

土壤温度检测及其与含水率关系研究

刘 斐¹, 陈 军¹, 慕军营¹, 吴朋涛¹, 韩文霆²

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为实现在小面积范围内对土壤水分的遥感监测, 采用 IRI1011 红外热像仪测量土壤温度, 并试图通过土壤温度来预测土壤含水率。分别测量不同深度 0~5 cm、0~10 cm、0~15 cm、0~20 cm 的土壤温度和土壤含水率, 分析土壤含水率和温度之间的关系。结果表明, 深度为 0~20 cm 的土壤平均含水率与温度之间的线性相关系数 R^2 为 0.658。通过一天中不同时间段即上午、中午、下午的测量结果可知, 在外界环境条件变化不大的情况下, 中午时段 0~5 cm 土壤平均含水率和温度之间线性相关系数 R^2 为 0.794。

关键词: 红外热像仪; 土壤温度; 土壤含水率; 相关分析

中图分类号: S152.8; TP212.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)03-0095-05

Detection of soil temperature and its relationship with moisture content

LIU Fei¹, CHEN Jun¹, MU Jun-ying¹, WU Peng-tao¹, HAN Wen-ting²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Water Saving Agriculture in Area Regions of China, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi 712100, China)

Abstract: In attempt to remotely monitor soil moisture and explore relationship of soil temperature and soil moisture content, the IRI1011 thermal infrared imager was used to measure soil temperature at different depth including 0~5 cm, 0~10 cm, 0~15 cm, 0~20 cm in a small area range in this paper. Relationship between soil temperature and soil moisture content was further analyzed. Results showed that correlation coefficient R^2 between average soil moisture content and temperature in depth from 0 to 20 cm was 0.658. Soil temperature was measured at different times of the day, and results showed that, at noon, correlation coefficient R^2 between moisture content of surface soil and temperature was 0.794, under the condition that there was no obvious changes in external environment.

Keywords: thermal infrared imager; soil temperature; soil water content; correlation analysis

水资源是制约我国北方干旱、半干旱地区农业生产最重要的因素之一, 土壤含水率监测不仅具有较高的理论研究价值, 而且对当地的农业生产实践也具有至关重要的指导意义。土壤含水率是气象学、水文学、生态学以及农业科学等领域所关注和研究的重要内容^[1]。国内外非接触测量土壤水分的方法主要有遥感法和近红外光谱法等。M. Kacira^[2]等设计了一个自动化的系统连续监控植物的健康成长, 在该系统中使用了非接触式传感器红外热电偶检测植物温度, 验证了红外热电偶能快速准确读取植物表面温度。刘婵^[3]等利用红外测温传感器测量植物冠层温度, 得出了可以通过检测 13:00~15:00

的冠层叶-气温差来了解作物的水分状况的结论。徐小龙^[4]等利用红外热像仪研究感染番茄花叶病的番茄叶片表面温度的变化与叶片病变程度的关系, 得出叶片表面温差可以显著反应番茄叶片染病程度。热红外遥感数据可以用来监测土壤含水率, 已有研究者利用 TM 波段数据反演地表温度, 然后建立地表温度与土壤含水率之间的定量关系, 达到监测的目的^[5-7]。张智韬^[8-9]等利用 TM 遥感影像中 TM5 和 TM7 波段进行差值、比值和归一化处理, 得到的差值归一化土壤湿度指数与差值土壤含水率有较高的相关性。接触式测量土壤水分方法主要有时域反射仪法(TDR)以及频域反射仪法(FDR)等^[10]。

收稿日期: 2012-01-15

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2011BAD29B08)

作者简介: 刘 斐(1987—), 女, 河南周口人, 硕士研究生, 主要从事土壤含水率检测方面的研究。E-mail: feifeiyiyan@163.com。

* 通信作者: 陈 军(1970—), 男, 宁夏固原人, 教授, 博士, 主要从事智能化农业装备研究。E-mail: chenjun_jdxy@nwsuaf.edu.cn。

Andrade - Sánchez^[11]等得出在实验室条件下传感器输出电导值与土壤含水率的相关系数为 0.87,在田间条件下相关系数为 0.78,证明了土壤水分传感器能准确测定土壤湿度的结论。

土壤温度是决定土壤与大气间能量和质量交换(包括蒸发和通气)速率和方向的一个非常重要的因素。杨邦杰等建立了斥水土壤中水热运动的数值模型,分析了保持表层土壤中的水分,阻止水分的蒸发,降低土壤的温度^[12]。梁冰等建立了土壤水 - 热耦合的运动模型,并对土壤中水分与温度相互作用建立了基于非等温条件下的土壤水 - 热耦合模型^[13]。乔平林等通过 TM 卫星的热红外波段反演地表温度,得出土壤水分与地表温度的相关系数高达 0.812^[14]。随着对地 - 气间相互作用过程的不断深入研究,对地表温度测量的准确性和精确性也有了更高的要求。一般采用温度计来测量土壤温度,

测量的精确性以及这种接触式测量无法实现大面积的快速测量^[15]。由于遥感技术所需要的资金较多且受周围环境影响较大,对于测量小面积的土壤水分不具备实用性,所以本文通过红外热像仪来测定土壤温度,试图通过测量土壤温度快速检测土壤含水率^[16-18]。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验在西北农林科技大学机械与电子工程学院试验田(107°55' ~ 108°04' E, 34°14' ~ 34°19' N)内进行。所处地理位置属暖温带季风半湿润气候区,年平均气温 12.9℃,多年平均降雨量 663 mm,年均日照时数 2 163.8 h,年均蒸发量 884 mm。试验田内地形平整,土层深厚,土壤为塋土,土壤颗粒组成见表 1。试验田无作物覆盖,地面平坦。

表 1 土壤颗粒组成

Table 1 Composition of soil particle

土壤类型 Soil type	黏粒 / % Clay particle (< 0.002mm)	粉粒 / % Powder particle (0.002 ~ 0.02mm)	砂粒 / % Sand particle (0.02 ~ 2mm)	质地 Texture	容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	初始体积含水率 Initial volumetric water content /%	含盐量 Salt content /(g·kg ⁻¹)	有机质含量 Organic matter content /(g·kg ⁻¹)
塋土 Lou soil	16.12	40.74	43.14	黏壤土 Clay loam	1.40	4.75	0.52	10

1.2 实验仪器

温度采集系统是由红外热像仪、计算机等硬件组成。为减少大气中水蒸气对热红外的吸收,采用了波长范围为 8 ~ 14 μm 的红外热像仪 IRI1011,非致冷焦平面,分辨率为 128 × 128 像素,采用雷射光点定位辅助测量;可测温范围 - 10℃ ~ 150℃,温度分辨率 0.5℃,在屏幕内移动十字光标可读取图像内任一点温度值,热像仪可自动生成影像且可以方便地转换为 Excel 形式。所用的计算机 CPU 为 Pentium E5300,4G 内存,320G 硬盘,在 Windows XP 操作系统环境下工作。

1.3 试验方法

试验共进行了 3 d,分别是 2012 年 6 月 2 日、6 月 4 日和 6 月 6 日。2012 年 6 月 2 日全天晴,日环境温度 25℃ ~ 41℃,6 月 4 日全天晴,日环境温度 26℃ ~ 41℃,6 月 6 日天气多云并有微风,日环境温度 26.5℃ ~ 43℃。测定时间为 8:00 ~ 10:00、12:00 ~ 14:00、16:00 ~ 18:00,在测量时段里每隔一个小时测量 1 次。试验田内没有种植作物,为裸地。将试验田分为 10 个试验小区,每个试验小区作为一个采样点,每个采样点是 5 m × 5 m 的正方形小区,采

样点设在小区对角线相交位置,即中心点位置。采样深度为地表及地表以下 5 cm、10 cm、15 cm 和 20 cm。在每个采样点使用 IRI1011 红外热像仪测定土壤温度,测定时为原状土,将红外热像仪的镜头垂直对向土壤表层,使镜头与测定土壤保持在 10 cm 左右的高度,并通过联接的计算机记录测定的数据,每次将测定 3 个数据的平均值为该时刻的土壤温度值。数据采集在热像仪预热 20 min 后进行,以减小外界环境因素的影响。在每个测点采集热像仪镜头内的土壤,采集时用环刀取 0 ~ 20 cm 土层的原状土,同时取散土,带回实验室进行含水率的测定。测定土壤含水率按国标 GB7172 - 1987 烘干法测定。每次采集数据时使用干湿球温湿度计记录下环境温度,尽量分析出外界环境因素对试验的影响,减少试验误差。

2 结果与分析

2.1 土壤温度和含水率的日变化

土壤含水率的变化主要受蒸腾作用的影响,土壤蒸发与两个因素有关,一是地表有无覆盖物,有覆盖物,蒸发就少;二是地温,土壤温度低,蒸发也少。

试验田无作物覆盖,土壤蒸发主要与温度有关。对蒸腾作用影响的因子除了土壤温度还有环境因子,而环境因子在一天内的变化受到各种因素的影响。日变化不仅可以分析土壤含水率与土壤温度及其相关环境因子的关系,还可以确定测定土壤含水率的最佳时间。

如图 1 所示,Temp 表示环境温度,0 cm 表示表层土壤,图中即为环境温度、0 cm、5 cm、10 cm、15 cm、20 cm 土壤温度的日变化曲线,从图 1 看出,表层和 5 cm 土壤温度有明显的日变化,尤其是表层土壤温度升高和降低过程都相当剧烈,最高温度和最低温度之差达到了 28.1℃。而 5 cm 以下土壤温度日变化幅度很小,且各层之间温差很小。另外还可以看出,表层和 5 cm 土壤温度最大值均出现在 12:00~14:00。环境温度和土壤表层温度的日变化规律基本相似,呈抛物线形状。一天之中土壤表层的最高温度几乎与日最高气温同时出现,正午随着太阳辐射的增强和环境温度的升高,土壤温度迅速上升,在 12:00~14:00 时达到峰值,并且土壤表层中的最高温度比气温高 15℃ 以上。正午过后随着环境温度的降低,土壤温度也随之降低,当环境温度达到日最低气温时,土壤表层也达到最低。因而出可以看出环境温度对土壤温度具有显著的影响。

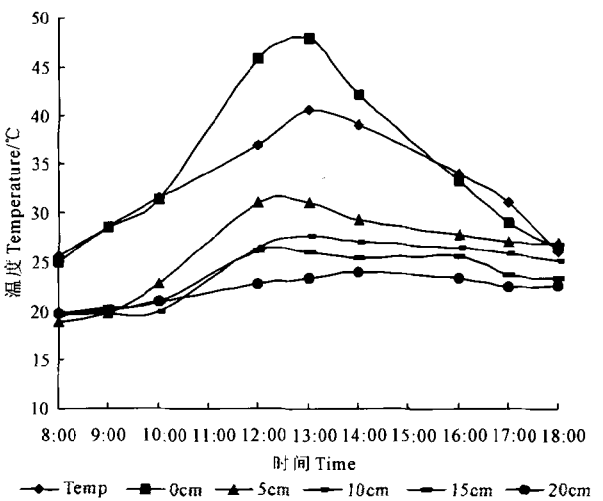


图 1 温度日变化
Fig.1 Daily variation of temperature

图 2 表示 6 月 2 日表层以及 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm 土壤含水率的日变化曲线。由图 2 看出,表层土壤含水率变化幅度最大,最大土壤含水率与最小土壤含水率之差达到了 18.26%,随着土壤深度的增加,土壤含水率逐渐增加,变化幅度逐渐减小。正午太阳辐射的作用使得越接近表面处的土壤温度越高,表层土壤接受太阳辐射后温度升高较快,加上空气流动作用、环境温度的升高和环境湿度的降低,使得土壤水分蒸发迅速,而土壤水分的散失方式主要为蒸发,因此土壤温度逐渐升高,土壤水分随之降低;正午过后,随着环境温度的降低和太阳辐射的降低,不利于土壤水分蒸发,土壤温度又逐渐降低,土壤水分缓慢降低。这种现象在土壤表层比较明显,并且持续的时间也很短,随着表层以下深度的增加剧烈程度逐渐减小,持续的时间也随之增加。

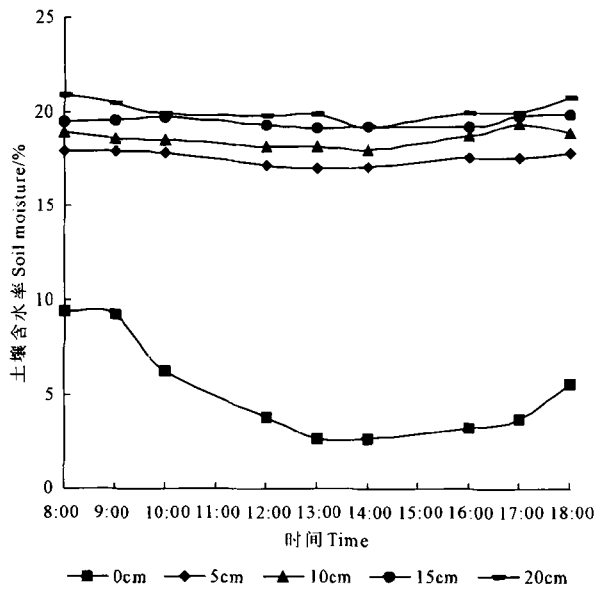


图 2 不同深度土壤含水率日变化
Fig.2 Daily variation of soil moisture at different depth

2.2 土壤温度与含水率的统计特征分析

分早、中、晚 3 个时间段进行采样,在实验室进行土壤含水率的测量。考虑外界环境干扰的影响,对数据进行了处理。除去偏差较大和重复较多的数据后,利用 SPSS 软件对 3 d 的土壤温度和土壤含水率进行描述性统计分析,统计结果如表 2、表 3。

表 2 土壤温度描述统计量
Table 2 Statistics table of soil temperature

日期(月-日) Date(M-d)	样点数 Sample points	最小值/℃ Minimum value	最大值/℃ Maximum value	均值/℃ Mean value	标准差/℃ Standard deviation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
06-02	50	18.9	47.99	27.57	5.77	1.43	3.74
06-04	58	19.74	47.89	27.08	5.05	1.53	2.58
06-06	34	18.9	38.3	25.2	6.28	0.92	0.51

表 3 土壤含水率描述统计量
Table 3 Statistics table of soil moisture

日期(月-日) Date(M-d)	样点数 Sample points	最小值/% Minimum value	最大值/% Maximum value	均值/% Mean value	标准差/% Standard deviation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
06-02	50	2.95	20.94	14.29	6.27	-0.75	-1.21
06-04	58	1.85	24	15.4	6.34	-1.05	-0.003
06-06	34	3.96	24.91	18.23	6.69	-1.64	0.946

由表 2、表 3 中可以得知,土壤温度和含水率的偏度和峰度没有明显变化,基本符合正态分布,土壤温度偏度大于 0,这说明较高的值占多数,而土壤含水率偏度小于 0,较低的值占多数。土壤温度在 6 日的标准差较 2 日和 4 日大,说明 6 日的温度数据均值离散程度比 2 日和 4 日偏大。6 日天气变化较大,由于土壤受空气温湿度和太阳辐射等多方面因素的影响,其温度分布很不均匀。

2.3 土壤温度与含水率的相关性分析

通过对土壤温度和含水率的日变化过程以及统计特征分析,发现土壤温度与土壤含水率之间有相关性,但不是所有土层都呈现相同规律的日变化。为了便于分析土壤温度和含水率的关系,以 0~5 cm、0~10 cm、0~15 cm、0~20 cm 平均土壤含水率数据与土壤温度建立线性关系。

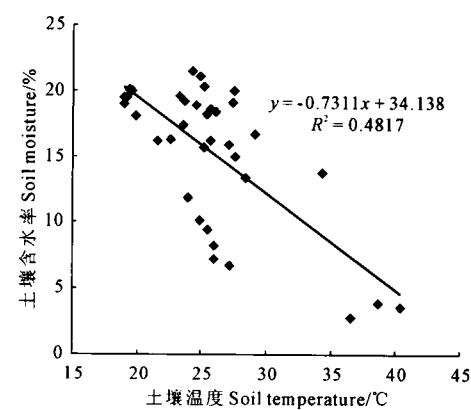


图 3 0~5 cm 土壤含水率关系
Fig.3 Soil moisture relationship of 0~5 cm

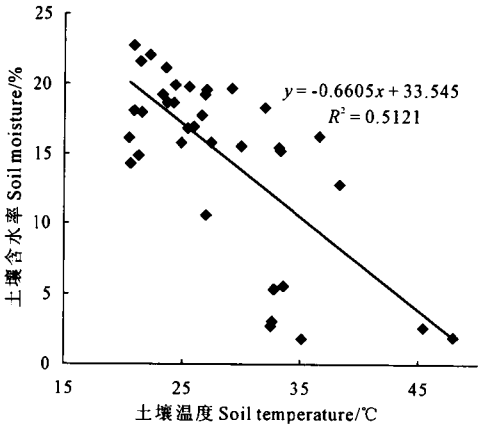


图 4 0~10 cm 土壤含水率关系
Fig.4 Soil moisture relationship of 0~10 cm

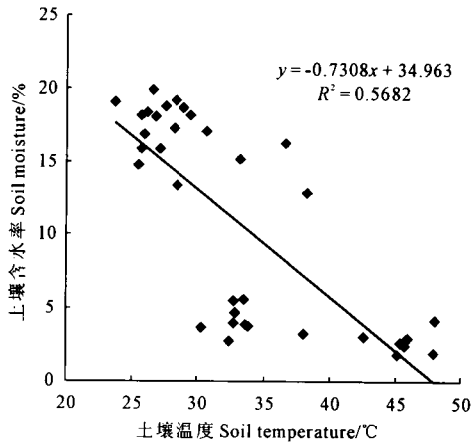


图 5 0~15 cm 土壤含水率关系
Fig.5 Soil moisture relationship of 0~15 cm

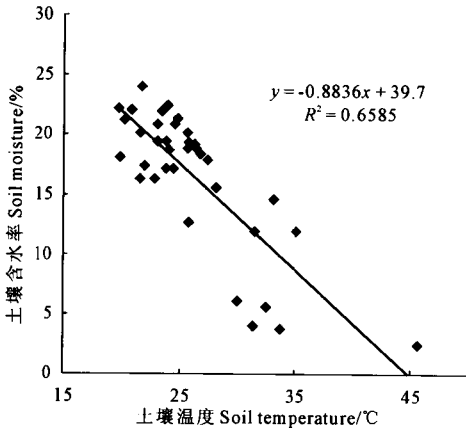


图 6 0~20 cm 土壤含水率关系
Fig.6 Soil moisture relationship of 0~20 cm

土壤温度与土壤水分相互作用对彼此具有重要影响,在相同条件下土壤含水率越高,地温升高越慢,进而对下层温度产生影响;同时较低的土壤温度

可以在一定程度上减小土壤水分蒸发,增加土壤含水率。土壤温度和含水率具有负相关关系,随着土壤温度的增加,土壤含水率呈下降的趋势。采用线

性回归分析,在0~5 cm、0~10 cm、0~15 cm、0~20 cm的相关系数分别是0.481、0.512、0.568和0.658,其相关关系式为 $y = -0.731x + 34.13$, $y = -0.66x + 33.54$, $y = -0.73x + 34.96$, $y = -0.883x + 39.7$ 。

表层土壤含水率在一天中的某个时段即在外界环境变化不大的情况下,和土壤温度具有线性相关关系。为了进一步分析二者之间的关系,使外界环境的影响减少到最小,在上午、中午、下午3个时间段分别对表层土壤温度和含水率进行线性回归分析,回归曲线如图7~图9所示。

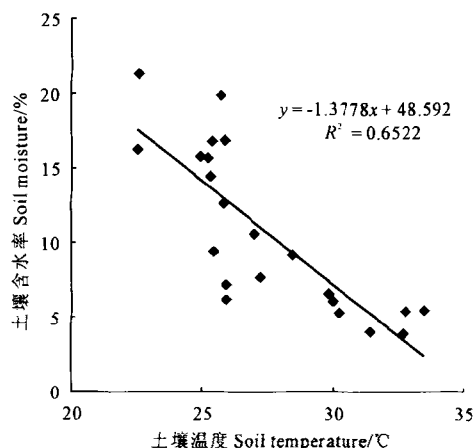


图7 上午表层土壤含水率与土壤温度关系

Fig.7 Soil moisture and soil temperature relationship in the morning

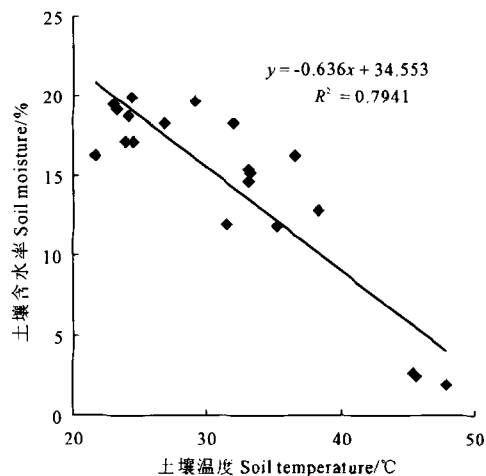


图8 中午表层土壤含水率与土壤温度关系

Fig.8 Soil moisture and soil temperature relationship at noon

从图7~图9可看出,采用线性回归分析,在上午、中午和下午的相关系数分别是0.652、0.794和0.449,中午土壤含水率和温度拟合程度较高,其相关关系式为 $y = -0.636x + 34.55$,上午和下午的相对降低,相关关系式为 $y = -1.377x + 48.59$ 和 $y = -0.817x + 39.7$ 。

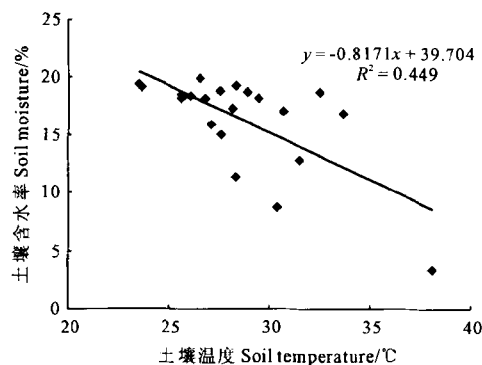


图9 下午表层土壤含水率与土壤温度关系

Fig.9 Soil moisture and soil temperature relationship in the afternoon

3 结论与讨论

1) 本试验主要在室外条件下研究土壤温度与含水率的关系,对土壤分层进行数据分析发现,0~20 cm土壤温度和含水率相关性最高,0~10 cm和0~15 cm次之,0~5 cm最低,因此可通过土壤温度,实现土壤含水率的快速监测。对表层土壤含水率进行上午、中午、下午分析得到相关系数最高值出现在中午,即在外界环境变化不大的情况下,土壤表层含水率和温度有较好的相关关系。

2) 通过与热红外遥感数据监测土壤含水率的结果对比,该方法得到的相关系数有了明显的提高,这说明利用红外热像仪测定土壤温度比利用热红外遥感反演土壤温度精度更高,更能准确地预测土壤含水率。

3) 从环境温度、土壤温度的日变化分析中,可以看出环境温度和土壤温度的日变化规律相一致,两者存在相关关系,这与其他学者研究一致。

4) 本研究只考虑土壤温度一个因子,具有一定的局限性。在今后的研究中,为提高模型的实用性和准确性,需要进一步考虑环境温度、环境湿度和太阳辐射率等因子对模型构建的影响。

参考文献:

- [1] Eric H, Hamed P. Evaluation of several dielectric mixing models for estimating soil moisture content in sand, loam and clay soils[J]. ASAE, 2003, 7: 26-30.
- [2] Kacira M, Ling P P. Design and development of an autorment and non-contact sensing system for contionous monitoring of plant health and growth[J]. ASAE, 2001, 44(4): 989-996.
- [3] 刘 婵, 范兴科. 基于冠层叶-气温差的温室土壤水分诊断[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 90-93.
- [4] 徐小龙, 蒋焕煜. 热红外成像用于番茄花叶病早期检测的研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 145-149.

(下转第117页)

试验结果不一致,其认为施用氯化钾的马铃薯产量和淀粉含量均高于硫酸钾,可能是供试马铃薯品种、土壤以及试验地气候及栽培措施不同所致,也可能与钾肥用量低有关系。综上所述,不同地区、不同的马铃薯品种以及不同的氮磷钾配比均会导致硫酸钾和氯化钾的施用效果不一致。因此,在马铃薯生产过程中,应根据马铃薯品种、当地气候条件以及土壤含钾量选择适宜的钾肥及其用量。

参考文献:

- [1] 牛秀群,李金花,张俊莲,等.甘肃省干旱灌区连作马铃薯根际土壤中镰刀菌的变化[J].草业学报,2011,20(4):136-243.
- [2] 谢从华.马铃薯产业的现状与发展[J].华中农业大学学报(社会科学版),2012,97(1):1-4.
- [3] 庞淑敏,方贯娜,李建欣.影响马铃薯商品性的关键因素分析[J].农业科技通讯,2012(1):116-118.
- [4] 佟屏亚.中国马铃薯栽培史[J].中国科技史料,1990,(11):10-19.
- [5] 张平良,郭天文.甘肃马铃薯产业发展现状、问题及对策[J].陕西农业科学,2008,(6):84-86.
- [6] 何三信,温国宏,王一航,等.甘肃马铃薯产业现状及提升措施建议[J].中国马铃薯,2010,24(1):54-57.
- [7] 王 祺.甘肃马铃薯市场风险规避途径与对策探讨[J].农业技术与装备,2012,21(11):34-35.
- [8] 刘克礼,张宝林,高聚林,等.马铃薯钾素的吸收、积累和分配规律[J].中国马铃薯,2003,17(4):204-208.
- [9] 杨进荣,王成社,李景琦,等.马铃薯干物质积累及分配规律研究[J].西北农业学报,2004,13(3):118-120.
- [10] 程东娟,任振江.高寒半干旱地区聚垄集肥覆膜土壤速效钾含量和马铃薯产量影响[J].陕西农业科学,2005,(5):7-13.
- [11] 殷 文,孙春明,马晓艳,等.钾肥不同用量对马铃薯产量及品质的效应[J].土壤肥料,2005,(4):44-47.
- [12] 徐宁生,杨琼芬,隋启君.马铃薯种植中钾肥的应用研究现状和展望[J].中国马铃薯,2011,25(2):119-121.
- [13] 刘长庆.马铃薯不同钾肥应用效果研究[J].安徽农学通报,2009,15(15):117-118.
- [14] 刘汝亮,李友宏,王 芳,等.两种钾源对马铃薯养分累积和产量的影响[J].西北农业学报,2009,18(1):143-146.
- [15] 秦鱼生,涂仕华,冯文强,等.不同钾肥品种及用量对马铃薯产量和品质的影响[J].西南农学报,2010,23(6):1950-1954.
- [16] 张志良.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,1990:1-3,160-162,165-170,183-184.
- [17] 王 锋,王汝娟,陈晓光,等.不同类型钾肥对甘薯钾素积累和利用率的影响[J].山东农业科学,2009,(10):77-80.
- [18] 孙志梅,薛世川,王国旗,等.不同腐殖酸复合肥施用量对辣椒产量及其养分利用率的影响[J].中国生态农业学报,2004,12(3):99-101.
- [19] 苏有健,廖万有,丁 勇,等.不同氮营养水平对茶叶产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(6):1430-1436.
- [20] 宇万太,赵 鑫,张 璐,等.长期施肥对作物产量的贡献[J].生态学杂志,2007,26(12):2040-2044.
- [21] 冯 琰,蒙美莲,马 恢,等.马铃薯不同品种氮、磷、钾与硫素吸收规律的研究[J].中国马铃薯,2008,22(4):205-209.
- [22] 张东昱,王多成,张 荣,等.钾肥对鲜食型马铃薯产量及品质的影响[J].中国马铃薯,2009,23(3):152-154.
- [23] 王彩霞,瞿慧萍.高海拔干旱山区钾肥不同用量对马铃薯的施用效果[J].安徽农业科学,2009,37(6):2608-2609,2771.
- [24] 宋家宝.灌溉条件下早熟马铃薯施钾肥增产效果研究[J].中国马铃薯,2004,18(2):86-87.
- [25] 李高峰,王一航,文国宏.高寒阴湿区马铃薯增施钾肥效果研究[J].甘肃农业科技,2002,(10):39-40.
- [26] 霍晓兰,姬青云,滑小赞,等.氮、磷、钾肥不同用量对马铃薯产量的影响[J].山西农业科学,2011,39(10):1064-1063.
- [27] 王 利,高祥照,马文奇,等.中国农业中硫的消费现状、问题与发展趋势[J].植物营养与肥料学报,2008,14(6):1219-1226.
- [28] 钟 杭,马国瑞.氯对马铃薯生理效应的影响[J].浙江农业学报,1993,5(2):83-88.
- [29] 刘效瑞,韩敬仁,梁淑珍,等.不同钾肥品种在半干旱区马铃薯的应用效果[J].甘肃农业科技,2001,(10):35-36.

(上接第99页)

- [5] Mario A G, David B. Landscape complexity and soil moisture variation in south Georgia, USA, for remote sensing applications[J]. Journal of Hydrology, 2008, 357: 405-420.
- [6] 白 洁,刘绍民.针对 TM/ETM⁺ 遥感数据的地表温度反演与验证[J].农业工程学报,2008,24(9):148-154.
- [7] 张 穗,谭德宝.TM 遥感影像监测裸露土壤含水率的方法研究[J].长江科学院院报,2008,25(1):34-35.
- [8] 张智韬,李援农,常庆瑞.遥感监测土壤含水率模型及精度分析[J].农业工程学报,2008,24(8):152-156.
- [9] 张智韬,李援农,常庆瑞.TM6 监测宝鸡峡灌区土壤水分研究[J].节水灌溉,2006,(3):38-40.
- [10] Joaquin J C, Member. Design of Access - Tube TDR sensor for soil water content: Testing[J]. IEEE, 2012, 7(6): 2064-2070.
- [11] Andrade S P, S. K, et al. Upadhyaya Evaluation of a capacitance-based soil moisture sensor for real-time applications[J]. ASAE, 2004, 47(4): 1281-1287.
- [12] 杨邦杰.斥水土壤水热运动模型的应用[J].土壤学报,1997,34(4):427-433.
- [13] 梁 冰,刘晓丽,薛 强.非等温入渗条件下土壤中水分运移的解析分析[J].辽宁工程技术大学学报,2002,21(6):741-744.
- [14] 乔平林,张继贤.利用 TM6 进行土壤水分的监测研究[J].测绘通报,2003,(7):14-18.
- [15] 江 灏,程国栋,王可丽.青藏高原地表温度的比较分析[J].地球物理学报,2006,49(2):391-397.
- [16] 周会珍,刘绍民,白 洁.毛乌素沙地土壤湿度的遥感监测[J].农业工程学报,2008,24(10):134-140.
- [17] Mario A G, David B. Landscape complexity and soil moisture variation in south Georgia, USA, for remote sensing applications[J]. Journal of Hydrology, 2008, 357: 405-420.
- [18] 史 舟,郭 燕.土壤近地传感器研究进展[J].土壤学报,2011,48(6):1275-1281.