

极端干旱区成龄葡萄滴灌田间毛管 布置方式优化研究

李 萌^{1,2}, 张江辉², 虎胆·吐马尔白¹, 白云岗², 刘洪波², 丁 平²

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利水电科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830049)

摘 要: 通过建立数学模型, 利用 Hydrus-2D 软件模拟双管不对称布置和三管布置下的水分入渗特征, 分析与葡萄根系分布的耦合程度。采用大田试验进行了验证, 与模拟结果进行了对照, 结果表明: 双管不对称和三管布置条件下湿润剖面比较接近, 双管不对称布置模式水分分布比较均匀, 垂直湿润深度在 60 cm 左右, 水平湿润宽度约 100 cm; 三管布置模式的垂直湿润深度为 60 cm, 水平湿润宽度约 120 cm。双管流量不对称布置在产量及葡萄生长等方面均能达到三管布置方式的效果。确定采用双管流量不对称布置方式可以替代三管布置方式, 同时, 也说明在田间毛管布置方式筛选及优化分析时, 采用数学模型分析的方法, 可大大减少进行野外试验的工作量, 在简化研究过程的同时能够得到科学的研究成果。

关键词: 葡萄根系分布; 水分入渗特征; 滴灌; 毛管布置方式; 模型模拟

中图分类号: S275.6; S663.1 **文献标志码:** A

Optimization research of lateral pipe layout mode for drip irrigation of adult grape in extreme arid region

LI Meng^{1,2}, ZHANG Jiang-hui², Hudan·tumaerba¹, BAI Yun-gang², LIU Hong-bo², DING Ping²

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University Urumqi 830052, China;

2. Xinjiang Institute of Water Resources and Hydroelectric Power, Urumqi 830049, China)

Abstract: Through established mathematical model, using the Hydrus-2D software simulated the characteristics of water infiltration under double pipes asymmetric layout and three pipes layout, analyzed the coupling degree of grape root distribution. The simulated results were verified and compared with the field test. The results showed that: the wetted profiles were comparatively close under the conditions of double pipes asymmetric and three pipes arrangement. The water distribution was relatively uniform, the vertical wetted depth was about 60 cm and horizontal wetted width was about 100 cm for the double pipes asymmetric layout mode. The vertical wetted depth was 60 cm and horizontal wetted width was approximately 120 cm for the three pipes arrangement mode. Under double pipes asymmetric arrangement, the yield and grape growth aspects can be reached the effect of three pipes layout mode. So determined that the three pipes layout mode can be replaced by the double pipes with asymmetric arrangement. At the same time, it explained when selected and optimally analyzed the lateral pipe layout in field, the mathematical model analysis method can be utilized. The workload of outside experiments in field can be greatly reduced, while the scientific research results can be obtained at the simplified research process.

Keywords: distribution of grape root system; characteristics of water infiltration; drip irrigation; lateral pipe layout mode; model simulation

我国葡萄生产园常采用大水漫灌、沟灌、盘灌、穴灌等简单易行的、较落后的方法进行灌溉。由于成龄葡萄根系复杂, 选择适宜的田间毛管布置方式及灌水器的参数对于满足成龄葡萄需水要求具有重

收稿日期: 2015-11-24

基金项目: 新疆自治区科技重大专项(201130103-1); 国家科技支撑计划(2011BAD29B05)

作者简介: 李 萌(1990—), 男, 新疆昌吉人, 硕士研究生, 主要从事水分高效利用研究。E-mail: 1244934076@qq.com。

通信作者: 虎胆·吐马尔白(1961—), 男, 哈萨克族, 新疆博乐人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地下水土壤水盐运移理论及节水灌溉理论。E-mail: hudan@hotmail.com。

要的意义。许多学者对滴灌条件下水分在土壤中的入渗规律以及土壤湿润体的变化进行了研究。有些学者采用数值计算的方法模拟计算了单滴头灌溉条件下土壤湿润体的分布规律^[1]。程慧娟^[2-4]等研究了不同线源长度、不同线源直径对土壤湿润体的影响及初始含水率对土壤垂直线源入渗的影响。Zhou Qingyun^[8]在土壤水分动态及葡萄根系分布的基础上建立了一个二维根系吸水模型,分别用 Hydrus - 2D 模型和部分根区交替灌模型对土壤水分动态进行模拟,并认为部分根区交替灌模型更适合于模拟土壤蒸发较大、不规则根系分布的干旱地区的土壤水分动态。Shan 等^[11]人利用 Hydrus - 3d 模拟了双管布设条件下不同滴头间距以及不同滴头流量情况下双点源交汇区水盐运移规律。周广林等^[12]采用 Hydrus - 3D 软件建立的模型可较好地模拟单点源水分入渗、水平湿润锋扩散过程及土壤剖面水分的分布情况,湿润范围模拟结果和实测结果的吻合度较高,说明 Hydrus - 3D 模型可模拟土壤水分再分布情况。苏李君等^[13]在分析灌溉条件下葡萄吸水特征的基础上,建立了一维非饱和土壤水分运动的无网格数值模拟模型,并依据实测葡萄根系分布特征,获得了葡萄一维根系分布函数,将其与不同的经验根系分布函数应用于数值模型进行动态模拟。马欢等^[14]应用 Hydrus - 1D 模型连续模拟了 2006—2009 年的田间水分运移过程。与时域反射仪(time domain reflectometry, TDR)实测土壤含水率的对比表明,模型对土壤含水率的模拟精度较高。任利东^[15]等利用两种均质土柱排水过程优化的土壤水力参数和 Hydrus - 1D 模型对两种均质土柱和三种不同类型层状土柱蒸发过程进行模拟分析,结果表明 Hydrus - 1D 可以较好地模拟层状土柱蒸发过程。

上述研究主要针对室内土筑试验,对大田滴灌条件下土壤湿润体和土壤含水量的分布规律研究报道的较少,关于滴灌管道布置方式和系统技术参数对作物生长发育影响的研究也为数不多。本文旨在研究滴灌带的不同布置方式对葡萄生长状况、水分利用和生理特征的影响,为极端干旱区葡萄的生产管理提供依据与参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验条件

该试验基地位于火焰山以北的新疆维吾尔自治区葡萄瓜果开发研究中心试验基地内,距鄯善县城 6 km,地理坐标为:北纬 42.91°,东经 90.30°;海拔 419 m。年降雨量 25.3 mm,年蒸发量 2 751 mm,全

年日照时数为 3 122.8 h,10℃以上有效积温 4 525℃以上,无霜期达 192 d。葡萄品种为无核白,1981 年定植,树龄 28 a,大沟定植,东西走向,沟长 54 m,沟宽 1.0~1.2 m,沟深 0.5 m 左右;株距约 1.2~1.5 m,行距 3.5 m;栽培方式为小棚架栽培,棚架前端高 1.5 m,后端高 0.8 m。试验地 40 cm 以上土层的土壤质地为砂壤土,40 cm 以下为土石混合介质。

1.2 试验设计

1.2.1 葡萄根系分布情况 土壤湿润体是滴灌系统对作物根系的作用区域,其作物根系合理匹配是滴灌系统优化的关键,根系在土壤剖面的分布对根系吸水功能和作物生产力具有很重要的作用,因此了解葡萄根系的分布范围及分布特征是确定湿润范围的依据。鄯善试验基地 28 年无核白葡萄根系在沟垄水平方向上,主要集中在距主根 120 cm 范围内,以主根为轴心 60~80 cm 范围内最多,向两侧逐渐减少。除主根外,均在两根中部分布最多,且主根大的一侧根系较多,在东西两侧根系分布不均,如图 1 所示。由于栽培垄上需要分配较多的水量,垄上的滴头流量要大于栽培沟里的滴头流量。因此在根系分布发达的一侧布置滴头流量较大的管件或双管布置方式,以期土壤湿润体能包围葡萄根系,满足根系的需水要求。



图 1 鄯善试验点葡萄根系分布图

Fig.1 The distribution of grape root system at Shanshan Experiment Point

1.2.2 田间点源入渗试验 本试验在田间葡萄棚架下进行,选取三个滴头流量(1.5、2.7、3.6 L·h⁻¹),三个灌水量(15、20、30 L),共进行 9 组试验,每组试验均设两个重复。试验时,连续观测马氏瓶读数、积水半径、水平湿润半径、垂直湿润深度以及湿润体形状,待入渗水量达设计水量时结束试验,取土测定含水量剖面,取土点布置在滴头至水平湿润锋、滴头连线中垂线上,水平方向和垂直方向上每 10 cm 布设一个取土点。

根据以上试验确定不同流量的滴头积水半径也有区别,从而得到半径随流量的变化如图 2,再根据

内插法求得试验所需流量滴头的积水半径(分别为 $2.2\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $3.3\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$)。

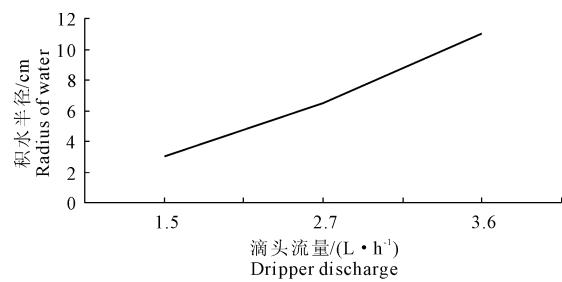


图 2 不同滴头流量下的积水半径变化过程
Fig.2 The change process of ponding water radius with different trickle discharge

选用目前常见的几种微灌灌水技术及田间毛管布置方式进行田间试验,地表滴灌田间毛管布置方式采用双管与三管布置。进行初步筛选,获得一些

基础数据,为进一步优化提供技术支持。通过多个滴头流量及沟内、垄上滴灌带距离葡萄主根的距离组合比较,筛选出较为理想的布置方式,具体试验技术参数如下:双管不对称布置(沟内与棚架下各一条滴灌带,沟内铺设滴灌带,灌水器采用滴头流量 $2.2\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$,滴头间距 30 cm ,棚架下铺设滴灌带,灌水器采用滴头流量 $3.3\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$,滴头间距 30 cm ,分别放置于葡萄主根两侧等距离 40 cm 的位置)、三管布置(沟内一条,棚架下两条滴灌带,滴头流量 $2.2\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$,滴头间距 30 cm ,栽培沟里滴灌带布置在距离葡萄主根 40 cm 位置,栽培垄上两条滴灌带分别布置在距离葡萄主根 20 cm 和 60 cm 的位置)和对照试验双管对称布置(沟内与棚架下各一条滴灌带,滴头流量 $2.2\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$,滴头间距 30 cm ,分别放置于葡萄主根两侧等距离 40 cm 的位置)。具体布置如图 3 所示。

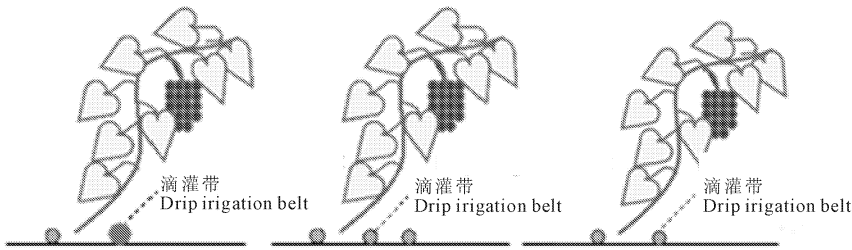


图 3 微灌灌水技术形式及毛管布置方式示意图
Fig.3 Schematic diagram of micro-irrigation technology and lateral pipe layout mode

1.3 试验内容与方法

1.3.1 试验内容 对研究区土壤水分特性进行研究,确定 VG 模型参数,设定多种灌水器技术参数,利用 HYDRUS - 2D 模拟预设环境下的土壤水分分布特征,采用 VG 模型进行描述,嵌入了 Scott、Kool 和 Parker 经验模型中的假定:吸湿(脱湿)扫描线与主吸湿(脱湿)曲线成比例变化,用于模拟变饱和和多孔介质中水分、能量、溶质运移的数值模型,近几年得到了比较广泛的应用,该模型与葡萄根系分布特征进行耦合,初步筛选出与生产实践中相适应的灌水器技术参数,在大田中进行试验验证。

1.3.2 试验方法 土壤含水量(体积含水量)采用 TRIM - IPH 测定;植物光合作用采用 CIRAS - 2 型光合仪测定;葡萄新梢生长量用卷尺测定。叶面积:每个布置方式选取三株长势均匀的葡萄蔓,每个蔓从底部至梢部选取三个枝条,利用卷尺定期测定每个蔓的枝条数及所选枝条的中脉长、叶片数和枝条数,计算出该蔓的叶面积,三个蔓的平均值代表该处理每株葡萄的叶面积。果粒体积:利用游标卡尺测定,每个布置方式定期随机测定葡萄果粒的长和宽,计

算出果粒体积。产量:实测法测得每个布置方式的实测总产量。

利用 Hydrus - 2D 模拟葡萄根系湿润范围,结合根系分布情况确定灌水区域为水平方向 200 cm 和深度 120 cm 的范围,假定超出 120 cm 深度的水量作为深层渗漏水量。试验区土壤质地分两层,以沟底为基准面, $0\sim45\text{ cm}$ 土层土壤质地为砂壤土,并混有少量碎石, 45 cm 以下碎石量较多,为土石混合介质。模拟不同微灌灌水器技术参数与布置模式下的土壤水分入渗分布特征,与葡萄根系分布特征进行耦合,进一步筛选与优化得到适宜鄯善地区成龄葡萄微灌模式。

模型初始条件: $0\sim45\text{ cm}$ 深度和 45 cm 深度以下土壤初始体积含水率分别设为 $0.132\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $0.072\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 。模型边界条件:每个滴头处边界条件视为点源累积入渗,含水量设为饱和含水量 $0.41\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 。上边界除滴头外均设为初始含水量。由于所研究区域的边界水流到达不了,且地下水位很深,所以模拟区域的左、右边界为零通量,下边界条件设为自由排水。

2 模型模拟分析

入渗是指水分进入土壤的过程,这是自然界水循环中的一个重要环节。土壤水分运动如同其它物质一样符合质量守恒定律,因此一般将达西定理称为土壤水分运动所遵循的基本原理,而质量守恒定理称为连续方程,通过联合达西定理和连续方程就可导出土壤水分运动的基本方程^[9]。以土壤吸力为因变量的直角坐标下的土壤水分运动方程为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (K(h) \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} (K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h)) \quad (1)$$

式中, θ 为土壤体积含水率; h 为土壤吸力; t 为时间; x 为水平距离; z 为垂向距离; $K(h)$ 为土壤非饱和导水率

(1) 定解条件

求解土壤水运动方程的初始条件为:

$$h(r, z, t = 0) = h_i(r, z) \quad (2)$$

式中, $h_i(r, z)$ 为土壤初始吸力。

求解土壤水运动方程的边界条件为:灌水过程中,流量 q 大于土壤饱和导水率,因此在滴头附近很快形成近似的饱和圈。则水分运动的边界条件为:

$$H = 0 \quad (r, z) \in D_s(t) \quad (3)$$

式中, (r, z) 指计算点的位置坐标; $D_s(t)$ 为饱和区域;不考虑蒸发作用。

由于所研究区域的边界水流到达不了,且地下水位很深,所以模拟区域的左、右边界与下边界条件设为自由排水。

(2) 土壤水力参数

土壤水分特征曲线 $\theta(h)$ 和非饱和土壤导水率 $K(h)$ 采用描述土壤吸湿过程的 van - Genuchten 模型描述:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + |\alpha h|)^m}, & h < 0 \\ \theta_s, & h \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$K(h) = \begin{cases} K_s S_e^l [(1 - (1 - S_e^{1/m})^m)^2], & h < 0 \\ K_s, & h \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

另外, $S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, m = 1 - \frac{1}{n}$

式中, θ 为土壤体积含水率($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); h 为吸力(cm); K 为水力传导系数($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); S_e 为有效土壤含水率; θ_r 为残余土壤含水率($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); θ_s 为饱和土壤含水率($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); K_s 为渗透系数($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$); n, m 和 α 均为经验参数, $m = 1 - 1/n$ 。

根据以上理论基础测得试验地区土壤水力参数见表 1。

采用表 1 中土壤水力参数,模拟不同滴灌灌水技术所得土壤水分入渗分布图如图 4 所示。

表 1 鄯善田间土壤水分特性的 VG 模型参数

Table 1 VG model parameters of soil water characteristics at Shanshan field

土壤深度 Soil depth/cm	$\theta_r/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	α/cm^{-1}	n	$K_s/(\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$	l
0 ~ 45	0.065	0.41	0.036	1.89	0.0737	0.5
45 ~ 120	0.045	0.43	0.145	2.68	0.495	0.5

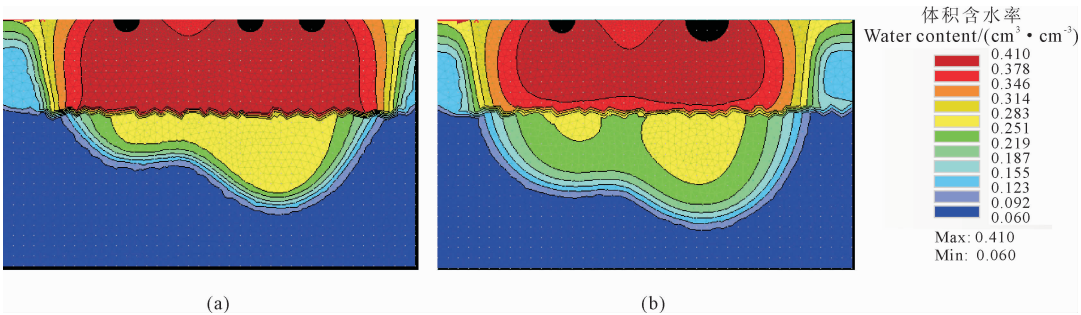


图 4 利用模型模拟的三管(a)与双管不对称布置(b)方式下的水分剖面

Fig.4 The water profiles under three pipes(a) and double pipes asymmetric layout simulated(b) by model

如图 4 所示,模型采用 Hydrus - 2D 软件模拟地表滴灌条件下两种不同毛管布置处理的体积含水率分布剖面图,可以发现,在同一时间段内,双管不对称布置和三管布置的灌水强度大致相同,土壤湿润范围也很接近,根系可以被湿润体包围,均可满足葡

萄根系吸水。三管布置由于初始含水率较大,因此含水率比双管不对称布置较高,但两种布置方式均可满足葡萄生长所需水量。其次,两种布置方式对葡萄生理特征、产量和品质的影响有待进一步的研究。

图 5 为不同水分处理灌后土壤水分再分布,从图可看出,各水分处理灌水器周围的含水量明显高于其它位置,随着深度的增加,土壤含水量逐渐减小。由于鄯善土质原因,在土壤下层的石砾层储水性能较差,由于根系分布在 20~60 cm 土壤深度范围内出现高峰,因此该深度范围内土壤耗水量大于深层土壤耗水量,其垂直耗水部位主要在垂直 20~60 cm 深度范围内;水平耗水部位主要在主根位置

沿沟方向 60 cm 范围内,沿垄方向 30 cm 范围内。对照不同水分处理的湿润体形状可以发现,双管不对称布置模式水分分布比较均匀,垂直湿润深度在 60 cm 左右,水平湿润宽度约 100 cm;三管布置模式的垂直湿润深度为 60 cm,水平湿润宽度约 120 cm。在 20~40 cm 深度的土壤含水量接近田间持水量,土壤水分在水平和垂直方向的分布都很均匀。

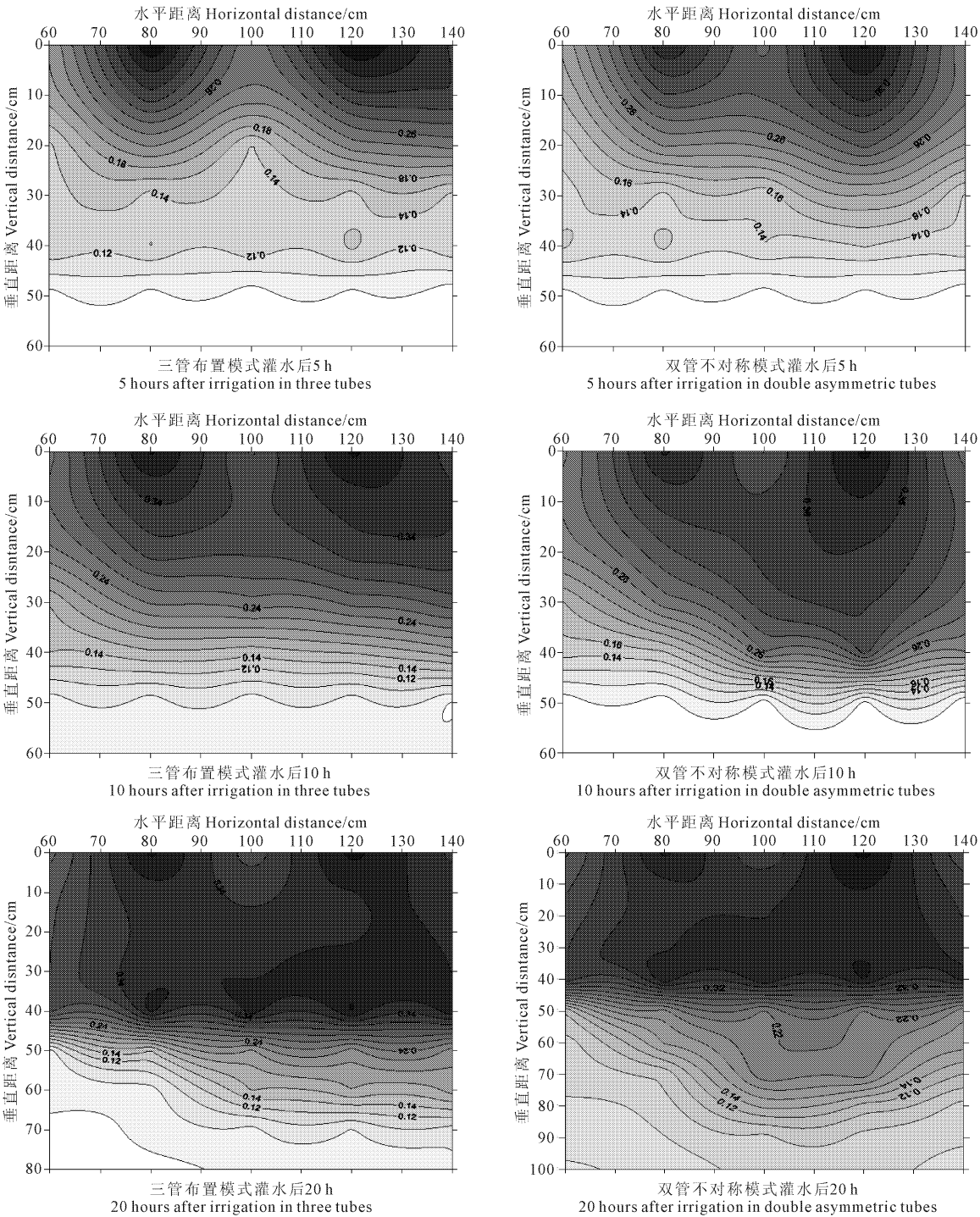


图 5 三管与双管不对称布置模式灌后土壤水分分布

Fig.5 The distribution of soil moisture under three pipes and double pipes asymmetric layout mode

3 模型试验验证

对利用数值模拟分析得到的优化的结果,在大田中开展试验研究,进行验证,并进行投资、效益、管理等方面综合评估,提出适宜极端干旱区成龄葡萄微灌技术的应用模式,并建立相应的技术规程,进行示范推广。

3.1 不同布置方式葡萄植株生长势对比分析

叶面积指数是研究作物群体结构的重要量化指标。对比分析三种灌水技术的叶面积指数,旨在筛选适合葡萄生长的灌水技术。从图 6 对比分析三种灌水技术葡萄生长的叶面积指数的变化,可以看到在五月份鄯善地表双管不对称处理的叶面积指数增加最高快,其次是地表三管处理,地表双管增长最为缓慢。

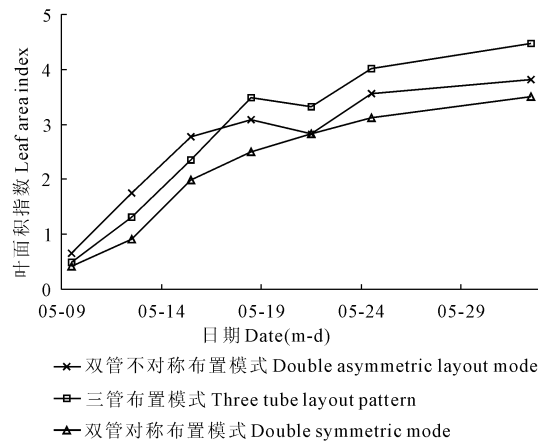


图 6 鄯善试验点不同处理葡萄叶面积指数变化
Fig.6 Change of grape leaf area index by different treatments at Shanshan Experiment Point

3.2 不同处理葡萄品质的对比分析

果粒的大小是葡萄果实商品率评价的重要依据,研究不同灌水技术下果粒生长变化的过程,可以作为灌水技术对葡萄果实品质影响的重要依据。如图 7 从果粒生长变化过程来看,鄯善试验点三种灌水技术处理葡萄果粒生长变化区别明显,地表三管和双管不对称处理增长速度明显高于地表双管对称处理,但是进入果粒膨大期后地表三管的果粒增长速度要略高于地表不对称双管。

3.3 不同布置方式葡萄植产量对比分析

产量是最终评判灌水技术优劣的依据,对比分析各种灌水技术处理葡萄的产量,是优选灌水技术的重要依据。如图 8 从测产的结果对比分析,三种灌水技术中地表三管产量最高(1 676.486 kg),其次双管不对称(1 587.884 kg),最后是双管对称处理(1 495.947 kg),但是三种灌水技术处理相比双管不

对称与三管布置方式产量基本接近,且均大于双管对称布置方式,说明两管流量不对称布置方式可以代替三管布置方式,不仅对葡萄产量影响不大,而且大大减少了单位面积投资。

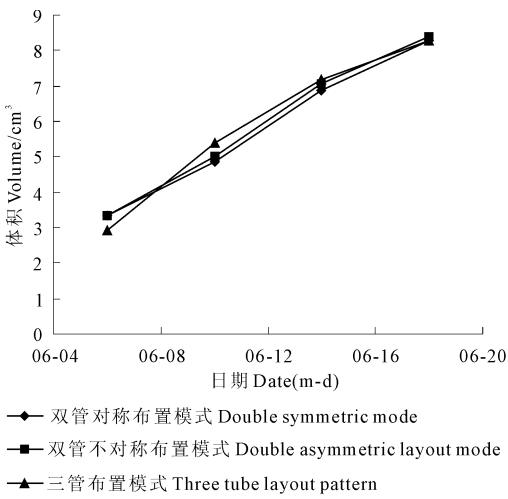


图 7 鄯善试验点不同灌水技术果粒体积变化
Fig.7 Volume change of single grape with different irrigation techniques at Shanshan Experiment Point

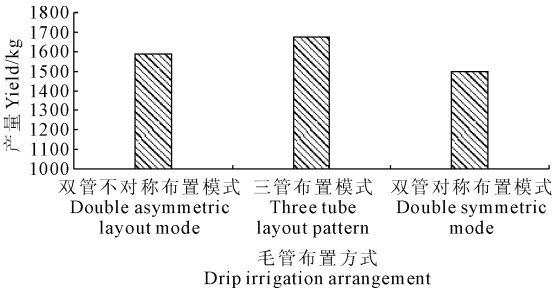


图 8 鄯善试验点不同处理葡萄产量变化
Fig.8 The grape yield changes with different treatments at Shanshan Experiment Point

4 结 论

通过模拟分析,双管不对称和三管布置条件下湿润剖面比较接近,双管不对称布置模式水分分布比较均匀,垂直湿润深度在 60 cm 左右,水平湿润宽度约 100 cm;三管布置模式的垂直湿润深度为 60 cm,水平湿润宽度约 120 cm。根系垂直耗水部位主要在垂直 20 ~ 60 cm 深度范围内;水平耗水部位主要在主根位置沿沟方向 60 cm 范围内,沿垄方向 30 cm 范围内。滴头流量水平湿润范围基本一致,土壤湿润深度都可以满足根系吸水的要求,并且能与调查的葡萄根系分布的范围较好地吻合。

通过软件模拟分析和现场试验对照,结合葡萄生长势和产量的对比分析可以看出,三管布置和双

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 SIRMOLD 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.