

仪器测墒按需补灌对冬小麦产量和水分利用效率的影响

张洪波, 王 东

(山东农业大学农学院, 山东 泰安 271018)

摘 要: 利用频域反射法(FDR)、时域反射法(TDR)和驻波率法(SWR)三种便携式土壤水分快速测试仪,在田间条件下测定土壤田间持水量(FC_v)和体积含水量(WC_v),于冬小麦越冬前、拔节期和开花期设补灌的目标土壤相对含水量分别为 80%、70%和 70%,每一补灌时期设 20 cm、40 cm 和 60 cm 三个测墒土层深度,研究不同仪器法在冬小麦生育期间对土壤水分测定的准确度和稳定性,探索用不同仪器测定数据计算灌水定额进行冬小麦补灌的效果及其差异原因。结果表明,FDR 和 SWR 仪器测得的 FC_v 换算为以水土质量百分比表示的田间持水量 FC_{v-m} ,与传统方法测得的田间持水量 FC_m 之间的相对误差为 0.4% ~ 2.6%;TDR 仪器测定计算得出的 WC_{v-m} 值与烘干法测得的 WC_m 值的相对误差与相应土层土壤温度呈极显著正相关,在冬小麦播种期、开花期和成熟期较高,在越冬前和拔节期较低;SWR 仪器测定计算得出的 WC_{v-m} 值与 WC_m 值的相对误差与相应土层土壤含水量呈极显著负相关,在土壤含水量较高的条件下测量的准确度较高。FDR 仪器在冬小麦生育期内测量的准确性受土壤温度和水分的影响较小,准确度和稳定性均较高,直接利用其测定的 FC_v 和 WC_v 值计算灌水定额补灌,获得了与传统烘干法测墒补灌一致的效果。

关键词: 土壤水分;测定方法;补灌;冬小麦;产量;水分利用效率

中图分类号: S152.7; S512.1⁺1 **文献标志码:** A

Effects of supplemental irrigation on winter wheat yield and water use efficiency by measured soil moisture with instruments

ZHANG Hong-bo, WANG Dong

(College of Agriculture, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China)

Abstract: In this experiment, the field capacity (FC_v) and soil volumetric moisture content (WC_v) were measured by three kinds of soil moisture instruments as frequency domain reflection (FDR), time domain reflection (TDR) and standing wave ratio (SWR) under field condition. The target relative soil moisture content was controlled as 80%, 70% and 70% in before the winter, jointing stage and anthesis stage, respectively. The soil depths for measuring soil moisture were set 20, 40 cm and 60 cm in each supplemental irrigation stage. The accuracy and stability of different instruments for soil moisture measuring during growing season of winter wheat has been researched to explore the effect and different reasons measuring soil moisture by different instruments to calculate irrigation quota for supplemental irrigation. The results showed that: The relative error was 0.4% ~ 2.6% comparing the FC_{v-m} measured by FDR and SWR with the FC_m measured by the traditional method. The relative error between the WC_{v-m} measured by TDR and the WC_m measured by drying method has shown a significant positive correlation with the related soil depth temperature. It was high in sowing period, blossom stage and mature period, but was lower in before wintering and jointing stage. The relative error of WC_{v-m} and WC_m measured by SWR with the soil moisture content was a significant negative correlation, the measured accuracy was higher under the condition of higher soil moisture content. The measured accuracy and stability of FDR were total higher, which less affected by soil temperature and soil moisture in the growing season of winter wheat. Direct using

收稿日期: 2014-05-01
基金项目: 国家自然科学基金(31271660);公益性行业科研专项经费项目(201503130);山东省农业重大应用技术创新课题
作者简介: 张洪波(1988—),男,山东诸城人,硕士研究生,主要从事小麦高产栽培和节水灌溉方面的研究。E-mail: zhanghongbo513@163.com。
通信作者: 王 东(1973—),男,山东滕州人,博士,教授,主要从事小麦高产栽培和节水灌溉方面的研究。E-mail: wangd@sdau.edu.cn。

the FC_v and WC_v measured by FDR to calculate the irrigation quota for supplemental irrigation have obtained the coincidence effect with the traditional drying method.

Keywords: soil moisture; determination method; supplemental irrigation; winter wheat; yield; water use efficiency

中国黄淮和北部冬麦区的小麦产量占全国的 60% 以上^[1], 该区年降水量 400 ~ 800 mm, 仅 30% 分布于冬小麦生育期内^[2-3], 而冬小麦总耗水量为 400 ~ 500 mm, 灌溉是满足冬小麦生长、获得高产的主要途径^[4]。前人的研究多采用定量灌溉的方式, 但小麦生长季不同年度间降水量、降水时期和土壤贮水量均存在差异, 灌水量亦应不同^[5]。测墒补灌技术^[6]依据不同生育阶段小麦的耗水特性, 充分考虑灌水前的降水量和土壤蓄水量, 于灌水前先测定一定深度土层土壤的质量含水量, 计算出土壤相对含水量, 然后根据该土层的目标土壤相对含水量和灌水定额公式^[7]计算需补灌水量进行补灌, 可获得较高的籽粒产量和水分利用效率^[8]。计算土壤相对含水量和补灌水量还需要测定土壤田间持水量。土壤质量含水量和田间持水量传统的测定方法分别是烘干法^[9]和田间灌水 + 烘干测定法^[10], 但测定过程烦冗, 费工费时, 制约着测墒补灌技术在生产中的应用。

频域反射法 (frequency domain reflectometry, FDR)、时域反射法 (time domain reflectometry, TDR) 和驻波率法 (standing-wave ratio, SWR) 均是基于土壤介电特性测定土壤含水量的方法, 在测定实时性上有明显的优势, 而且仪器使用方便灵活, 有广阔的推广应用前景^[11-13]。FDR 法根据土壤水分测试仪发射出的电磁波在不同介质中振荡频率的变化来测定介质的介电常数, 进而通过一定的对应关系反演出土壤水分状况^[11]。TDR 法则根据土壤水分测试仪发射出的电磁波在不同介质中传播速度的变化来测定介质的介电常数, 并据此计算出土壤含水量^[12]。SWR 法发射无线电波沿传输线传送至探头, 通过测量传输线上的驻波率确定土壤含水量^[13]。三种仪器法的测量值均为土壤体积含水量, 由于受土壤质地、容重、温度等诸多因素影响, 测量结果存在误差。目前多采用室内标定的方法进行数据校正, 但室内标定结果与实地标定结果仍存在较大差异^[14]。黄淮和北部冬麦区的冬小麦生育期自当年 10 月至次年 6 月, 跨越秋冬春夏四季, 期间土壤温度和含水量多变, 不同仪器法在冬小麦生育期间对土壤水分测定的准确度和稳定性, 及用仪器法测定数据计算灌水定额进行冬小麦补灌的方法和可靠性方面的研究鲜有报道。因此, 本试验选用 FDR 法、TDR 法和

SWR 法三种土壤水分测试仪测定土壤田间持水量和冬小麦不同生育时期的土壤体积含水量, 探索不同仪器测量稳定性的差异及其对冬小麦测墒补灌效果的影响。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2012—2013 年冬小麦生长季, 在山东省兖州市小孟镇史家王子村大田 (35.41°N, 116.41°E) 进行, 供试冬小麦品种为济麦 22。试验田 0 ~ 200 cm 各土层土壤质地均为粉壤土, 播种前试验田 0 ~ 20 cm 土层含有机质 1.7%、全氮 0.1%、碱解氮 103.9 mg·kg⁻¹、速效磷 29.2 mg·kg⁻¹ 和速效钾 122.0 mg·kg⁻¹。小麦播种期至越冬前降水量 33.0 mm, 越冬前至拔节期 59.0 mm, 拔节期至开花期 10.5 mm, 开花期至成熟期 135.5 mm, 总降水量 238.0 mm。0 ~ 200 cm 各土层土壤容重见表 1。

表 1 试验田 0 ~ 200 cm 各土层土壤容重

Table 1 Soil bulk density in each soil layer in 0 ~ 200 cm of experimental land

土层 Soil layers /cm	土壤容重 Soil bulk density /(g·cm ⁻³)	土层 Soil layers /cm	土壤容重 Soil bulk density /(g·cm ⁻³)
0 ~ 20	1.60	100 ~ 120	1.65
20 ~ 40	1.64	120 ~ 140	1.64
40 ~ 60	1.51	140 ~ 160	1.65
60 ~ 80	1.63	160 ~ 180	1.66
80 ~ 100	1.61	180 ~ 200	1.66

试验共设置 12 个处理 (表 2), 各处理均于冬小麦越冬前、拔节期和开花期进行测墒补灌。即灌水前先测定一定深度土层土壤的平均相对含水量, 然后根据灌水定额公式计算需补灌水量。分别采用频域反射 (FDR)、时域反射 (TDR)、驻波率 (SWR) 土壤水分测试仪及传统烘干法测定土壤含水量, 每一补灌时期设 20 cm、40 cm 和 60 cm 三个测墒土层深度。同一补灌时期, 各处理补灌的目标相对含水量一致。冬小麦越冬前、拔节期和开花期补灌的目标相对含水量分别设为 80%、70% 和 70%。灌溉时采用潜水泵和水龙带引井水并在田间均匀喷洒, 水龙带装有水表和闸阀, 用于计量和控制灌水量。各处理每次补灌水量和总灌水量见表 2。每处理 3 次重复, 随

机区组排列。小区面积为 4 m×4 m=16 m²。

表 2 不同处理的测墒方法、测墒土层深度、目标土壤相对含水量和补灌水量
Table 2 Method of the soil moisture measuring, measuring soil depth, target soil relative water content and supplemental irrigation volume for different treatments

处理 代号 Treatment code	测墒方法 Soil moisture measuring method	测墒土层 深度/cm Measuring soil depth	目标土壤相对含水量/% Target soil relative water content			补灌水量/mm Supplemental irrigation volume			总补灌水量/mm Total amount of supplemental irrigation volume
			越冬前 Before winter	拔节期 Jointing	开花期 Anthesis	越冬前 Before winter	拔节期 Jointing	开花期 Anthesis	
W ₁	Drying	20	80	70	70	13.9f	17.9h	39.2c	71.0f
W ₂		40	80	70	70	20.2d	38.3de	33.5d	92.0e
W ₃		60	80	70	70	15.8ef	30.3f	54.1b	100.2d
W ₄	FDR	20	80	70	70	13.7f	24.7g	33.9d	72.3f
W ₅		40	80	70	70	23.8d	39.8d	27.4e	91.0e
W ₆		60	80	70	70	19.8de	45.5c	31.8de	97.1d
W ₇	TDR	20	80	70	70	10.4g	24.7g	22.1f	57.2g
W ₈		40	80	70	70	15.3ef	40.5d	32.2de	88.0e
W ₉		60	80	70	70	10.7g	34.9ef	4.0g	49.6h
W ₁₀	SWR	20	80	70	70	36.6c	37.4de	35.0cd	109.0c
W ₁₁		40	80	70	70	58.5b	65.9b	52.7b	177.1b
W ₁₂		60	80	70	70	80.7a	76.6a	66.2a	223.5a

冬小麦播种前将前茬玉米秸秆全部粉碎翻压还田。底肥用量为 N 105 kg·hm⁻², P₂O₅ 150 kg·hm⁻², K₂O 150 kg·hm⁻², 拔节期追施 N 135 kg·hm⁻²。2012 年 10 月 10 日播种, 3 叶 1 心期定苗, 留苗密度为 180 株·m⁻², 其它管理措施同一般高产田。

1.2 土壤水分测试仪

本试验采用的 FDR 土壤水分测试仪为北京盟创伟业科技有限公司生产的 SU-LA 型高智能土壤水分测试仪, 由测试主机、水分传感器和数据线等组成; 采用的 TDR 土壤水分测试仪为美国 Spectrum Technologies 公司生产的 TDR 300 型土壤水分测试仪, 由 TDR 300 主机、装载盒和电脑连接数据线等组成; 采用的 SWR 土壤水分测试仪为中国农业大学传感器与检测技术研究所研制的 TSC-IV 型智能化土壤水分空间分布快速测试仪, 由 SWR-2 型土壤水分传感器、测试仪表和数据线等组成。仪器均由厂家标定。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤容重测定 参照鲁如坤^[9]的方法, 每 20 cm 一层, 测定 0~200 cm 土层土壤的干容重。
1.3.2 田间持水量测定 参照吕贻国和李保国^[10]的方法, 在试验田选代表性地段, 面积为 4 m², 将地面平整后四周筑起一正方形的坚实土埂, 埂高 30 cm, 底宽 30 cm。然后在中央放一方木框, 入土深度 15 cm。框内面积 1 m² 为测试区。从测试点附近

每 20 cm 一层采集土样测定 1 m 土体内土壤比重和质量含水量。按土壤总孔隙度计算使 1 m 土体全部孔隙充满水所需的总灌水量, 减去土壤现有蓄水量, 差值的 1.5 倍为需要补充的灌水量。灌水后, 在测试区和保护区覆盖 50 cm 厚的草层, 在草层上覆盖塑料薄膜, 避免土壤水分蒸发损失, 并防止雨水渗入影响。经两昼夜后, 分别用 SU-LA 型高智能土壤水分测试仪、TDR 300 型土壤水分测试仪和 TSC-IV 型智能化土壤水分空间分布快速测试仪测定 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层土壤体积含水量, 每天测定 1 次, 直至前后两天的含水量无显著差异, 水分运动基本平衡时为止, 取两次测定结果相近的数值求平均值即为相应土层土壤的田间持水量(体积%), 以 FC_v 表示。三种土壤水分测试仪均为便携式, 测定前先将水分测试仪传感器探头连接到延长杆上, 并根据测定深度调节延长杆长度, 传感器另一端连接测试仪主机; 然后手握连接杆上的手柄将传感器探头垂直插入待测土层土壤中, 确保探针与土壤紧密接触, 之后操作测试仪主机进行该层土壤含水量的测定。依次测定下层土壤含水量时, 需先用土钻将已测的上层土壤取出, 再将传感器探头通过土钻孔垂直插入到待测土层土壤中测定。采用仪器法测定的同时, 将土钻采集的各土层土壤样品装入铝盒, 用烘干法测定土壤质量含水量, 取两次测定结果相近的数值求平均值即为相应土层土壤的田间

持水量(质量%),以 FC_m 表示。

1.3.3 土壤含水量和温度测定 于冬小麦播种期、越冬前、拔节期、开花期和成熟期及每次灌水前后,按试验设计要求,分别用 SU-LA 型高智能土壤水分测试仪、TDR 300 型土壤水分测试仪和 TSC-IV 型智能化土壤水分空间分布快速测试仪测定 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层土壤体积含水量(%),以 WC_v 表示。仪器操作方式和步骤与“1.3.2”中叙述的一致。同时,采用烘干法^[9]测定同一土层土壤质量含水量(%),以 WC_m 表示;用 ARN-TW 型智能土壤温度记录仪测定各土层土壤温度。

1.3.4 籽粒产量和产量构成因素的测定 成熟期每小区(重复)随机选取 1 m² 调查单位面积穗数,随机选取 50 个单茎调查穗粒数。每小区(重复)收获 3 m²,自然风干脱粒后称重,并测定含水量,按小区籽粒产量和标准含水量(12.5%)计算公顷籽粒产量。从风干的籽粒中随机取样,测定千粒重。

1.4 数据处理与计算

1.4.1 数据处理 采用 Microsoft Excel 2003 处理数据、图表,采用 DPS v7.05 进行统计分析和差异显著性检验。

1.4.2 土壤质量含水量 由仪器法测得的土壤体积含水量(WC_v , 体积%)计算土壤质量含水量(WC_{v-m} , 质量%)。计算公式为:

$$WC_{v-m} = WC_v / \gamma$$

式中, γ 为土壤容重($g \cdot cm^{-3}$)。

1.4.3 土壤田间持水量 由仪器法测得的土壤田间持水量(FC_v , 体积%)计算以水土质量百分比表示的土壤田间持水量(FC_{v-m} , 质量%)。计算公式为:

$$FC_{v-m} = FC_v / \gamma$$

式中, γ 为土壤容重($g \cdot cm^{-3}$)。

1.4.4 土壤相对含水量 RWC_m 由烘干法测得的土壤含水量(WC_m , 质量%)和田间灌水+烘干测定法测得的田间持水量(FC_m , 质量%)计算土壤相对含水量(RWC_m , %)。计算公式为:

$$RWC_m = WC_m / FC_m \times 100$$

1.4.5 土壤相对含水量 RWC_v 由仪器法测得的土壤含水量(WC_v , 体积%)和田间持水量(FC_v , 体积%)计算土壤相对含水量(RWC_v , %)。计算公式为:

$$RWC_v = WC_v / FC_v \times 100$$

1.4.6 土壤相对含水量 RWC_{v-m} 由 WC_{v-m} (质

量%) 和 FC_m (质量%) 计算土壤相对含水量(RWC_{v-m} , %)。计算公式为:

$$RWC_{v-m} = WC_{v-m} / FC_m \times 100$$

1.4.7 补灌水量的计算 参照山仑等^[7]的方法,用传统烘干法测得的数据计算每次补灌的灌水量,灌水定额公式为 $M = 10\gamma H(WC_{mt} - WC_{ma})$, 式中 M 为灌水量(mm); γ 为土壤容重($g \cdot cm^{-3}$); H 为测墒土层深度(cm); WC_{mt} 为补灌的目标土壤质量含水量(质量%, $WC_{mt} = FC_m \times$ 目标土壤相对含水量); WC_{ma} 为补灌前用烘干法测得的土壤质量含水量(质量%)。

参照宋文等^[15]的方法,用仪器法测得的数据计算每次补灌的灌水量,灌水定额公式为: $M = 10H(WC_{vt} - WC_{va})$, 式中 M 为灌水量(mm); H 为测墒土层深度(cm); WC_{vt} 为补灌的目标土壤体积含水量(体积%, $WC_{vt} = FC_v \times$ 目标土壤相对含水量); WC_{va} 为补灌前用仪器法测得的土壤体积含水量(体积%)。

1.4.8 农田耗水量计算 参照 Lv 等^[16]和 Chattaraj 等^[17]的方法,计算公式为: $ET_c = P + I + \Delta W$, 式中 ET_c 为小麦生育期农田耗水量(mm); P 为生育期内有效降水量(mm); I 为生育期内的灌水量(mm); ΔW 为生育期内 0~200 cm 土层土壤贮水消耗量(mm),即播种期土壤贮水量减去收获期土壤贮水量。本试验田地势平坦,地下水埋深在 5 m 以下,故不考虑径流、排水和地下水补给量。计算土壤贮水量所用的各土层土壤含水量均采用烘干法^[9]测定。

1.4.9 水分利用效率计算 参照 Wang 等^[18]的方法,计算公式为: $WUE = Y / ET_c$, 式中, WUE 为水分利用效率($kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$); Y 为籽粒产量($kg \cdot hm^{-2}$), ET_c 为小麦生育期农田耗水量(mm)。

2 结果与分析

2.1 不同方法测定的土壤田间持水量的差异

如表 3 所示,采用 TDR 法测得的 0~60 cm 各土层土壤 FC_v 值显著高于 FDR 和 SWR 法测得的 FC_v 值。将 FC_v 值换算为以水土质量百分比表示的田间持水量 FC_{v-m} 值,其与传统的田间灌水+烘干测定法测得的 FC_m 值之间的相对误差以 TDR 法的最大。FDR 法和 SWR 法的 FC_{v-m} 与 FC_m 之间的相对误差在 0.4%~2.6% 范围内,有较高的准确度。

2.2 WC_{v-m} 与 WC_m 之间的差异及相关性分析

冬小麦全生育期的 WC_{v-m} 与 WC_m 相关性分析结果(图 1)示出,采用三种仪器测定值 WC_v 计算出

的 WC_{v-m} 值与传统烘干法测得的 WC_m 值呈显著正相关,以 FDR 法的模型拟合优度最高。不同生育时期的 WC_{v-m} 与 WC_m 比较(表 4),FDR 法在冬小麦各生育时期的 WC_{v-m} 值与烘干法测得的 WC_m 值均无显著差异。TDR 法的 WC_{v-m} 值在冬小麦各生育时期均显著高于 WC_m 值,相对误差在 15.1% ~ 31.5% 范围内;SWR 法的 WC_{v-m} 值在冬小麦各生育时期均显著低于 WC_m 值,相对误差在 17.6% ~ 28.0% 范围内。TDR 法的 WC_{v-m} 值与 WC_m 值的相对误差在冬

小麦播种期、开花期和成熟期较高,在越冬前和拔节期较低;而 SWR 法的在冬小麦播种期、拔节期和开花期较高,在越冬前和成熟期较低。相关分析表明,TDR 法 WC_{v-m} 值与 WC_m 值的相对误差与相应土层土壤温度呈极显著正相关,相关方程为 $y = 5.9434 + 1.0878x$ ($R^2 = 0.9441, P < 0.01$);SWR 法 WC_{v-m} 值与 WC_m 值的相对误差与相应土层土壤含水量呈极显著负相关,相关方程为 $y = 54.9085 - 1.7394x$ ($R^2 = 0.9524, P < 0.01$)。

表 3 不同方法测定的田间持水量
Table 3 Field capacity measured by different methods

土层 Soil layers /cm	FC_m /%	FC_v /%			FC_{v-m} /%			FC_{v-m} 与 FC_m 之间的相对误差/% Relative error between FC_{v-m} and FC_m		
		FDR	TDR	SWR	FDR	TDR	SWR	FDR	TDR	SWR
0~20	24.6	38.5b	42.0a	39.2b	24.1b	26.3a	24.5b	2.0b	6.9a	0.4c
20~40	22.8	37.9b	39.0a	36.8c	23.0b	23.7a	22.4c	1.0b	3.9a	1.8b
40~60	27.2	40.0b	42.3a	40.1b	26.5b	28.0a	26.6b	2.6ab	2.9a	2.2b

注:同一项目和土层不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$); FC_{v-m} 与 FC_m 之间的相对误差(%) = $(FC_{v-m} - FC_m)/FC_m \times 100$ 。
Note: Different small letters in the same item and soil layer indicate significant difference at 0.05 level; Relative error between FC_{v-m} and FC_m (%) = $(FC_{v-m} - FC_m)/FC_m \times 100$.

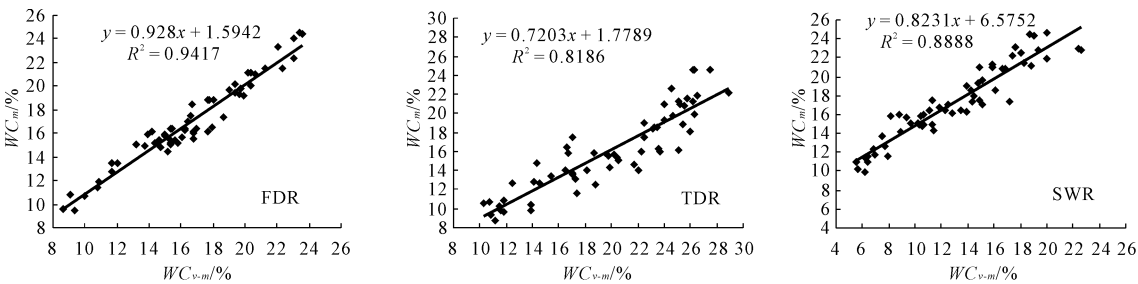


图 1 冬小麦全生育期的 WC_{v-m} 与 WC_m 相关性分析
Fig.1 Correlation analysis of WC_{v-m} and WC_m in whole growing season of winter wheat

2.3 RWC_v 和 RWC_{v-m} 与 RWC_m 之间的差异及相关性分析

本试验通过两种途径用仪器法测得的数据计算土壤相对含水量,一种是用仪器法测定土壤田间持水量 FC_v 和土壤体积含水量 WC_v ,直接计算出土壤相对含水量 RWC_v ;另一种是先将仪器法测得的 WC_v 值换算为土壤质量含水量 WC_{v-m} 值,再与传统田间灌水+烘干测定法测得的田间持水量 FC_m 值计算出土壤相对含水量 RWC_{v-m} 。冬小麦全生育期的 RWC_v 和 RWC_{v-m} 与 RWC_m 相关性分析结果(图 2)示出,各仪器法测定计算出的 RWC_v 和 RWC_{v-m} 均与传统方法测定计算出的土壤相对含水量 RWC_m 呈显著正相关,以 FDR 法的模型拟合优度最高。不同生育时期的 RWC_v 和 RWC_{v-m} 与 RWC_m 比较(表 5),FDR 法的 RWC_v 和 RWC_{v-m} 在各生育时期均与 RWC_m

无显著差异。TDR 法的 RWC_v 在各生育时期均显著低于 RWC_{v-m} ,显著高于 RWC_m ;SWR 法的 RWC_v 在各生育时期与 RWC_{v-m} 无显著差异,但显著低于 RWC_m 。TDR 法的 RWC_v 与 RWC_m 的相对误差在各生育时期均显著低于 RWC_{v-m} 与 RWC_m 的相对误差,且表现为在冬小麦播种期、开花期和成熟期较高,在越冬前和拔节期较低;SWR 法的 RWC_v 与 RWC_m 的相对误差在冬小麦播种期、拔节期和开花期较高,在越冬前和成熟期较低。说明用 FDR 法测得的数据计算冬小麦各生育时期的土壤相对含水量,准确度和稳定性均较高,用 TDR 和 SWR 法测定值计算出的各生育时期的土壤相对含水量与用传统方法测定值计算出的土壤相对含水量存在明显差异,其相对误差受不同生育时期土壤温度和水分的影响。

表 4 不同生育时期 WC_{v-m} 与 WC_m 之间的差异

Table 4 Difference between WC_{v-m} and WC_m in different growing stage

生育时期 Growing stage	测墒方法 Soil moisture measuring method	项目 Items	样本数 Sample number	平均值 Mean / %	差异范围 Difference range	极差 Range	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variance	与 WC_m 的相对误差 Relative error for WC_m / %
播种期 Sowing	FDR	WC_{v-m}	9	16.8b ¹⁾	14.9 ~ 18.6	3.7	1.8	11.0	2.4e ²⁾
		WC_m	9	16.4b	15.8 ~ 17.4	1.7	0.9	5.4	—
	TDR	WC_{v-m}	9	21.2a	18.7 ~ 22.5	3.8	2.1	10.1	29.3ab
		WC_m	9	16.4b	15.8 ~ 17.4	1.7	0.9	5.4	—
	SWR	WC_{v-m}	9	11.8c	10.4 ~ 14.4	4.0	2.2	18.9	28.0ab
		WC_m	9	16.4b	15.8 ~ 17.4	1.7	0.9	5.4	—
越冬前 Before winter	FDR	WC_{v-m}	18	20.1c	15.0 ~ 23.6	8.6	2.6	12.9	2.4e
		WC_m	18	20.6bc	15.9 ~ 24.5	8.6	2.7	13.0	—
	TDR	WC_{v-m}	18	24.4a	16.7 ~ 28.9	12.2	3.8	15.5	15.1d
		WC_m	18	21.2bc	15.9 ~ 22.1	6.2	2.8	13.1	—
	SWR	WC_{v-m}	18	17.8d	8.2 ~ 20.1	11.9	3.7	21.8	17.6cd
		WC_m	18	21.6b	15.9 ~ 24.6	8.7	2.8	12.9	—
拔节期 Jointing	FDR	WC_{v-m}	18	15.2b	8.6 ~ 23.0	14.4	4.3	28.4	3.2e
		WC_m	18	15.7b	9.6 ~ 22.3	12.8	3.9	24.5	—
	TDR	WC_{v-m}	18	17.3a	10.3 ~ 26.2	16.0	5.2	30.2	18.5cd
		WC_m	18	14.6b	10.6 ~ 21.2	10.7	3.5	24.0	—
	SWR	WC_{v-m}	18	11.6c	5.5 ~ 22.7	17.2	5.4	46.9	26.6b
		WC_m	18	15.8b	11.0 ~ 22.9	11.8	3.9	24.8	—
开花期 Anthesis	FDR	WC_{v-m}	18	14.4b	9.4 ~ 18.0	8.6	2.3	15.8	4.0e
		WC_m	18	15.0b	9.4 ~ 16.5	7.0	2.2	15.0	—
	TDR	WC_{v-m}	18	16.7a	11.2 ~ 22.0	10.8	3.7	22.3	31.5a
		WC_m	18	12.7c	8.7 ~ 14.1	5.4	2.2	17.5	—
	SWR	WC_{v-m}	18	11.1d	6.2 ~ 16.6	10.4	3.4	30.7	27.9ab
		WC_m	18	15.4b	11.4 ~ 20.8	9.4	3.2	20.7	—
成熟期 Maturity	FDR	WC_{v-m}	9	18.3b	16.2 ~ 20.4	4.1	1.7	9.0	0.5e
		WC_m	9	18.4b	16.4 ~ 21.1	4.7	2.1	11.3	—
	TDR	WC_{v-m}	9	24.8a	23.2 ~ 26.5	3.3	1.2	4.7	30.5a
		WC_m	9	19.0b	18.4 ~ 21.9	3.5	2.1	10.9	—
	SWR	WC_{v-m}	9	14.9c	11.4 ~ 18.3	6.8	2.1	13.9	21.2c
		WC_m	9	18.9b	14.3 ~ 21.4	7.1	2.5	13.7	—

注:1) 同一列同一生育时期不同小写字母表示该生育时期处理间差异显著 ($P < 0.05$);2) 同一列不同小写字母表示各生育时期处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note:1) Different small letters in the same growing stage within a column indicate significant difference at 0.05 level among different treatments in this growing stage; 2) Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level among different treatments in all growing stage. The same as below.

2.4 不同处理对冬小麦产量和水分利用效率的影响

由表 6 看出, FDR 法各测墒深度处理的产量、产量构成因素及水分利用效率与烘干法对应测墒深度处理的无显著差异, 均以测墒深度为 40 cm 处理的穗数、穗粒数和籽粒产量最高, 以测墒深度为 20 cm 处理的水分利用效率最高。SWR 法的各测墒深度处理的穗数和穗粒数的平均值显著高于 FDR 和

TDR 法的各测墒深度处理的值, 千粒重的平均值则低于 FDR 和 TDR 法各测墒深度处理的值; FDR 法各测墒深度处理产量的平均值与 SWR 法的无显著差异, 显著高于 TDR 法的值; 而其水分利用效率的平均值与 TDR 法的无显著差异, 显著高于 SWR 法的值。说明用测量准确度和稳定性较高的 FDR 法测得的数据计算灌水定额进行补灌, 可获得与传统烘干法测墒补灌处理一致的效果。

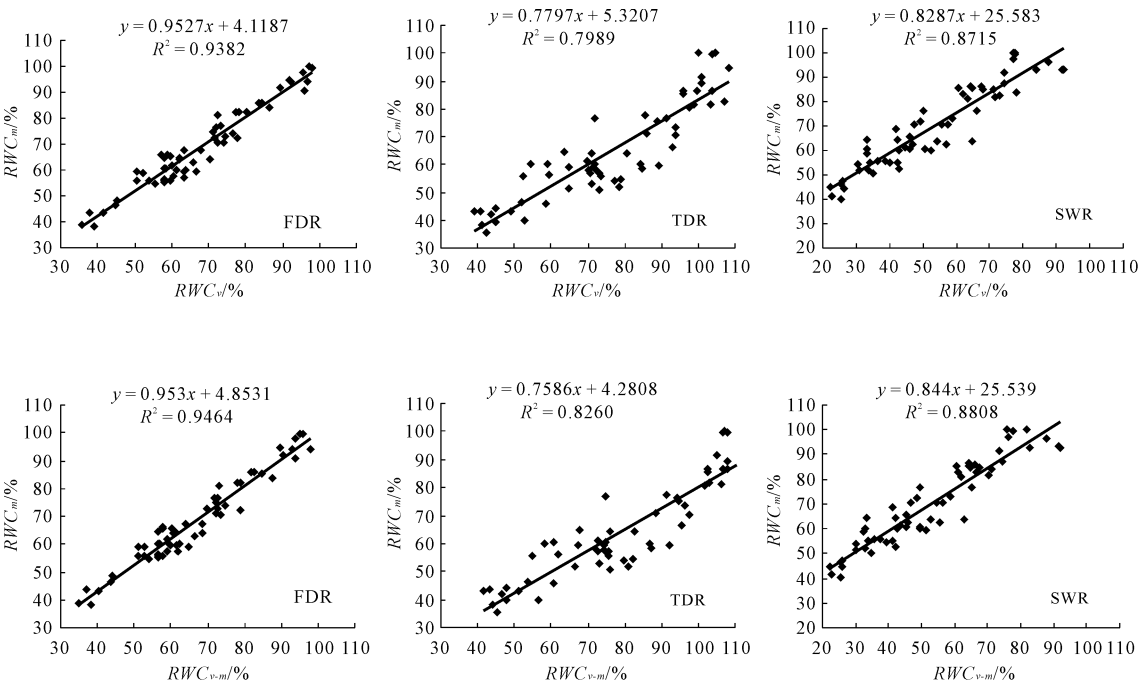


图 2 冬小麦全生育期的 RWC_v 和 RWC_{v-m} 与 RWC_m 相关性分析

Fig.2 Correlation analysis of RWC_v , RWC_{v-m} and RWC_m in whole growing season of winter wheat

3 讨 论

研究表明,SWR 法传感器与 TDR 法传感器在测量性能上无显著差异^[19],室内条件下 TDR 法和 FDR 法分别与烘干法拟合,模型拟合优度均大于 0.97^[20]。苏都等^[21]用荒漠草原的淡栗钙土进行 TDR 法的室内标定,测定值与烘干法测定值模型拟合优度达到 0.9860,而实地标定测定值与烘干法测定值模型拟合优度仅为 0.7743,说明实地进行测定时当地土壤成分、理化性质和电导率等各种因素对水分测试仪器测量准确度的影响是不容忽视的。本试验在土壤容重为 1.51 ~ 1.66 g·cm⁻³的粉壤土田间条件下,于冬小麦生长的各关键生育时期用厂家标定过的仪器进行田间土壤含水量的测定,FDR 法测得的 WC_{v-m} 值与烘干法测得的 WC_m 值模型拟合优度达到 0.9417,高于 TDR 法和 SWR 法。

周凌云等^[22]研究表明,TDR 法在测定粘壤土含水量时,准确性会随着温度变化而变化,在低温条件下误差小,在高温条件下误差大。李元寿等^[23]用 FDR 法测量高寒草地土壤水分含量,测定值与烘干法测定值模型拟合优度不到 0.80。还有研究表明,当土壤含水量较小时,TDR 法测定值与烘干法测定值比较接近;随土壤含水量增加,TDR 法测定值与烘干法测定值的差距逐渐变大^[14]。本试验结果表明,TDR 法的 WC_{v-m} 值与 WC_m 值的相对误差与相应土

层土壤温度呈极显著正相关,在冬小麦播种期、开花期和成熟期较高,在越冬前和拔节期较低;SWR 法的 WC_{v-m} 值与 WC_m 值的相对误差与相应土层土壤含水量呈极显著负相关,在土壤含水量较高的条件下测量的准确度较高。本试验条件下,FDR 法在冬小麦生育期内测量的准确性受土壤温度和水分的影响较小,准确度和稳定性均较高。

前人测墒补灌多采用传统方法测得的土壤质量含水量和田间持水量计算灌水量^[6,8]。本试验直接利用 FDR、TDR 和 SWR 仪器法测定的 WC_v 和 FC_v 值计算灌水量。FDR 法各测墒深度处理的越冬前灌水量和总灌水量与烘干法对应测墒深度处理的无显著差异,其产量、产量构成因素及水分利用效率与烘干法对应测墒深度处理的亦无显著差异。而 TDR 法和 SWR 法各测墒深度处理的越冬前灌水量和总灌水量分别低于和高于烘干法对应测墒深度处理的值,这与 TDR 法测得的 RWC_v 在各生育时期均显著高于 RWC_m ,而 SWR 法测得的 RWC_v 在各生育时期均显著低于 RWC_m 有关,也是导致 TDR 法各测墒深度处理的平均产量和 SWR 法各测墒深度处理的平均水分利用效率较低的原因。

4 结 论

在土壤容重为 1.51 ~ 1.66 g·cm⁻³的粉壤土田间条件下,采用 FDR 法和 SWR 法便携式水分测试

仪在田间测定计算出的 FC_{v-m} 值与传统方法测得

2.6% 范围内。在冬小麦生育期内, FDR 法便携式水

的土壤田间持水量之间的相对误差在 0.4% ~

分测试仪对土壤含水量的测量值及由此计算出的土

表 5 不同生育时期 RWC_v 和 RWC_{v-m} 与 RWC_m 之间的差异

Table 5 Difference between RWC_v , RWC_{v-m} and RWC_m in different growing stage

生育时期 Growing stage	测墒方法 Soil moisture measuring method	项目 Items	样本数 Sample number	平均值 Mean /%	差异范围 Difference range	极差 Range	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variance	与 RWC_m 的 相对误差/% Relative error compared to RWC_m
播种期 Sowing	FDR	RWC_v	9	68.4c ¹⁾	62.1 ~ 72.6	10.5	5.5	8.1	3.3l ²⁾
		RWC_{v-m}	9	67.6c	60.8 ~ 73.4	12.6	6.3	9.4	2.1l
		RWC_m	9	66.2c	64.1 ~ 70.4	6.3	3.6	5.5	—
	TDR	RWC_v	9	81.8b	71.2 ~ 93.7	22.5	11.3	13.9	23.6efg
		RWC_{v-m}	9	85.5a	76.1 ~ 97.5	21.4	11.0	12.8	29.2bc
		RWC_m	9	66.2c	64.1 ~ 70.4	6.3	3.6	5.5	—
	SWR	RWC_v	9	48.1d	42.5 ~ 54.2	11.8	34.8	5.9	27.3bcde
		RWC_{v-m}	9	47.3d	42.4 ~ 52.9	10.6	28.2	5.3	28.5bcd
		RWC_m	9	66.2c	64.1 ~ 70.4	6.3	13.0	3.6	—
越冬前 Before winter	FDR	RWC_v	18	82.3de	62.3 ~ 98.2	35.9	12.0	14.5	1.2l
		RWC_{v-m}	18	81.3e	60.9 ~ 96.1	35.1	12.1	14.9	2.4l
		RWC_m	18	83.3de	60.4 ~ 99.8	35.1	12.8	15.3	—
	TDR	RWC_v	18	93.9b	63.5 ~ 108.3	44.8	13.8	14.7	9.6k
		RWC_{v-m}	18	98.3a	67.9 ~ 112.8	44.9	14.6	14.8	14.7j
		RWC_m	18	85.7cd	64.6 ~ 100.0	35.3	13.2	15.4	—
	SWR	RWC_v	18	71.5f	33.4 ~ 87.8	54.4	15.3	22.0	18.1hij
		RWC_{v-m}	18	69.7f	33.3 ~ 67.7	54.5	15.3	22.6	20.2ghi
		RWC_m	18	87.3c	64.6 ~ 87.3	35.3	12.1	13.8	—
拔节期 Jointing	FDR	RWC_v	18	70.9c	35.9 ~ 96.8	41.4	15.4	21.8	0.1l
		RWC_{v-m}	18	69.9c	35.5 ~ 97.8	43.9	15.8	22.6	1.5l
		RWC_m	18	71.0c	38.9 ~ 94.7	37.1	15.0	21.2	—
	TDR	RWC_v	18	76.9b	39.0 ~ 103.7	44.6	15.2	19.8	16.5ij
		RWC_{v-m}	18	80.3a	41.7 ~ 108.0	47.1	16.7	20.8	21.7fgh
		RWC_m	18	66.0d	38.3 ~ 86.6	30.8	11.9	18.0	—
	SWR	RWC_v	18	53.3e	22.3 ~ 92.4	58.0	21.9	38.2	25.4cdef
		RWC_{v-m}	18	52.5e	22.3 ~ 92.2	58.4	22.0	38.9	26.5bcde
		RWC_m	18	71.4c	41.5 ~ 93.4	37.7	15.0	21.0	—
开花期 Anthesis	FDR	RWC_v	18	63.7c	38.9 ~ 78.0	20.0	7.1	11.1	3.3l
		RWC_{v-m}	18	63.3c	38.1 ~ 78.8	22.3	7.6	12.1	3.9l
		RWC_m	18	65.0c	38.4 ~ 81.0	25.2	7.6	11.5	—
	TDR	RWC_v	18	72.5b	42.5 ~ 79.1	20.6	5.3	7.3	29.7b
		RWC_{v-m}	18	75.1a	45.4 ~ 82.3	21.5	5.4	7.2	34.3a
		RWC_m	18	55.9d	35.5 ~ 60.3	9.5	3.2	5.6	—
	SWR	RWC_v	18	53.2e	25.4 ~ 67.8	27.6	10.1	19.0	23.1efg
		RWC_{v-m}	18	52.3e	25.3 ~ 67.6	28.4	10.2	19.5	24.4defg
		RWC_m	18	69.2b	40.2 ~ 86.1	31.3	12.0	17.3	—
成熟期 Maturity	FDR	RWC_v	9	75.1c	61.2 ~ 86.6	25.4	9.7	12.9	0.3l
		RWC_{v-m}	9	74.3c	59.6 ~ 87.5	27.8	10.1	13.6	0.8l
		RWC_m	9	74.9c	59.2 ~ 85.9	26.8	11.9	15.9	—
	TDR	RWC_v	9	95.8b	84.3 ~ 107.1	22.8	6.6	6.8	24.6def
		RWC_{v-m}	9	100.3a	86.8 ~ 111.5	24.6	7.6	7.6	30.4ab
		RWC_m	9	76.9c	59.5 ~ 89.1	29.6	11.6	15.1	—
	SWR	RWC_v	9	61.1d	43.0 ~ 74.5	31.5	8.6	14.0	17.8hij
		RWC_{v-m}	9	60.3d	42.0 ~ 74.3	32.3	8.8	14.6	18.8hij
		RWC_m	9	74.3c	52.6 ~ 87.2	34.6	12.5	16.8	—

表 6 不同处理对冬小麦产量和水分利用效率的影响

Table 6 Effects of different treatments on yield and water use efficiency of winter wheat.

处理代号 Treatment code	测墒方法 Soil moisture measuring method	测墒土层深度 Measuring soil depth /cm	穗数 Number of spikes /(10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1000-grain weight /g	产量 Grain yield /(kg·hm ⁻²)	水分利用效率 Water use efficiency /(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
W ₁	Drying	20	713bc ¹⁾	31.1c	40.3a	9037.7d	25.4a
W ₂		40	756a	33.4a	40.2a	9479.4a	24.5b
W ₃		60	721b	31.7bc	40.3a	9255.3bc	24.4b
平均值 Mean			730b ²⁾	32.1b	40.2a	9257.5a	24.3a
W ₄	FDR	20	728b	31.1c	40.1a	9102.0cd	25.2a
W ₅		40	756a	33.2a	40.3a	9496.4a	24.3b
W ₆		60	724b	32.3ab	40.3a	9211.8bcd	24.2b
平均值 Mean			736b	32.2b	40.2a	9270.1a	24.6a
W ₇	TDR	20	712bc	31.7bc	40.4a	9078.1cd	25.2a
W ₈		40	732b	32.4ab	40.1a	9145.5bcd	23.5c
W ₉		60	692c	31.6bc	38.7b	8543.6e	24.2b
平均值 Mean			712b	31.9b	39.7ab	8922.4b	24.3a
W ₁₀	SWR	20	776a	33.3a	40.4a	9589.7a	23.7c
W ₁₁		40	764a	32.9a	38.9b	9315.9b	20.4d
W ₁₂		60	768a	32.9a	38.7b	9212.4bcd	18.6e
平均值 Mean			769a	33.0a	39.3b	9372.7a	20.9b

注:1) 同一列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$);2)同一列不同小写字母表示不同测墒方法间差异显著($P < 0.05$)。

Note:1) Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level among different treatments; 2) Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level among the mean of different soil moisture measuring method.

壤相对含水量均表现出较高的准确度和稳定性,采用 FDR 法便携式水分测试仪测得的 FC_v 和 WC_v 值直接计算每次灌水定额进行补灌,可获得与传统烘干法测墒补灌处理一致的效果。TDR 法便携式水分测试仪测定计算出的 WC_{v-m} 值与 WC_m 值的相对误差与相应土层土壤温度呈极显著正相关;SWR 法便携式水分测试仪测定计算出的 WC_{v-m} 值与 WC_m 值的相对误差与相应土层土壤含水量呈极显著负相关。冬小麦生育期间土壤温度和含水量多变,采用 TDR 和 SWR 法便携式水分测试仪测定土壤含水量,数据的稳定性较差。

参 考 文 献:

[1] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2013:449,453.

[2] Zhang Xiyong, Chen Suying, Sun Hongyong, et al. Water use efficiency and associated traits in winter wheat cultivars in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2010,97(8):1117-1125.

[3] Fang Q X, Ma L, Green T R, et al. Water resources and water use efficiency in the North China Plain: Current status and agronomic management options[J]. Agricultural Water Management, 2010,97(8):1102-1116.

[4] Dong Baodi, Shi Lei, Shi Changhai, et al. Grain yield and water use

efficiency of two types of winter wheat cultivars under different water regimes[J]. Agricultural Water Management, 2011,99(1):103-110.

[5] Guo Shengli, Zhu Hanhua, Dang Tinghui, et al. Winter wheat grain yield associated with precipitation distribution under long-term nitrogen fertilization in the semiarid Loess Plateau in China[J]. Geoderma, 2012,189-190:442-450.

[6] Wang Dong, Yu Zhenwen, White P J. The effect of supplemental irrigation after jointing on leaf senescence and grain filling in wheat[J]. Field Crops Research, 2013,151:35-44.

[7] 山 仑,康绍忠,吴普特.中国节水农业[M].北京:中国农业出版社,2004:229-230.

[8] 韩占江,于振文,王 东,等.测墒补灌对冬小麦干物质积累与分配及水分利用效率的影响[J].作物学报,2010,36(3):457-465.

[9] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000:289-290,269-271.

[10] 吕贻国,李保国.土壤学实验[M].北京:中国农业出版社,2010:62-64.

[11] 徐学义,崔兆韵,黄 华,等.FDR 与烘干法测定土壤水分对比分析[J].山东农业大学学报(自然科学版),2013,44(2):190-192.

[12] Quinones H, Ruelle P, Nemeth I. Comparison of three calibration procedures for TDR soil moisture sensors[J]. Irrigation and Drainage, 2003,52(3):203-217.

指标为目标得出的结果相比施肥量相似,但灌水量要高 $100 \sim 500 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,而比虞娜^[22]以产量为目标得出的结果最佳施肥量 $337.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 低。这一方面可能与考虑的目标因素不同,另一方面可能与试验地的养分条件、气候状况不同有关,但相差不大。本试验对品质进行了综合评价,且结合了产量与品质综合得分两个因素得出最优的灌水施肥量,所以对滴灌条件下番茄生产的水肥用量有一定指导意义。

参 考 文 献:

[1] 袁洪波,王海华,庞树杰,等.日光温室封闭式栽培系统的设计与试验[J].农业工程学报,2013,29(21):159-165.

[2] 张乐森,王振华,孟凡山,等.保护地大葱水肥一体化滴灌施肥应用研究[J].节水灌溉,2013,(11):17-20,24.

[3] 陈修斌,潘林,王勤礼,等.温室番茄水肥耦合数学模型及其优化方案研究[J].南京农业大学学报,2006,29(3):138-141.

[4] 丁果.温室蔬菜滴灌灌溉施肥水肥耦合效应的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2005.

[5] 徐心诚.主成分分析法对番茄品种耐弱光性的综合评价[J].中国农学通报,2012,28(4):135-140.

[6] 张文娥,王飞,潘学军.应用隶属函数法综合评价葡萄种间抗寒性[J].果树学报,2007,24(6):849-853.

[7] 陈义强,刘国顺,习红昂.基于烟叶品质指数的氮、磷、钾施肥模型[J].植物营养与肥料学报,2013,19(3):632-643.

[8] 刘振虎,卢欣石,葛军.利用层次分析法综合评价 9 个草坪品种的耐盐性[J].草地学报,2002,10(3):207-11,216.

[9] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006.

[10] 马庆华,李永红,梁丽松,等.冬枣优良单株果实品质的因子分析与综合评价[J].中国农业科学,2010,43(12):2491-2499.

[11] 李世娟,周殿玺,李建民.限水灌溉下不同氮肥用量对小麦产量及氮素分配利用的影响[J].华北农学报,2001,16(3):86-91.

[12] 饶碧玉,罗绍芹,吴占景,等.水肥耦合对当归产量和品质的影响效应研究[J].中国农学通报,2012,28(34):274-278.

[13] 李冬梅,魏珉,张海森,等.氮、磷、钾用量和对比对温室黄瓜叶片相关代谢酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(3):382-387.

[14] Mahgoub G, Khedr E, Amer S, et al. Effect of Adenosine Triphosphate (ATP) and Nicotinamide Adenine Dinucleotide (NAD) on maize grain yield and NPK uptake in grains[J]. Annals of Agricultural Science, Moshtohor,1991,29(2):631-644.

[15] Hebbar S, Ramachandrappa B, Nanjappa H, et al. Studies on NPK drip fertigation in field grown tomato[J]. European Journal of Agronomy, 2004,21(1):117-127.

[16] 田丰,张永成,张凤军,等.不同肥料和密度对马铃薯光合特性和产量的影响[J].西北农业学报,2010,19(6):95-98.

[17] 孙文涛,张玉龙,王思林,等.滴灌条件下水肥耦合对温室番茄产量效应的研究[J].土壤通报,2005,36(2):202-205.

[18] 虞娜,张玉龙,黄毅,等.温室滴灌施肥条件下水肥耦合对番茄产量影响的研究[J].土壤通报,2003,34(3):179-183.

[19] 王海艺,韩烈保,黄明勇.干旱条件下水肥耦合作用机理和效应[J].中国农学通报,2006,22(6):124-128.

[20] 赵立新,荆家海,王韶唐.旱地冬小麦施肥效应研究[J].干旱地区农业研究,1991,(4):46-52.

[21] 陈碧华,邵庆炉,孙丽.番茄日光温室膜下滴灌水肥耦合效应研究[J].核农学报,2009,23(6):1082-1086.

[22] 虞娜,张玉龙,张玉玲,等.灌溉和施肥对温室番茄产量和品质影响效应的研究[J].中国土壤与肥料,2009,(4):31-35.

(上接第 9 页)

[13] 赵燕东,王一鸣.基于驻波率原理的土壤水分传感器的测量敏感度分析[J].农业工程学报,2002,18(2):5-8.

[14] 伍永秋,刘宝元,Erik van den Elsen,等.黄土高原土壤水分的自动监测——TDR 系统及其应用[J].水土保持学报,2001,15(2):108-111.

[15] 宋文,张玉龙,韩巍,等.渗灌灌水定额对温室黄瓜产量和水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2010,26(8):61-66.

[16] Lv Lihua, Wang Huijun, Jia Xiuling, et al. Analysis on water requirement and water - saving amount of wheat and corn in typical regions of the North China Plain[J]. Frontiers of Agriculture in China, 2011,5(4):556-562.

[17] Chattaraj Sudipta, Chakraborty Debashis, Garg R N, et al. Hyper-spectral remote sensing for growth-stage-specific water use in wheat [J]. Field Crops Research, 2013,144:179-191.

[18] Wang Jun, Liu Wenzhao, Dang Tinghui. Responses of soil water balance and precipitation storage efficiency to increased fertilizer application in winter wheat[J]. Plant and Soil, 2011,347(1-2):41-51.

[19] 赵燕东,王一鸣.基于驻波率原理的土壤含水率测量方法[J].农业机械学报,2002,33(4):109-111,121.

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

[21] 苏都,红梅,陈有君,等.TDR 测定淡栗钙土水分的标定[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2012,33(1):88-92.

[22] 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,2003,40(1):59-64.

[23] 李元寿,王根绪,程玉菲,等.FDR 在高寒草地土壤水分测量中的标定及其应用[J].干旱区地理,2006,29(4):543-547.