

春小麦垄作沟灌灌水质量评价指标的改进与应用

张新民¹,孙克翠²,高雅玉¹,赵 恩³

(1.甘肃省水土保持科学研究所,甘肃 兰州 730020;2.甘肃农业大学工学院,甘肃 兰州 730070;

3.河海大学设计研究院有限公司,江苏 南京 210098)

摘要:根据垄作沟灌水分入渗特点和灌水效果,对传统地面灌水质量评价指标体系进行了改进,建立了以灌水均匀度、储水率与田间灌溉水利用率、垄体湿润度4个指标组成的灌水质量评价指标体系,从减少测量工作量与便于实际应用的角度,对指标计算方法进行了简化,利用现场实例试验测定的灌水效果对该指标体系及简化算法进行验证,指标体系科学合理,计算简单可行。

关键词:垄作沟灌;灌水质量;评价指标;改进

中图分类号: S275.3 **文献标志码:** A

Improvement and utilization of irrigation quality evaluation indexes of ridge tillage using furrow irrigation of spring wheat in the arid region

ZHANG Xin-min¹, SUN Ke-cui², GAO Ya-yu¹

(1. Gansu Research Institute for Soil and Water Conservation, Lanzhou, Gansu 730020, China;

2. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730030, China;

3. Hohai University Design & Research Institute Co., Ltd. Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: According to water infiltration characteristics and irrigation effect of ridge tillage using furrow irrigation, the evaluation indexes of irrigation quality of traditional surface irrigation was improved, an index system including irrigation uniformity, water storage rate and irrigation water use efficiency, the ridged body wetting degree was established for irrigation quality evaluation of this irrigation techniques. To reduce measuring work and facilitate the practical application, the index calculation method was simplified. This evaluation index system is scientific and reasonable, and its simplified calculation method is simple and feasible verified by using water content data measured in field of the case study.

Keywords: ridge tillage using furrow irrigation; irrigation quality; the evaluation index; improvement

小麦垄作栽培技术将传统平作的平面型田面改为波浪型,扩大了土壤表面积,光能利用率提高,有利于延缓植株衰老,延长叶片功能期,增加了植株抗倒伏能力,小麦抗病性能增强,产量显著提高^[1-2]。平作改为垄作后,田间灌溉方式由畦灌改为沟灌,灌水定额减少,提高了降水和灌溉水利用率。据山东省青州试验点调查,传统平作畦灌灌水定额 $900 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,而垄作沟灌灌水定额 $540 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,比平作减少40%。目前,小麦垄作技术的应用主要局限在冬小麦区,研究工作集中于垄作小麦的节水效应、田间小气候的变化及其对小麦生理生态效应的影响。

垄作沟灌技术采取垄上种植,沟灌灌溉方式,

由于小麦自身生长所需土壤水分由灌水沟内的水分向垄体侧渗供给,因此,在同等肥力和灌水量条件下,垄作栽培的效果与垄的宽度、垄的方向、小麦种植密度以及灌水质量密切相关。沟灌入渗属二维入渗,灌溉水沿灌水沟推进的同时,受重力及土壤基质吸力作用,沿灌水沟断面以纵向下渗和横向入渗浸润土壤。在水分入渗过程中各点毛管吸力和重力作用不是直线关系,因此入渗水量与入渗面不成比例,而且由于沟中水深随时间和空间不断变化,导致入渗水势梯度不同,且受到复杂的沟断面几何形状、土壤初始含水量、土壤容重、土壤特性参数变化的影响,使得沟灌的入渗过程极其复杂,入

收稿日期:2017-04-11

修回日期:2018-03-06

基金项目:国家自然科学基金项目“干旱区春小麦垄作沟灌技术参数研究”(51169002)

作者简介:张新民(1965—),男,甘肃庆阳人,正高级工程师,博士,硕士生导师,主要从事农业水资源利用研究。E-mail: xzmzhgs@aliyun.com。

渗水量难以测定,灌水质量评价难度增加。目前地面灌溉灌水质量评价的指标主要有田间灌水有效利用率、储水效率、灌水均匀度,依据这三项指标可评价灌水质量,确定灌水技术要素优化组合。在这方面有关畦灌与中耕作物沟灌技术的研究成果较多^[3-5],理论相对成熟。但由于垄作栽培小麦的垄面宽度远大于玉米,且采用非均一行距种植(目前采用同一垄上 15~25 cm,不同垄 75 cm),因此已有的地面灌溉灌水质量评价方法不能全面反映小麦垄作沟灌技术的灌水质量。李方红等^[3]研究了膜孔沟灌主要灌水技术要素组合对灌水质量评价指标影响,采用的评价指标亦为灌水有效利用率和灌水均匀度,其中指标计算中只考虑沟的入渗水深。聂卫波等^[4]采用模拟与试验对照的方法,研究了不同土壤对沟灌灌水质量指标影响,采用灌水效率、灌水均匀度和储水效率作为评价指标,指标计算中计划湿润层采用 1 m,入渗深度仍采用沟中土壤含水量计算。以上两项成果采用的是传统地面灌水质量评价指标,不能充分反映垄体、垄沟含水量的横向差异。汪顺生等^[5]研究了常规沟灌和小麦、玉米一体化垄作沟灌对灌水质量及夏玉米产量的影响,采用的灌水质量评价指标为田间灌溉水的利用率和田间灌水的均匀度,其中灌溉水利用率计算中采用垄体、垄坡、垄面平均含水量。孙克翠等^[13-14]研究了干旱区春小麦垄作沟灌的灌水质量,把灌水均匀度分为纵向和横向,灌水效率和储水率也充分考虑了垄面、垄坡和垄沟的不同。这两项研究涉及到了小麦垄作沟灌灌水质量评价指标等问题,但指标体系仍受传统地面灌溉评价思路的限制,导致计算复杂,测量工作量大。本文试图以地面灌溉灌水质量评价指标体系为基础,结合小麦垄作沟灌的特点,提出改进全面反映小麦垄作沟灌灌水质量的评价指标。

1 灌水质量评价指标改进

1.1 地面灌灌水质量评价指标

目前,畦灌、沟灌等地面灌灌水质量的评价指标有灌水均匀度、储水率(灌溉水供需比)与田间灌溉水利用系数。一次灌水完成后,土壤中入渗水分的纵向剖面如图 1 所示。

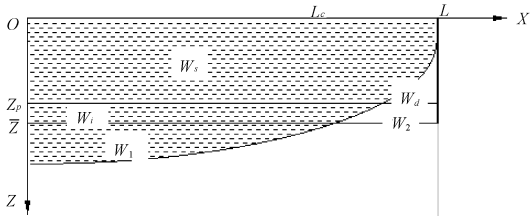


图 1 地面灌灌水有效性分析图
Fig.1 Effectiveness analysis diagram for irrigation water of surface irrigation

图 1 中, W_1 为湿润深度超过平均湿润深度部分的水量(cm^2); W_2 为湿润深度小于平均湿润深度部分的欠水量(cm^2); W_s 为计划湿润层灌水量(cm^2); W_i 为超灌水量(cm^2),将田间总灌水量、计划湿润层需水量用 $W_f(\text{cm}^2)$ 、 $W_n(\text{cm}^2)$ 表示。 Z_p 为计划灌水深度(cm); $\bar{Z}$ 为平均灌水深度(cm); W_d 为欠灌水量。

上述水量与水深存在如下关系:

$$\begin{aligned} W_f &\geq W_n; W_f = W_s + W_i; W_n = W_s + W_d \\ W_i &\geq W_1; W_2 \geq W_d; W_1 = W_2 \\ \bar{Z} &\geq Z_p \end{aligned}$$

三个灌溉质量评价指标灌水均匀度、储水率(灌溉水供需比)与田间灌溉水利用系数 E_u 、 E_d 、 E_s 计算公式为:

$$E_u = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |Z_i - \bar{Z}|}{N\bar{Z}} \tag{1}$$

式中, Z_i 为第 i 个计算点的入渗水深(cm); $\bar{Z}$ 为各计算入渗水深的平均值(cm); N 为入渗水深计算点个数。

$$E_d = \frac{W_s}{W_f} \tag{2}$$

$$E_s = \frac{W_s}{W_n} = \frac{W_s}{W_s + W_d} \tag{3}$$

1.2 垄作沟灌灌水质量评价指标改进

对于畦灌,上述评价指标的大小主要决定于灌水技术要素;对于沟灌还受垄沟参数的影响。如果垄宽较大且种植宽行作物,可认为是局部灌溉,上述均匀度可只指纵向均匀度,计算点取沿沟方向,但灌溉水利用率与储水率计算要考虑湿润系数;如垄宽较小时,入渗过程很快从二维转变为一维入渗,灌水质量评价指标计算与畦灌完全相同,湿润系数为 1。但对于小麦垄作沟灌,情况介于二者之间,灌水质量评价可采用类似于畦灌的方法,但评价指标计算应考虑垄上、沟坡与沟中的入渗水深的差别。现以单沟模拟试验为例,说明 E_u 、 E_d 、 E_s 三个指标的计算。室内模型模拟单沟灌水入渗试验,一次灌水完成后的剖面土壤水分布见图 2,24 h 再分布后剖面水分分布见图 3。

由图 2、图 3 可以看出,灌水后垄作沟灌的垄上、垄坡与沟中各点入渗水深完全不同,再分布后趋于均匀,但垄上、垄坡与沟中含水量分布还是有一定差别,严密计算灌水质量评价指标应考虑横向入渗的不均匀性。即:

$$E_u = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |Z'_{d,i} - \bar{Z}| + \sum_{i=1}^N |Z'_{s,i} - \bar{Z}| + \sum_{i=1}^N |Z'_{f,i} - \bar{Z}|}{3N\bar{Z}} \quad (4)$$

式中, E_u 为灌水均匀度; $Z'_{d,i}$ 、 $Z'_{s,i}$ 、 $Z'_{f,i}$ 分别为沟中、沟坡、垄中第 i 个计算点的入渗水深 (cm); $\bar{Z}$ 为各计算入渗水深的平均值 (cm); N 为纵向入渗水深计算点个数。

田间灌溉水利用率 E_d 、储水率 E_s 的计算较为复杂, 需先根据灌水沟的形状计算计划湿润层储水量, 然后再分别计算田间灌溉水利用率 E_d 、储水率 E_s 。第 i 个计算点计划湿润层储水量为:

$$w_{s,i} = bZ_{d,i} + (B - b)Z_{s,i} + RZ_{f,i} \quad (5)$$

$$E_d = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{w_{s,i}}{Nw_f}}{\quad} \quad (6)$$

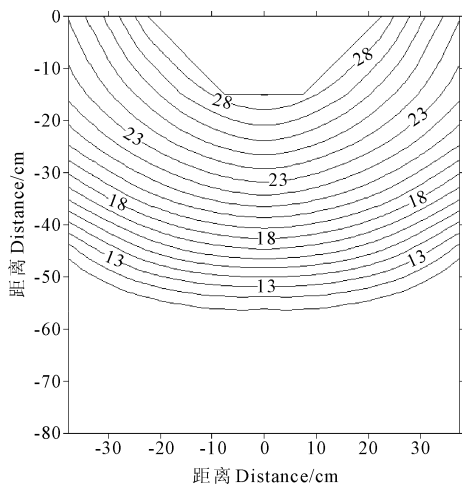


图2 灌水后土壤水分等值线

Fig.2 The contour map after irrigation

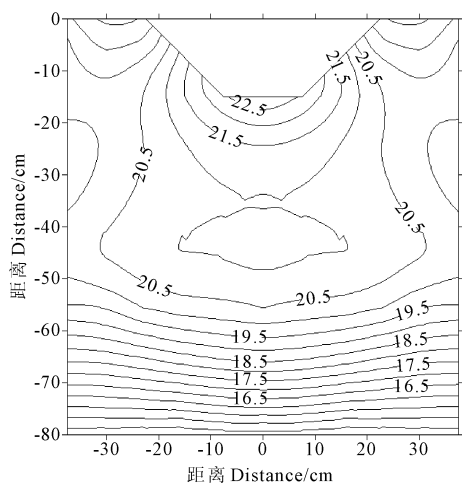


图3 灌溉水再分布后土壤水分等值线

Fig.3 The contour map after irrigation water redistribution

$$E_s = \sum_{i=1}^N \frac{w_{s,i}}{Nw_n} \quad (7)$$

式中, B 、 b 分别为灌水沟口宽与底宽 (cm); R 为垄宽 (cm); $Z_{d,i}$ 、 $Z_{s,i}$ 、 $Z_{f,i}$ 分别为沟中、沟坡、垄中第 i 个计算点的计划湿润层内入渗水深 (cm); $w_{s,i}$ 为第 i 个计算点单位沟长计划湿润层灌水量 (cm^2); w_f 为单位沟长田间灌水量 (cm^2); w_n 为单位沟长计划湿润层需水量 (cm^2); 其它符号意义同前。

对某次灌水而言, 计划湿润层需水量由下述公式确定:

$$w_n = \gamma(\beta_{\max} - \beta_{\min})A_d \quad (8)$$

$$A_d = b(H_p - h) + (B - b)(H_p - h/2) + RH_p \quad (9)$$

式中, γ 为计划湿润层内土壤干容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); $\beta_{\max}$ 、 $\beta_{\min}$ 分别为该时段允许土壤最大与最小含水量 (%); A_d 为单一灌水沟计划湿润层内断面面积 (cm^2); h 为灌水沟深 (cm); 其它符号意义同前。

如果按上式计算, 不但计算较为复杂, 测量工作量大。为了简化计算, 可先根据沟、垄、坡入渗量计算观测点单位长度灌水沟的总入渗量, 再计算单一沟纵向均匀度。但对于整个田块, 可在不同沟上布置计算点, 计算各点总入渗水量, 再按公式计算得到田块均匀度。这时需增加反映灌溉水横向扩散的指标, 由于传统沟灌定额制定中使用的湿润系数是一个综合指标, 即包含反映灌水沟占耕作层体积的比例, 也有反映计划湿润层充分湿润程度的因素, 所以不能准确反映垄体的湿润程度, 考虑到垄作沟灌在垄上种植作物, 所以选择反映垄体灌溉需水满足程度的指标——垄体湿润度。

2 灌水质量评价指标简化计算

对以上垄作沟灌灌水质量评价指标进行如下简化, 以便在测得沟灌入渗模型情况下, 可进行计算评价灌水质量。灌水后均匀度只考虑纵向, 则式(4)变为:

$$E_u = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |w'_i - \bar{w}'|}{N\bar{w}'} \quad (10)$$

式中, w'_i 为第 i 个计算点单位沟长的入渗总水量 (cm^2); $\bar{w}'$ 为各计算点入渗水量平均值 (cm^2); 其它符号意义同前。

$$w'_i = zw_i x_i \quad (11)$$

式中, zw_i 为第 i 个计算点单位湿周入渗水深 (cm), 可利用现场实测单位湿周入渗模型根据入渗时间求得; x_i 为该计算点过水过程的平均湿周 (cm)。

计算点单位沟长的入渗总水量也可通过垄沟、

垄面两点的入渗水深简化计算,即:

$$w'_i = (b + mh)Z'_{d,i} + (R + mh)Z'_{f,i} \quad (12)$$

式中, m 为灌水沟边坡系数;其实验室符号意义同前。

近似认为沟的入渗水深等于单位湿周入渗水深 zw_i ,则可由上式计算出垄的入渗水深 $z'_{f,i}$,由于灌水质量评价时储水率与灌水效率计算需求出计划湿润层入渗水深,因此还需对计划湿润层入渗水深进行推求。

利用沟入渗水深计算出沟湿润土层深度为:

$$D_{d,i} = \frac{z'_{d,i}}{\gamma(\theta_f - \theta_{o,d})} \quad (13)$$

式中, $D_{d,i}$ 为第 i 个计算点沟部位灌溉湿润土层深 (cm)、 $\theta_{o,d}$ 分别为沟部位田间持水量和灌水前平均含水量 (%);其它符号意义同前。

沟部位计划湿润层灌水深为:

$$Z_{d,i} = \gamma(H_p - h)(\theta_f - \theta_{o,f}) = \frac{H_p - h}{D_{d,i}}ZW_i \quad (14)$$

垄体部位计划湿润层内灌水深为:

$$Z_{f,i} = \frac{H_p}{D_{d,i} + h}Z'_{f,i} \quad (15)$$

垄体部位湿润度:

$$\rho_i = \frac{Z_{f,i}}{\gamma H_p(\theta_f - \theta_{o,f})} \quad (16)$$

式中, ρ_i 为第 i 计算点垄体灌溉湿润度 (%); θ_f 、 $\theta_{o,f}$ 为垄体部位灌水前平均含水量 (%);其它符号意义同前。

田间灌溉水利用率 E_d 、储水率 E_s 的计算也进行简化,计算点计划湿润层储水量可按沟和垄两点平均入渗水深计算,式(5) 简化为式(17),其它计算式同前。

$$w_{s,i} = (b + mh)Z_{d,i} + (R + mh)Z_{f,i} \quad (17)$$

3 灌水质量试验

3.1 试验方案

灌水质量试验在甘肃省水利科学研究院民勤节水农业生态建设试验示范基地进行。试验区土壤为砂质粘壤土,0~60 cm 土层土壤平均干容重为

1.46 g · cm⁻³,田间持水量 22.27%,速效钾 177 mg · kg⁻¹,速效磷 74 mg · kg⁻¹,有机质 13%,液态氮含量 12 mg · kg⁻¹。灌溉水源为地下水,埋深 18~25 m 之间^[15]。根据文献[7]、[10~12]等前期研究成果选择垄沟参数(垄坡、垄宽、沟深、沟宽)与灌水技术参数(沟长、沟坡、入沟流量),组成灌水质量试验方案见表 1。

该方案包括 5 个不同垄沟参数与灌水技术参数处理,每个处理 3 个重复,共 15 个试验小区。每一试验小区布置 3 条沟,中间为试验沟,两边为保护沟。试验采用统一沟型,沟底宽 15 cm,沟深 15 cm,沟坡为 1 : 1。试验采用人工开沟起垄,机械播种。2013 年收割完成后灌入冬水,春天统一用翻耕机进行深翻,机器整平后去除杂物,整理试验地为起垄播种做好准备。2014 年 3 月下旬进行播种,起垄、播种、整形、镇压一次完成。供试春小麦品种为永良 4 号,播种量 1 050 kg · hm⁻²,垄上种植,行距 10 cm。垄宽 40 cm,种植 3 行小麦;垄宽 50 cm,种植 4 行小麦。

灌水量控制利用水表和流量控制阀结合的方法,在总阀门与入田管道出口处接水表,后接流量控制阀,根据试验方案要求调节流量控制阀,用灌水定额计算每个处理的灌水量,水表严格控制每个沟中的灌水量。全生育期灌水 5 次,灌水定额为 40 m³ · hm⁻²,时间分别为出苗分蘖期、拔节期、抽穗期、开花期、成熟期。各处理锄草、施肥、松土等田间管理措施均保持相同。试验观测项目包括土壤含水量、产量等。含水量测定采用称重法。产量测定在成熟后进行,随机在垄上收割长度为 1m 的小区单独测产,统计各小区的穗数,穗长,单穗颗粒数,样本籽粒晾晒达到标准后,除去空秕粒,采用随机选取 1 000 粒小麦籽粒,称重,3 次重复(组内差值不大于 3%)取均值为千粒重。

3.2 产量及水分利用效率

不同的垄沟参数与灌水技术参数造成土壤水分、温度和光照面积的差异,进而影响到小麦的产量及其构成因素。实测得验证试验产量及水分利用效率以及 SPSS 软件分析计算结果见表 2。

表 1 试验设计方案
Table 1 The designed experiment scheme

处理 Treatment	沟长/m Length of ditch	垄宽/cm Width of ridge	流量/(L · s ⁻¹) Irrigation discharge	田面坡度 Slope	沟型 Ditch type
T1	58	40	1.5	1/500	梯型 Trapezoid
T2	58	50	1.5	1/500	梯型 Trapezoid
T3	50	40	1.0	1/500	梯型 Trapezoid
T4	50	40	1.5	1/1000	梯型 Trapezoid
T5	50	50	1.5	1/1000	梯型 Trapezoid

表 2 不同处理模式下小麦产量和水分利用效率

Table 2 Comparison of wheat yield and water use efficiency of different treatment

处理 Treatments	穗长 Ear length /cm	亩穗数 Number of ear per 666.7m ² /10 ⁴	穗粒数 Grains per spikes	千粒数 1000-grain weight/g	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	耗水量 Water consumption /mm	水分利用效率 Water use efficiency /(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
T1	7.8c	33.35a	34.15b	47.88b	8179.60b	317.48	25.76b
T2	8.35b	29.84abc	33.99b	47.87b	7282.37c	313.55	23.23c
T3	8.88a	26.45c	41.70a	49.62ab	8207.92b	313.58	26.05b
T4	8.73a	32.96ab	36.23b	51.05a	9142.87a	315.08	29.18a
T5	8.93a	29.35bc	42.53a	48.11ab	9005.44a	314.56	28.63a

注:不同的小写字母分别表示在 0.05 水平上差异显著,下同。
Note: Different lowercase letters meant significant difference at 0.05 levels respectively. The same as below.

由表 2 可知,不同处理之间产量的差异明显,T4 处理产量最高,达到 9 142.87 kg·hm⁻²,T2 处理的产量最低,仅为 7 282.37 kg·hm⁻²。T4 处理产量较 T5 处理高出 1.5%,但差异不显著,较 T1 和 T3 处理分别高出 10.5%和 10.2%。T2 处理由于垄宽过宽、沟长较长,横向灌水均匀度较低^[4-7],因此垄体水分的不足限制了植株的生长。T5 处理的穗长与穗粒数均高于其它处理,但由于 T5 处理的亩穗数较低,因此 T5 的产量低于 T4。说明适宜的垄宽可以最大限度地发挥垄上小麦的受光条件和边行优势,有利于改善群体的通风和透光条件,提高作物产量。

不同处理模式下的水分利用效率 T4 处理最高为 29.18 kg·hm⁻²·mm⁻¹,T2 处理的最低为 23.23 kg·hm⁻²·mm⁻¹。由 T1、T2 处理和 T4、T5 处理对比分析可知:在沟长、入沟流量、坡降相同的条件下,垄宽与春小麦产量与水分利用效率呈现负增长的趋势;T5 处理的产量与水分利用效率分别较 T4 处理降低了 1.50%与 1.88%,无显著差异。

4 试验灌水质量评价

4.1 实测灌水质量指标

通过开展现场灌溉试验,对不同的垄沟参数(垄坡、垄宽、沟深、沟宽)与灌水技术参数(沟长、沟坡、入沟流量)为处理的 5 组田间试验进行灌水质量的评价,以第一次灌水的实验数据为例,用式(1)、式(2)、式(3)和式(10)采用实测土壤水分剖面分别计算灌水均匀度、田间灌溉水利用率、储水率和垄体湿润度 4 个评价指标,计算结果见表 3。

由表 3 看出,灌水均匀度 T1 处理最高为 88.9%,T4 处理为 87.8%;田间灌溉水利用率 T4 处理最高为 83.6%;储水率 T3 处理高为 83.3%;垄体湿润深度 T3 处理最高为 82.9%。综合评价各灌水质量指标,T3 处理与 T4 处理有较高的灌水质量。T4 处理较高灌水质量与表 2 中 T4 处理产量与水分

利用效率最高的结论相吻合。

4.2 简化计算灌水质量指标

对上述试验结果,采用简化式(11)、式(2)、式(3)和式(10)计算灌水均匀度、田间灌溉水利用率、储水率和垄体湿润度 4 个评价指标,各观测点的入渗总水量与沟入渗水深可通过入渗模型计算,但由于试验中未观测各测点入渗时间与沟水深,所以计算中采用实测入渗总水量与沟入渗水深计算。简化计算灌水质量评价指标见表 4。

由表 4 简化计算结果可以看出,除灌水均匀度由于纵向测点较少,导致均匀度计算结果均偏高外,其它指标简化计算结果与实测结果接近。说明研究对灌水质量评价指标所做的简化是合理的,简化计算公式可在减少实测工作量的基础上,评价垄作沟灌的灌水质量。

表 3 第一次灌水各处理的灌水质量评价指标

Table 3 Measured evaluation index of irrigation quality

处理 Treatment	灌水 均匀度 E_u /%	田间灌溉 水利用率 E_d /%	储水率 E_s /%	垄体 湿润度 ρ /%
T1	88.9	83.2	73.1	71.8
T2	85.4	80.7	79.7	77.4
T3	73.1	78.9	83.3	82.9
T4	87.8	83.6	76.2	68.9
T5	85.7	67.5	71.5	72.1

表 4 简化计算灌水质量评价指标

Table 4 Calculated evaluation index of irrigation quality

处理 Treatment	灌水 均匀度 E_u /%	田间灌溉 水利用率 E_d /%	储水率 E_s /%	垄体 湿润度 ρ /%
T1	99.0	83.2	73.1	71.6
T2	99.3	79.3	78.3	70.4
T3	73.5	77.2	81.5	81.0
T4	90.5	87.0	79.3	65.8
T5	88.6	63.3	67.0	76.6

MYB21 and MYB24 to affect jasmonate-regulated stamen development in *Arabidopsis* [J]. Plant cell, 2011, 23 (3): 1000 - 1013.

[14] Velez-Bermudez I C, Salazar-Henao J E, Fornale S, et al. A MYB/ZML complex regulates wound-induced lignin genes in maize [J]. Plant Cell, 2015,27(11):3245 - 3259

[15] Blanchette M, Tompa M. Discovery of regulatory elements by a computational method for phylogenetic footprinting [J]. Genome Res, 2002,12(5):739 - 748.

[16] Huang W L, Tung C W, Huang H L, et al. ProLoc: prediction of protein subnuclear localization using SVM with automatic selection from physicochemical composition features [J]. Biosystems, 2007,90(2):573 - 581.

[17] Crooks G E, Hon G, Chandonia J M, et al. WebLogo: a sequence logo generator [J]. Genome Res, 2004,14 (6):1188 - 1190.

[18] Du Z, Zhou X, Ling Y, et al. agriGO: a GO analysis toolkit for the agricultural community [J]. Nucleic Acid Res, 2010, 38: W64 - 70.

[19] Wang Q, Dooner H K. Remarkable variation in maize genome structure inferred from haplotype diversity at the *bz* locus [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2006,103(47):17644 - 17649.

[20] Matys V, Fricke E, Geffers R, et al. TRANSFAC® : transcriptional regulation, from patterns to profiles [J]. Nucleic Acid Res, 2003,31(1):374 - 378.

[21] Bryne J C, Valen E, Tang M H E, et al. JASPAR, the open access database of transcription factor-binding profiles: new content and tools in the 2008 update [J]. Nucleic Acid Res, 2008, 36: D102 - D106.

(上接第 43 页)

5 结 论

1) 由于垄作沟灌灌溉水是通过横向扩散作用湿润垄体,因此与畦田灌溉不同,采用灌水均匀度、灌溉水利用率、田间储水率三指标评价灌水质量不能客观反映其灌水质量,研究表明,增加垄体湿润度评价指标能更全面反映其灌水质量。

2) 实际应用中为了简化测试工作量,将沟入渗水深采用实测单位湿周入渗量代替,由此通过总入渗量推求垄体入渗深,利用公式计算储水量及灌水质量各评价指标,此方法与实测法相比具有较高精度。

参 考 文 献:

[1] 王旭清,王法宏.小麦垄作栽培技术的肥水效应及光能利用率[J].山东农业科学,2002,(4):3-5.

[2] 王旭清,王法宏,李升东,等.垄作栽培对小麦产量和品质的影响[J].山东农业科学,2003(6):15-17.

[3] 李方红,李援农,侯吉鹰.膜孔沟灌技术要素对灌水质量评价指标的影响[J].人民黄河,2007,29(8):50-51.

[4] 聂卫波,费良军,马孝义.沟灌土壤入渗参数和糙率估算及灌水技术要素组合研究[J].干旱地区农业研究,2012,30(1):

49-53.

[5] 汪顺生,王 兴,史 尚,等.不同沟灌方式下灌水质量的试验研究[J].灌溉排水学报,2013,32(6):68-71.

[6] 张新民,张吉孝,单于洋.春小麦垄作沟灌水分入渗模拟与灌水沟断面优化[J].水土保持研究,2014,21(1):137-141.

[7] 张新民,张吉孝,单于洋.考虑水分再分布的沟灌水分入渗模拟与春小麦垄作沟灌合理垄宽[J].干旱地区农业研究,2014,32(2):201-205,227.

[8] 张吉孝,张新民,单于洋,等.春小麦垄沟灌土壤水分入渗数值模拟[J].干旱区资源与环境,2014,28(6):165-170.

[9] 张吉孝.干旱区春小麦垄作沟灌入渗试验研究及数值模拟[D].兰州:甘肃农业大学,2013.

[10] 王文娟,张新民,金建新,等.干旱区春小麦垄作沟灌技术研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(2):138-143.

[11] 王文娟.干旱区春小麦垄作沟灌合理技术参数的研究[D].兰州:甘肃农业大学,2014.

[12] 金建新.干旱区沟灌水流运动和入渗模型研究及数值模拟[D].兰州:甘肃农业大学,2014.

[13] 孙克翠,张新民,金建新,等.干旱区春小麦产量对沟垄参数和灌水技术的响应[J].水土保持研究,2015,22(6):155-166.

[14] 孙克翠,张新民,金建新,等.干旱区春小麦灌水质量评价指标研究[J].干旱地区农业研究,2016,34(2):252-257.

[15] 陈丽娟,冯 起,王 昱,等.民勤绿洲地下水环境动态研究[J].干旱区资源与环境,2012,26(7):8-13.