

紫花苜蓿中心支轴式喷灌灌水均匀性试验研究

郑和祥¹, 李和平¹, 白巴特尔¹, 程满金²

(1. 中国水利水电科学研究院牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020;
2. 内蒙古自治区水利水电科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘 要: 为提高紫花苜蓿中心支轴式喷灌灌水均匀性及定量分析其主要影响因子, 在鄂尔多斯市鄂托克前旗昂素镇示范区进行了紫花苜蓿中心支轴式喷灌灌水均匀性试验, 采用基于标准差的 Wilcox – Swailes 均匀系数法计算了不同风速条件下的喷灌灌水均匀系数, 并定量化研究了喷灌对漂移损失、冠层截留损失、漂移和冠层截留总损失以及土壤含水率的影响。结果表明: 风速对喷灌灌水均匀系数影响显著, 平均风速为 2.57 m·s⁻¹ 和 1.53 m·s⁻¹ 时均匀系数分别达到 0.88 和 0.92, 说明喷灌均匀性良好, 平均风速为 3.34 m·s⁻¹ 时均匀系数为 0.72, 喷灌均匀性较差; 研究区喷灌灌水定额 40 mm 时最大土壤入渗深度为 80 cm, 灌水后 0~40 cm 土层土壤含水率的提高非常显著, 新增灌水量在该土层的分配占 85.0%~95.0%; 风速对喷灌漂移损失影响显著, 随着风速的增大漂移损失率明显提高; 风速对冠层截留损失影响不如对漂移损失的影响显著, 较大风速时冠层截留损失率反而较低; 即使在风速较低时 (1.53 m·s⁻¹) 紫花苜蓿分枝期喷灌漂移和冠层截留总损失率也在 11.0%~15.0%, 损失较大。

关键词: 喷灌; 均匀系数; 漂移损失; 冠层截留; 紫花苜蓿
中图分类号: S274.3; S541+.1 **文献标志码:** A

Experimental research of uniformity in center pivot
sprinkler irrigation of alfalfa

ZHENG He-xiang¹, LI He-ping¹, BAI Bateer¹, CHENG Man-jin²

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area of China Institute of Water Resources and
Hydropower Research, Huhhot 010020, China;
2. Hydraulic Conservancy Science Institute in Inner Mongolia Huhhot, 010020, China)

Abstract: In order to increase the uniformity in center pivot sprinkler irrigation of alfalfa and quantatively analyze the main influence factors, carried out the uniformity experiment of center pivot sprinkler irrigation of alfalfa in demonstration area of Angsu Town of Etuohe Banner of Erdos City. Using standard Wilcox – Swailes coefficient method calculated the uniformity coefficients of sprinkler irrigation under different wind condition, and quantatively researched the influence of sprinkler irrigation to drift losses, the canopy interception losses, total losses of drift and canopy interception and soil water content. The results showed that: The wind speed will be significant influence to uniformity coefficient of sprinkler irrigation. When the average wind speed was 2.57 m·s⁻¹ and 1.53 m·s⁻¹, the uniformity coefficients of sprinkler irrigation were 0.88 and 0.92 respectively, it explained good uniformity of sprinkler irrigation. When the average wind speed was 3.34 m·s⁻¹, the uniformity coefficients of sprinkler irrigation was 0.72, the uniformity was poor. When the sprinkler irrigation quota was 40 mm in research area, the maximal soil infiltration depth was 80 cm. After irrigation the soil water content in 0 to 40 cm depth was significantly increased, the water distribution in this soil layer by new added irrigation volume was accounted for 85% to 95%. The wind speed will be significantly affectetd the drift losses of sprinkler irrigation. The drift loss rate will be significantly increased with wind speed increasing. The impac of wind speed to canopy interception losses was poor than the drift losses, On the contrary the canopy interception loss rate will be lower when the larger wind speed. Even if when the wind speed was rather lower (1.53 m·s⁻¹), the total losses rate of drift and canopy interception of sprinkler irrigation was 11.0% to 15.0% in Alfalfa branching stage, the losses was too much.

收稿日期: 2015-11-24
基金项目: 水利部科技推广计划项目 (TG1202 和 TG1401); 内蒙古自治区新增“四个千万亩”节水灌溉工程科技支撑项目 (20121036)
作者简介: 郑和祥 (1980—), 男, 山东菏泽人, 博士, 高级工程师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: zhenghexiang.29@163.com。

Keywords: sprinkler irrigation; uniformity coefficients; drift losses; canopy interception; alfalfa

中心支轴式喷灌具有节水、高效、自动化程度高和适应性强等优点,近年来,在我国广大牧区的应用越来越多,其中中心支轴式喷灌紫花苜蓿已具有相当的规模。中心支轴式喷灌作为一种较为先进的灌水方式,也有其适用条件,特别是在与具体作物灌溉结合时还应进行较为深入的研究;中心支轴式喷灌作为一项系统工程,是一个完整的水循环系统,即有压水从管道喷出,在风和气温等作用下产生漂移蒸散,降落到作物冠层后一部分被截留,而后剩余的水量落到地表进入土壤再分布后供给作物^[1-2];中心支轴式喷灌灌水均匀性是评价系统性能的重要指标,也是喷灌工程设计的基本参数之一。影响中心支轴式喷灌灌水均匀度的因素较多,主要有土壤类型、土壤初始含水率、风速、作物冠层截留和土地平整状况等。如何定量测定各因素对灌水均匀性的影响程度并采取对应措施提高灌水均匀性是目前面临的难点问题。

国内外众多学者围绕喷灌灌水均匀性进行了大量的相关研究,取得了许多重要的成果。韩启彪等^[2]开展了喷灌均匀系数现状及发展趋势研究,提出了以作物需求为出发点,通过试验和模拟等进一步研究喷灌土壤水分均匀系数及其对作物产量的影响;韩文霆等^[3]开展了喷灌水量分布均匀性评价指标比较及进展研究,提出了喷灌各类型均匀系数互有联系,但评价的侧重点各不相同,应根据评价和研究目的的不同选用相应的均匀系数对均匀性进行综合评价;王勇等^[4]进行了喷灌条件下玉米地土壤水分动态与水分利用效率研究,得出了喷灌区土壤含水率在玉米全生育期内变化情况;李久生等^[5]开展了喷灌施肥灌溉均匀性对土壤硝态氮空间分布影响的田间试验研究;黄修桥等^[6]进行了有风条件下喷灌系统组合均匀度的计算理论与方法研究,提出了一种计算有风条件下喷灌系统组合均匀度的方法。

上述关于影响喷灌均匀性和水分运动环节水量损失的相关试验研究较少,而喷灌灌水均匀性和主要影响因子的定量分析是其研究的重点和难点,本文在前人研究的基础上,以实测喷灌试验数据为基础,研究喷灌灌水均匀系数以及水分运动中的漂移损失、冠层截留损失、漂移和冠层截留总损失以及喷灌对土壤含水率影响。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验区位于鄂尔多斯市鄂托克前旗昂素镇哈日根图嘎查,地处毛乌素沙地腹部。该试验地属中温带半干旱大陆性气候,年平均气温 7.9℃,年平均降水量 261 mm,年平均蒸发量 2 498 mm,年平均风速 2.6 m·s⁻¹,年平均日照时数 2 958 h;年平均无霜期 171 d,最大冻土层深度 1.54 m;土壤为砂土,0~100 cm 土层土壤容重为 1.61 g·cm⁻³,田间持水率为 22.86%。

鄂托克前旗现有中心支轴式喷灌机 654 台,其中维蒙特 408 台,林赛 176 台,瑞克 70 台。哈日根图嘎查位于鄂托克前旗昂素镇南部,属于纯牧区,其主要特点是独立牧户经营,每个牧户拥有 200~667 hm² 天然草场和 3~20 hm² 灌溉人工草地,在该地区具有较好的代表性。该嘎查现状水利工程条件以中心支轴式喷灌为主,其中维蒙特中心支轴式喷灌机 29 台,每台控制面积均为 9.5 hm²;林赛中心支轴式喷灌机每台控制面积 9.1 hm²,共有 15 台,另有控制面积 40.1 hm² 的喷灌机 1 台。本文以控制面积 9.5 hm² 维蒙特中心支轴式喷灌机为例进行灌水均匀性试验研究。

1.2 试验设计

中心支轴式喷灌水分损失量主要包括:漂移损失量、冠层截留损失量和深层渗漏损失量三部分。其中漂移损失量 W_e 采用水表精确计量的灌水量与多测点雨量筒测定的平均降雨深的差值来测定,计算公式为:

$$W_e = W_m - W_p \quad (1)$$

式中, W_e 为漂移损失量; W_m 为喷灌机进水口水表精确计量的灌水量; W_p 为各测点雨量筒测定的平均降雨量。

深层渗漏损失量 W_d 根据灌水前后土壤含水率的变化计算得出,计算公式为:

$$W_d = W_D - W_d \quad (2)$$

式中, W_d 为深层渗漏损失量; W_d 为灌水前各测点土壤含水率的平均值; W_D 为灌水后各测点土壤含水率的平均值。

冠层截留损失量 W_c 为喷灌机进水口水表精确计量的灌水量与漂移损失量、深层渗漏损失量的差值。

$$W_c = W_m - W_e - W_d \quad (3)$$

式中, W_c 为冠层截留损失量;其它同上。

试验于 2012 年 4—9 月进行,试验区位于哈日根图嘎查巴图巴雅尔牧户灌溉人工草地,试验地面积 6.5 hm²。种植作物紫花苜蓿为多年生牧草,试验区为种植后的第三年,每年刈割 3 茬。以维蒙特 8120 型中心支轴式喷灌机为试验对象,其基本参数为:2 跨加悬臂,每跨长度均为 60.63 m,悬臂长 22.55 m,设备总长度 143.81 m;带尾枪控制灌溉半径为 173.81 m,控制面积 9.5 hm²;不带尾枪控制灌溉半径为 143.81 m,控制面积 6.5 hm²;系统设计流量为 32 m³·h⁻¹。

本文开展不带尾枪时的灌水均匀性试验,即测定区域为灌溉半径 143.81 m 范围内。为了测定风速对灌水均匀度的影响,设风速分别为 3.4 m·s⁻¹ (灌溉最大允许风速)、2.6 m·s⁻¹ (多年平均风速)和 1.5 m·s⁻¹ 三个处理进行测试,每个处理均设 4 个试验区;在中心支轴式喷灌圈内划定 4 个试验区,每个试验区的范围均为整个喷灌圈的 30°角,即每个试验区的灌溉面积为 0.54 hm²,每个试验区间隔 60°角,详见布设图 1。雨量筒采用径向型布置,以喷灌机中心支轴为圆心,每个雨量筒间隔 5.0 m 布设,每个试验区设 10 个雨量筒,雨量筒均匀分布在每个试验区中心径向线上,具体布设见图 1。

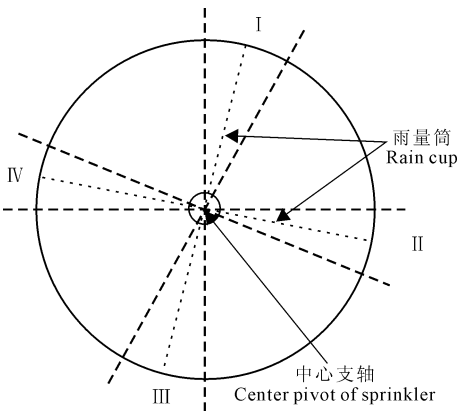


图 1 试验区布置图
Fig.1 Layout chart of experimental area

试验测定内容包括:根据紫花苜蓿生育期进程、农田气象站实时风速数据和土壤含水率情况,分别于 2012 年 5 月 10 日、7 月 15 日和 8 月 18 日实施了 3 个设计处理的灌水试验。其中 5 月 10 日灌水试验为处理 1,灌水期间实测平均风速为 3.34 m·s⁻¹,紫花苜蓿处于第 1 茬分枝期,平均高度为 43 cm;7 月 15 日灌水试验为处理 2,灌水期间平均风速为 2.57 m·s⁻¹,紫花苜蓿处于第 2 茬分枝期,平均高度为 48 cm;8 月 18 日灌水试验为处理 3,灌水期间平均

风速为 1.53 m·s⁻¹,紫花苜蓿处于第 3 茬分枝期,平均高度为 45 cm。三次灌水期间实测风速变化见图 2。

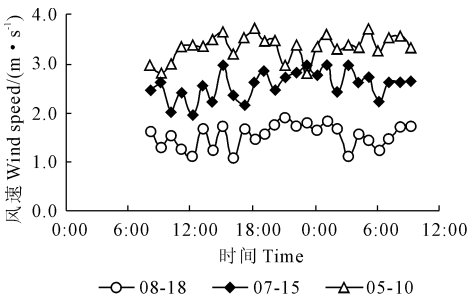


图 2 灌水期间实测风速变化
Fig.2 Change of measured wind speed in irrigation period

各处理设计灌水定额均为 40 mm,喷灌机行走速度设置为 8%,对应喷灌设备性能参数表中的降水量为 20.3 mm,连续灌水 2 圈达到灌水要求;3 个处理灌水试验雨量筒的安置高度均为 50 cm,稍高于紫花苜蓿的平均高度,雨量筒型号为 Y290,内径 14.5 cm,容积 2 000 ml;在喷灌机进水口处安装水表,精确计量各试验区每次灌水量。

各处理每次灌水前 12 h 和灌水后 24 h 进行土壤含水率测定,测点对应布置在各雨量筒附近 30 cm 处;土壤含水率采用烘干法测定,取土深度为 100 cm,共分 6 层,分别为 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80 cm 和 80 ~ 100 cm。

1.3 分析方法

喷灌均匀系数有多种,各有不同的针对性,应该根据评价目的不同选用相应的均匀系数^[7-9]。克里斯琴森(1942)最早提出了描述喷灌水量分布均匀程度的定量指标—克里斯琴森均匀系数,该均匀系数描述的是各测点水深与平均水深偏差的绝对值之和与总水深的比值,可以较好地表征整个田间水量分布与平均值偏差的情况;克里斯琴森均匀系数不能突出与平均值有较大偏差的点对均匀系数的影响,为此 Wilcox 和 Swailes(1947)提出了基于标准差的均匀系数,用于评价风、地形和压力等因素对喷灌系统均匀性的影响^[10-12]。本文采用基于标准差的均匀系数进行紫花苜蓿中心支轴式喷灌均匀性试验研究。

基于标准差的 Wilcox - Swailes 均匀系数 U_s :

$$U_s = 1 - \frac{s}{\bar{h}} = 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i - \bar{h})^2}}{\bar{h}} \tag{4}$$

式中, U_s 为基于标准差的 Wilcox - Swailes 均匀系数; s 为标准离差; h_i 为第 i 测点的降雨深(mm); $\bar{h}$ 各

测点平均降雨深(mm); n 为测点数。

2 结果与分析

2.1 喷灌对土壤含水率的影响分析

灌溉的最终目的是为作物生长提供必要的水分条件,土壤水分分布是灌水均匀与否的最终体现,灌水后灌溉水需以土壤水作为媒介,即灌溉水先转化为土壤水,再由作物根系从土壤中吸收利用^[13-16]。因而,土壤含水率的分布是评价喷灌效果的一个重要标准。试验区为砂土,灌水后 24 h 土壤水分运动相对稳定,此时进行取样测定土壤含水率。

现以处理 1 和处理 2 中测点 2、6 和 8 灌水前及灌水后土壤含水量的变化分析喷灌对土壤含水率的影响。图 3(a)为处理 1 中测点 2、6 和 8 灌水前及灌水后土壤含水量的变化,从图中可以看出:各测点在灌前 0~60 cm 各土层的土壤含水率均在 12.0%~16.0%之间,为田间持水率的 52.5%~70.0%,各土层的土壤含水率相差不大,表层土壤含水率均相对较小;60~100 cm 土层的土壤含水率均在 14.0%~18.0%之间,为田间持水率的 61.2%~78.7%。而灌后各土层含水率的变化幅度差异较大,其中 0~

40 cm 土层土壤含水率的提高非常显著,比灌前提提高约 40.0%~75.0%,各土层的土壤含水率均在 20.0%~23.0%之间,为田间持水率的 87.5%~100.0%;40~60 cm 土层土壤含水率的提高幅度明显降低,比灌前提提高约 15.0%~35.0%,各土层的土壤含水率均在 16.0%~18.0%之间,为田间持水率的 70.0%~78.7%;60~80 cm 土层土壤含水率的提高幅度很小或基本未变化;80~100 cm 土层土壤含水率基本无变化;新增灌水量在各土层中的分配情况为:0~40 cm 土层占 85.0%~95.0%,40~60 cm 土层占 5.0%~15.0%,60~80 cm 土层小于 5.0%。图 3(b)为处理 2 中测点 2、6 和 8 灌水前及灌水后土壤含水率的变化,其各土层土壤含水率的变化规律与处理 1 中各测点基本一致。上述分析结果表明:在灌后土壤入渗基本达到稳定时,灌水定额 40 mm 的最大入渗深度在 80 cm 左右;其中 0~40 cm 土层土壤含水率的提高非常显著,新增灌水量在该土层的分配占 85.0%~95.0%;40~60 cm 土层土壤含水率的提高幅度明显降低,新增灌水量在该土层的分配占 5.0%~15.0%;60~80 cm 土层土壤含水率的提高幅度很小,新增灌水量在该土层的分配小于 5.0%。

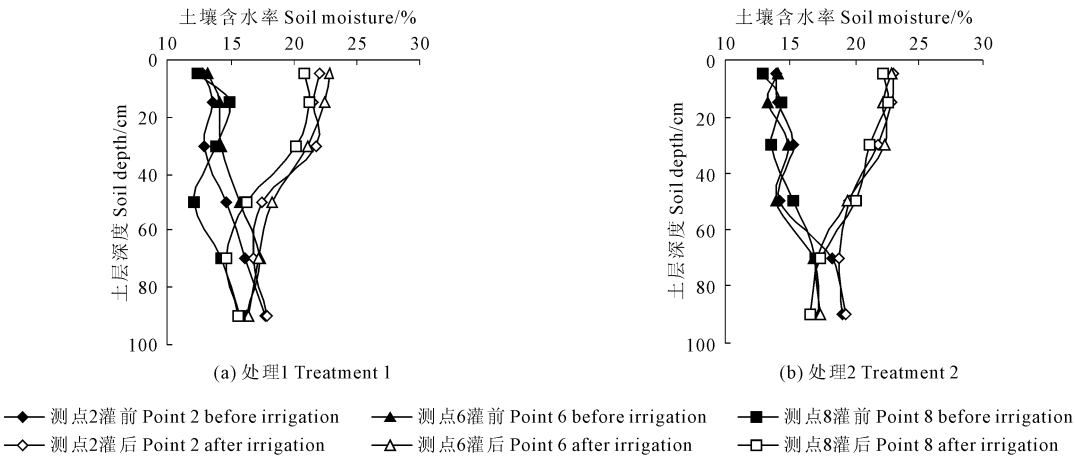


图 3 不同处理灌水前后土壤含水率变化

Fig.3 Change of soil moisture before and after irrigation under different treatments

2.2 喷灌漂移损失影响分析

喷灌漂移损失是指在风和气温等作用下产生的漂移蒸散,本文以 4 个试验区为研究对象,分析在不同风速条件下的漂移损失情况。以在喷灌机进水口处安装水表精确计量的灌水量作为总灌水量 W_t ,以每个试验区 10 个测点雨量筒测定的平均降雨深作为该试验区的实测灌水量 W_y ,总灌水量 W_t 与实测灌水量 W_y 的差值即为该试验区本次灌水的漂移损失量,漂移损失量与总灌水量 W_t 的比值即为漂移损失率,由此计算得出平均风速为 3.34、2.57 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

和 1.53 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 4 个试验区的漂移损失率见图 4。

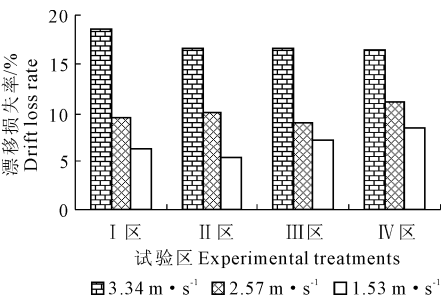


图 4 不同处理漂移损失率对比

Fig.4 Comparison of drift loss rate in different treatments

从图 4 可以看出:平均风速为 $3.34\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 4 个试验区的漂移损失率均在 $16.0\%\sim 19.0\%$;平均风速为 $2.57\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 4 个试验区的漂移损失率在 $8.0\%\sim 12.0\%$;平均风速为 $1.53\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 4 个试验区的漂移损失率在 $5.0\%\sim 9.0\%$ 。上述结果说明:在相同风速条件下,喷灌漂移损失率差异性较小。

分析图 4 中同一试验区不同风速条件下的漂移损失率可以得出:随着风速的增大,漂移损失率增大显著;I 区平均风速为 $1.53\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时漂移损失率为 6.27% ,当平均风速提高至 $2.57\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时漂移损失率增大为 9.63% ;当平均风速提高至 $3.34\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时漂移损失率增大为 18.54% ,分别比 $1.53\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $2.57\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的漂移损失率增大 296% 和 154% ;对于另外 3 个试验区也有类似的结果。

上述分析结果表明:喷灌漂移损失率受风速影响较大,随着风速的增大,漂移损失也逐渐增大,并且增大幅度非常显著,当风速增大到 $3.34\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,漂移损失率达到了 $16.0\%\sim 19.0\%$,大大降低了灌溉水利用效率。

2.3 喷灌紫花苜蓿冠层截留损失分析

紫花苜蓿为密植型作物,叶面冠层截留是喷灌损失的重要组成部分,特别是紫花苜蓿进入分枝期以后,冠层截留更为明显。本文以紫花苜蓿分枝期喷灌灌水为例,探索不同风速条件下紫花苜蓿中心支轴式喷灌冠层截留损失。以各试验区每个测点雨量筒的平均实测水量作为冠层截留前的降雨深 W_q ,根据前述喷灌对土壤含水率的影响分析得出: $0\sim 80\text{ cm}$ 土层土壤含水量的变化可作为土壤新增的有效降雨深 W_e ;由此根据水量平衡原理得出:冠层截留前的降雨深 W_q 与土壤新增有效降雨深 W_e 的差值即为冠层截留损失 W_g ;冠层截留损失 W_g 与喷灌机进水口处水表精确计量的总灌水量 W_l 的比值即为该试验区的冠层截留损失率。现以 4 个试验区为研究对象,采用上述方法计算分析在不同风速条件下的冠层截留损失情况。图 5 是在平均风速分别为 3.34 、 $2.57\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.53\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时各试验区的冠层截留损失率。

从图 5 中可以看出:不同风速条件下各试验区的冠层截留损失率在 $2.0\%\sim 7.0\%$,差异性相对较小,远小于风速对漂移损失的影响;风速为 $3.34\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的冠层截留损失率在 $2.0\%\sim 6.0\%$,4 个试验区紫花苜蓿分枝期灌水平均冠层截留损失率为 4.31% ,而风速为 $2.57\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.53\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的平均冠层截留损失率分别为 5.58% 和 6.10% 。由此得出:较大风速时冠层截留损失率反而降低,分析原因主要为:一方面是紫花苜蓿叶面较小,较大的风速

减少了叶面冠层对水量的贮存;另一方面是较大风速时其漂移损失也大,在灌水定额相同的条件下进入叶面冠层的降雨深也较小,相应的冠层截留损失量也较小。

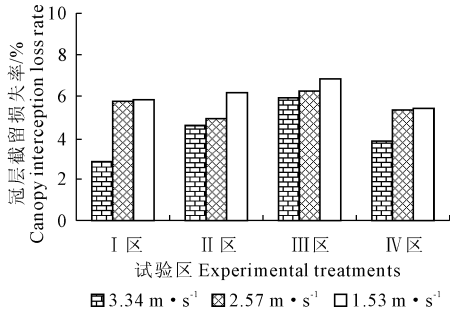


图 5 不同处理冠层截留损失率

Fig.5 The canopy interception loss rate in different treatments

上述分析结果表明:风速对冠层截留损失影响不如风速对漂移损失的影响显著;在灌水定额相同的条件下,较大风速时冠层截留损失率较低;灌水定额为 40 mm 时紫花苜蓿分枝期喷灌的冠层截留损失率相对较小,在 $2.0\%\sim 7.0\%$ 之间。

2.4 喷灌漂移和冠层截留总损失分析

图 6 是在平均风速分别为 3.34 、 $2.57\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.53\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时各试验区的漂移和冠层截留总损失率,从图中可以看出:不同风速条件下各试验区的漂移和冠层截留总损失率在 $11.0\%\sim 23.0\%$ 之间,差异性较大。其中风速为 $3.34\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时各试验区的漂移和冠层截留总损失率最大,在 $20.0\%\sim 23.0\%$ 之间;风速为 $2.57\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时各试验区的漂移和冠层截留总损失率显著较低,在 $15.0\%\sim 17.0\%$ 之间;风速为 $1.53\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时各试验区的漂移和冠层截留总损失率最低,在 $11.0\%\sim 15.0\%$ 之间。

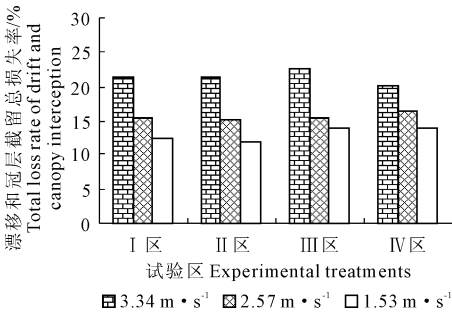


图 6 不同处理漂移和冠层截留总损失率

Fig.6 Total loss rate of drift and canopy interception in different treatments

上述结果表明:在平均风速为 $3.34\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 中心支轴式喷灌漂移和冠层截留总损失率达到了 $20.0\%\sim 23.0\%$,显著降低了喷灌灌溉水利用效率,即喷灌

紫花苜蓿田间灌溉水利用率为 77.0% ~ 80.0% (该喷灌系统 1 眼井控制 1 台喷灌机,井位于喷灌机中心支轴处,输水管道很短,其管道水利用率基本在 100%),稍低于规范中喷灌灌溉水利用率大于 80% 的要求;而该风速条件下紫花苜蓿分枝期冠层截留损失的贡献率在 2.0% ~ 6.0%,如果核减该部分损失,田间灌溉水利用率可达约 80%,基本满足灌水要求;由此得出:喷灌灌水最大允许风速 $3.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的条件不适合紫花苜蓿分枝期灌溉;即使在风速较小(平均风速 $1.53\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)时紫花苜蓿分枝期喷灌漂

移和冠层截留总损失率也达到 11.0% ~ 15.0%,即喷灌紫花苜蓿田间灌溉水利用率为 85% ~ 89%,因此在进行喷灌灌溉制度设计时应充分考虑该部分的损失量。

2.5 喷灌均匀系数

利用式(4)计算不同处理基于标准差的 Wilcoxon-Swales 均匀系数,每个处理对应 4 个试验区,共 40 个测点,连续灌水 2 圈,可得到 80 个降雨深数据,计算得出 3 个处理对应的标准离差和 Wilcoxon-Swales 均匀系数,见表 1。

表 1 不同处理喷灌均匀系数
Table 1 The uniformity coefficients of sprinkler irrigation in different treatments

处理 Treatment	测点数/个 Points/No.	降雨深最大值 Maximum rain depth/mm	降雨深最小值 Minimum rain depth/mm	降雨深平均值 Averages rain depth/mm	标准离差 s Standard deviation	均匀系数 U_s Uniformity coefficient
处理 1 Treatment 1	80	26.10	10.11	17.52	4.98	0.72
处理 2 Treatment 2	80	24.53	14.84	18.76	2.33	0.88
处理 3 Treatment 3	80	22.29	16.05	18.96	1.42	0.92

从表 1 中可以看出:处理 1 灌水时的平均风速为 $3.34\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,其降雨深的最大值为 26.10 mm,最小值为 10.11 mm,两者相差约 2.58 倍,差异性非常显著;处理 2 和处理 3 灌水时的风速分别为 $2.57\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.53\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,其降雨深的最大值和最小值相对差异性较小。3 个处理中降雨深的平均值依次降低,分别为 17.52 mm、18.76 mm 和 18.96 mm,处理 1 与处理 2 和处理 3 的差异较大,分别相差 1.24 mm 和 1.44 mm;而处理 2 和处理 3 仅相差 0.2 mm。上述结果说明:较大的风速可造成降雨深的两极分化,对灌水效果影响很大;当风速低于 $2.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,风速对降雨深的影响明显减弱。

表 1 中 3 个处理的标准差分别为 4.98、2.33 和 1.42,标准差越大说明各降雨深数据的差异性越大,处理 1 比处理 2 和处理 3 的标准差分别高 210% 和 350%,表明处理 1 各测点降雨深数据的离散程度很大,处理 2 和处理 3 各测点降雨深数据与平均值差异较小。处理 1 的均匀系数为 0.72,稍大于喷灌设计灌溉均匀度 0.70 的要求,而处理 2 和处理 3 的喷灌均匀系数分别达到 0.88 和 0.92,表明在风速分别为 $2.57\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.53\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,喷灌均匀性良好。上述分析结果表明:风速对喷灌均匀系数影响显著,建议应尽量在风速较小时进行喷灌灌水。

3 结 论

1) 分析喷灌对土壤含水率的影响得出:该研究区灌水定额 40 mm 的最大入渗深度在 80 cm 左右,0 ~ 40 cm 土层土壤含水率的提高非常显著,新增灌

水量在该土层的分配占 85.0% ~ 95.0%; 40 ~ 60 cm 土层土壤含水率的提高幅度明显降低,新增灌水量在该土层的分配占 5.0% ~ 15.0%; 60 ~ 80 cm 土层土壤含水率的提高幅度很小,新增灌水量在该土层的分配小于 5.0%。

2) 喷灌漂移损失影响分析得出:相同风速条件下,喷灌漂移损失率差异性较小;不同风速条件下,随着风速的增大漂移损失率增大显著;平均风速为 $1.53\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $2.57\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时漂移损失率为 6.27% 和 9.63%,当风速增大到 $3.34\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,漂移损失率达到了 16.0% ~ 19.0%,大大降低了灌溉水利用效率。对喷灌紫花苜蓿冠层截留损失分析得出:风速对冠层截留损失影响不如风速对漂移损失的影响显著;在灌水定额相同的条件下较大的风速冠层截留损失率较低;灌水定额为 40 mm 时紫花苜蓿分枝期喷灌的冠层截留损失率在 2.0% ~ 7.0%。

3) 分析漂移和冠层截留总损失率得出:平均风速为 $1.53\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时紫花苜蓿分枝期喷灌漂移和冠层截留总损失率在 11.0% ~ 15.0%,相应的田间灌溉水利用率为 85% ~ 89%,在进行喷灌灌溉制度设计时应充分考虑该部分的损失量;平均风速为 $3.34\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 中心支轴式喷灌漂移和冠层截留总损失率达到了 20.0% ~ 23.0%,其田间灌溉水利用率为 77.0% ~ 80.0%,低于喷灌规范中灌溉水利用效率大于 80% 的要求,由此喷灌灌水最大允许风速 $3.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的条件不适合紫花苜蓿分枝期的灌水要求。

管不对称布置各项指标基本接近,地表三管和双管不对称处理叶面积指数与果粒体积的增长速度比较接近,均明显高于地表双管对称处理。双管不对称的产量(1 587.884 kg)与三管布置方式(1 676.486 kg)产量基本接近,且均大于双管对称布置方式(1 495.947 kg)。说明双管流量不对称布置方式在不影响葡萄产量及其它特性的前提下,还可以满足葡萄根系的需水要求。因此找到了适合当地葡萄需水规律的毛管布置方式,确定采用双管流量不对称布置方式代替三管布置方式。同样的,我们可以利用模型优化分析其它作物的各项特性,在节省劳力的情况下,逐步做到利用模型代替试验的高效分析方式。

参 考 文 献:

[1] 李光永,曾德超.滴灌土壤湿润体特征值的数值算法[J].水利学报,1997,(7):1-6.

[2] 程慧娟,王全九,曾 辰,等.垂直线源灌溉条件下交汇入渗特性研究[J].灌溉排水学报,2010,29(4):63-66.

[3] 王振华,郑旭荣,任 杰,等.灌水频率对地下滴灌线源入渗土壤水分运动规律影响的试验研究[J].水利学报,2007,(21):299-302.

[4] 李 涛,张建丰,程慧娟,等.深层坑渗灌田间单点入渗湿润锋分布特性及拟合模型研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(4):36-39,45.

(上接第 102 页)

4) 基于标准差的 Wilcox – Swailes 均匀系数结果表明:风速对喷灌均匀系数影响显著;平均风速为 $3.34\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的标准差最大,比平均风速为 $2.57\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.53\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的标准差高 210% 和 350%,说明各测点降雨深数据的离散程度很大,灌水均匀性也很差;平均风速分别为 $2.57\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.53\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,喷灌均匀系数分别达到 0.88 和 0.92,说明喷灌灌水均匀性良好,平均风速为 $3.34\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的均匀系数为 0.72,说明喷灌灌水均匀性较差。

参 考 文 献:

[1] 韩文霆,崔利华,吴普特,等.正三角形组合喷灌均匀度计算方法[J].农业机械学报,2013,44(4):99-107.

[2] 韩启彪,孙 浩,仵 峰,等.喷灌均匀系数研究现状及发展趋势[J].节水灌溉,2011,(12):74-78.

[3] 韩文霆,吴普特,杨 青,等.喷灌水量分布均匀性评价指标比较及研究进展[J].农业工程学报,2005,21(9):172-177.

[4] 王 勇,白玲晓,赵 举,等.喷灌条件下玉米地土壤水分动态与水分利用效率[J].农业工程学报,2012,28(增刊 1):92-97.

[5] 李久生,饶敏杰,李 蓓.喷灌施肥灌溉均匀性对土壤硝态氮空间分布影响的田间试验研究[J].农业工程学报,2005,21(3):

[5] Zhou Qingyun, Kang Shaozhong, Zhang Lu, et al. Comparison of APRI and Hydrus – 2D models to simulate soil water dynamics in a vineyard under alternate partial root zone drip irrigation[J]. Plant and Soil, 2007,291(1 – 2):211-223.

[6] 朱德兰,汪志农,王得祥,等.不同土壤中滴灌水分分布与设计参数的确定[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2000,28(2):45-49.

[7] 孙海燕,李明思,王振华,等.滴灌点源入渗湿润锋影响因子的研究[J].灌溉排水学报,2004,23(3):14-17.

[8] 吕殿青,王文焰,王全九.滴灌条件下土壤水盐运移特性的研究[J].灌溉排水学报,2000,19(1):16-21.

[9] 陈渠昌,吴忠渤.滴灌条件下沙地土壤水分分布与运移规律[J].灌溉排水,1999,18(1):28-31.

[10] 孙海燕,王全九.滴灌湿润体交汇情况下土壤水分运移特征的研究[J].水土保持学报,2007,21(2):115-118.

[11] Shan Y, Wang Q. Simulation of salinity distribution in the over-lap zone with double-point-source drip irrigation using HYDRUS – 3D [J]. Australian Journal of Crop Science,2012,6(2):238.

[12] 周广林,王全九,李 云,等.Hydrus – 3D 模型模拟田间点源入渗与水分再分布准确性评价[J].干旱地区农业研究,2015,(2):113-121,129.

[13] 苏李君,王全九,白云岗,等.极端干旱地区葡萄根系吸水数值模拟[J].农业工程学报,2012,(6):88-93.

[14] 马 欢,杨大文,雷慧闽,等.Hydrus – 1D 模型在田间水循环规律分析中的应用及改进[J].农业工程学报,2011,(3):6-12.

[15] 任利东,黄明斌.砂性层状土柱蒸发过程实验与数值模拟[J].土壤学报,2014,51(6):1282-1289.

51-55.

[6] 黄修桥,廖永诚.有风条件下喷灌系统组合均匀度的计算理论与方法研究[J].灌溉排水,1995,14 (1):12-18.

[7] 郭向红,孙西欢,马娟娟.降雨灌溉蒸发条件下苹果园土壤水分运动数值模拟[J].农业机械学报,2009,40(11):68-73.

[8] 李永冲,严海军,徐成波,等.考虑水滴运动蒸发的喷灌水量分布模拟[J].农业机械学报,2013,44(7):127-132.

[9] 郑和祥,史海滨,朱 敏,等.基于 SIRMOD 模型的畦灌入渗参数估算及灌溉模拟[J].农业工程学报,2009,25(11):29-34.

[10] 李永冲,严海军,徐成波,等.考虑水滴运动蒸发的喷灌水量分布模拟[J].农业机械学报,2013,44(7):127-132.

[11] 郑和祥,史海滨,程满金,等.畦田灌水质量评价及水分利用效率分析[J].农业工程学报,2009,25(6):1-6.

[12] 刘月梅,张兴昌.EN – 对黄土性固化土水分垂直入渗特征的影响[J].农业机械学报,2012,43(11):66-73.

[13] 潘 云,吕殿青.土壤容重对土壤水分入渗特性影响研究[J].灌溉排水学报,2009,22(3):59-61.

[14] 刘俊萍,袁寿其,李 红,等.变量喷洒全射流喷头副喷嘴优化与评价[J].农业机械学报,2011,42(9):98-101.

[15] 李久生,雷志栋,杨诗秀.喷灌条件下土壤水分空间分布特性研究[J].水科学进展,1998,9(1):7-14.

[16] 王 锐,孙西欢,郭向红,等.不同入渗水头条件下土壤水分运动数值模拟[J].农业机械学报,2011,42(9):45-49.