

▪ 灌溉技术与装备 ▪

文章编号: 1672-3317 (2022) 12 - 0044 - 09

不同因素对内镶贴片式滴灌带抗堵塞性能指标的试验研究

陶洪飞^{1,2}, 陶娟琴^{1,2}, 周良³, 李巧^{1,2},

马合木江·艾合买提^{1,2}, 姜有为^{1,2}, 杨文新^{1,2}, 魏建群^{1,2}

(1.新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2.新疆水利工程安全与水灾害防治
重点实验室, 乌鲁木齐 830052; 3.中建新疆建工, 成都 610000)

摘要:【目的】探究内镶贴片式滴灌带灌水均匀度和流量降幅与滴灌带铺设坡度、灌水水源含沙量、进水口运行压力的关系, 提高灌水均匀度和降低流量降幅, 减少滴灌带堵塞。【方法】设计铺设坡度(-1%、0%、1%)、含沙量(1、2、3 g/L)及运行压力(40、70、100 kPa)三因素三水平的均匀正交试验方案, 开展滴灌带长度为35 m的室内物理试验。【结果】灌水均匀度的影响因素大小为: 含沙量>铺设坡度>运行压力; 流量降幅的影响因素大小为: 含沙量>运行压力>铺设坡度; 构建了含沙量、铺设坡度及运行压力与灌水均匀度和流量降幅的投影寻踪回归模型, 2个模型的标准化均方根误差为2.98%和2.42%, 预测模型表现效果极好。【结论】含沙量是影响内镶贴片式滴灌带堵塞的重要因素, 以及构建了不同含沙量、铺设坡度、运行压力与灌水均匀度和流量降幅的关系。研究成果可对一定范围内不同含沙量、铺设坡度、运行压力下内镶贴片式滴灌带的灌水均匀度和流量降幅进行预测, 在滴灌系统设计和运行理论体系中起到一定的参考作用。

关键词: 内镶贴片式滴灌带; 灌水均匀度; 流量降幅; 预测模型

中国分类号: S275.6

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022028

OSID:



陶洪飞, 陶娟琴, 周良, 等. 不同因素对内镶贴片式滴灌带抗堵塞性能指标的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(12): 44-51, 58.

TAO Hongfei, TAO Juanqin, ZHOU Liang, et al. The Effect of Different Factors on Clogging of Inlay Patch Drip Irrigation Belt[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(12): 44-51, 58.

0 引言

【研究意义】中国淡水资源总量约为 $2.75 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 约占世界总量的6%, 但人均占有量仅相当于全球人均水平的1/4, 属于干旱、缺水严重的国家, 也是世界上水资源最贫乏的13个国家之一, 到2030年, 预计每年将消耗 $7.5 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 的水资源, 约占可用水资源总量的90%^[1-3]。滴灌技术作为当今高效节水灌溉技术之一, 具有节水、节能、增产及农产品品质高的优点, 但是滴灌的灌水器容易堵塞, 这将改变滴灌带的原有水力性能, 使其流量降低, 最终导致整个滴灌系统的灌水质量降低, 严重影响滴灌系统的运行安全, 同时也降低了滴灌系统的使用寿命^[4-6]。灌水器的堵塞无法避免, 即使灌溉水质良好, 并采用完善的过滤措施, 滴灌系统中仍存在约31%的物理堵塞^[7]。

【研究进展】灌水均匀度和流量降幅是抗堵塞性能评价的重要指标。在实际的运行过程中, 灌水均匀度和流量降幅受诸多因素的影响, 如灌溉的水质和水温、运行压力、灌水器的材质、流道的堵塞情况和几何形状、滴头的制造偏差、毛管的铺设方式、地形偏差等^[8-14]。在灌水运行压力、泥沙粒径和浓度对灌水器堵塞的影响研究中, 发现颗粒物粒径越大、浓度越高, 堵塞情况越严重^[15-21]。之前的研究者们通过实验室试验, 评价堵塞的随机性程度、流量可恢复程度^[22]、平均流量变化率、灌水均匀度、堵塞率和堵塞位置^[23]等指标, 研究滴灌带的水力性能和抗堵塞性能; 或结合人工神经网络、基因表达式^[24]和回归模型^[25]的方法, 以用来预测灌水器评价指标, 这些模型均能很好预测影响因素的最佳工况。

【切入点】诸多因素在滴灌带抗堵塞性能的影响显著性中研究还不完善。本文选择铺设坡度、含沙量、运行压力3个影响因素, 设计均匀正交试验方案, 以灌水均匀度和流量降幅为考核指标, 开展浑水物理室内试验。投影寻踪回归(Projection Pursuit Regression, 简称PPR)是一种无假定建模方法, 数据无须满足正

收稿日期: 2022-01-14

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项项目(2022A02003); 2019年度新疆维吾尔自治区人民政府公派出国留学成组配套项目“干旱区微灌节水增效技术研究”; 新疆维吾尔自治区创新环境(人才、基地)建设专项“天山青年计划”项目(2019Q075)

作者简介: 陶洪飞(1987-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事节水新技术与新设备以及计算水力学研究。E-mail: 304276290@qq.com

态性和方差齐性等假定，操作简单，建模精度和准确性较高^[26-30]。本文将采用 PPR 建立 3 个因素与灌水均匀度和流量降幅的表达式，以此来预测最佳工况。

【拟解决的关键问题】对内镶贴片式滴灌带铺设坡度、含沙量、运行压力影响显著性排序，采用 PPR 构建 3 个因素与灌水均匀度与流量降幅的关系。

1 材料和方法

1.1 材料及设备

试验选用中国某节水公司生产的内镶贴片式滴灌带，其结构参数及水力性能如表 1 所示，流态指数为 0.49，额定压力为 100 kPa，额定流量为 3 L/h。

表 1 内镶贴片式滴灌带结构参数及水力性能

Table 1 The structural parameters and hydraulic performance of the inner patch drip irrigation tape

滴灌带类型	外径/ mm	滴头 间距/cm	流量 系数	流态 指数	额定压力/ kPa	额定流量/ (L h ⁻¹)
内镶贴片式	16	30	0.32	0.49	100	3

试验泥沙选用乌鲁木齐市西山的自然黄土，将其过 120 目筛网。先用一套标准筛子筛分大于 0.074 mm 的颗粒，收集各个筛子的筛余量，称量求得颗粒占土质量百分数；小于 0.074 mm 用量筒制成一定量均匀浓度的土悬液，用密度计测出对应于不同时间的不同悬液密度，根据密度计读数和土粒下沉时间计算颗粒占土重百分数，最后绘制颗粒粒径的分布曲线如图 1。由图 1 可知，颗粒粒径小于 0.125 mm 的占 100%，小于 0.1 mm 的占 35.28%，中值粒径 D_{50} 为 0.106 mm。

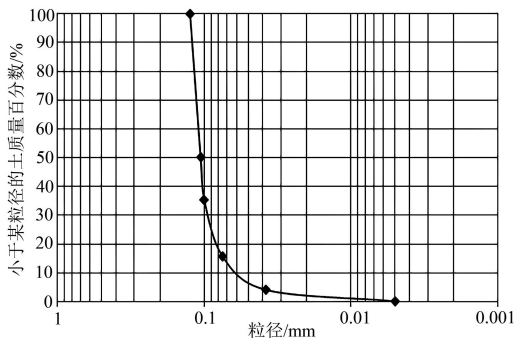


图 1 泥沙颗粒曲线

Fig.1 Sediment particle curve

装置示意图 2，本套滴灌带抗堵塞性能试验台型号为 KD-DJC，由河北可道试验机科技有限公司制造，系统适用电压 380 V。其中包括西林 SD200 矢量变频器，最高频率为 0~600 Hz，载波频率为 2~10 kHz，调速范围为 1:50 或者 1 Hz/150% 额定转矩；32CDLF4-150 轻型多级泵，由永嘉县英科泵阀有限公司生产，流量为 4 m³/h，转速为 2 880 r/min，扬程为 120 m，功率为 3 kW；MPM489 型压力变送器，由麦克传感器股份有限公司生产，它的测量范围是 0~1 600 kPa，压力波动范围为 ±2 kPa，精度为 ±0.5%FS；

YE2-802-2 三相异步电动机，功率为 11 kW，电压 380 V，频率 50 Hz，转速 2 830 r/min；IRK50-100A 离心泵，流量 22.3 m³/h，扬程 10 m，配用功率 1 kW，转速 2 900 r/min。滴头流量采用称量法，使用的电子天平型号为 YP2002N，由上海菁海仪器有限公司制造，最大称量 2 kg，分度值是 0.01 g。测试平台长度为 35 m。试验水不循环，水将从“7 流量测试平台”流入下水道。

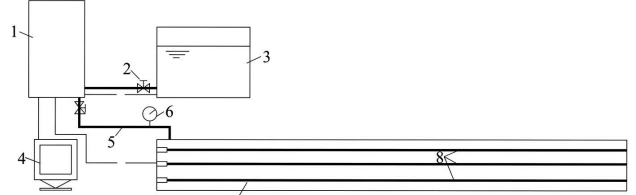


图 2 滴灌带（管）抗堵塞测试平台

图 2 滴灌带（管）抗堵塞测试平台

Fig.2 Anti-clogging test platform for drip irrigation tape (pipe)

1.2 抗堵塞性能评价指标

本试验采用流量降幅 (δ) 与灌水均匀度 (C_u) 对滴灌带的物理堵塞性能进行评价。

滴灌均匀度通常以克里斯琴森均匀系数表示：

$$C_u = 1 - \frac{\sum |q_i - \bar{q}|}{N\bar{q}}, \quad (1)$$

式中： C_u 为灌水均匀度； \bar{q}_i 为各滴头的平均流量 (L/h)； q_i 为各滴头流量； N 为测试的滴头数。

$$\gamma = \frac{\bar{q}_h}{\bar{q}} \times 100\%, \quad (2)$$

$$\delta = 1 - \gamma, \quad (3)$$

式中： γ 为平均相对流量 (%)； δ 为流量降幅； \bar{q}_h 为浑水条件下的平均流量 (L/h)； \bar{q} 为清水条件下的平均流量 (L/h)。

1.3 投影寻踪回归介绍

PPR 模型是利用一系列岭函数的和来逼近回归函数，其核心内容是要估算出 f_i ，确定 α_{ij} 、 β_i 的最优组合，设 x 为 P 维自变量， y 为因变量，其表达式如下^[26-30]：

$$\hat{y} = E(y|x) = \bar{y} + \sum_{i=1}^M \beta_i f_i \left(\sum_{j=1}^P \alpha_{ij} x_{ij} \right), \quad (4)$$

使其满足如下极小化准则：

$$L = \sum_{i=1}^Q W_i E \left[Y_i - EY_i - \sum_{i=1}^{M_i} \beta_i f_i \left(\sum_{j=1}^P \alpha_{ij} X_{ij} \right) \right]^2 = \min, \quad (5)$$

式中： f_i 为第 i 个岭函数； M 、 M_u 分别为岭函数的上限个数和最优个数； β_i 为岭函数的贡献权重系数； α_{ij} 为第 j 个方向的第 i 个分量； W_i 为应变量的权重系数； Q 为因变量的个数。

1.4 模型表现效果评价

为进一步对模型的表现效果进行评价，引入模型的评估标准： $nRMSE < 10\%$ ，模型表现极好； $10\% < nRMSE < 20\%$ ，模型表现良好； $20\% < nRMSE < 30\%$ ，模型表现一般； $nRMSE > 30\%$ ，模型表现很差^[31]。计

算式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SM_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{OBS} \times 100\% \quad (7)$$

式中: OBS_i 为观测值; SM_i 为模型模拟值; n 为样本容量; $RMSE$ 为平均标准化的均方根误差; $nRMSE$ 为标准化的均方根误差。

1.5 均匀正交试验设计

根据流量测试平台的长度, 滴灌带铺设长度取 35 m。为探究顺坡、平坡、逆坡下的滴灌带水力性能, 设计铺设坡度-1%、0、1%。新疆河流多年平均含沙量为 0.039~12.900 g/L^[32]。灌溉水源取水形式多样化, 一般为河水-输水明渠-沉淀池-过滤器-滴灌带^[33], 在洪水季节很难保证较低含沙量的水源灌溉, 因此含沙量选取 1、2、3 g/L。低压小流量滴灌技术是目前较先进的滴灌技术, 具有运行压力小, 运行能耗低、工程投资少、灌溉均匀度好的特点^[34], 且在实际滴灌工程中, 为了减少耗能运行压力一般不大于 100 kPa^[35], 因此, 本研究设计运行压力 40、70、100 kPa 的 3 个梯度。设计铺设坡度 (A)、含沙量 (E)、运行压力 (B) 三因素三水平均匀正交表 $UL_9(3^3)$, 试验安排及取值见表 2 所示。

表 2 三因素三水平均匀正交表

Table 2 Three-factor three-level uniform orthogonal table

试验	因素		
	A	E	B
	铺设坡度/%	含沙量/(g L ⁻¹)	运行压力/kPa
1	-1	1	40
2	-1	2	100
3	-1	3	70
4	0	1	100
5	0	2	70
6	0	3	40
7	1	1	70
8	1	2	40
9	1	3	100

目前对于滴灌带堵塞试验的方法主要采用短周期堵塞测试程序, 为加速试验进程, 参照国际滴头抗堵塞研究标准草案, 将灌水周期等比例缩短^[36]。根据专家学者研究, 结合实际情况对其进行相应改进^[37]。为了使进入流道中的泥沙颗粒充分碰撞、凝结、沉积, 结合试验周期, 适当的延长了灌水时间和灌水间隔, 选取的灌水时间为 30 min, 灌水间隔为 30 min。对滴灌带进行 6 次灌水, 灌水结束后进行各滴头的流量测量。每组试验结束后, 对系统流道、水箱、泵等进行冲洗, 并更换新的滴灌带。

试验安排为: 选择 3 根长度为 35 m 的滴灌带安装在抗堵塞测试平台上 (重复 2 次, 流量取均值), 每根滴灌带等间距选择 25 个滴头, 调试铺设坡度, 在各滴头下方放置集水桶 (1 000 mL) 收集水量; 浑

水试验开始前, 在清洗干净的浑水罐中加入清水, 然后在计算机终端设定测试压力值, 测出当前条件下的清水流量; 清水试验后, 保持原有布置不变, 在浑水罐中加入配置好的相应浓度的含沙水, 然后在计算机终端设定测试压力值、灌水时间、灌水间隔, 待 6 次灌水结束后进行 10 min 的流量测量。

2 结果与分析

2.1 均匀正交试验结果

严格按照设计的均匀正交表展开 9 组物理试验, 测量流量次数 2 次取平均流量, 代入式(1)、式(2)、式(3)中, 计算得灌水均匀度 (C_u) 和流量降幅 (δ), 计算结果如表 3。

表 3 三因素三水平均匀正交试验结果

Table 3 Three-factor three-level uniform orthogonal test results

试验	因素				C_u	δ
	A/%	E/(g L ⁻¹)	B/kPa	空白列		
1	-1	1	40	2	0.880 9	0.089 9
2	-1	2	70	1	0.380 2	0.380 2
3	-1	3	100	3	0.227 0	0.452 8
4	0	1	100	3	0.9351	0.085 1
5	0	2	70	2	0.772 1	0.238 9
6	0	3	40	1	0.736 9	0.321 4
7	1	1	70	1	0.915 5	0.087 8
8	1	2	40	3	0.744 8	0.218 8
9	1	3	100	2	0.247 6	0.501 3

2.2 方差分析

对计算得出的灌水均匀度进行方差分析, 见表 4, 由 P 值可知, 各因素对灌水均匀度影响的排序为 $E>A>B$, 即含沙量>铺设坡度>运行压力。可知含沙量对灌水均匀度影响极其显著, 铺设坡度和运行压力对灌水均匀度影响显著。

表 4 各因素对灌水均匀度的影响

Table 4 The influence of various factors on irrigation uniformity

方差来源	平方和	自由度	均方和	F	P
A (铺设坡度)	0.153 08	2	0.076 54	41.416 3	0.024*
E (含沙量)	0.386 30	2	0.193 15	104.517 0	0.009**
B (运行压力)	0.107 10	2	0.053 55	28.977 6	0.033*
空白列	0.003 70	2	0.001 85	-	-

注 *表示显著, $P<0.05$; **表示极其显著, $P<0.01$, 下同。

对计算得出的流量降幅进行方差分析, 见表 5, 由 P 值可知, 各因素对流量降幅影响大小的排序为 $E>B>A$, 即含沙量>运行压力>铺设坡度。含沙量对滴灌带流量降幅影响极其显著, 运行压力对流量降幅影响显著, 铺设坡度对其影响不显著。

表 5 各因素对流量降幅的影响

Table 5 The influence of various factors on the flow rate decrease

方差来源	平方和	自由度	均方和	F	P
A (铺设坡度)	0.012 96	2	0.006 48	14.376	0.065
E (含沙量)	0.172 79	2	0.086 40	190.772	0.005**
B (运行压力)	0.018 95	2	0.009 48	21.022	0.045*
空白列	0.000 90	2	0.000 45	-	-

2.3 主效应多重比较分析

因素主效应是指各因素不同水平之间的差异，使用 SPSS 23.0 进行主效应多重比较分析。因铺设坡度对流量降幅影响不显著，故不做多重比较分析，分析结果见表 6。

由表 6 可以看出，在因素 A 中，A2 灌水均匀度显著高于 A3，显著高于 A1，其余水平间的灌水均匀度差异不显著。因素 E 中的灌水均匀度差异均达到了显著水平。因素 B 中，只有 B1 的灌水均匀度显著高于 B3，其余水平间的灌水均匀度差异不显著。浑水滴灌条件下，平坡铺设的毛管有利于提升其灌水均匀

度；随着含沙量的增大，滴灌带的灌水均匀度呈下降趋势，且不同含沙量间的差异均达到显著水平，故为保证滴灌的灌水均匀度，应尽量降低灌溉水中的含沙量；随着运行压力的升高，灌水均匀度呈下降趋势，但相邻压力水平间的差异不显著。出现这种情况可能原因是，在高浓度的浑水滴灌过程中，较高的压力加大了流体的紊动程度，虽然颗粒在流道里的停留时间变短，但颗粒间的紊乱程度增加，粒子间的碰撞几率增加，颗粒更容易进入流道涡旋区消能，最终产生沉淀，导致流道堵塞，造成灌水均匀度降低。

表 6 主效应多重分析

Table 6 Multiple analysis of main effects

因素	C_u				δ			
	显著性	水平	均值	显著性水平 $\alpha=0.05$	显著性	水平	均值	显著性水平 $\alpha=0.05$
A (铺设坡度)	0.024*	2	0.814 7	a	0.121	1	0.307 6	-
		3	0.636 0	b		3	0.269 3	-
		1	0.496 0	b		2	0.215 1	-
E (含沙量)	0.009**	1	0.910 5	a	0.005**	3	0.425 1	a
		2	0.632 4	b		2	0.279 3	b
		3	0.403 8	c		1	0.089 1	c
B (运行压力)	0.033*	1	0.787 5	a	0.045*	3	0.322 2	a
		2	0.638 2	ab		2	0.259 8	ab
		3	0.521 1	b		1	0.210 0	b

由表 6 可知，因素 E 中，各水平间的流量降幅差异均达显著水平。因素 B 中，B1 与 B3 流量降幅差异显著，其余水平间的差异不显著。随含沙量增加，流量降幅显著升高，进一步说明含沙量是影响流量降幅的主要因素，而较高的运行压力会造成堵塞状况加重。

2.4 投影寻踪回归建模

通过 PPR 程序对表 3 中的 9 组灌水均匀度(C_u)和流量降幅(δ)数据进行计算分析，投影灵敏度的光滑系数取 0.1，投影次数 M 取值为 5， M_u 值应小于 M 值，故而取 M_u 值为 3。最终的建模参数为： $N=9$ ， $P=3$ ， $Q=1$ ， $M=5$ ， $M_u=3$ 。

通过 PPR 建模，得到灌水均匀度及流量降幅的岭函数权重系数 β 和投影方向 α 依次如式(8)~式(11)所示，分别将各考核指标岭函数相应的权重系数和投影方向的向量式代入式(4)中最终获得含沙量、运行压力及铺设坡度与灌水均匀度和流量降幅的预测模型。

$$\beta=(0.957\ 2\ 0.229\ 7\ 0.129\ 6), \quad (8)$$

$$\alpha=\begin{pmatrix} 0.320\ 3 & -0.674\ 3 & 0.398\ 1 \\ -0.947\ 1 & 0.738\ 0 & -0.917\ 1 \\ 0.020\ 4 & 0.025\ 8 & 0.018\ 4 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

$$\beta=(0.937\ 3\ 0.152\ 2\ 0.181\ 0), \quad (10)$$

$$\alpha=\begin{pmatrix} -0.171\ 3 & -0.422\ 1 & 0.990\ 3 \\ 0.985\ 1 & 0.906\ 4 & -0.139\ 2 \\ 0.012\ 9 & -0.016\ 9 & 0.000\ 3 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

利用 PPR 程序计算得到灌水均匀度及流量降幅的预测值将其与实测值进行对比，结果见表 7 所示。由表 7 可知，灌水均匀度的绝对误差在 $\pm 0.022\ 4$ 以内，相对误差小于 9.07%；流量降幅的绝对误差在 $\pm 0.012\ 7$ 以内，相对误差小于 5.31%。以上两考核指标建模样本数据在相对误差取绝对值小于 10% 的情况下，合格率均为 100%。

表 7 PPR 模型计算结果分析

Table 7 Analysis of calculation results of PPR model

试验	C_u				δ			
	实测值	预测值	绝对误差	相对误差/%	实测值	预测值	绝对误差	相对误差/%
1	0.880 9	0.875 9	-0.005 0	-0.57	0.089 9	0.086 8	-0.003 1	-3.47
2	0.380 2	0.365 0	-0.015 2	-3.99	0.380 2	0.371 7	-0.008 5	-2.24
3	0.227 0	0.244 3	0.017 3	7.63	0.452 8	0.460 7	0.007 9	1.74
4	0.935 1	0.957 0	0.021 9	2.34	0.085 1	0.088 4	0.003 3	3.89
5	0.772 1	0.750 2	-0.021 9	-2.83	0.238 9	0.251 6	0.012 7	5.31
6	0.736 9	0.715 4	-0.021 5	-2.92	0.321 4	0.316 1	-0.005 3	-1.66
7	0.915 5	0.895 5	-0.020 0	-2.18	0.087 8	0.083 7	-0.004 1	-4.72
8	0.744 8	0.766 7	0.021 9	2.94	0.218 8	0.218 6	-0.000 2	-0.10
9	0.247 6	0.270 0	0.022 4	9.07	0.501 3	0.498 8	-0.002 5	-0.50

由式(6)、式(7)计算可得,灌水均匀度非线性模型的 $nRMSE=2.98\% < 10\%$; 流量降幅非线性模型的 $nRMSE=2.42\% < 10\%$ 。可见两模型的表现效果极好。
2.5 仿真计算及寻优

图3为灌水均匀度等值线图。由图3(a)可知,在含沙量为1 g/L的工况下,当运行压力从40 kPa变化到100 kPa,铺设坡度从-1%变化到1%时,灌水均匀度从0.881 8增加到0.923 6,增加了4.74%。可见在含沙量较低时,压力及坡度的变化对灌水均匀度影响较小。由图3(b)可知,在运行压力为40 kPa工况下,灌水均匀度随含沙量的增加快速降低,随坡度

由逆坡向顺坡变化时缓慢增加;铺设坡度相对于含沙量,对灌水均匀度的影响更小。由图3(c)可知,在铺设坡度为0的工况下,当含沙量由1 g/L变化到3 g/L,压力由40 kPa变化到100 kPa时,灌水均匀度由0.862 0急剧降低到0.379 0,降幅达56.03%,压力变化曲线相较含沙量更平缓,由此可知含沙量对灌水均匀度的影响更显著。

综合以上分析及图形可知,当铺设坡度的取值范围为-0.5%~1.0%,含沙量为1 g/L,运行压力的取值范围为90~100 kPa时,存在最优因素组合,使灌水均匀度有最大值。

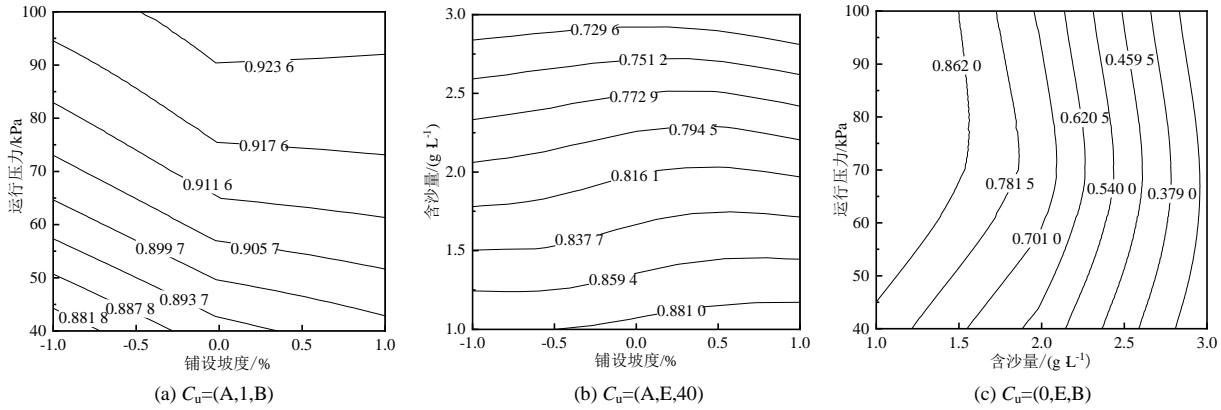


图3 灌水均匀度等值线

Fig.3 Contour map of irrigation uniformity

图4为流量降幅等值线图。由图4(a)可知,在含沙量为1 g/L的工况下,当运行压力从100 kPa变化到40 kPa,铺设坡度从-1%变化到1%时,流量降幅由0.128 6降低到0.062 6,降幅达51.32%。但坡度相较于压力的等值线斜率更平缓,说明压力对流量降幅的影响比坡度更显著。由图4(b)可知,在运行压力为40 kPa工况下,当坡度固定时,流量降幅随

着含沙量的减少快速降低,当含沙量由3 g/L降低到1 g/L时,流量降幅由0.353 0降低到了0.015 5,降幅达95.61%,可见含沙量对流量降幅的影响是极其显著的。由图4(c)可知,在铺设坡度为0的工况下,随着运行压力和含沙量的降低,流量降幅显著下降,降幅达76.63%,且含沙量的等值线斜率大于压力,可见含沙量对流量降幅的影响较压力更大。

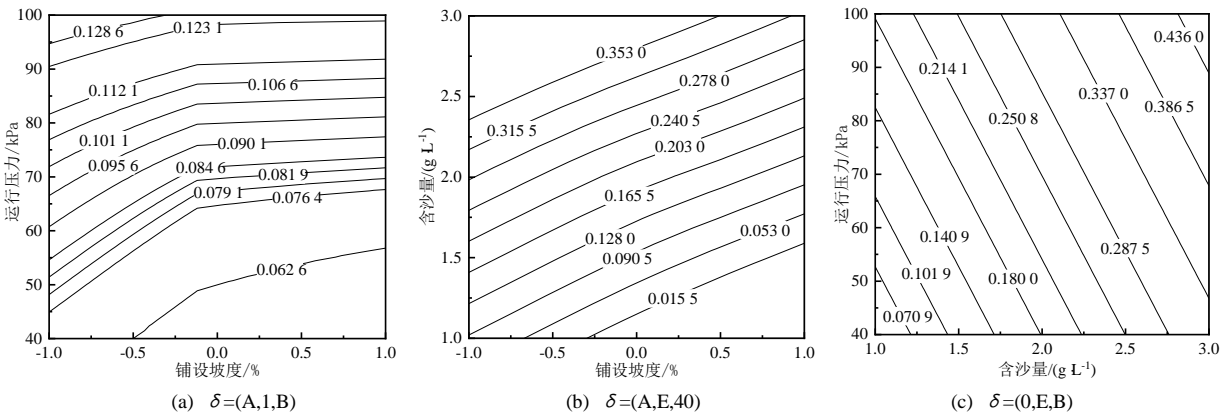


图4 流量降幅等值线

Fig.4 Contour map of flow rate drop

综合以上分析及图形可知,当铺设坡度的取值范围为-0.5%~1.0%,含沙量的取值范围为1.0~1.5 g/L,运行压力40 kPa时,存在最优因素组合使流量降幅有最小值。

可知,当铺设坡度为0,含沙量为1 g/L,运行压力为96 kPa时,灌水均匀度有最大值0.958 5,此时流量降幅0.083 5(8.35%),该组合为灌水均匀度PPR预测模型最优因素水平。

灌水均匀度PPR优化仿真计算结果见表8,由表

流量降幅PPR优化仿真计算结果见表9,由表可

知, 当铺设坡度为 0, 含沙量为 1 g/L, 运行压力为 40 kPa, 该组合为流量降幅 PPR 预测模型 40 kPa 时, 流量降幅为 0.041 1 (4.11%), 此时灌水 最匀因素水平。

表 8 灌水均匀度 PPR 优化仿真计算表

Table 8 PPR optimization simulation calculation table of irrigation uniformity

序号	因素水平			考核指标	序号	因素水平			考核指标
	A/%	E/(g L ⁻¹)	B/kPa	C _u		A/%	E/(g L ⁻¹)	B/kPa	C _u
1	-0.5	1	90	0.921 1	28	0.2	1	96	0.954 8
2	-0.5	1	92	0.910 6	29	0.2	1	98	0.955 9
3	-0.5	1	94	0.898 6	30	0.2	1	100	0.956 9
4	-0.5	1	96	0.886 7	31	0.4	1	90	0.941 9
5	-0.5	1	98	0.874 7	32	0.4	1	92	0.944 4
6	-0.5	1	100	0.862 8	33	0.4	1	94	0.945 4
7	-0.4	1	90	0.944 6	34	0.4	1	96	0.946 5
8	-0.4	1	92	0.937 6	35	0.4	1	98	0.947 5
9	-0.4	1	94	0.930 0	36	0.4	1	100	0.948 5
10	-0.4	1	96	0.918 1	37	0.5	1	90	0.935 1
11	-0.4	1	98	0.906 1	38	0.5	1	92	0.936 1
12	-0.4	1	100	0.894 2	39	0.5	1	94	0.937 1
13	-0.2	1	90	0.951 8	40	0.5	1	96	0.938 1
14	-0.2	1	92	0.953 7	41	0.5	1	98	0.939 2
15	-0.2	1	94	0.937 5	42	0.5	1	100	0.940 2
16	-0.2	1	96	0.947 3	43	0.8	1	90	0.926 8
17	-0.2	1	98	0.937 5	44	0.8	1	92	0.927 8
18	-0.2	1	100	0.925 6	45	0.8	1	94	0.928 8
19	0	1	90	0.948 5	46	0.8	1	96	0.929 8
20	0	1	92	0.951 8	47	0.8	1	98	0.930 8
21	0	1	94	0.955 2	48	0.8	1	100	0.931 8
22	0	1	96	0.958 5	49	1	1	90	0.918 7
23	0	1	98	0.943 3	50	1	1	92	0.919 5
24	0	1	100	0.957 0	51	1	1	94	0.920 5
25	0.2	1	90	0.945 2	52	1	1	96	0.921 5
26	0.2	1	92	0.948 5	53	1	1	98	0.922 5
27	0.2	1	94	0.951 9	54	1	1	100	0.923 5

表 9 流量降幅 PPR 优化仿真计算表

Table 9 Flow rate reduction PPR optimization simulation calculation table

序号	因素水平			考核指标	序号	因素水平			考核指标
	A/%	E/(g L ⁻¹)	B/kPa	δ		A/%	E/(g L ⁻¹)	B/kPa	δ
1	-0.5	1	40	0.062 8	28	0.2	1.3	40	0.072 9
2	-0.5	1.1	40	0.071 6	29	0.2	1.4	40	0.090 9
3	-0.5	1.2	40	0.087 9	30	0.2	1.5	40	0.108 1
4	-0.5	1.3	40	0.102 1	31	0.4	1	40	0.062 2
5	-0.5	1.4	40	0.116 6	32	0.4	1.1	40	0.065 1
6	-0.5	1.5	40	0.131 0	33	0.4	1.2	40	0.068 0
7	-0.4	1	40	0.049 2	34	0.4	1.3	40	0.079 4
8	-0.4	1.1	40	0.053 9	35	0.4	1.4	40	0.097 4
9	-0.4	1.2	40	0.072 5	36	0.4	1.5	40	0.115 5
10	-0.4	1.3	40	0.088 5	37	0.5	1	40	0.074 0
11	-0.4	1.4	40	0.102 7	38	0.5	1.1	40	0.076 8
12	-0.4	1.5	40	0.117 2	39	0.5	1.2	40	0.079 7
13	-0.2	1	40	0.046 8	40	0.5	1.3	40	0.085 9
14	-0.2	1.1	40	0.049 5	41	0.5	1.4	40	0.103 9
15	-0.2	1.2	40	0.061 5	42	0.5	1.5	40	0.122 0
16	-0.2	1.3	40	0.078 7	43	0.8	1	40	0.085 9
17	-0.2	1.4	40	0.092 5	44	0.8	1.1	40	0.088 7
18	-0.2	1.5	40	0.104 8	45	0.8	1.2	40	0.091 6
19	0	1	40	0.041 1	46	0.8	1.3	40	0.094 4
20	0	1.1	40	0.045 9	47	0.8	1.4	40	0.110 5
21	0	1.2	40	0.054 7	48	0.8	1.5	40	0.128 5
22	0	1.3	40	0.074 7	49	1	1	40	0.098 2
23	0	1.4	40	0.093 9	50	1	1.1	40	0.101 1
24	0	1.5	40	0.109 5	51	1	1.2	40	0.103 9
25	0.2	1	40	0.050 4	52	1	1.3	40	0.106 8
26	0.2	1.1	40	0.053 3	53	1	1.4	40	0.117 5
27	0.2	1.2	40	0.056 2	54	1	1.5	40	0.135 5

3 讨论

3.1 不同因素对灌水均匀度和流量降幅的影响

周良等^[38]研究发现在清水条件下影响内镶贴片式滴灌带灌水均匀度的因素排序为运行压力>铺设长度>铺设坡度。本研究在浑水条件下发现运行压力影响流量降幅大于铺设坡度,这与周良因素排序的研究发现一致。但在灌水均匀度的研究中因素排序却相反,是由于沙粒运移和沉积的影响,有待对运行压力和铺设坡度进一步研究。

3.2 采用 PPR 建立影响因素与抗堵塞性能指标的关系

由于多元线性回归分析时,数据需满足正态性和方差齐性等假定,过程相对复杂。而 PPR 模型已成功应用于非线性函数逼近和函数的平滑问题中,在主成分分析及独立成分分析当中运用成熟^[26-30]。本研究构建的含沙量、铺设坡度及运行压力与灌水均匀度和流量降幅的 PPR 预测模型标准化均方根误差达到 2.98%、2.42%,表现效果极好。建议各领域可采用 PPR 处理试验数据,以满足更高的精度和可靠性。

徐路全等^[19]研究发现,在一定压力时,含沙量越大,滴头堵塞越严重。本研究构建的含沙量、运行压力及铺设坡度与灌水均匀度的 PPR 回归模型表明:随着含沙量升高,灌水均匀度显著降低,滴头堵塞越严重,这与徐路全等人结论一致。土地平整可有效改善农田表面微地形状况,提高灌水均匀度和水肥利用效率,防治水土流失,是现代农业节水增产技术措施之一^[39]。本研究发现铺设坡度为 0 时,灌水均匀度能达到最优值,这与前人在铺设坡度方面的研究一致。

本研究预测模型可得到最优工况:当重点考虑作物平均产量问题时,应选择灌水均匀度较高的方案,为铺设坡度 0,含沙量 1 g/L,运行压力 96 kPa,此时灌水均匀度为 0.958 5,流量降幅为 8.35%;当重点考虑耗能和滴灌带灌水次数时,应选择流量降幅较低的方案,为铺设坡度为 0,含沙量为 1 g/L,运行压力为 40 kPa 时,此时流量降幅为 4.11%,灌水均匀度为 0.831 0。

3.3 本研究存在的问题

本文只考虑了含沙量、铺设坡度和运行压力,未考虑滴头流量、滴灌带铺设长度、滴头间距、泥沙粒径、泥沙级配。且运行压力没有考虑较高压力情况。堵塞影响是渐变产生的,主要随时间的变化而变化,论文也没有考虑时间变量。建议后续研究者们完善其他因素及其他水平对滴灌带抗堵塞性能的影响。

4 结论

1) 含沙量是影响滴灌带灌水均匀度的主要因素,

影响效果极其显著;滴灌带的运行压力、铺设坡度为次要因素,影响效果均显著。

2) 含沙量是影响流量降幅的主要因素,影响效果极其显著;运行压力为次要因素,影响效果显著;铺设坡度对流量降幅无显著影响。

3) 灌水均匀度 PPR 预测模型的最优工况为:铺设坡度 0,含沙量 1 g/L,运行压力 96 kPa,此条件下灌水均匀度为 0.958 5,流量降幅为 8.35%。

4) 流量降幅 PPR 预测模型的最优工况为:铺设坡度为 0,含沙量为 1 g/L,运行压力为 40 kPa 时,此时流量降幅为 4.11%,灌水均匀度为 0.831 0。

参考文献:

- [1] 史立红. 黄河水资源可持续利用对策研究[J]. 华北自然资源, 2020(5): 131-132.
SHI Lihong. Research on countermeasures for sustainable utilization of water resources in the Yellow River[J]. Huabei Natural Resources, 2020(5): 131-132.
- [2] 刘玉明. 我国水资源现状及高效节水型农业发展对策[J]. 农业科技与信息, 2020(16): 80-81, 83.
LIU Yuming. Current situation of my country's water resources and development strategies for high-efficiency water-saving agriculture[J]. Agricultural Science-Technology and Information, 2020(16): 80-81, 83.
- [3] QIU J. China faces up to groundwater crisis[J]. Nature, 2010, 466(7 304): 308.
- [4] 李云开, 冯吉, 宋鹏, 等. 低碳环保型滴灌技术体系构建与研究现状分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 83-92.
LI Yunkai, FENG Ji, SONG Peng, et al. Developing situation and system construction of low-carbon environment friendly drip irrigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 83-92.
- [5] EUGENIO COELHO F, OR D. A parametric model for two-dimensional water uptake intensity by corn roots under drip irrigation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(4): 1 039-1 049.
- [6] NAKAYAMA F S, BUCKS D A. Emitter clogging effects on trickle irrigation uniformity[J]. Transactions of the ASAE, 1981, 24(1): 77-80.
- [7] 王福军, 王文娥. 滴头流道 CFD 分析的研究进展与问题[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 188-192.
WANG Fujun, WANG Wen'e. Research progress in analysis of flow passage in irrigation emitters using Computational Fluid Dynamics techniques[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(7): 188-192.
- [8] LI Q, SONG P, ZHOU B, et al. Mechanism of intermittent fluctuated water pressure on emitter clogging substances formation in drip irrigation system utilizing high sediment water[J]. Agricultural Water Management, 2019, 215: 16-24.
- [9] WANG T Z, GUO Z C, KUO C. Effects of mixing Yellow River water with brackish water on the emitter's clogging substance and solid particles in drip irrigation[J]. SN Applied Sciences, 2019, 1(10): 1-13.
- [10] 王广智, 罗金耀, 燕在华. 喷微灌灌水技术特性参数研究[J]. 节水灌溉, 1999(4): 20-22, 42.
WANG Guangzhi, LUO Jinyao, YAN Zaihua. Study on distribution characteristic parameters of sprinkler irrigation and micro-Irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 1999(4): 20-22, 42.
- [11] 牛文全. 微压滴灌技术理论与系统研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.

- NIU Wenquan. Theory and system research of micro-pressure drip irrigation technology[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2006.
- [12] AL-MUHAMMAD J, TOMAS S, ANSELMET F. Modeling a weak turbulent flow in a narrow and wavy channel: Case of micro-irrigation[J]. *Irrigation Science*, 2016, 34(5): 361-377.
- [13] KATZ S, DOSORETZ C, CHEN Y, et al. Fouling formation and chemical control in drip irrigation systems using treated wastewater[J]. *Irrigation Science*, 2014, 32(6): 459-469.
- [14] 徐明金, 聂境, 葛旭峰, 等. 低压条件下滴灌带的水力特性及温度影响效应试验[J]. *中国农村水利水电*, 2010(12): 8-10.
XU Mingjin, NIE Jing, GE Xufeng, et al. Experiment of hydraulic trait of drip irrigation strap under low pressure and the influence of temperature on emitter discharge[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2010(12): 8-10.
- [15] ZHANG L, WU P T, ZHU D L, et al. Effect of pulsating pressure on labyrinth emitter clogging[J]. *Irrigation Science*, 2017, 35(4): 267-274.
- [16] BOUNOUA S, TOMAS S, LABILLE J, et al. Understanding physical clogging in drip irrigation: in situ, in-lab and numerical approaches[J]. *Irrigation Science*, 2016, 34(4): 327-342.
- [17] NIU W Q, LIU L, CHEN X. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters[J]. *Irrigation Science*, 2013, 31(4): 545-555.
- [18] FENG J, LI Y K, LIU Z Y, et al. Composite clogging characteristics of emitters in drip irrigation systems[J]. *Irrigation Science*, 2019, 37(2): 105-122.
- [19] 徐路全, 李援农, 房云杰, 等. 泥沙浓度与进口压力对迷宫流道滴头堵塞的影响[J]. *节水灌溉*, 2018(2): 34-39, 46.
XU Luquan, LI Yuannong, FANG Yunjie, et al. Influence of sediment concentration and inlet pressure on the clogging of the dripper of the labyrinth emitter[J]. *Water Saving Irrigation*, 2018(2): 34-39, 46.
- [20] 任改萍, 吴普特, 朱德兰, 等. 泥沙粒径对大流道迷宫灌水器堵塞影响研究[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(3): 1-6.
REN Gaiping, WU Pute, ZHU Delan, et al. Influence of sediment particle size on clogging of large labyrinth channel emitters[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(3): 1-6.
- [21] NIU W Q, LIU L, CHEN X. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters[J]. *Irrigation Science*, 2013, 31(4): 545-555.
- [22] 马晓鹏, 龚时宏, 王建东, 等. 低压条件下滴灌带灌水均匀系数试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(4): 6-10.
MA Xiaopeng, GONG Shihong, WANG Jiandong, et al. Experimental study on irrigation uniformity coefficient of drip irrigation tapes under low operating pressure[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(4): 6-10.
- [23] 罗春艳, 牛文全. 滴头堵塞率及堵塞位置对灌水均匀度的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(2): 196-200.
LUO Chunyan, NIU Wenquan. Influence of emitter clogged ratio clogged location to the irrigation uniformity[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(2): 196-200.
- [24] MATTAR M A, ALAMOUD A I, AL-OTHMAN A A, et al. Hydraulic performance of labyrinth-channel emitters: Experimental study, ANN, and GEP modeling[J]. *Irrigation Science*, 2020, 38(1): 1-16.
- [25] 席奇亮, 葛国锋, 周方, 等. 2 种滴灌带灌水均匀度对铺设长度和进水压力的响应[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(3): 78-83.
XI Qiliang, GE Guofeng, ZHOU Fang, et al. Responses of irrigation uniformity of two drip irrigation belts to inlet pressure and laying length[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(3): 78-83.
- [26] 姜春萌, 宫经纬, 唐新军, 等. 基于 PPR 的低热水泥胶凝体系综合性能优化方法[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(3): 333-340.
JIANG Chunmeng, GONG Jingwei, TANG Xinjun, et al. Optimization method of comprehensive properties of low heat cement cementitious system based on projection pursuit regression[J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(3): 333-340.
- [27] 盛建东, 文启凯, 蒋平安, 等. 投影寻踪回归技术在棉花土地适宜性评价中的应用[J]. *干旱区研究*, 1997, 14(2): 36-41.
SHENG Jiandong, WEN Qikai, JIANG Ping'an, et al. Application of the projection pursuit regression technique in the rural land evaluation[J]. *Arid Zone Research*, 1997, 14(2): 36-41.
- [28] 郑祖国, 葛毅雄, 杨力行, 等. 投影寻踪回归 (PPR) 技术在水泥配方优化中的应用[J]. *八一农学院学报*, 1995, 18(1): 20-24.
ZHENG Zuguo, GE Yixiong, YANG Lixing, et al. Application of projection pursuit regression technique in optimization of cement formulation[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 1995, 18(1): 20-24.
- [29] 朱玲玲, 张振伟, 杨力行. 悬栅消能工均匀正交设计及投影寻踪回归试验研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(6): 210-214.
ZHU Lingling, MU Zhenwei, YANG Lixing. Experiment on uniform orthogonal design and projection pursuit regression of energy dissipator of suspension gird in stilling pool[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2014, 25(6): 210-214.
- [30] GONG J W, JIANG C M, TANG X J, et al. Optimization of mixture proportions in ternary low-heat Portland cement-based cementitious systems with mortar blends based on projection pursuit regression[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 238: 117666.
- [31] BANNAYAN M, HOOGENBOOM G. Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model[J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(3): 290-302.
- [32] 赵妮. 新疆多泥沙河流水库泥沙处理措施[J]. *水利规划与设计*, 2020(1): 147-151.
ZHAO Ni. Sediment treatment measures for the reservoirs of muddy river in Xinjiang[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2020(1): 147-151.
- [33] 顾烈烽. 滴灌工程设计图集[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
GU Liefeng. *Drip Irrigation Project Design Atlas*[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005.
- [34] 顾涛, 李兆增, 吴玉芹. 我国微灌发展现状及“十三五”发展展望[J]. *节水灌溉*, 2017(3): 90-92.
GU Tao, LI Zhaozeng, WU Yuqin. The development status of micro-irrigation in my country and the development prospect of the “Thirteenth Five-Year Plan” [J]. *Water Saving Irrigation*, 2017(3): 90-91, 96.
- [35] 张志新. 滴灌工程规划设计原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
ZHANG Zhixin. *The principle and application of drip irrigation project planning and design*[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007.
- [36] Clogging test methods for emitters. ISO/TC 23/SC 18/WG5 N12-V3[S].
- [37] 吴泽广. 泥沙粒径与含沙量对滴头堵塞的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
WU Zeguogang. Influence of sediment particle size, concentration and composition of sediment on clogging of labyrinth channels emitters[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2014.
- [38] 周良, 陶洪飞, 李巧, 等. 一种内镶贴片式滴灌带的水力性能影响因素研究[J]. *节水灌溉*, 2020(11): 25-28.
ZHOU Liang, TAO Hongfei, LI Qiao, et al. Research on the influencing factors of hydraulic performance of inlay patch drip irrigation tape[J]. *Water Saving Irrigation*, 2020(11): 25-28.
- [39] 吴昊. 农田土地机械化平整技术与装备[J]. *农村牧区机械化*, 2015(2): 39-40.
WU Hao. Technology and equipment for mechanized leveling of farmland[J]. *Mechanization in Rural and Pastoral Areas*, 2015(2): 39-40.