



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.02.029

徐倩, 刘玉春, 潘秋艳, 等. 几种土壤参数测定仪的实验室标定[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 192-197. XU Qian, LIU Yuchun, PAN Qiuyan, et al. Laboratory calibration of several instruments for measurement of soil parameters[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 192-197. (in Chinese)

## 几种土壤参数测定仪的实验室标定

徐倩<sup>1</sup>, 刘玉春<sup>1</sup>, 潘秋艳<sup>1</sup>, 姜红安<sup>2</sup>, 李晶<sup>3</sup>

(1. 河北农业大学 城乡建设学院, 河北 保定 071001; 2. 保定中法供水有限公司, 河北 保定 071000;  
3. 河北农业大学 渤海校区理工学院, 河北 保定 071001)

**摘要:** 对土壤含水率、电导率和 pH 值等参数的实时、准确测定是实现精准灌溉的前提, 对我国目前科研和生产中常用的几种土壤参数测定仪进行实验室标定, 分析这些仪器测试结果的可靠性。结果表明 TDR 和土壤电导率仪测定土壤含水率和电导率的精度较高, 操作简单; 土壤酸碱度仪和三合一测定土壤含水率具有较好的精度、且测定快速简单, 稳定性好, 在使用时根据土壤特性和作物品种确定适宜的灌水控制值, 但三合一不适宜用来测定土壤 pH 值; 四合一测定土壤含水率稳定性差; 土壤电导率和含水率之间呈现为负相关关系, 随着含水率的增大, 电导率呈现下降的趋势。研究结果能够为作物生产中土壤参数测定仪的选择提供参考依据。

**关键词:** 土壤; 含水率; 电导率; pH 值; 仪器; 实验室标定

中图分类号: S274 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2017)02-0192-06

### Laboratory calibration of several instruments for measurement of soil parameters

XU Qian<sup>1</sup>, LIU Yuchun<sup>1</sup>, PAN Qiuyan<sup>1</sup>, JIANG Hong'an<sup>2</sup>, LI Jing<sup>3</sup>

(1. Urban and Rural Construction College, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China;

2. Baoding Sino French Water Supply Co., Ltd, Baoding 071000, China;

3. Science and Technology College of Bohai Campus, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China)

**Abstract:** Real time and accurate measurement of soil parameters, such as soil water, soil electrical conductivity and pH, is the premise to realize precise irrigation. Laboratory calibration of several instruments for measurement of soil parameters now used in research and agricultural production was conducted in this paper to test the reliability of these instrument test results. The results showed that the instruments of TDR and soil electric conductivity meter were simple operation and the test results showed high precision. When measuring soil water, the test results of pH meter and three unity showed better accuracy and high reliability, the two instruments also had the feature of simple operation. But suitable soil water controlled value should be determined according to the properties of the soil and the crop or vegetable when using them. The instrument of three unity was not suitable for using in pH measurement. The instrument of four unity showed low reliability when measuring soil water and was not suitable for use in agricultural production. The content of soil electrical conductivity and soil water showed negative correlation, soil electric conductivity showed the tendency of decline with the increase of soil water. The results of this paper can provide reference for the choice of instruments for measuring soil environmental parameters in agricultural production.

**Key words:** soil; water content; electric conductivity; pH; instruments; laboratory calibration

收稿日期: 2016-01-20 修回日期: 2016-05-17 网络出版时间: 2016-06-00

网络出版地址:

基金项目: 河北省科技计划项目 (15227003D); 河北省重点研发计划国际科技合作专项 (3010907)

Funds: Science and Technology Plan Project of Hebei Province (15227003D); Special International Technology Cooperation in Key Research and Development Plan of Hebei Province (3010907)

作者简介: 徐倩 (1992-), 女 (蒙古族), 河北承德人, 主要从事节水灌溉理论与技术方面研究。E-mail: 295811345@qq.com

通讯作者: 刘玉春 (1971-), 女 (满族), 河北平泉人, 副教授, 博士, 主要从事农业水土工程理论与技术研究。E-mail: liuyuchun5@163.com

精细灌溉是根据作物和土壤信息适时、适量地进行灌溉,通过对水肥的精细调控确保农产品的产量和品质,是提高灌溉管理水平、实现节水农业的必然趋势<sup>[4]</sup>。在作物生长过程中,对土壤含水率、pH 值、电导率等土壤参数进行连续、实时、准确地观测,根据观测数据来指导田间灌溉,这对精细灌溉的实现和水资源合理利用具有重要意义<sup>[5-7]</sup>。在已有研究中,对 TDR 测量土壤含水率的研究较多<sup>[8-12]</sup>,研究表明 TDR 的测量值与真实值之间具有较高的相关性,目前 TDR 测定土壤含水率的方法已经在作物灌溉制度的制定、农田水分监测中得到了较为广泛的应用<sup>[13-15]</sup>。目前我国市场上出现了多种操作简便的土壤含水率、电导率、pH 值等土壤参数测定仪

器,对这些仪器测定结果的标定尚没有相关研究。对此,本研究对目前科研和生产中常用的 5 种土壤参数测定仪器,包括 TDR 进行实验室仪器标定,对这些仪器测定土壤参数的可靠性进行评定,为作物生长过程中土壤参数测定仪的选择提供更多参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验土壤和测定仪器

本研究选用两种土壤进行试验,一种取自廊坊市永清县新苑阳光农业园区,一种取自河北农业大学东校区绿化区,取土层次均为 0~20 cm 土层,表 1 给出了两种试验土壤的物理和水力特性参数。

表 1 试验土壤物理和水力特性参数

Tab. 1 Physical and hydraulic properties of experimental soils

土壤	不同颗粒粒径所占百分数(中国制)			土质	容重 $/(g \cdot cm^{-3})$	田间持水率 $/(cm^3 \cdot cm^{-3})$	饱和含水率 $/(cm^3 \cdot cm^{-3})$
	砂粒(%) (1~0.05mm)	粉粒(%) (0.05~0.002mm)	黏粒(%) (<0.002mm)				
廊坊土	32.31	61.33	6.36	砂粉土	1.39	0.24	0.36
保定土	34.36	62.12	3.52	砂粉土	1.28	0.26	0.38

本研究对目前科研和生产中常用的 5 种土壤参数测定仪器进行实验室标定,包括 TDR 土壤水分测量仪/TZS 型、土壤电导率原位测量仪/Ec110,土壤 pH 值/湿度测量仪/KS-06、三合一园艺检测仪/TR01 和四合一土壤测试仪/AMT-300,表 2 给出了以上 5 种土壤参数测定仪的名称、标定项目、标示测量范围及精度、产地等相关信息,图 1 给出了这些仪器的照片。TDR 和土壤电导率仪是目前科学研究中应用较广的测定土壤含水率和电导率的仪器,操作简便、快速,且测量范围较大,为科学研究提供

了较为精准的土壤含水率和电导率数据<sup>[16]</sup>;土壤酸碱度仪、三合一和四合一等仪器是我国近几年出现的土壤含水率、pH 值、温度等土壤环境多参数测定仪器,由于价格低,使用快捷方便,在园艺生产上得到了一定的推广应用。这些仪器的测定精度直接影响着水肥管理决策方案,因此有必要对这些仪器的测量精准度进行评价,以便为农业生产中土壤参数测定仪的选择提供参考依据,本文对这几类仪器土壤含水率、电导率和 pH 值等 3 个与水肥管理决策密切相关的参数进行了实验室标定。

表 2 试验用 5 种土壤参数测定仪的名称、标定项目、标示测量范围和精度、产地等信息

Tab. 2 Name, Test items, measurement range, measurement precision, and origin of the five instruments for measuring soil parameters

名称/型号	简称	标定项目	测量范围	精度	产地	其他参数	
TDR 土壤水分测量仪/TZS	TDR	体积含水率/ $(cm^3 \cdot cm^{-3})$	0~1	$\pm 0.03$	德国	无	
土壤电导率原位测量仪/Ec110	土壤电导率仪	电导率/ $(\mu s \cdot cm^{-1})$	0~ $1.9 \times 10^5$	$\pm 0.02$	美国	无	
土壤 pH 值/湿度测量仪/KS-06	土壤酸碱度仪	相对含水率	/	1~8	$\pm 0.5$	中国	无
		pH 值	/	3~8	$\pm 0.3pH$		
三合一园艺检测仪/TR01	三合一	相对含水率	/	1~10	$\pm 0.5$	中国	光照
		pH 值	/	3~8	$\pm 0.2$		
四合一土壤测试仪/AMT-300	四合一	相对含水率	/	分 5 档	/	中国	光照、温度
		pH 值	/	3.5~9.0	$\pm 0.5$		

### 1.2 试验设计、观测项目与方法

试验于 2014 年 7 月~8 月在河北农业大学农田水利实验室进行。试验土壤首先自然风干、过 2 mm 筛待用。试验时将试验土壤配制成不同含水率

后装盆,共设计 15 个土壤含水率梯度,分别为田间持水率的 40%~100% (每隔 5% 一个梯度)、125% 和 150%,并按照土壤初始容重装盆。装盆后试验土壤静置 24 h,使水分重新分布达到设计土壤含



图 1 试验用 5 种土壤参数测定仪器

Fig. 1 Five instruments for measuring soil parameters

水率。而后用以上 5 种土壤参数测定仪器依次测定每盆土壤的含水率、pH 值和电导率等环境参数值。仪器测试完成后,每盆取土约 50 g,一部分土样用烘干法测定土壤含水率,一部分土样自然风干、磨碎、过 2 mm 筛后,按土水比 1:5 配置土壤浸提液,测定土壤浸提液电导率  $E_c$  [17-18]。试验数据分析利用 SPSS17.0 进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤含水率测定效果分析

烘干法测定土壤含水率是其它土壤含水率测定方法的标定依据 [11, 15], 本试验也用烘干法测得的土壤含水率作为 5 种土壤参数测定仪器测定土壤含水率的标定依据。图 2 给出了烘干法测定的土壤含水率与设计土壤含水率的相互关系,烘干法测得的廊坊土和保定土的土壤含水率与设计含水率之间的相关系数分别达到 0.991 和 0.987,在  $\alpha = 0.01$  水平上达到显著相关,说明试验土壤含水率配制达到了设计值且具有较高的精度。图 3 给出了 TDR 测定的土壤含水率与烘干法土壤含水率之间的关系,两种土壤 TDR 测得的土壤含水率与烘干法测得的含水率之间的相关系数分别达到 0.967 和 0.949,在  $\alpha = 0.01$  水平上达到显著相关,说明 TDR 测定的土壤含水率精度较高。

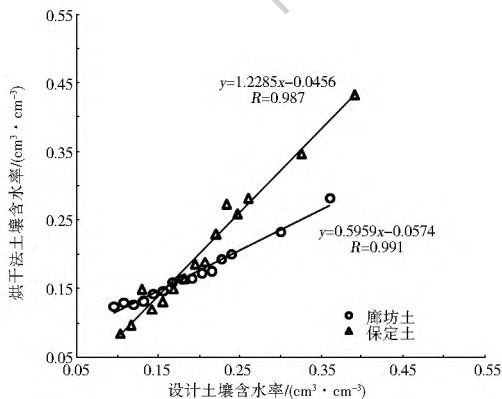


图 2 烘干法测定的土壤含水率与设计土壤含水率比较

Fig. 2 Comparison between designed soil content and the value measured by over dry method

土壤酸碱度仪和三合一测得的土壤含水率值越小说明土壤越干燥,图 4 和图 5 分别给出了土壤酸

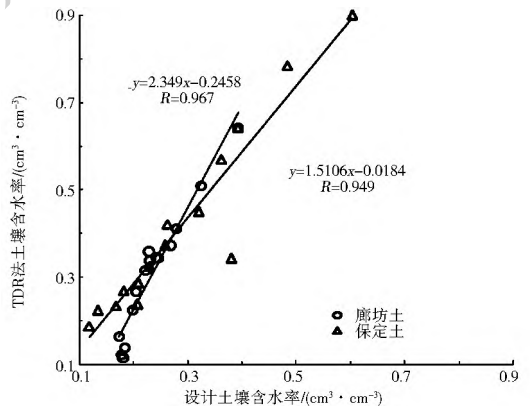


图 3 TDR 测定的与烘干法测定的土壤含水率比较

Fig. 3 Comparison of soil content measured by TDR and by over dry method

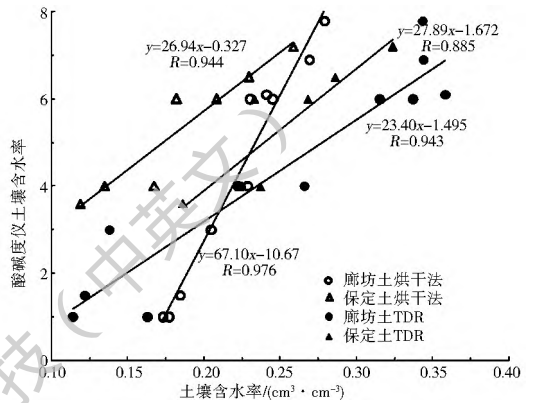


图 4 土壤酸碱度仪与烘干法和 TDR 测得的土壤含水率比较

Fig. 4 Comparison of soil content measured by pH meter and by over dry method and TDR

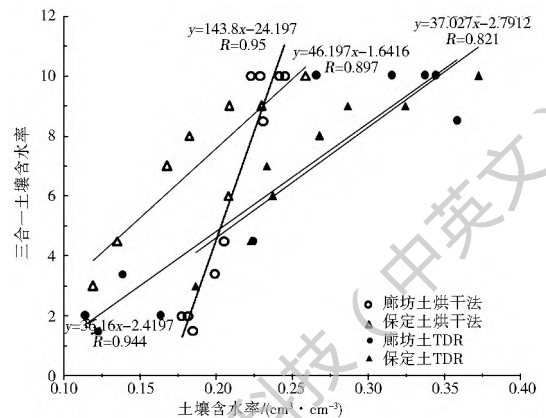


图 5 三合一与烘干法和 TDR 测得的土壤含水率比较

Fig. 5 Comparison of soil content measured by three unity and by over dry method and TDR

碱度仪和三合一测得的廊坊土、保定土两种土壤的含水率与烘干法和 TDR 法测得的土壤含水率之间关系。土壤酸碱度仪测得的廊坊土、保定土的含水率与烘干法的相关系数分别达到 0.976 和 0.944,与 TDR 测得土壤含水率之间的相关系数分别为 0.943 和 0.885;三合一测得的两种土壤含水率与烘干法测得的土壤含水率之间相关系数分别达到

0.957和0.897,与TDR测得土壤含水率之间的相关系数分别达到0.944和0.821;均在 $\alpha = 0.01$ 水平上均达到显著相关,说明土壤酸度仪和三合一测得的土壤含水率值与真实土壤水分状况间具有较好的对应关系,能够反映土壤水分含量的大小。

表3给出了土壤酸度仪和三合一土壤含水率测定值与烘干法土壤含水率的对应关系,土壤酸碱度仪的含水率测量值为0~8,三合一的测量值为0~10,相同土壤含水率两种土壤的测量值不同,说明土壤酸度仪和三合一测定的土壤含水率值因土壤的不同而不同,需要在使用时根据土壤特性和作物品种确定适宜的灌水控制值;土壤酸度仪测量时廊坊土

含水率超过 $0.28 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 、保定土超过 $0.26 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时超量程,三合一测量时廊坊土含水率超过 $0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 、保定土超过 $0.26 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时超量程,即土壤含水率较高达到或超过土壤的田间持水率时这两种仪器均出现了超量程问题,说明不适合在含水率较大情况下使用;表3中同时给出了四合一测得的土壤含水率与烘干法测定结果的比较,四合一测定土壤含水率值根据土壤水分含量的大小测定结果显示为DRY+、DRY、WET和WET+,从表3分析可见,四合一测定值对应的土壤水分范围较大,说明测量精度较低,且在试验过程中发现此仪器在应用中测定值的稳定性差。

表3 酸碱度仪、三合一和四合一土壤含水率测量值与烘干法土壤含水率比较

Tab.3 Comparison of soil content measured by pH meter,three unity and four unity and by oven dry method

酸碱度仪测量值		0~2	2~4	4~6	6~8	>8
烘干含水率	廊坊土	< 0.18	0.18~0.22	0.22~0.24	0.24~0.28	> 0.28
$/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	保定土	< 0.11	0.11~0.16	0.16~0.21	0.21~0.26	> 0.26
三合一测量值		0~3	3~6	6~8	8~10	>10
烘干含水率	廊坊土	< 0.18	0.18~0.20	0.20~0.22	0.22~0.25	> 0.25
$/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	保定土	< 0.12	0.11~0.17	0.17~0.20	0.20~0.26	> 0.26
四合一测量值		DRY+	DRY	WET	WET+	
烘干含水率	廊坊土	0.12~0.14	0.15	0.16~0.17	0.18~0.28	
$/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	保定土	< 0.09	0.09	0.09~0.11	0.12~0.43	

## 2.2 土壤电导率 定效果分析

图6比较了电导率仪和浸提法测得的土壤电导率,图7给出了廊坊土和保定土2种土壤的电导率(浸提法)和含水率(烘干法)的相关关系。分析可见,廊坊土和保定土2种土壤电导率仪测得的土壤电导率与浸提法测定结果之间的相关系数分别为0.977和0.974,在 $\alpha = 0.01$ 水平上显著相关,说明电导率仪测得的土壤电导率精度较高、能够快速测定并提供较为精准的土壤电导率状况。随着土壤含水率的增大,土壤电导率呈现下降的趋势,土壤电导率和含水率之间呈现为负相关,廊坊土含水率与电导率之间的相关系数为0.510,没有达到显著相关,保定土含水率与电导率相关系数为-0.719,在 $\alpha = 0.01$ 水平上显著负相关。廊坊土电导率为400~500  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ,保定土为250~300  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ,当土壤含水率接近田间持水率时,廊坊土电导率则下降至300  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 以下,保定土下降至200  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 以下,说明盐碱土条件下通过土壤水分的调控能够控制土壤电导率,以保证作物的正常生长对土壤水分和盐分含量的需求。

## 2.3 土壤 pH 值测定效果分析

表4给出土壤酸碱度仪、三合一和四合一3种仪器测定的土壤pH值的统计分析结果,3种仪器测试的土壤pH值变异系数均小于0.1,为弱变异

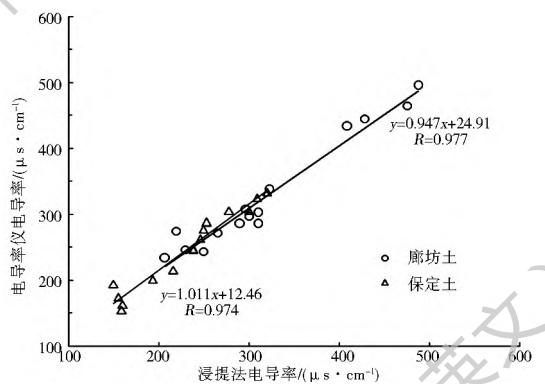


图6 电导率仪和与浸提法测定的土壤电导率比较  
Fig.6 Comparison of soil conductivity measured by conductivity meter and by extraction method

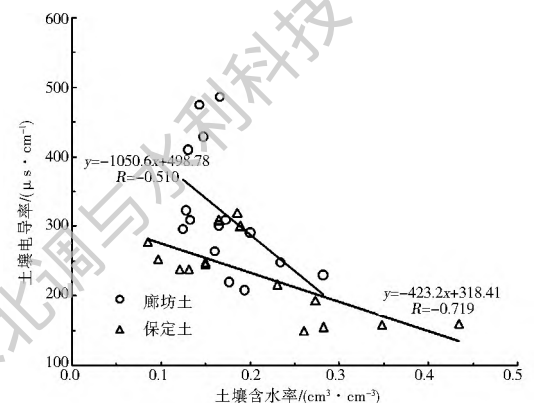


图7 土壤电导率与土壤含水率关系分析  
Fig.7 The correlation between soil conductivity and soil content

性,说明 3 种仪器测试的土壤 pH 值差异不大结果一致。土壤酸碱度仪和四合一测量值的偏度系数、测试的土壤 pH 值变异系数均小于 0.1,为弱变异性,说明 3 种仪器测试的土壤 pH 值差异不大结果一致。土壤酸碱度仪和四合一测量值的偏度系数、

峰度系数均接近 0,说明二种仪器的测试结果十分接近、准确可靠。三合一测定结果的方差较大,偏度系数、峰度系数较高,说明测定值的波动较大。试验测量过程中土壤酸度仪和四合一的稳定性好,三合一的测定值波动性大,稳定性较差。

表 4 土壤酸碱度仪、三合一和四合一测定土壤 pH 值的统计分析结果

Tab. 4 Statistical analysis results of soil pH measured by pH meter, three unity and four unity

土样	仪器	样本容量	最小值	最大值	均值	方差	标准差	偏度系数	峰度系数	变异系数
廊坊土	土壤酸碱度仪	15	7	8.5	7.66	0.16	0.399	0.415	0.38	0.052
	三合一	15	5.4	7.5	7.01	0.354	0.595	-1.601	2.833	0.085
	四合一	15	7	8.5	7.66	0.16	0.399	0.415	0.38	0.052
保定土	土壤酸碱度仪	15	5	7.5	6.57	0.531	0.729	-0.584	0.093	0.111
	三合一	15	6.5	7.5	7.15	0.087	0.295	-0.453	-0.069	0.041
	四合一	15	5	7.5	6.57	0.781	0.884	-0.59	-0.656	0.135

### 3 结语

对土壤含水率、pH 值、电导率等环境参数的实时、准确掌握是实现精准灌溉的前提,对土壤参数测定仪器的可靠性的准确评定,能够为作物生长过程中土壤参数测定仪器的选择、精准灌溉决策提供参考依据。

本文对我国目前科研和生产中 5 种土壤参数测定仪器的实验室标定结果表明,这 5 种仪器对土壤含水率、电导率和 pH 值的测试都具有操作简便、快速简单的特点。就土壤含水率的测试而言,TDR 的测量精度较高,能够定量测定土壤含水率,适宜在科研和农业生产中选用;土壤酸碱度仪和三合一测定土壤含水率稳定性较好,测定值与烘干法和 TDR 测定的土壤含水率之间具有较高的相关性,测量结果具有较高的精度,能够定性的反映土壤含水率的高低,但不能定量的确定土壤含水率的大小,在使用时需根据土壤特性和作物品种确定适宜的灌水控制限值,适宜在农业生产中选用;四合一测定土壤含水率精度低、稳定性差,不适宜在作物种植过程中选用。就土壤 pH 值的测试而言,三合一测定 pH 值的稳定性差,四合一测定 pH 值稳定性较好。Ec110 土壤电导率原位测量仪测定土壤电导率精度较高。

本文仅对这几种仪器土壤含水率、电导率和 pH 值等 3 个与水肥管理决策密切相关的参数进行了实验室标定,没有对光照和温度等其他参数进行标定,尚需在后续研究中加以考虑。农业生产中亟需价格合理、操作简便、能够准确定量测定土壤参数的仪器,以便为农业生产的水肥管理提供定量的决策支撑;我国目前科研中这些仪器大多依赖进

口,真正应用于农业生产、操作简便、精度较高的相关仪器尚处于空白,亟需展开相关的研发。

### 参考文献(References)

- [1] 黎啟江, 卢永志, 黎竞雄, 等. 一种实用新型温室精细灌溉自动控制系統及其應用[J]. 云南农业科技, 2015(2): 47. (LI Qi-jiang, LU Yong-zhi, LI Jing-xiong, et al. A practical new type of greenhouse irrigation automatic control system and its application[J]. Yunnan Agricultural Science, 2015(2): 47. (in Chinese))
- [2] 郭文忠, 陈青云, 高丽红. 设施蔬菜生产节水灌溉制度研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2005(增刊): 24-25. (GU Wen-zhong, CHEN Qing-yun, GAO Li-hong. Present situation and developmental tendency on system of water saving irrigation of vegetable production in protective cultivation[J]. Transactions of the CSAE, 2005(supp.): 24-25. (in Chinese))
- [3] 田军仓, 韩丙芳, 王炳亮. 精细地面灌溉技术的研究进展[J]. 宁夏农学院学报, 2002, 23(3): 74-77. (TIAN Jun-cang, HAN Bing-fang, WANG Bing-liang. Research advances on the technique of precision ground irrigation[J]. Journal of Ningxia Agricultural College, 2002, 23(3): 74-77. (in Chinese))
- [4] 许迪, 李益农. 精细地面灌溉技术体系及其研究的进展[J]. 农业工程学报, 2007, 38(5): 529-537. (XU Di, LI Yi-nong. Review on advancements of study on precision surface irrigation system[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 38(5): 529-537. (in Chinese))
- [5] 李震, Wang Ning, 洪添胜, 等. 农田土壤含水率监测的无线传感器网络系统设计[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 212-217. (LI Zhen, Ning Wang, HONG Tian-sheng, et al. Design of wireless sensor network system based on irfield soil water content monitoring[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 212-217. (in Chinese))
- [6] Jackson T, Mansfield K, Saafi M, et al. Measuring soil temperature and moisture using wireless MEMS sensors[J]. Journal of Measurement, 2007, 41(4): 381-390.

- [7] 王京元, 阎俊崎, 陈霞, 等. 土壤 pH 值对盆栽大豆幼苗的影响 [J]. 江西农业学报, 2012, 24(2): 96-97. (WANG Jing yuan, YAN Jun qi, CHEN Xia, et al. Effect of soil pH value on seedling of potted soybean [J]. Acta Agriculture Jiangxi, 2012, 24(2): 96-97. (in Chinese))
- [8] 李道西, 彭世彰, 丁加丽, 等. TDR 在测量农田土壤水分中的室内标定 [J]. 农业工程学报, 2005(增刊): 24-25. (LI Dao xi, PENG Shi-zhang, DING Jia li, et al. Laboratory calibration on measurement of field soil moisture using TDR [J]. Transactions of the CSAE, 2005(supp.): 24-25. (in Chinese))
- [9] 周凌云, 陈志雄, 李卫民. TDR 法测定土壤含水量的标定研究 [J]. 土壤学报, 2003(1): 59-64. (ZHOU Ling-yun, CHEN Zhi-xiang, LI Wei-min. Calibration on measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR) [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003(1): 59-64. (in Chinese))
- [10] 吴月茹, 王维真, 晋锐, 等. TDR 测定土壤含水量的标定研究 [J]. 冰川冻土, 2009(2): 262-267. (WU Yue ru, WANG Wei zhen, JIN Rui, et al. The Calibration of measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR) [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009(2): 262-267. (in Chinese))
- [11] 王贵艳, 史秀捧, 张建恒, 等. TDR 法、中子法、重量法测定土壤含水量的比较研究 [J]. 河北农业大学学报, 2002(3): 23-27. (WANG Gui yan, SHI Xiur peng, ZHANG Jian heng, et al. A study on the comparison of measuring soil water content with TDR, neutron probe and oven dry [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2002(3): 23-27. (in Chinese))
- [12] 王相平, 杨劲松, 余世鹏, 等. 基于蒸发皿水面蒸发量优化冬小麦微咸水灌溉制度 [J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(4/5): 6-10. (WANG Xiang ping, YANG Jin song, YU Shi peng, et al. Optimizing brackish water irrigation program based on water surface evaporation of a 20cm standard pan [J]. Journal of irrigation and drainage, 2014, 33(4/5): 6-10. (in Chinese))
- [13] 邹君, 杨玉蓉. 农田水分研究的意义、进展及存在的问题 [J]. 衡阳师范学院学报: 自然科学, 2002, 23(6): 101-104. (ZOU Jun, YANG Yu rong. A review of study on farmland moistures [J]. Journal of Hengyang Normal University: Natural Science, 2002, 23(6): 101-104. (in Chinese))
- [14] 郑重, 马富裕, 张凤荣, 等. 农田水分监测与决策支持系统的实现 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 155-161. (ZHENG Zhong, MA Fu yu, ZHANG Feng rong, et al. Application of decision support system for monitoring field water [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 155-161. (in Chinese))
- [15] 龚元石, 李春友, 李子忠. 农田土壤水分测定三种方法的比较 [J]. 中国农业大学学报, 1997, 2(3): 53-58. (GONG Yuan shi, LI Chun-you, LI Zi zhong. Comparison of three methods for measuring soil moisture in the field [J]. Journal of China Agricultural University, 1997, 2(3): 53-58. (in Chinese))
- [16] 王维真, 小林哲夫. 利用 TDR 对土壤含水量及土壤溶液电导率的同步连续测量 [J]. 冰川冻土, 2008(3): 24-25. (WANG Wei zhen, Tetsuo Kobayashi. Continuous measurement of soil water content and soil solution electrical conductivity by using TDR [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008(3): 24-25. (in Chinese))
- [17] 王若水. 内陆干旱区重度盐碱地滴灌土壤水盐调控机制与农业利用方法研究 [D]. 中国科学院研究生院, 2012. (WANG Ruoshui. A study on inland arid severe drip saline alkali soil water salt regulation mechanism and agricultural utilization method [D]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese))
- [18] 张祯, 荀久玉, 孔锦. 土壤电导率的测定中影响因素研究 [J]. 科技信息: 学术版, 2007(28): 276-277. (ZHANG Zhen, XUN Jiu-yu, KONG Jin. The influence factors of measurement of soil electrical conductivity in the study [J]. Science and Technology Information: Academic Version, 2007(28): 276-277. (in Chinese))

(上接第 184 页)

- [13] 宗全利, 郑铁刚, 刘焕芳, 等. 滴灌自清洗网式过滤器全流场数值模拟与分析 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 57-65. (ZONG Quan li, ZHENG Tie gang, LIU Huan fang, et al. Numerical simulation and analysis on whole flow field for drip self-cleaning screen filter [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(16): 57-65. (in Chinese))
- [14] 于旭永. 自清洗过滤器内部机构受力特性研究 [D]. 石河子大学, 2014. (YU Xu yong. Study on the stress characteristics of the internal structure of self-cleaning screen filter [D]. Shihezi University, 2014. (in Chinese))
- [15] 骆秀萍. 自清洗网式过滤器运行特性及内部流场数值模拟研究 [D]. 石河子大学, 2013. (LUO Xiur ping. Study on operating characteristics and internal flow field numerical simulation of self-cleaning screen filter [D]. Shihezi University, 2013. (in Chinese))
- [16] 李振鹏, 孙中宁, 廖永浩. 非达西流区微球床多孔介质阻力特性研究 [J]. 应用科技, 2009, 36(04): 61-64. (LI Zhen peng, SUN Zhong ning, LIAO Yong hao. The research on the resistance characteristics of microsphere packed bed porous media in non-Darcy regime [J]. Applied Science and Technology, 2009, 36(04): 61-64. (in Chinese))
- [17] 白兆亮, 李琳. 有压管道中孔板相对间距对局部阻力系数的影响及其机理研究 [J]. 水电能源科学, 2015, 33(1): 177-182. (BAI Zhao liang, LI Lin. Study on impact of relative spacing of orifice plate in pressure pipe on local resistance coefficient and impact mechanism [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(1): 177-182. (in Chinese))