doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.08.029

基于 SISM 模型和畦灌技术的冬小麦最小灌水定额研究

史　源　白美健　李益农　章少辉　李亦凡　戴　玮
（中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室，北京 100038）

摘要：为确定满足畦灌技术约束下的冬小麦最小灌水定额，采用地面灌溉水流运动模拟模型 SISM，结合华北地区畦灌现状，考虑畦田长度、坡度、田面标准差、微地形空间分布差异及入畦单宽流量等要素，设计 53 088 种畦灌技术要素组合，以地面灌溉水流覆盖整个田块和最小灌水深度 $Z_{min}>0$ 为控制条件，对不同技术要素组合下的灌水过程进行模拟，分析畦灌技术要素和灌水性能指标值的对应关系，结合畦灌数值模拟试验结果，提出 3 种代表性畦田长度（50、100、150 m）下田面标准差、坡度、入畦单宽流量等畦灌要素的建议范围。在不考虑畦田布置优化方案的条件下，3 种代表性畦长畦灌最小灌水定额不宜低于 84、117、148 mm；在地面灌溉技术及畦田布置方案优化的条件下，3 种代表性畦长畦灌最小灌水定额不宜低于 71、75、79 mm。

关键词：冬小麦；畦灌；数值模拟；SISM 模型；灌水定额
中图分类号：S274　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2021)08-0278-09　　**OSID**：

Minimum Irrigation Quota of Winter Wheat Based on SISM Model and Border Irrigation Technology

SHI Yuan　BAI Meijian　LI Yinong　ZHANG Shaohui　LI Yifan　DAI Wei
(*State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin*, *China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100038, *China*)

Abstract: The irrigation process under different combinations of border irrigation technology elements was simulated to obtain the corresponding border irrigation performance index values, and determine the minimum irrigation quota under different combinations of border irrigation technology elements in North China Plain. Combined with the current situation of border irrigation in North China Plain, the border length, slope, field leveling accuracy, micro-topography spatial distribution difference and border unit width flow were taken into account, including 53 088 border irrigation technology elements in total. The whole field was covered with the surface irrigation water, the minimum irrigation depth $Z_{min}>0$ was taken as the control condition, and the SISM model was taken to simulate the irrigation process under the combination of different technology elements, analyze the corresponding relationship between border irrigation technology elements and irrigation performance index values, and by combining with the test results of border irrigation numerical simulation and relevant regulations of surface irrigation, the recommended range of border irrigation elements under three representative lengths of border field 50 m, 100 m and 150 m (such as field leveling accuracy S_d, slope S_p, and unit width flow q) was proposed. The minimum irrigation quota of three representative border lengths should not be lower than 84 mm, 117 mm and 148 mm under normal conditions, and the minimum irrigation quota of three representative border lengths should not be lower than 71 mm, 75 mm, and 79 mm under the optimized conditions.

Key words: winter wheat; border irrigation; numerical simulation; SISM model; irrigation quota

收稿日期：2021－03－08　修回日期：2021－04－03
基金项目：兵团科技攻关项目(2019AB035)和国家自然科学基金项目(52009143)
作者简介：史源(1982—)，男，高级工程师，博士，主要从事节水灌溉技术研究，E-mail：86091263@qq.com
通信作者：白美健(1974—)，女，教授级高级工程师，博士，主要从事节水灌溉技术研究，E-mail：baimj@iwhr.com

0　引言

目前，地面灌溉是我国乃至世界范围内应用最为广泛的灌溉方法，具有基础设施简单、操作简便、成本低廉等特点[1]。在世界范围内，地面灌溉面积占总灌溉面积 90% 以上[2]，美国占比为 50.7%[3]，我国占比为 86.4%[4]。冬小麦是华北地区主要粮食作物，以畦灌为主的地面灌溉是冬小麦普遍采用的灌溉方法，但由于田间管理粗放、相关畦灌要素设置及管理不合理等因素，导致田间灌水质量不高、灌水效率较低。

现有的地面灌溉优化研究主要集中在畦田规格、入畦流量、田间微地形、改口成数等灌水技术要素及灌水质量评价优化等方面。林性粹等[5]建议按照农机设备作业宽度的整数倍来确定地面灌溉畦田宽度，一般取 1.5 ~ 5 m，窄畦有利于获得较好的灌水质量，建议不超过 3 m，畦田长度按照田面坡度、土壤质地及透水性能来确定，自流灌区建议取 50 ~ 100 m，井灌区建议取 10 ~ 50 m，我国《节水灌溉工程技术标准》[6]建议畦田长度不宜超过 75 m。对于田面坡度，郭元裕[7]认为 0.1% ~0.3% 的田面坡度较为适宜。入畦单宽流量取决于畦长、土壤入渗能力、田面坡度等因素，王京等[8]认为砂壤土较为适宜的入畦单宽流量为 4 ~9 L/(s·m)，粘壤土为 3 ~6 L/(s·m)，畦长较短、田面坡度较大时建议取小些，反之取大些。刘钰等[9]在河北省雄县采用 ISAREG 模型对不同灌溉制度的田间试验成果进行了模拟，结果显示，现行灌溉定额大大超过灌溉需水量，其原因是受地面灌水技术的制约，并定性提出了改进地面灌溉技术的优化方案。史学斌[10]在关中平原灌区进行了试验，得到不同土壤和灌溉条件下的最佳灌水技术组合，可以保证灌水效率和灌水均匀度在 80% 以上。李援农等[11]选择开孔直径、开孔率、单宽流量和地面坡度 4 个因素，采用正交试验方法获得合理的地面灌溉技术要素组合。白美健等[12]提出了畦灌控制指标 R 和畦灌关口时间优化方法，通过数值模拟得出不同灌溉条件下畦灌关口控制模式。

随着华北地区“节水压采”行动的开展及最严格水资源管理制度的实施，对冬小麦等粮食作物用水总量及灌溉定额的控制提出了明确的要求，以北京市为例，明确要求以冬小麦为主的灌溉粮田、露地蔬菜年灌溉定额不超过 300 mm[13]。在灌水总量的限制下，优化灌溉制度的实施在很大程度上取决于地面灌溉技术的改进与完善。目前，考虑灌水技术约束下灌溉制度优化的研究成果较少，现有作物灌溉制度优化研究较适用于喷灌、滴灌及较为精细的小区试验条件，而地面灌溉下由于水流直接以田面为载体运动，要满足水流覆盖整个畦田，灌溉水量必须达到一定值，相关研究并未考虑受地面灌溉技术约束的最小灌水定额要求。

本文采用地面灌溉水流运动模拟模型(SISM)模拟不同技术要素组合下的灌水过程，获得相应的畦灌性能指标值，分析确定研究区冬小麦不同畦灌要素组合下的最小单次灌水定额，以提供具有较强可操作性的畦田布置应用模式。

1　材料与方法

1.1　地面灌溉水流运动模拟模型 SISM

采用作者所在课题组开发的地面灌溉水流运动模拟模型(SISM 模型)进行地面灌溉过程的模拟研究[14]。SISM 模型可以针对一维、二维畦灌、沟灌等地面灌溉过程进行模拟。该模型以圣维南全水动力学方程为基础，建立地面灌溉水流运动流速、水深和畦田内任意断面间的水力关系，利用二阶时空离散精度的混合数值解法来求解全水动力学方程[15-16]，该模型虽然求解较为复杂，但模型方程求解方法具有更强的稳定性和收敛性，模拟精度高，适用范围广，能精确地描述畦灌水动力学过程[17]。

一维地表畦灌水流运动过程如图 1 所示，沿畦长方向任意断面 Δx，满足质量守恒及动量守恒方程，即

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial q}{\partial x}=-i_c \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t}=-g\frac{\partial h}{\partial x}-g\frac{\partial b}{\partial x}-gS_f \tag{2}$$

式中　h——地表水深，m

t——水流运动时间，s

q——灌水单宽流量，L/(s·m)

x——水平方向坐标，m

i_c——地表水入渗率，L/(s·m^2)

U——水流速度，m/s

g——重力加速度，m/s^2

b——田面高程，m

S_f——畦田摩擦阻力

将式(1)、(2)进一步推导求解为显-隐时间格

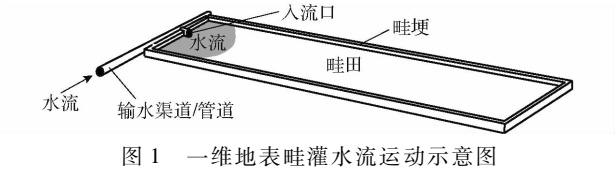

图 1　一维地表畦灌水流运动示意图

Fig. 1　Schematic view of one-dimensional surface flow movement in border irrigation

式,通过空间离散形成矩阵方程组来求解,最终获得沿畦长及任意垂向断面的流场分布及数值模拟结果[14]。华北地区冬小麦耕作的畦田宽度普遍为1.5~3 m,因此比较适合采用 SISM 模型的畦灌一维模拟模块进行数值模拟。本文作者所在团队于2011—2016 年在华北地区北京、河北等地进行了系统的田间试验,进行模型参数的率定及验证,模拟结果表明[17-19],SISM 模型对于一维畦灌水流运动过程表现出较好的收敛性和准确性,可以用于畦灌水流运动模拟。

1.2 地面灌溉模拟性能评价指标与方法

目前较为常用的地面灌溉灌水质量评价指标为灌水效率 E_a、灌水均匀度 C_u和储水效率 E_s等3 个评价指标[20],灌水效率 E_a是灌水后储存在土壤计划湿润层的水量占总灌水量百分比,灌水均匀度 C_u反映了沿畦长方向灌溉水量在田间入渗的分布均匀程度,储水效率 E_s反映了作物灌水后计划湿润层的储水量对作物需水量的满足程度[21-22]。理想的地面灌溉技术组合参数应使上述 3 个评价指标达到最大值,但在实际应用中很难实现,因为灌水效率提高,储水效率就会降低,两者互为矛盾,因此,本文同时采用上述 3 个指标进行地面灌溉模拟性能评价。相关计算公式为

$$E_a = \frac{V_{ZR}}{V_{ZR} + V_{DP}} \times 100\% \tag{3}$$

$$C_u = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} | Z_i - Z_{avg} |}{nZ_{avg}}\right) \times 100\% \tag{4}$$

$$E_s = \frac{\sum_{i=1}^{n} h_i}{nZ_{req}} \times 100\% \tag{5}$$

其中 $V_{ZR} = (\theta_b - \theta_a) R_D$

式中 V_{ZR}——灌水后储存在土壤计划湿润层的水量(可以用灌水前后土壤体积含水量差值计算),m^3

θ_b、θ_a——土壤灌前、灌后计划湿润层平均体积含水量,cm^3/cm^3

R_D——土壤计划湿润层深度,mm

V_{DP}——土壤深层渗漏水量,m^3

n——畦田测点数

Z_i——第 i 个测点灌水深度,mm

Z_{avg}——畦田平均灌水深度,mm

h_i——灌水后第 i 个测点存储在计划湿润层的水量深度,mm

Z_{req}——作物灌溉需水量,mm

1.3 数值模拟试验设计

模型输入的参数包括:畦长(m)、灌水时间(min)、灌溉需水量(mm)、灌溉入畦单宽流量(L/(s·m))、Kostiakov 土壤入渗物理经验参数 k、糙率系数 α、田面高程(m)、田面相对高程标准偏差(以下简称田面标准差)(cm)。根据相关文献及作者所在研究团队在华北等地田间试验的实测值[20,23-24],土壤质地选取砂壤土,Kostiakov 土壤入渗参数采用田间试验处理反求的入渗能力最大的一组作为模型输入参数,即 $k=251$,$\alpha=0.31$,因为入渗能力最大,理论上其对应的最小灌水定额最大,畦灌关口控制指标,以最小灌水深度大于 0,即 $Z_{\min}>0$ 为控制指标,模型输入的畦灌要素组合见表 1。

进一步考虑田面微地形的空间分布组合,采用白美健[25]的研究成果,应用田间微地形空间分布模拟软件,生成相应的地形文件,作为 SISM 模型的地形输入文件。田间微地形具有很大的空间变异性,

表 1 畦灌数值模拟试验要素组合

Tab.1 Combinations of numerical test elements in border irrigation

畦灌要素	畦长 L/m	田面标准差 S_d/cm	坡度 S_p/%	入畦单宽流量 q/(L·s^{-1}·m^{-1})	作物灌溉需水量 Z_{req}/mm
要素组合	50、60、70、80、90、100、110、120、130、140、150、160、170、180、190、200	2、3、4、5、6	0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5	2、3、4、5、6、7、8	80
水平数	16	5	6	7	1

相同的田面标准差,理论上可以对应无数种田间微地形(畦面相对高程),对随机生成的微地形空间样本容量进行分析,当样本容量达到一定数量时,其对应的地面灌溉性能指标值也趋于稳定[26],样本容量的均值和标准偏差,可以用其稳定值来近似代替。采用其研究成果,当田面标准差 S_d分别为 2、3、4、5、6 cm 时,田间微地形的最小样本数量分别为 4、12、15、20、28 个,即 5 种不同水平下田面标准差的地形,可以用 79 个田间微地形文件代表。

结合华北地区砂壤土的代表性土壤参数、$Z_{\min}>0$ 的灌溉控制目标、50~200 m 畦田长度下 16 类畦田规格、0~0.5% 的 6 类田面坡度、2~8 L/(s·m)的 7 类入畦单宽流量,以及 80 mm 的作物灌溉需水量[27],采用正交组合,共产生 53 088 种灌溉模拟情景,采用 SISM 模型进行数值模拟。模拟过程中根据灌溉控制指标试算反求出灌溉关口时

间(min)，对于相同畦田规格的田间微地形文件，例如，田面坡度 S_p 为 0.1%、畦长 L 为 50 m、田面标准差 S_d 为 4 cm 下对应的田间微地形文件有 15 个，分析这 15 个灌溉情景对应模拟结果反求的灌溉关口时间的平均值，与该平均值最接近的灌溉关口时间(min)，定义为代表性关口时间，其对应的田间微地形文件及模型模拟结果，作为该地形组合的代表性模拟场景，故从 53 088 种灌溉模拟场景中选取 3 360 种模拟场景，作为灌溉要素组合对应的灌溉性能参数的数据库。

模拟输出数据包括：田面各点水流推进时间(min)、消退时间(min)、地表水深(mm)、入渗深度(mm)、入渗 1/4 畦田内最小灌水深度(mm)、平均灌水深度(mm)，以及储水效率 E_s(%)、灌水效率 E_a(%)、灌水均匀度 C_u(%)等灌溉性能评价指标。

2　结果与分析

2.1　数值模拟试验结果分析

根据以上数值模拟试验结果，分析不同组合的畦灌技术要素对灌溉性能及平均灌水深度(灌水定额)的影响。受篇幅限制，本文未列出全部结果，根据试验结果分析，田面标准差 S_d 的变化不会显著改变上述指标值与畦长 L、入畦单宽流量 q、坡度 S_p 3 个畦灌技术要素的响应关系，因此，首先设定 S_d 为 3 cm，分析畦长 L、入畦单宽流量 q、田面坡度 S_p 的组合情景，对灌溉性能和平均灌水深度(灌水定额)的影响，其他畦灌要素组合的影响趋势与 S_d = 3 cm 时的变化趋势相似。再设定 L 为 50、100、150 m 3 种代表性畦长和 S_p 为 0.3%，分析田面标准差 S_d、入畦单宽流量 q 的组合情景，对灌溉性能和平均灌水深度(灌水定额)的影响，其他畦灌要素组合的影响趋势与 L 为 50、100、150 m 和 S_p 为 0.3% 时的变化趋势相似。

2.1.1　畦灌技术要素对灌溉性能的影响

畦灌技术要素对灌溉性能的影响如图 2～5 所示。

由图 2～4 可知，随着畦长 L 的增加，灌溉水流推进的距离增加，推进到畦尾耗时耗水，灌水时间和灌水量增加，灌水效率 E_a 显著减小，灌水均匀度 C_u 和储水效率 E_s 波动较大，但总体趋势是逐渐增加，

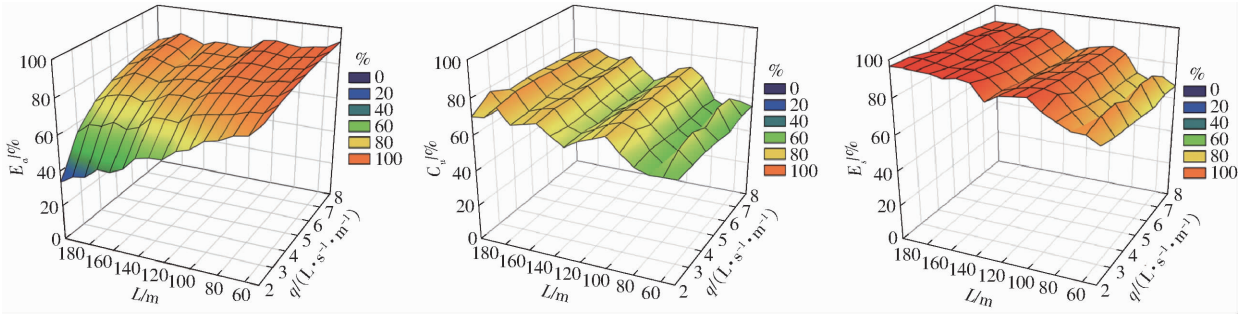

图 2　S_d = 3 cm 和 S_p = 0.1% 时灌溉性能随 L 和 q 的变化

Fig. 2　Irrigation performance with different values of L and q (S_d = 3 cm, S_p = 0.1%)

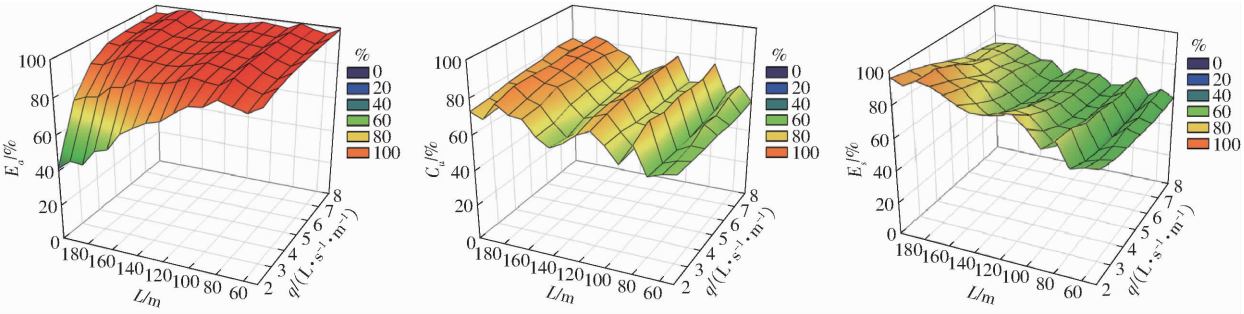

图 3　S_d = 3 cm 和 S_p = 0.3% 时灌溉性能随 L 和 q 的变化

Fig. 3　Irrigation performance with different values of L and q (S_d = 3 cm, S_p = 0.3%)

二者变化趋势显著程度不及灌水效率 E_a，并且灌水均匀度 C_u 的变化趋势显著程度更小，总体而言，E_a 和 E_s 受 L 变化的影响比较大，参数敏感性较强(曲线斜率较大)，而 C_u 对 L 变化的参数敏感性较小。

由图 2～4 可知，随着入畦单宽流量 q 的增加，灌溉水流在畦田内推进速度加快，推进时间缩短，畦田土壤水分入渗分布更为均匀，灌水效率 E_a 显著增加，灌水均匀度 C_u 逐渐增加，储水效率 E_s 逐渐减少，灌水均匀度 C_u 的变幅小于储水效率 E_s 的变幅，总体而言，E_a 受 q 变化的影响比较大，参数敏感性较强，C_u 和 E_s 对 q 的变化也具有比较显著的参数敏感性。

由图 2～4 可知，坡度 S_p 会影响水流的推进速

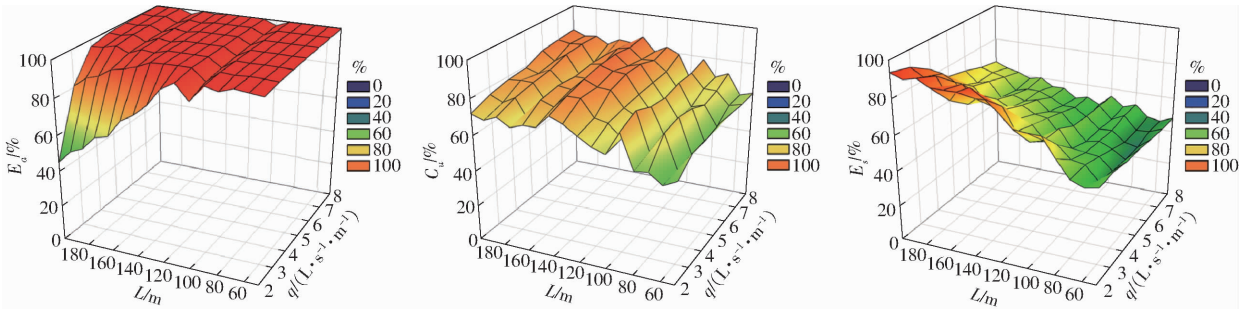

图 4 S_d = 3 cm 和 S_p = 0.5% 时灌溉性能随 L 和 q 的变化

Fig. 4 Irrigation performance with different values of L and q (S_d = 3 cm, S_p = 0.5%)

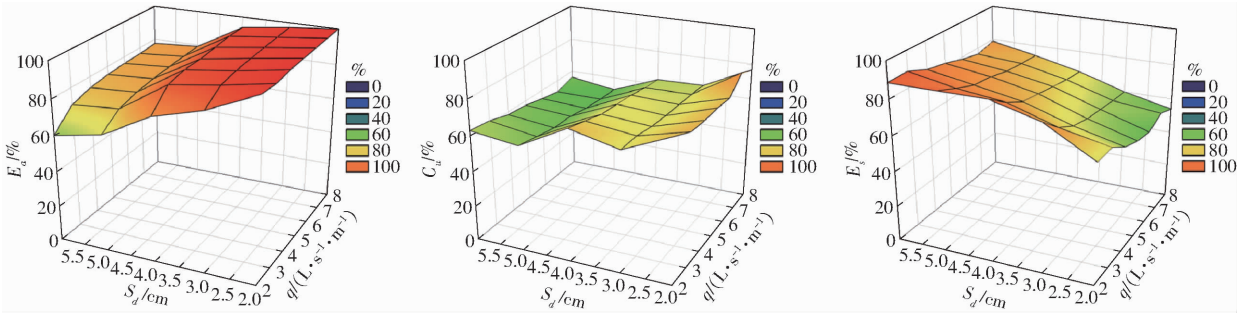

图 5 L = 100 m 和 S_p = 0.3% 时灌溉性能随 S_d 和 q 的变化

Fig. 5 Irrigation performance with different values of S_d and q (L = 100 m, S_p = 0.3%)

度,较大的坡度可以使灌溉水流较快推进到畦尾,提高灌水效率 E_a,但较大的坡度又会导致畦尾积水,降低储水效率 E_s,总体而言,灌水效率 E_a、储水效率 E_s受坡度 S_p变化的影响比较大,参数敏感性较强,并且随着入畦单宽流量 q 的增加,这种敏感程度更进一步加强,而灌水均匀度 C_u对坡度 S_p变化的参数敏感性较小。

由图5 可知,田面标准差 S_d的变化,对 3 个灌溉性能评价指标的影响都较为显著,随着田面标准差 S_d的增加,畦田地表空间变异性增加,灌溉时间大幅增加,灌溉性能递减加快,灌水效率 E_a和灌水均匀度 C_u显著减小,储水效率 E_s显著增加,总体而言,3 个灌溉性能评价指标对田面标准差 S_d的变化都具有较强的参数敏感性,而畦长 L、入畦单宽流量 q、坡度 S_p 3 个灌水技术参数的变化对田面标准差 S_d的变化响应程度较小。

2.1.2 畦灌技术要素对平均灌水深度的影响

畦灌技术要素对平均灌水深度的影响见图 6、7。

由图 6 可知,随着畦长 L 的增加,灌溉水流推进的距离增加,平均灌水深度 Z_{avg}显著增加,尤其是在入畦单宽流量 q 较小($q \leqslant 4$ L/(s·m))的情况下,总体而言,在 q 较小的情况下,Z_{avg}对 L 变化的参数敏感性较强。

由图 6、7 可知,随着入畦单宽流量 q 的增加,灌溉水流在畦田内推进速度加快,推进时间缩短,平均灌水深度 Z_{avg}呈减小的趋势,在畦长 $L \leqslant$ 120 m,且田面标准差较小的情况下,平均灌水深度 Z_{avg}随入畦单宽流量 q 的变化较小,畦长 L 超过 120 m 后,若田面标准差较大,则 Z_{avg}对 q 变化的参数敏感性较强。

由图 6 可知,不同的坡度 S_p会影响水流的推进速度,较大的坡度可以使灌溉水流较快推进到畦尾,减小平均灌水深度 Z_{avg},总体而言,平均灌水深度 Z_{avg}受坡度 S_p变化的影响比较大,参数敏感性较强。

由图 7 可知,田面标准差 S_d的变化,对平均灌水深度 Z_{avg}的影响较为显著,随着田面标准差 S_d的增加,畦田地表空间变异性增加,对地表水流推进消退时间、地表水深及入渗深度有较大影响,导致平均灌水深度 Z_{avg}显著增加,总体而言,平均灌水深度 Z_{avg}对田面标准差 S_d的变化具有较强的参数敏感性。

根据上述分析,对于灌溉评价指标,在砂壤土灌溉关口控制指标为 $Z_{\min} > 0$ 的条件下,选取灌水效率 E_a作为一维畦灌灌水质量评价的主要控制指标较为合理,而灌水均匀度 C_u和储水效率 E_s可以作为辅助控制指标。而平均灌水深度 Z_{avg}与各项畦灌控制指标也具有显著的响应关系。地面畦灌过程中,灌溉水流直接以田面为载体,受其约束,畦灌最小灌水定额与畦灌技术要素组合密切相关,如果想输入较小的灌水定额来获得较好的灌水效果,在不进行畦灌技术要素优化的前提下,是难以实现的。

2.2 华北地区典型畦灌技术要素组合下的最小灌水定额

根据在华北地区现场调研及参照文献[28 –

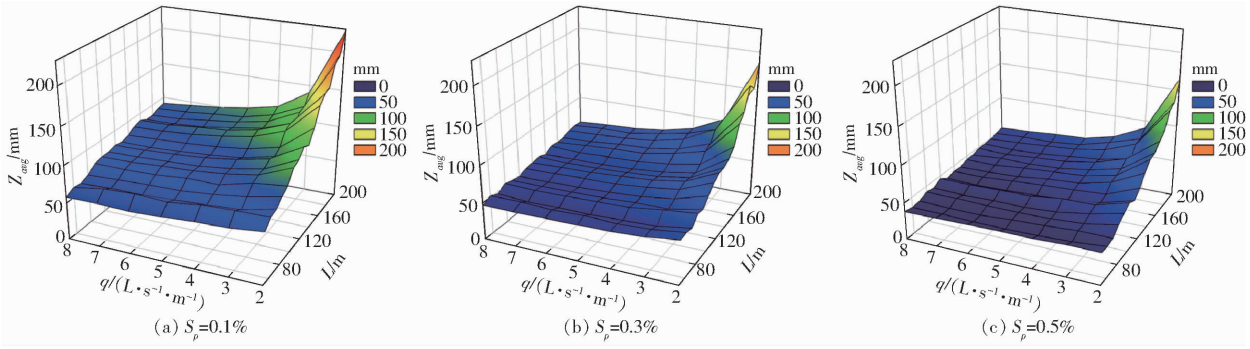

图 6　S_d = 3 cm 时平均灌水深度随 L 和 q 的变化

Fig. 6　Average water depth with different values of L and q(S_d = 3 cm)

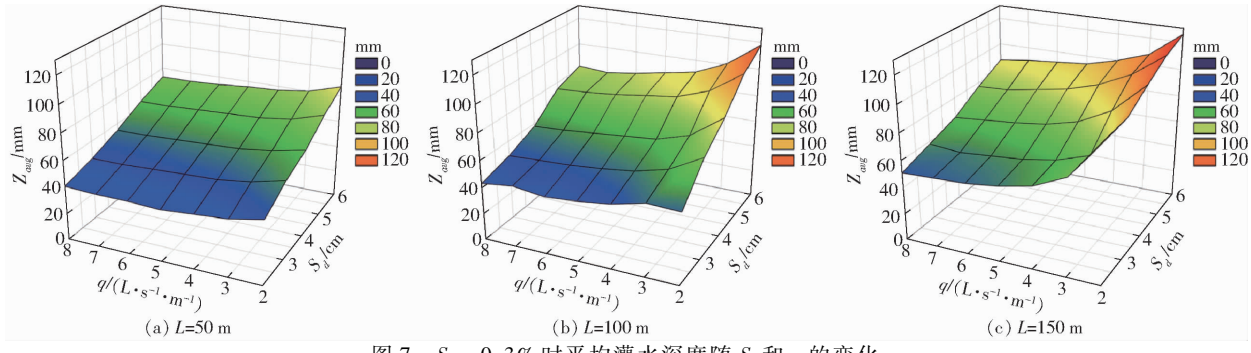

图 7　S_p = 0.3% 时平均灌水深度随 S_d 和 q 的变化

Fig. 7　Average water depth with different values of S_d and q(S_p = 0.3%)

29]，华北地区大田作物畦灌的畦长普遍在50～150 m，因此选取 3 个代表性畦田长度 50、100、150 m，根据以上数值模拟试验结果，以非充分灌溉条件下最小灌水深度 $Z_{min}>0$ 为灌溉性能控制条件，分析典型畦灌技术要素下的最小灌水定额。

2.2.1　最小灌水定额确定

以代表性畦长 50 m 下的模拟试验结果为例，共有 210 个处理，绘制所有模拟试验处理中得到的平均灌水深度 Z_{avg} 的频数直方图及累积频率分布图，见图 8a，Z_{avg} 在 31～125 mm 之间，平均值为 64 mm，变异系数（CV）为 0.32，其中大部分处理的 Z_{avg} 在 85 mm 以内。类似的，100 m 代表性畦长下 210 个模拟试验结果中，Z_{avg} 在 36～190 mm 之间，平均值为 84 mm，CV 为 0.38，其中大部分处理 Z_{avg} 在120 mm 以内；150 m 代表性畦长下 210 个模拟试验结果中，Z_{avg} 在 41～260 mm 之间，平均值为 99 mm，CV 为 0.41，其中大部分处理的 Z_{avg} 在 140 mm 以内。对各累积频率曲线进行方程拟合，获得平均灌水深度 Z_{avg} 的累积频率拟合方程。

对于最小灌水定额的确定，模拟试验设计中的畦灌要素组合基本可以涵盖实际工程中的各类现实条件，在实际的田间灌水操作中，从提高灌水效率、减少灌溉用水量的角度考虑，应当允许一定的“失败”概率，即灌溉水流不能在 100% 的情况下推进到畦尾的灌水事件。因此，考虑实际灌水的工程需求，综合设定 80% 的灌水事件成功保证率（频率），由累积频率拟合方程推求，3 种代表性畦长 50、100、150 m 下最小灌水定额分别为 84、117、148 mm，即在不考虑畦田布置优化方案的条件下，3 种代表性畦长畦灌最小灌水定额不宜低于上述值。

2.2.2　畦灌技术组合优化下的最小灌水定额确定

结合模拟试验结果，并依据 SL/T 246—2019《灌溉与排水工程技术管理规程》及相关试验研究成果[10-11,28]，地面灌溉前田间灌溉设施应进行修整，土壤入渗能力强、田面坡度小、土地平整差，畦田长度宜短些，反之，畦田宜长些，灌水效率不应低于 80%，灌水均匀度不应低于 60%，田间水利用率应符合 GB/T 50563—2018《节水灌溉工程技术标准》[6]的规定，井灌区不应低于 0.8。综上，3 种代表性畦长下推荐的畦灌技术组合方案见表 2，并从所有畦灌模拟试验处理中筛选出符合条件的试验处理，进行 3 种代表性畦长下最小灌水深度的确定。

代表性畦长 50 m 对应模拟试验组合 96 个，绘制上述试验处理中得到的平均灌水深度 Z_{avg} 的频数直方图及累积频率分布图，见图 9a，Z_{avg} 在 31～100 mm 之间，平均值为 56 mm，CV 为 0.28，其中大部分处理的 Z_{avg} 在 80 mm 以内。类似的，代表性畦长 100 m，对应模拟试验组合 64 个，Z_{avg} 在 39～102 mm 之间，平均值为 61 mm，CV 为 0.23，其中大部分处理的 Z_{avg}

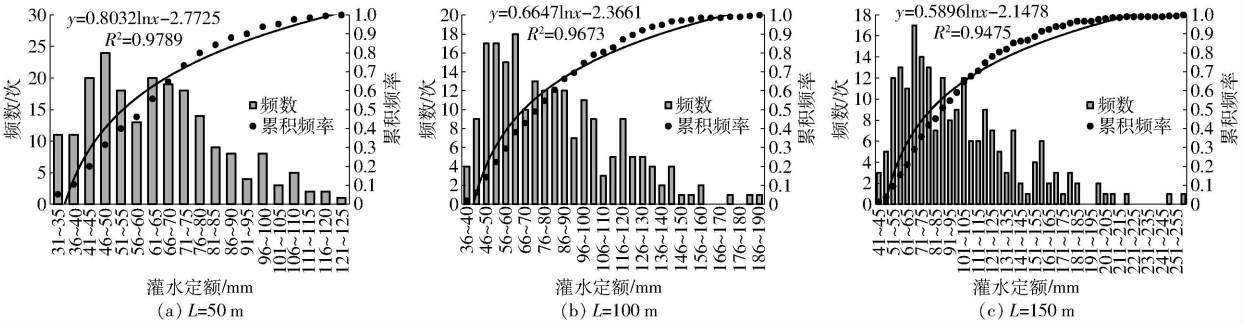

图 8 3 种代表性畦长下 Z_{avg} 频数直方图及累积频率分布

Fig. 8 Frequency histogram and probability distribution diagram of Z_{avg} under three representative border lengths

表 2 畦灌技术要素建议组合

Tab. 2 Recommended combination of border irrigation technology elements

畦灌要素	畦长 L/m	田面标准差 S_d/cm	坡度 S_p/%	入畦单宽流量 q/(L·s^{-1}·m^{-1})	符合条件的灌溉事件组合/个
要素组合	50	2、3、4、5	0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5	5、6、7、8	96
	100	2、3、4、5	0.2、0.3、0.4、0.5	3、4、5、6	64
	150	2、3、4、5	0.4、0.5	3、4、5、6	32

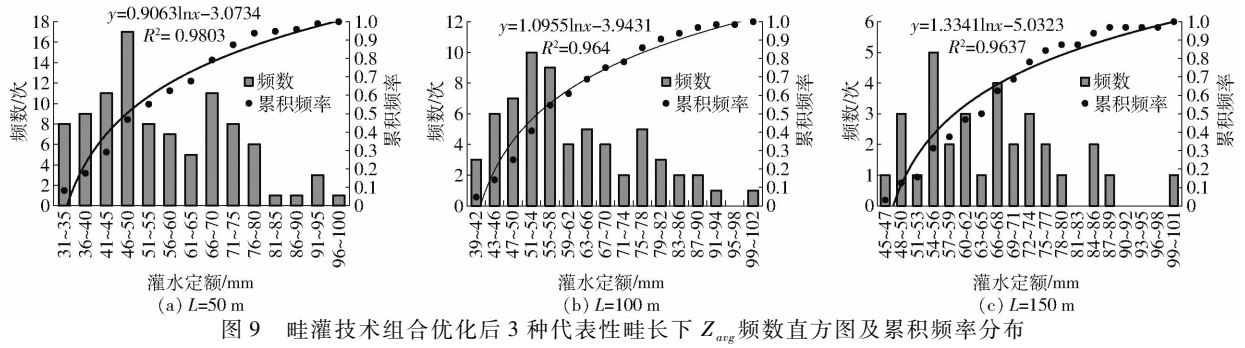

图 9 畦灌技术组合优化后 3 种代表性畦长下 Z_{avg} 频数直方图及累积频率分布

Fig. 9 Frequency histogram and probability distribution diagram of Z_{avg} under three representative border lengths after optimization

在 82 mm 以内;代表性畦长 150 m,对应模拟试验组合 32 个,Z_{avg} 在 45 ~ 101 mm 之间,平均值为 66 mm,CV 为 0.19,其中大部分处理的 Z_{avg} 在 85 mm 以内。

借鉴全部模拟场景下最小灌水定额确定的原则,综合设定 80% 的灌水事件成功保证率(频率),由累积频率拟合方程推求,3 种代表性畦长 50、100、150 m 下最小灌水定额分别为 71、75、79 mm,即在采用畦灌技术组合优化的条件下,3 种代表性畦长畦灌最小灌水定额不宜低于上述值。

结合我国华北地区的实际情况,地面灌溉的技术要素约束中,田面坡度、田面标准差等技术参数,通常已由田块实际情况确定,除非采用激光平地等土地精细平整措施,否则地面灌溉工程在生产实际中很难进一步优化。入畦单宽流量、灌水时间(改口成数)等管理参数,既取决于畦田技术约束,也取决于灌溉系统的性能约束,在生产实际进行优化需要考虑多方面的制约。因此,对于地面灌溉技术的改进,最有效的方法就是对畦田长度进行优化,以提高畦灌灌水性能。结合上述分析结果,无论是从灌水技术田间管理,还是从灌溉制度应用的角度,华北地区畦灌技术应用,建议采用 50 m 左右的短畦,可以取得较好的效果。

3 结论

(1)灌水效率 E_a 和储水效率 E_s 对各畦灌要素变化响应较为敏感,灌水效率 E_a 随畦长 L 的减小、入畦单宽流量 q 的增加、坡度 S_p 的增加、田面标准差 S_d 的减小而显著增加,储水效率 E_s 随畦长 L 的增加、入畦单宽流量 q 的减小、坡度 S_p 的减小、田面标准差 S_d 的增加而逐渐增加,灌水均匀度 C_u 对畦灌要素的变化也有规律性的响应,但敏感性较小。总体而言,选取灌水效率 E_a 作为一维畦灌灌水质量评价的主要控制指标较为合理,而灌水均匀度 C_u 和储水效率 E_s 可以作为辅助控制指标。

(2)平均灌水深度 Z_{avg} 与各畦灌要素也具有较为显著的响应关系,平均灌水深度 Z_{avg} 随畦长 L 的增加(尤其是 $q \leqslant 4$ L/(s·m)条件下)、入畦单宽流量 q 的减小(尤其是 $L > 120$ m 条件下)、坡度 S_p 的减

小、田面标准差 S_d 的增加而显著增加。

(3)不同畦灌技术要素组合下，满足水流覆盖整个田面的最小灌水定额变化范围较大。在不考虑优化技术要素组合的条件下，50、100、150 m 3 种代表性畦长畦灌最小灌水定额不宜低于 84、117、148 mm。基于在未来改进地面灌溉技术及畦田布置方案优化的基础上，3 种代表性畦长畦灌最小灌水定额不宜低于 71、75、79 mm。

(4)华北地区畦灌技术应用建议采用 50 m 左右的短畦，可以取得较好的效果。

参 考 文 献

[1] 缴锡云，王维汉. 沟畦灌溉稳健设计[M]. 南京：河海大学出版社，2012.

[2] RICHARD G A，PEREIRA L S. FAO irrigation and drainage paper No.56[M]. Roma:FAO，1998.

[3] 段爱旺，白晓君. 美国灌溉现状分析[J]. 灌溉排水，1998，18(1)：52－56.
DUAN Aiwang，BAI Xiaojun. Present situation of irrigation in USA [J]. Irrigation and Drainage，1998，18(1)：52－56.（in Chinese）

[4] 中华人民共和国水利部. 中国水利统计年鉴 2017[M]. 北京：中国水利水电出版社，2018.

[5] 林性粹，赵乐诗. 旱作物地面灌溉节水技术[M]. 北京：中国水利水电出版社，1999.

[6] 中华人民共和国水利部. 节水灌溉工程技术标准:GB/T　50363—2018[S]. 北京:中国计划出版社,2018.

[7] 郭元裕. 农田水力学[M]. 北京：中国水利水电出版社，1997.

[8] 王京，史学斌，宋玲，等. 畦田水流特性及灌水质量的分析[J]. 中国农村水利水电，2005(6)：4－7.
WANG Jing，SHI Xuebin，SONG Ling，et al. Analysis of water flow performance and irrigation efficiency of border irrigation [J]. China Rural Water and Hydropower,2005(6)：4－7.（in Chinese）

[9] 刘钰，PEREIRA L S. 考虑地面灌水技术制约的灌溉制度优化[J]. 农业工程学报，2003，19(4)：74－79.
LIU Yu，PEREIRA L S. Optimization of irrigation scheduling considering constraints of surface irrigation technology [J]. Transactions of the CSAE，2003，19(4)：74－79.（in Chinese）

[10] 史学斌. 畦灌水流运动数值模拟与关中西部灌水技术指标研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2005.
SHI Xuebin. Study on border irrigation water current movement mathmatical simulation and irrigation technique index in the west of Guanzhong [D]. Yangling：Northwest A&F University，2005.（in Chinese）

[11] 李援农，张晓鹏，费良军，等. 垄膜覆盖膜孔沟灌技术要素试验研究[J]. 干旱地区农业研究，2006，24(4)：33－35.
LI Yuannong，ZHANG Xiaopeng，FEI Liangjun，et al. Study on technical variables in film hole furrow irrigation with plastic-covered ridge[J]. Agricultural Research in the Arid Areas，2006，24(4)：33－35.（in Chinese）

[12] 白美健，李益农，涂书芳，等. 畦灌关口时间优化改善灌水质量分析[J]. 农业工程学报，2016，32(2)：105－110.
BAI Meijian，LI Yinong，TU Shufang，et al. Analysis on cutoff time optimization of border irrigation to improve irrigated water quality[J]. Transactions of the CSAE，2016，32(2)：105－110.（in Chinese）

[13] 北京市人民政府办公厅关于印发《北京市推进“两田一园”高效节水工作方案》的通知 [EB/OL]. http://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/201905/t 20190522 _60378.html.

[14] 章少辉，许迪，李益农. 基于混合数值解法的一维全水动力学畦灌模型[J]. 农业工程学报，2009，25(9)：7－14.
ZHANG Shaohui，XU Di，LI Yinong. One-dimensional complete hydrodynamic model for border irrigation based on hybrid numerical method[J]. Transactions of the CSAE，2009,25(9):7－14.（in Chinese）

[15] 章少辉. 畦灌两种施肥方式下地表水流溶质运移模拟方法及应用[D]. 北京：中国水利水电科学研究院，2012.
ZHANG Shaohui. Modeling and applicatin of basin surface water flow and solute transport with two fertilization methods[D]. Beijing：China Institute of Water Resources and Hydropower Research，2012.（in Chinese）

[16] 董勤各，许迪，章少辉，等. 一维畦灌地表水流-土壤水动力学耦合模型Ⅰ:建模[J]. 水利学报，2013，44(5)：570－577.
DONG Qin'ge，XU Di，ZHANG Shaohui，et al. Coupled surface－subsurface hydrodynamic model for border irrigation Ⅰ. Model development [J]. Journal of Hydraulic Engineering，2013，44(5)：570－577.（in Chinese）

[17] 吴彩丽. 基于实时地表水流推进数据反馈控制畦灌过程的机理与方法[D]. 北京：中国水利水电科学研究院，2015.
WU Caili. The mehanism and method of real-time feedback control border irrigation process on surface water advance data [D]. Beijing：China Institute of Water Resources and Hydropower Research，2015.（in Chinese）

[18] 董勤各，许迪，章少辉，等. 一维畦灌地表水流-土壤水动力学耦合模型:验证[J]. 水利学报，2013，44(6)：726－729.
DONG Qin'ge，XU Di，ZHANG Shaohui，et al. Coupled surface－subsurface hydrodynamic model for border irrigation Ⅱ：validation [J]. Journal of Hydraulic Engineering，2013，44(6)：726－729.（in Chinese）

[19] 史源. 灌水总量与灌溉技术约束下华北典型区域冬小麦灌溉制度优化研究[D]. 北京：中国水利水电科学研究院，2019.
SHI Yuan. Study on the optimized irrigation schedule of winter wheat in typical regions of North China under the constraints of irrigation amount and irrigation technique[D]. Beijing：China Institute of Water Resources and Hydropower Research，2019.（in Chinese）

[20] 白美健，许迪，李益农. 随机模拟畦面微地形分布及其差异性对畦灌性能的影响[J]. 农业工程学报，2006，22(6)：28－32.
BAI Meijian，XU Di，LI Yinong. Impacts of stochastic modeling microtopograpy distribution and its discrepancy on basin irrigation performance[J]. Transactions of the CSAE，2006，22(6)：28－32.（in Chinese）

[21] 范雷雷，史海滨，李瑞平,等. 河套灌区畦灌灌水质量评价与优化[J/OL]. 农业机械学报，2019，50(6)：315－321.

FAN Leilei, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Evaluation and optimization of border irrigation performance in Hetao Irrigation District[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 315 - 321. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190636&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.036. (in Chinese)

[22] 范雷雷, 史海滨, 李瑞平,等. 河套灌区畦灌灌水质量优化与敏感性分析[J/OL]. 农业机械学报, https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20210319.1359.002.html.

[23] 黄昌永. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.

[24] 邵明安, 王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.

[25] 白美健. 微地形和入渗时空变异及其对畦灌系统影响的二维模拟评价[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2007.
BAI Meijian. The two-dimensional simulation evaluation for spatial variability of microtopography and infiltration on border irrigation system[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2007. (in Chinese)

[26] 白美健, 许迪, 李益农. 随机生成的畦面相对高程最小样本容量确定方法[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 90 - 93.
BAI Meijian, XU Di, LI Yinong. Approach for determining minimum sample content of stochastically generated surface relative elevation[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(12): 90 - 93. (in Chinese)

[27] 李久生, 饶敏杰. 地面灌溉水流特性及水分利用率的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 54 - 58.
LI Jiusheng, RAO Minjie. Field evaluation of water flow performance and application efficiency for border irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(3): 54 - 58. (in Chinese)

[28] 李援农, 范兴科. 畦田灌溉设计中存在问题及其处理方法[J]. 水土保持研究, 2002, 9(2): 48 - 50.
LI Yuannong, FAN Xingke. Existent problems in border irrigation design and countermeasures[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9(2): 48 - 50. (in Chinese)

[29] 崔振岭, 陈新平, 张福锁, 等. 不同灌溉畦长对麦田灌水均匀度与土壤硝态氮分布的影响[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(3): 88 - 91.
CUI Zhenling, CHEN Xinping, ZHANG Fusuo, et al. Effect of different border lengths on the irrigation homogeneity and soil nitrate-N distribution on wheat field [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(3): 88 - 91. (in Chinese)

(上接第 277 页)

[13] HU Xueyang, ZHENG Yili, LIANG Hao, et al. Design and test of a microdestructive tree-ring measurement system[J]. Sensors, 2020, 20(11):3253.

[14] RINN F. Basics of micro-resistance drilling for timber inspection[J]. Holztechnologie, 2012, 53(3): 24 - 29.

[15] 边春元, 满永奎. 电机原理与拖动[M]. 北京:中国邮电出版社, 2013.

[16] 徐峰, 罗建举, 符韵林. 木材学实验教程[M]. 北京:化学工业出版社, 2014:67.

[17] 杨洋, 张刚, 查家翼,等. 基于直流电机与全液压转向器直联的自动转向系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(8):44 - 54,61.
YANG Yang, ZHANG Gang, ZHA Jiayi, et al. Design of automatic steering system based on direct connection of DC motor and full hydraulic steering gear[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 44 - 54,61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx ? flag = 1 &file_no = 20200805&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.005. (in Chinese)

[18] Texas Instruments. TMS320F281x/TMS320C281x digital signal processors data manual[EB/OL]. http://www.ti.com, 2003 - 11 - 03.

[19] 丁友强, 杨丽, 张东兴, 等. 玉米变量播种机单体驱动器的设计[J]. 农业工程学报,2019,35(11):1 - 9.
DING Youqiang, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design of row-unit driver for maize variable rate planter[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(11): 1 - 9. (in Chinese)

[20] 李茂军, 刘鼎邦. 步进电机细分驱动电磁转矩分析[J]. 控制工程, 2013, 20(2):243 - 245,253.
LI Maojun, LIU Dingbang. Study on electromagnetic torque of stepping motor subdivided driving[J]. Control Engineering of China, 2013, 20(2):243 - 245,253. (in Chinese)

[21] 唐守正, 郎奎建, 李海奎. 统计和生物数学模型计算(ForStat 教程)[M]. 北京:科学出版社,2009:75 - 80.

[22] RINN F. Basics of typical resistance-drilling profiles[J]. Western Arborist, 2012, 17:30 - 36.

[23] 孙燕良, 张厚江, 朱磊,等. 微钻力阻力仪在检测木材密度中的应用研究[J]. 湖南农业科学, 2011(5):43 - 44.

[24] 孙燕良. 基于微钻阻力的古建筑木材密度与力学性能检测研究[D]. 北京:北京林业大学, 2012:10 - 18.
SUN Yanliang. Determining wood density and mechanical properties of ancient architectural timbers with micro-drilling resistance[D]. Beijng: Beijing Forestry University, 2012: 10 - 18. (in Chinese)

[25] ACUNA L, BASTERRA L A, CASADO M M, et al. Application of resistograph to obtain the density and to differentiate wood species[J]. Materiales De Construcción, 2011, 61(303):451 - 464.

[26] DOWNES G M, LAUSBERG M, POTTS B M, et al. Application of the IML Resistograph to the infield assessment of basic density in plantation eucalypts[J]. Australian Forestry, 2018, 81(3): 177 - 185.

[27] NICKOLAS H, WILLIAMS D, DOWNES G, et al. Application of resistance drilling to genetic studies of growth, wood basic density and bark thickness in *Eucalyptus globulus*[J]. Australian Forestry, 2020,83(3):172 - 179.