

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.04.015

波动水压参数对灌水器水力性能影响试验

刘 洁,王 聪,魏青松,史玉升

(华中科技大学材料成形及模具技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要: 针对低压灌溉系统虽然可以节省电能但却容易发生堵塞的不利情况,将原来恒定不变的水压改变为按照一定频率和振幅波动的动态水压模式,以期增强低压运行时滴灌灌水器的抗堵塞能力。以基础水压、波幅和波动周期为变量参数来设计工作水压的波动模式,通过正交方式实施波动参数与流量特性试验,分析了 3 种波动参数对灌水器流量的影响规律,结果表明基础水压对灌水器流量的影响最大。

关键词: 低压灌溉;波动水压;滴灌灌水器;灌水器水力性能

中图分类号: S277 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2014)04-0361-06

Experimental study of effect of fluctuating water pressure factors on hydraulic properties of drip emitters

LIU Jie, WANG Cong, WEI Qingsong, SHI Yusheng

(State Key Laboratory of Materials Processing and Die and Mould Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Although a low-pressure irrigation system can save power energy, it is prone to clogging. In this study, the constant water pressure was changed to dynamic pressure fluctuating with a certain frequency and amplitude, in order to increase the drip emitter's anti-clogging capability during the runtime at a low pressure. The dynamic model of operating pressure was designed by taking the base pressure, fluctuation amplitude, and fluctuation cycle as variable parameters. With orthogonal experiments, the fluctuation parameters and flow properties were tested. The effects of three fluctuation parameters on the emitter flow were analyzed. The study results show that the water base pressure has the most significant effect on the emitter flow.

Key words: low-pressure irrigation; fluctuating water pressure; drip emitter; hydraulic properties of drip emitter

灌溉方式选择将对滴灌系统的灌溉效率、应用成本以及系统的水力性能等产生较大影响,所以选择合适的工作水压对于滴灌系统来说至关重要,它将直接决定系统的灌溉效果。近年来低压灌溉由于对滴灌系统电力驱动要求较低而得到广泛关注,范兴科等^[1]研究了低压滴灌条件下提高系统灌水均匀度的途径;张国祥等^[2]对滴灌系统滴头设计水头的取值依据进行了研究;张林等^[3]对低压滴灌灌水均匀度进行试验研究;马晓鹏等^[4]针对常压滴灌系统中使用较多的 6 种国产单翼迷宫和内镶片式滴灌带,在低压条件下进行了滴灌带铺设长度、压力水头、地形坡度 3 个因素对滴灌带灌水均匀系数影响规律的试验研究;王威等^[5]应用流体力学的一般原理分析了灌水器微小流道中的流体流态特征,并且利用 N-S 方程和灌水器的水头损失描述灌水器微内流场,建立了微小流道中的流体 K-E 紊流模型;白丹等^[6]对地下滴灌灌水器的压力和流量关系进行研究,认为压力和流量是最重要的水力要素之一。

研究者们大多采用 Darcy-Weisbach 方程和 Hazen-Williams 经验方程计算管网内的水头损失^[7],但是在许多情况下,经验方差由于计算准确性差和计算量大的弊端难以满足工程需求。所以很多学者对经验方差

收稿日期: 2013-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(51109087)

作者简介: 刘洁(1972—),女,广西南宁人,副教授,博士,主要从事节水产品快速制造研究。E-mail:hustliuj@mail.hust.edu.cn

进行优化和完善,以提高计算效率^[8-9]。

Duan 等^[10]研究了低工作水压和常压(0~310 kPa)在污水滴灌试验条件下压力补偿式灌水器的补偿效果。李永光^[11]研究了流态指数 x 对灌水器压力补偿的规律,认为当 $x<0.4$ 时灌水器为压力补偿灌水器, x 越接近零则灌水器的补偿性能越好。Kang^[12]研究了工作水压对灌溉均匀度的影响,发现灌水器的均匀度会以 $x=0.5$ 为分界点:在 $0<x<0.5$ 时,工作水压增加则灌溉均匀度会出现增加或减少 2 种情况;当 $x>0.5$ 时,工作水压的增加将使灌溉均匀度减小。Safi 等^[13]通过试验研究了多种类型灌水器在不同工作水压(最低达到 49 kPa 水压)和铺设长度下的出水均匀度;Li 等^[14]通过有限元模拟的方法研究微压(9.8~49 kPa)条件下迷宫式灌水器内的流场状态,发现在低压情况下灌水器内流场处于紊流流态。

低压灌溉虽然可以在一定程度上节省电能,但滴灌系统中使用的灌水器因其流道曲折且尺寸微小,在恒定低压工作条件下容易发生堵塞现象,从而影响低压灌溉系统的长期稳定运行。在相对较低工作水压运行基础上,将原来恒定不变的水压改变为按照一定频率和振幅波动的动态水压模式,利用灌水器内流场的连续波动效应,实现水流对固体悬浮物的扰动和冲击,从而增强低压运行时灌水器的抗堵塞能力。该种思路不同于已有的脉冲式滴灌方式^[15-16]。本文研究的波动水压动态模式是通过自动控制技术,实时改变和控制加压水泵的运行频率,使工作水压值按特定波动模式动态变化,时间频率可短至秒级,波动幅度可低至 9.8 kPa 水压左右,属于一种微观层面的供压方式。采用该种波动水压后,宏观上灌水器的出水形式有异于传统恒压状态,微观上灌水器内流场的流动特征发生了较大的改变。

国外尚无学者涉及波动水压对灌水器水力性能的研究,只有 Assouline 等^[15]和 Elmaloglou 等^[16]人提出了脉冲式滴灌方式。而各学者研究的主要方向是研究具体情况下的灌水器堵塞、低工作水压滴灌系统和低压对灌水器水力性能的影响问题。

本文主要针对波动水压工作模式下滴灌灌水器的流量与压力特征、灌水均匀度等水力性能的演变及其调控规律进行深入研究,在微灌综合水力性能测试平台上对多种灌水器进行波动水压测试,目的在于揭示清水条件下波动水压对灌水器水力性能的影响规律,为该创新构思在实际滴灌工程中获得应用奠定理论与技术基础。不同波动模式对灌水器堵塞性能影响的试验研究将在后续的论文中阐述。

1 试验材料与方法

为了研究波动水压对典型结构灌水器水力性能的影响,选取 4 种不同灌水器产品:NetafimST16125 滴灌带、NetafimST16150 滴灌带、热压折叠式滴灌带和 HWP 绕流滴灌带。各种灌水器的性能参数见表 1。

表 1 4 种滴灌产品性能参数
Table 1 Performance parameters of four kinds of drip irrigation products

代号	灌水器种类	截面尺寸/mm		额定流量/ (L·h ⁻¹)	滴头间距/ mm
		宽度	深度		
A	NetafimST16 125 滴灌带	0.63	0.50	1.65	300
B	NetafimST16 150 滴灌带	0.78	0.67	1.75	300
C	热压折叠式滴灌带	1.00	0.40	2.07	300
D	HWP 绕流滴灌带	0.70	0.60	3.00	400

不同的波动模式对波动水压的影响较大,本文选取 4 种典型模式(图 1):矩形波形、梯形波形、锯齿波形和正弦波形。每种波动模式的主要影响因素有基础水压 H 、波幅 W 和波动周期 T 。

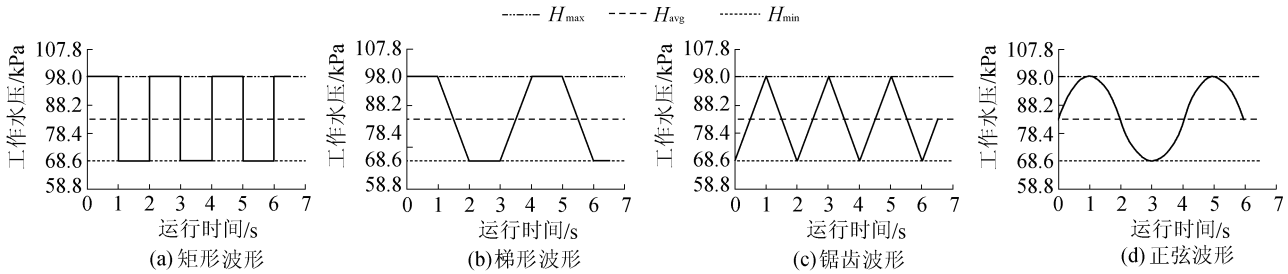


图 1 4 种波动水压模式
Fig. 1 Four kinds of pressure fluctuation modes

在每种波动模式下,分别选取 H 、 W 和 T 为变量因素,考虑到波动水压要适合在 49 kPa (5 mH₂O) 低工作压力下正常运行,将每个变量因素选取如表 2 所示的 3 种水平值。依据 $L_9(3^3)$ 的正交试验表(表 3)来安排各个因素,并考虑基础水压与波幅的交互作用因素。

试验步骤如下:

a. 根据 SL/T 67.1—1994《水利技术标准汇编》灌溉排水卷节水设备与材料-微灌灌水器-滴头,本文在压力-流量试验中,选取 15 个试验样安装在微灌综合水力性能试验平台上,在恒压条件下测量 15 个试验样在 9.8 ~ 98 kPa (1 ~ 10 mH₂O) 每一个压力点的出水量,试验时间不得少于 2 min。记录室温、水温、水压、试验时间和灌水器出水流量。重复上述试验,保证每个试验样 2 次测得水量之差不大于 2%,取平均值,并计算流量。按照上述方法,分别测试上述 4 种灌水器产品在各工作水压下的流量,并记录试验相关数据,计算获得 4 种灌水器的压力-流量特性参数。

b. 在上述压力-流量试验测试标准下,按照正交试验方案(表 3)进行压力-流量测试试验,记录试验相关数据,计算获得 4 种灌水器的压力-流量特性参数。

2 试验结果与分析

按照上述步骤 a 得到 9.8 ~ 98 kPa (1 ~ 10 mH₂O) 恒压条件下 4 种灌水器的试验数据,并根据试验记录数据计算获得 4 种灌水器的压力与流量试验结果。

按照上述步骤 b 得到 4 种灌水器在 4 种不同波动模式下的试验数据,并根据试验记录数据计算获得 4 种灌水器在正交试验条件下的压力与流量试验结果。正交表中各因素水平的组合参照表 3。

对上述正交试验数据进行直观分析和方差分析,得到锯齿波动模式下 4 种灌水器的波动因素对流量的影响关系(表 4)。

表 4 锯齿波动模式波动因素-流量分析结果

Table 4 Analysis of relationship between dynamic factors and flow in zigzag mode								
灌水器	H		W		$(H \wedge W)$		T	
	极差	均方差	极差	均方差	极差	均方差	极差	均方差
A	0.320 867	0.008 186	0.064 933	0.003 169	0.061 200	0.001 430	0.079 600	0.006 003
B	0.170 200	0.025 545	0.087 133	0.007 509	0.086 633	0.003 464	0.080 767	0.004 909
C	0.374 233	0.106 607	0.037 933	0.001 100	0.035 433	0.000 557	0.036 333	0.001 196
D	0.972 767	0.739 457	0.156 100	0.019 999	0.012 800	0.000 790	0.132 633	0.01 5548

由表 4 可以看出,对于灌水器 A,在数据分析中的 4 个因素—— H 、 W 、 $H \wedge W$ 和 T 对应的极差和均方差大小顺序为 $H>T>W>(H \wedge W)$,该结果表明:对灌水器流量影响最大的是基础水压,其次为波动周期,再次为波幅,影响最弱的是基础水压与波幅的交互作用。其最优方案为 $H_3W_2T_1$ 。

对于灌水器 B,各因素对灌水器流量的极差影响主次顺序为: $H>W>(H \wedge W)>T$,即基础水压的影响最明显,波动周期影响最小。但是,根据方差分析可以看出,4 个因素的均方差值在一个数量级,说明这 4 个因素对灌水器 B 的流量影响作用比较均衡。这是因为灌水器 B 为压力补偿式灌水器,锯齿波波动水压产生的波动效应在灌水器内部被垫片所吸收。其最优方案为 $H_3W_2T_1$ 。

对于灌水器 C,各因素对灌水器流量的极差影响主次顺序为: $H>W>T>(H \wedge W)$,即基础水压对灌水器的流量影响最显著,而基础水压与波幅的互交因素影响最小。方差分析表明, W 、 $(H \wedge W)$ 、 T 与 H 的影响程度相差近 3 个数量级以上,表明除基础水压 H 以外,其他 3 个因素可以归入误差。其原因为:锯齿形波动模式下水压变化幅度大,且灌水器 C 的流道尺寸较长,波动水压产生的波动效应在较长的流道内通过撞击和摩

表 2 正交试验因素和水平

Table 2 Orthogonal experimental factors and levels

水平	因素		
	H/m	T/s	W/m
1	3	36	3
2	5	48	2
3	7	60	1

表 3 正交试验方案

Table 3 Orthogonal experimental programs

编号	H/m	W/m	$(H \wedge W)$	T/s
1	3	3	1	36
2	3	2	2	48
3	3	1	3	60
4	5	2	2	60
5	5	1	3	36
6	5	3	1	48
7	7	1	3	48
8	7	3	1	60
9	7	2	2	32

注:($H \wedge W$)为基础水压与波幅的交互作用因素。

擦被弱化。其最优方案为 $H_3W_1T_1$ 。

对于灌水器 D,各因素对灌水器流量的极差影响主次关系为: $H>W>T>(H\wedge W)$,即基础水压对灌水器流量的影响最显著,由方差分析得到 $(H\wedge W)$ 与其他3个因素相差近3个数量级,可以被归入误差。其最优方案为 $H_3W_3T_2$ 。

对正交试验数据进行直观分析和方差分析,得到正弦波动模式下4种灌水器的波动因素对流量的影响关系如表5所示。

表5 正弦波动模式波动因素-流量分析结果
Table 5 Analysis of relationship between dynamic factors and flow in sine waveform mode

灌水器	H		W		(H∧W)		T	
	极差	均方差	极差	均方差	极差	均方差	极差	均方差
A	0.313 061	0.074 275	0.024 761	0.000 543	0.044 217	0.000 810	0.008 756	0.000 071
B	0.199 567	0.036 901	0.149 600	0.019 137	0.155 667	0.010 633	0.087 233	0.005 740
C	0.423 767	0.135 516	0.037 700	0.001 086	0.058 467	0.001 298	0.056 533	0.002 398
D	1.016 067	0.780 736	0.087 300	0.005 716	0.090 033	0.003 063	0.033 333	0.001 059

由表5可以看出,对于灌水器 A,各因素对灌水器流量的极差影响主次关系为: $H>(H\wedge W)>W>T$,即 H 对灌水器流量的影响最显著,而 T 对灌水器流量影响最小。其最优方案为 $H_3W_3T_1$ 。

对于灌水器 B,各因素对灌水器流量的极差影响主次关系为: $H>(H\wedge W)>W>T$,即 H 对灌水器流量的影响最显著,但是由均方差值看出各因素的影响程度较均衡,即各因素对灌水器流量都有较大的影响作用。其最优方案为 $H_3W_3T_1$ 。

对于灌水器 C,各因素对灌水器流量的极差影响主次关系为: $H>(H\wedge W)>T>W$,即 H 对灌水器流量的影响最显著,而 W 的影响最小,且由均方差值看出, W 、 $(H\wedge W)$ 、 T 均与 H 相差2个数量级。其最优方案为 $H_3W_3T_1$ 。

对于灌水器 D,各因素对灌水器流量的极差影响主次关系为: $H>(H\wedge W)>W>T$,即 H 对灌水器流量的影响最显著,而 T 的影响最小。其最优方案为 $H_3W_1T_2$ 。

对正交试验数据进行直观分析和方差分析,得到梯形波动模式下4种灌水器的波动因素对流量的影响的关系如表6所示。

表6 梯形波动模式波动因素-流量分析结果
Table 6 Analysis of relationship between dynamic factors and flow in trapezoid mode

灌水器	H		W		(H∧W)		T	
	极差	均方差	极差	均方差	极差	均方差	极差	均方差
A	0.330 933	0.083 526	0.039 133	0.001 516	0.053 933	0.001 194	0.024 133	0.000 507
B	0.223 067	0.048 640	0.174 100	0.026 220	0.176 533	0.013 260	0.146 667	0.017 337
C	0.419 667	0.133 186	0.041 733	0.001 308	0.070 500	0.001 901	0.077 667	0.004 539
D	1.037 828	0.820 960	0.128 961	0.014 154	0.176 950	0.012 585	0.081 422	0.006 423

由表6可以看出,对于灌水器 A,各因素对灌水器流量的极差影响主次关系为: $H>(H\wedge W)>W>T$,即 H 对灌水器流量的影响最显著,而 T 的影响最小,其中 T 与其他3个因素相差2个数量级,所以可以归入误差。其最优方案为 $H_3W_3T_1$ 。

对于灌水器 B,各因素对灌水器流量的极差影响主次关系为: $H>(H\wedge W)>W>T$,即 H 对灌水器流量的影响最显著,而 T 的影响最小,从均差值看出各因素对灌水器流量的影响较均衡。其最优方案为 $H_2W_3T_1$ 。

对于灌水器 C,各因素对灌水器流量的极差影响主次关系为: $H>T>(H\wedge W)>W$,即 H 对灌水器流量的影响最显著,而 W 的影响最小,这是因为灌水器为三角形流道,流道较长,由波幅产生的波动效应被流道削弱。其最优方案为 $H_3W_1T_2$ 。

对于灌水器 D,各因素对灌水器流量的极差影响主次关系为: $H>(H\wedge W)>W>T$,即 H 对灌水器流量的影响最显著, T 的影响最小。其最优方案为 $H_3W_2T_1$ 。

对正交试验数据进行直观分析和方差分析,得到矩形波动模式下4种灌水器的波动因素对流量的影响关系如表7所示。

由表7可以看出,对于灌水器 A,各因素对灌水器流量的极差影响主次关系为: $H>(H\wedge W)>W>T$,即 H

对灌水器流量的影响最显著,而 T 的影响最小。其最优方案为 $H_2W_2T_1$ 。

对于灌水器 B,各因素对灌水器流量的极差影响主次关系为: $H>(H \wedge W)>W>T$,即 H 对灌水器流量的影响最显著,而 T 的影响最小。其最优方案为 $H_3W_2T_1$ 。

表 7 矩形波动模式波动因素-流量分析结果

灌水器	H		W		$(H \wedge W)$		T	
	极差	均方差	极差	均方差	极差	均方差	极差	均方差
A	0.441533	0.179837	0.149100	0.022132	0.338433	0.046512	0.115767	0.010122
B	0.405067	0.153000	0.296833	0.073288	0.316533	0.042329	0.236933	0.044140
C	0.473933	0.174711	0.080200	0.006068	0.139300	0.007620	0.080800	0.005629
D	1.037828	0.820960	0.128961	0.014154	0.176950	0.012585	0.081422	0.006423

对于灌水器 C,各因素对灌水器流量的极差影响主次关系为: $H>(H \wedge W)>T>W$,即 H 对灌水器流量的影响最显著,而 W 的影响最小,且从均方差看出 W 、 $H \wedge W$ 和 T 与 H 相差 2 个数量级。其最优方案为 $H_3W_2T_1$ 。

对于灌水器 D,各因素对灌水器流量的极差影响主次关系为: $H>(H \wedge W)>W>T$,即 H 对灌水器流量的影响最显著,而 T 的影响最小,且从均方差看出 T 与其他 3 个因素相差 2 个数量级,所以可以归入误差。其最优方案为 $H_3W_2T_1$ 。

3 结 语

清水条件下的波动因素——基础水压 H 、波幅 W 和波动周期 T 对灌水器流量影响的正交试验结果表明,波动因素影响流量的主次关系为:基础水压 $H>$ 波幅 $W>$ 波动周期 T ,基础水压对灌水器流量影响最大,影响率超过 50%。

参考文献:

[1] 范兴科,吴普特,牛文全,等. 低压滴灌条件下提高系统灌水均匀度的途径探讨[J]. 灌溉排水学报,2008,27(1):18-20. (FAN Xingke,WU Pute,NIU Wenquan,et al. The methods of improving system's irrigation uniformity under low-pressure drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2008,27(1):18-20. (in Chinese))

[2] 张国祥,吴普特. 滴灌系统滴头设计水头的取值依据[J]. 农业工程学报,2005,21(9):20-22. (ZHANG Guoxiang,WU Pute. Determination of the design working head of emitter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005,21(9):20-22. (in Chinese))

[3] 张林,吴特普,范兴科,等. 低压滴灌灌水均匀度试验研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(12):215-220. (ZHANG Lin,WU Pute,FAN Xingke,et al. Experimental research on drip irrigation uniformity at low-pressure[J]. Journal of Northwest A & F University:Natural Science Edition, 2009,37(12): 215-220. (in Chinese))

[4] 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):8-12. (MA Xiaopeng,GONG Shihong,WANG Jiandong,et al. Uniformity coefficient of drip irrigation tapes under low operating pressure [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010,29(4): 8-12. (in Chinese))

[5] 王威,翟治芬. 灌水器水力性能参数的计算方法[J]. 安徽农业科学, 2008,36(26): 11618-11620. (WANG Wei,ZHAI Zhifen. Calculation method for the hydraulic performance parameter of emitter[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2008, 36(26):11618-11620. (in Chinese))

[6] 白丹,宋立勋,王晓愚,等. 地下滴灌灌水器流量和压力关系的试验[J]. 农业机械学报,2008,39(8):195-197. (BAI Dan, SONG Lixun,WANG Xiaoyu,et al. Flow rate and pressure relationships tests of subsurface drip irrigation [J]. Journal of Agricultural Machinery,2008,39(8):195-197. (in Chinese))

[7] WATTERS G Z, KELLER J. Trickle irrigation tubing hydraulics[M]. St Joseph, Michigan:ASAE, 1978.

[8] JUANA L, RODRIGUEZ-SINOBAS L, LOSADA A. Determining minor head losses in drip irrigation laterals I: methodology [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2002,128(6):376-384.

[9] PROVENZANO G, PUMO D, DIO P D. Simplified procedure to evaluate head losses in drip irrigation laterals[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE,2005,131(6):525-532.

[10] DUAN X J, LESIKAR B J, KENIMER A L, et al. Performance of wastewater subsurface drip emitters at low and normal pressure[J]. Water Environment Research,2008,80(2): 142-148.

[11] 李光永. 压力补偿灌水器的研究新进展与使用中应注意的几个问题[J]. 节水灌溉,2000(3):19-21. (LI Guangyong. New advances and several using issues should pay attention to the pressure compensating emitters[J]. Water Saving Irrigation,2000 (3):19-21. (in Chinese))

[12] KANG Y. Effect of operating pressures on microirrigation uniformity[J]. Irrig Sci,2000,20:23-27.

[13] SAFI B, NEYSHABOURI M R, NAZEMI A H, et al. Water application uniformity of a subsurface drip irrigation system at various operating pressures and tape lengths[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2007, 31(5):275-285.

[14] LI Yunkai, YANG Peiling, XU Tingwu, et al. Hydraulic property and flow characteristics of three labyrinth flow paths of drip irrigation emitters under micro-pressure[J]. Transactions o the ASABE, 2009, 52(4): 1129-1138.

[15] ASSOULINE S, MOLLER M, COHEN S, et al. Soil-plant system response to pulsed drip irrigation and salinity: bell pepper case study[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006,70(5):1556-1568.

[16] ELMALOQLOU S, DIAMANTOPOUOS E. Wetting front advance patterns and water losses by deep percolation under the root zone as influenced by pulsed drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2007, 90(1/2): 160-163.

· 简讯 ·

《Water Science and Engineering》国际学术研讨会暨
第三届编委工作会议在河海大学举行

《Water Science and Engineering》(WSE)国际学术研讨会第三届编委会工作会议于2014年6月21日在河海大学举行。河海大学副校长唐洪武教授出席会议并致辞。会议由WSE学科主编余钟波教授和李凌教授共同主持。

会议主题如下:研讨当前国际水科学与水工程前沿学术问题,交流WSE国际影响力提升计划的实施情况,进一步明确和落实提升WSE国际影响力的保障措施。经与会代表的热烈讨论,在优化编委工作机制、精炼选题范围、重构稿件处理流程等方面达成了共识。

会议期间,加拿大工程院院士、滑铁卢大学 Edward Sudicky 教授,美国俄亥俄州立大学 Frank Schwartz 教授,澳大利亚昆士兰大学 William Clarke 教授,李凌教授,瑞典乌普萨拉大学 AlaAldahan 教授等著名学者为相关学科的师生代表作了大会报告。

学校有关部门和学院领导以及WSE编辑部工作人员参加会议。

(本刊编辑部供稿)