,叶丹,等,2015. 模式时间关联误差对集合平方根滤波估算土壤湿度的影响[J]. 地球科学进展,30(6):700-708.

蒲金涌,冯建英,姚晓红,等,2008. 甘肃黄土高原土壤农业水分常数分布特征[J]. 干旱地区农业研究,26(3):205-209.

秦耀东,2003. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社.

孙丞虎,李维京,张祖强,等,2005. 淮河流域土壤湿度异常的时空分布特征及其与气候异常关系的初步研究[J]. 应用气象学报,16(2):129-138.

佟华,姚鸣明,王雨,等,2006. T213L31 全球中期数值天气预报系统 2 m 温度预报误差源分析[J]. 气象,32(2):52-57.

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

王良宇,张艳红,程路,2014. 自动土壤水分观测资料应用误差分析[J]. 气象科技,42(5):731-736.

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[J]. 气象,36(12):102-108.

杨光辉,渡边正孝,王智平,等,2004. 气候变化对太行山土壤水分及植被的影响[J]. 地理学报,59(1):56-63.

杨毅毅,樊军,2009. TDR 和 FDR 测定黄绵土土壤含水量的标定[J]. 土壤通报,40(4):740-742.

云文丽,侯琼,王海梅,等,2014. 不同土壤水分对向日葵光合光响应的研究[J]. 应用气象学报,25(4):476-482.

张文君,周天军,宇如聪,2008. 中国土壤湿度的分布与变化 I. 多种资料间的比较[J]. 大气科学,32(3):581-597.

张文君,周天军,智海,2012. 土壤湿度影响中国夏季气候的数值试验[J]. 气象学报,70(1):78-90.

郑婧,谢正辉,戴永久,等,2009. 陆面过程模型 CoLM 与区域气候模式 RegCM3 的耦合及初步评估[J]. 大气科学,33(4):737-750.

Cammalleri C, Micale F, Vogt J, 2015. On the value of combining different modelled soil moisture products for European drought monitoring[J]. J Hydro, 525:547-558.

Dan G, Baruch G, Daniel R, 1976. Drip Irrigation: Principles, Design, and Agricultural Practices[M]. Kfar Shmaryahu: Drip Irrigation Scientific Publications.

Dillon M E, Collini E A, Ferreira L J, 2016. Sensitivity of WRF short-term forecasts to different soil moisture initializations from the GLDAS database over South America in March 2009 [J]. Atmos Res, 167:196-207.

Li Y, Zhou J, Wang H J, et al, 2015. Integrating soil moisture retrieved from L-band microwave radiation into an energy balance model to improve evapotranspiration estimation on the irrigated oases of arid regions in northwest China[J]. Agr Forest Meteorol, 214-215:306-318.

Rodríguez-Lado L, Riala M, Taboada T, et al, 2015. A pedotransfer function to map soil bulk density from limited data[J]. Procedia Environ Sci, 27:45-48.