doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.17.030

微纳米曝气增氧滴灌系统水-氧传输特性研究

王　越[1,2]　刘宁宁[1,2]　刘亚龙[1,2]　张佳豪[1,2]　李　淼[1,2]　张金珠[1,2]　王振华[1,2]
(1.石河子大学水利建筑工程学院,石河子 832000;2.兵团农业水肥高效关键装备技术创新中心,石河子 832000)

摘要:为阐明微纳米增氧曝气滴灌系统中水-氧协同传输规律,以 90 m 长非压力补偿式(HL)和压力补偿式(NT)滴灌带为对象,设置 6 个工作压力(25~150 kPa)以及不加氧(0 L/min)和加氧(1.5 L/min)两种运行模式,测定滴灌带沿程出流量及均匀性,并在加氧条件下测定溶解氧(DO)的沿程变化,采用方差分析和偏效应量 η^2 评价各因素影响。结果表明:工作压力和距离是影响系统水-氧传输的主导因素。HL 出流量主要受工作压力($\eta^2\approx0.919$)和距离($\eta^2\approx0.065$)影响,NT 出流量主要受工作压力($\eta^2\approx0.772$)及其与距离交互作用($\eta^2\approx0.118$)影响;与不加氧相比,加氧条件下两类灌水器出流量及其均匀性变化均较小,其中 HL 为极小效应($\eta^2<0.01$),NT 为小效应($\eta^2<0.06$),表明在本试验加氧条件下,微纳米增氧对系统水力性能扰动有限;溶氧量均随距离增加而衰减,随工作压力先升高后趋于稳定,HL 在 100 kPa 时溶氧量均匀性最佳(98.46%),NT 在 75 kPa 及以上可保持较高且稳定的出流量与溶氧量均匀性(均大于 97%)。

关键词:增氧灌溉;溶氧量;微纳米曝气系统;灌溉均匀性;水力性能
中图分类号:S126　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)17-0324-10　　**OSID**:

Transport Characteristics of Water – Oxygen Transfer in Micro-nano Bubble Aerated Drip Irrigation System

Wang Yue[1,2]　Liu Ningning[1,2]　Liu Yalong[1,2]　Zhang Jiahao[1,2]　Li Miao[1,2]　Zhang Jinzhu[1,2]　Wang Zhenhua[1,2]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi* 832000, *China*
2. *Xinjiang Production and Construction Corps Key Technology Innovation Center for Efficient Water and Fertilizer Equipment in Agriculture, Shihezi* 832000, *China*)

Abstract: The coupled transport of water and oxygen in a micro/nanobubble-aerated drip irrigation system was investigated, with particular emphasis placed on the effects of operating pressure, distance along the lateral, and emitter type on hydraulic performance and dissolved oxygen (DO) distribution. To address this issue, two 90 m drip tapes, namely a non-pressure-compensating tape (HL) and a pressure-compensating tape (NT), were tested under six operating pressures (25 ~ 150 kPa) and two aeration treatments, i.e., non-aeration (0 L/min) and aeration (1.5 L/min). Emitter discharge, Christiansen's uniformity coefficient, and DO concentration were measured at multiple locations along the lateral. The independent and interactive effects of pressure, distance, and aeration were quantified by analysis of variance, and their relative contributions were evaluated using partial eta squared η^2. It was found that operating pressure and distance were the dominant factors governing water-oxygen transport in both drip tapes. For HL, emitter discharge was controlled primarily by operating pressure ($\eta^2=0.919$), followed by distance ($\eta^2=0.065$). For NT, emitter discharge was also governed mainly by operating pressure ($\eta^2=0.772$), as the interaction between pressure and distance showed a stronger contribution ($\eta^2=0.118$). Compared with the non-aerated treatment, aeration caused only negligible to small changes in hydraulic performance, with effect sizes below 0.01 for HL and below 0.06 for NT, and with changes in discharge uniformity limited to 2.2% for HL and 1.8% for NT. Under aerated conditions, DO concentration was reduced with the increase of distance along the lateral but was increased with the

收稿日期:2026-02-25　修回日期:2026-04-10
基金项目:第七师胡杨河市-石河子大学创新合作专项(QS2025004)和新疆维吾尔自治区人才发展基金-科研创新平台项目
作者简介:王越(1997—),女,博士生,主要从事干旱区节水灌溉理论与技术研究,E-mail:20202010032@shzu.edu.cn
通信作者:王振华(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事干旱区节水灌溉理论与技术研究,E-mail:wzh2002027@163.com

increase of operating pressure. At 25 kPa, the DO concentration declined from the inlet to the end of the lateral by 17.88% in HL and 22.61% in NT. When the pressure was increased from 25 kPa to 150 kPa, the DO concentration was increased by 18.36% ~ 36.33% in HL and by 6.73% ~ 33.35% in NT, indicating that high pressure effectively alleviated longitudinal DO attenuation. The highest DO uniformity for HL was obtained at 100 kPa, reaching 98.46%, whereas NT maintained both discharge and DO uniformity above 97% at pressures of 75 kPa and higher. It was therefore concluded that micro/nanobubble aeration imposed only limited disturbance on the hydraulic characteristics of the drip irrigation system, while operating pressure remained the key factor controlling stable and uniform water-oxygen delivery over long transport distances. The originality of the research can lay in the systematic quantification of the relative contributions of pressure, distance, aeration, and emitter type to both hydraulic behavior and DO transport in a long-distance micro/nanobubble-aerated drip irrigation system, and in the identification of pressure ranges suitable for coordinated water-oxygen delivery in non-pressure-compensating and pressure-compensating drip tapes.

Key words: aerated irrigation; dissolved oxygen; micro-nano bubble aeration; irrigation uniformity; hydraulic performance

0　引言

膜下滴灌和地下滴灌因节水增产效果显著,已成为干旱半干旱区重要的高效灌溉方式[1-2]。然而,高频及小流量的灌水特性、地表覆膜以及地下滴灌湿润体的长期存在,共同抑制了土壤与大气之间的气体交换,灌溉水占据土壤孔隙,降低气体扩散通道,易诱发作物根区缺氧问题[3-4],在孔隙连通性差、通气阻力较大的细质(黏)土壤中尤为明显[5-6]。增氧灌溉通过向灌溉水中注入空气或氧气,并借助滴灌系统实现水氧协同入土,被认为是缓解根区缺氧、提高水肥利用效率和作物产量的有效途径[7-8]。

已有研究从作物与土壤响应角度证实了微纳米增氧滴灌的增产潜力。在加工番茄[9]、玉米[10]、棉花[11]、鹰嘴豆[12]等作物试验表明,增氧灌溉可通过改善根区微环境、调控微生物群落与酶活性,促进养分吸收和干物质积累,进而提高作物产量。但作物响应并不能替代工程评价,增氧灌溉能否稳定应用,关键在于氧气在灌溉系统中的生成、溶解、输配与释放过程是否稳定可控。

从实现方式看,增氧灌溉主要包括独立通气和水气一体化增氧两类。前者通常在灌溉过程之外向土壤注入空气或氧气,虽可改善根区通气性,但需额外铺设管道或改造系统,初始投入较高,且存在土壤扰动风险[13-14]。后者则将气体直接与灌溉水混合后随水入土[15],工程兼容性更强。根据增氧机理不同,该方式又可分为化学增氧和物理增氧两类。化学增氧通过向灌溉水中加入可分解释放氧的物质(如过氧化物等)实现增氧[16-17]。物理增氧则通过空气泵、微纳米气泡发生器[18]或文丘里管[19-20]实现。其中,微纳米气泡发生器产生的气泡粒径小、比表面积大、停留时间长、传质效率高,更有利于提升和维持水体溶解氧(Dissolved oxygen, DO)浓度,在农业增氧灌溉研究中备受关注[21]。

在系统输配与装置层面,已有研究对不同条件下增氧滴灌系统的水气传输特征进行了探索。雷宏军等[22]比较了空气、氧气曝气对非压力补偿式滴灌带沿程水气传输特性的影响,研究得出,氧气曝气的溶氧均匀性高于空气曝气。饶晓娟等[23]、刘燕芳等[24]分别探讨了边缝式滴灌带、压力补偿式滴灌带中的 DO 变化规律,揭示了 DO 浓度存在沿程变化规律。李浩[25]进一步从两相流角度指出,随输送距离增加,气泡可能发生聚并、长大和逸散,从而改变流态并影响灌溉均匀性。已有研究为认识微纳米曝气增氧(Micro-nano aeration oxygenation, MNBO)滴灌系统提供了基础,但关于工作压力、输送距离、灌水器类型和进氧处理等因素对水氧传输行为的耦合影响及其相对贡献,尚缺乏系统量化分析。

因此,本文选取两种典型内镶贴片式滴灌带(非压力补偿式、压力补偿式),在 90 m 长条件下设置不同工作压力(25 ~ 150 kPa)和进气量(0、1.5 L/min)处理,通过沿程多点同步监测滴头出流量、溶氧量,分析微纳米曝气增氧滴灌系统的水氧输配特征,量化各因素对出流量、水量均匀性和溶氧量分布特征的独立与交互作用,并基于方差分析与偏效应量识别主控因子,为系统运行调控与参数优化提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验装置

试验在石河子大学水利建筑工程学院农水试

验大厅(44°31′N,86°05′E)开展,灌溉水源为井水,水温 10 ~ 15℃,pH 值 7.64 ~ 7.75,电导率 0.2 ~ 1.55 mS/cm,初始溶氧量 10.55 ~ 11.28 mg/L。试验装置由供氧装置、微纳米循环曝气装置和测试装置 3 部分组成(图 1)。供氧装置包括空气阀、空气流量计(0 ~ 10 L/min)和氧气浓缩器,氧气浓缩器由格立(佛山)环保科技有限公司生产(型号:WGL - 10 - 9,氧气体积分数 97% 以上,出口压力 10 ~ 30 kPa)。微纳米循环曝气装置包括微纳气泡发生装置(北京中农天陆微纳米气泡水科技有限公司,型号:TL - MBG20 - A,出水量 2 m^3/h,最大加气量为流量的 10%,气泡直径 100 nm ~ 10 μm)、500 L 水箱、搅拌器和曝气头。测试装置包括变频泵(扬程 40 m)、压力表、堵头、量杯等。

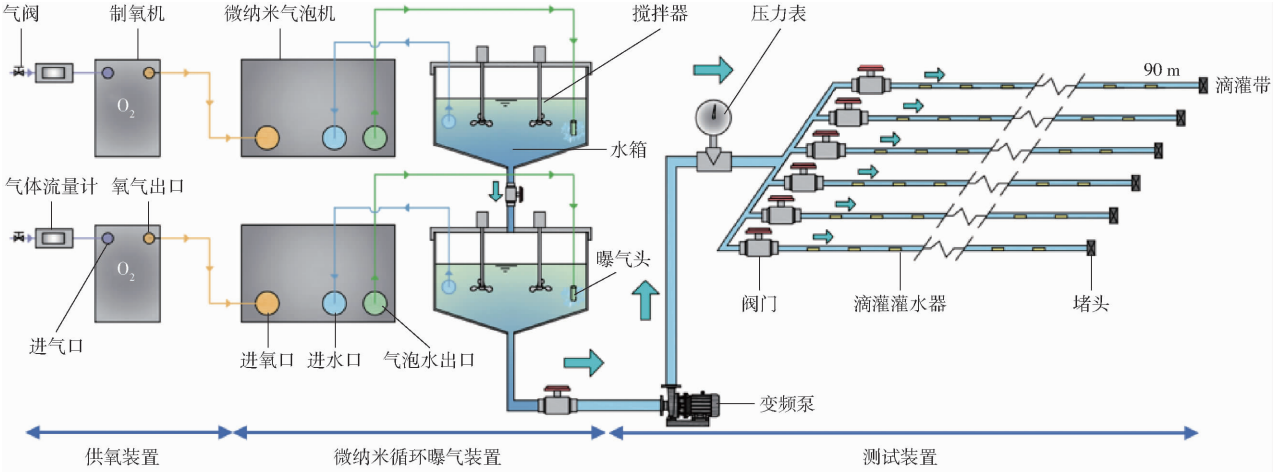

图 1 试验装置构成图

Fig. 1 Test bench

为确保试验期间初始 DO 浓度稳定,采用双水箱并联工作模式,一箱实时供水,另一箱预曝气备用。预试验表明,450 L 水中需要曝气约 40 min 后可稳定到饱和状态(图 2),因此每次试验前预曝气 40 min 后开展试验。

滴灌带水平铺设,长度 90 m。选用两种常用的内镶贴片式滴灌带:非压力补偿式 HL(新疆惠利灌溉科技股份有限公司)以及压力补偿式(Netafim, NT),其结构参数与性能指标详见表 1。灌水前用清水冲洗管道,并按 GB/T 19182.3—2017《塑料节水灌溉器材 第 3 部分:内镶式滴灌管及滴灌带》测定灌水器流量-压力关系。

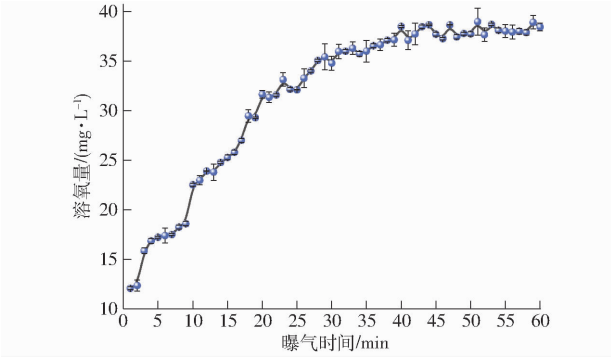

图 2 溶解氧与曝气时间关系曲线

Fig. 2 Relationship between dissolved oxygen and aeration time

表 1 灌水器基本参数

Tab. 1 Basic parameters of irrigation emitters

灌水器类型	额定流量 Q/(L·h^{-1})	压力补偿类型	流道最小尺寸/mm			分布间隔/m	流量系数 k	流态指数 x	灌水器流道图示
			宽度	深度	长度				
HL	1.95	非压力补偿式	1.00	0.43	26.00	0.3	0.65	0.48	
NT	1.85	压力补偿式	1.00	0.75	7.50	0.3	1.46	0.05	

1.2 试验设计

试验因素与水平如表 2 所示。包括灌水器类型、工作压力、进氧速率及测点距离,共 216 个处理,每个处理重复 3 次。其中,25 kPa 为本试验设置的低压边界工况,主要用于考察系统在低压条件下的水氧输配响应特征及稳定运行阈值。每次测试 6 根滴灌带,NT 和 HL 各 3 根,单根长度为 90 m。沿每条滴灌带距首端阀门 5 ~ 85 m 处设置 9 个测点,每个测点连续取 3 个灌水器作为重复,灌水器出水口均朝上。出流量测定时,在系统压力稳定后于测点下方放置集水容器,灌水 5 min 后称量并换算为体积流量(L/h)。溶氧量采用 DO 溶解氧测定仪(上

海雷磁仪器有限公司，型号：JPBJ－608，精度±0.1 mg/L）测定。于各测点接取 5 min 内滴出的微纳米气泡水，即取即测。测量方法参考《便携式溶解氧测定仪技术要求及检测方法》，每 6 s 记录一次数值，记录 1 min 内的平均值，重复 3 次，取总平均值作为该测点的溶氧量。

表 2　试验因素与水平

Tab.2　Test factors and levels

试验因素	水平
灌水器类型	HL、NT
工作压力 P/kPa	25、50、75、100、125、150
进氧速率 O/(L·min^{-1})	0、1.5
测点距离 L/m	5、15、25、35、45、55、65、75、85

1.3　测试指标

1.3.1　均匀性 CU

采用克里斯琴森均匀系数（CU）[26]评价出流量与溶解氧的沿程分布均匀性，公式为

$$C_U = \left(1 - \frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{n\bar{x}}\right) \times 100\% \qquad (1)$$

式中　C_U——克里斯琴森均匀系数，%

x_i——每个采样点出流量或溶解氧质量浓度

$\bar{x}$——平均值　　n——采样点数量

1.3.2　数据归一化

为消除不同物理量纲对多因素分析的影响，对各指标实测值（组内）进行归一化处理[27]，公式为

$$y_{norm} = \frac{y - y_{min}}{y_{max} - y_{min}} \qquad (2)$$

式中　y_{norm}——变量的归一化值

y——变量实际值

y_{min}、y_{max}——变量的最小值、最大值

1.3.3　数据处理与统计分析

所有数据采用 SPSS 24.0 进行统计分析。采用多因素方差分析（ANOVA）检验滴灌带类型、工作压力、进氧速率及测点距离对各性能指标的显著性影响（显著性水平 0.05，不同大写字母表示不同测点距离间差异的显著性，$p<0.05$；不同小写字母表示不同工作压力间差异的显著性，$p<0.05$）。为进一步量化各因素及其交互作用对总变异的贡献，在方差分析基础上计算偏效应量 η^2[28-29]，公式为

$$\eta^2 = \frac{S_{effect}}{S_{effect} + S_{error}} \qquad (3)$$

式中　S_{effect}——该因素/交互项的平方和

S_{error}——误差的平方和

$\eta^2<0.01$ 时判定为效应可忽略（或极小效应），$0.01\leqslant\eta^2<0.06$ 为小效应，$0.06\leqslant\eta^2<0.14$ 为中等效应，$\eta^2\geqslant0.14$ 为大效应。

2　结果与分析

2.1　不同工况对灌水器出流量的影响

两种灌水器的出流量沿程变化如图 3 所示。

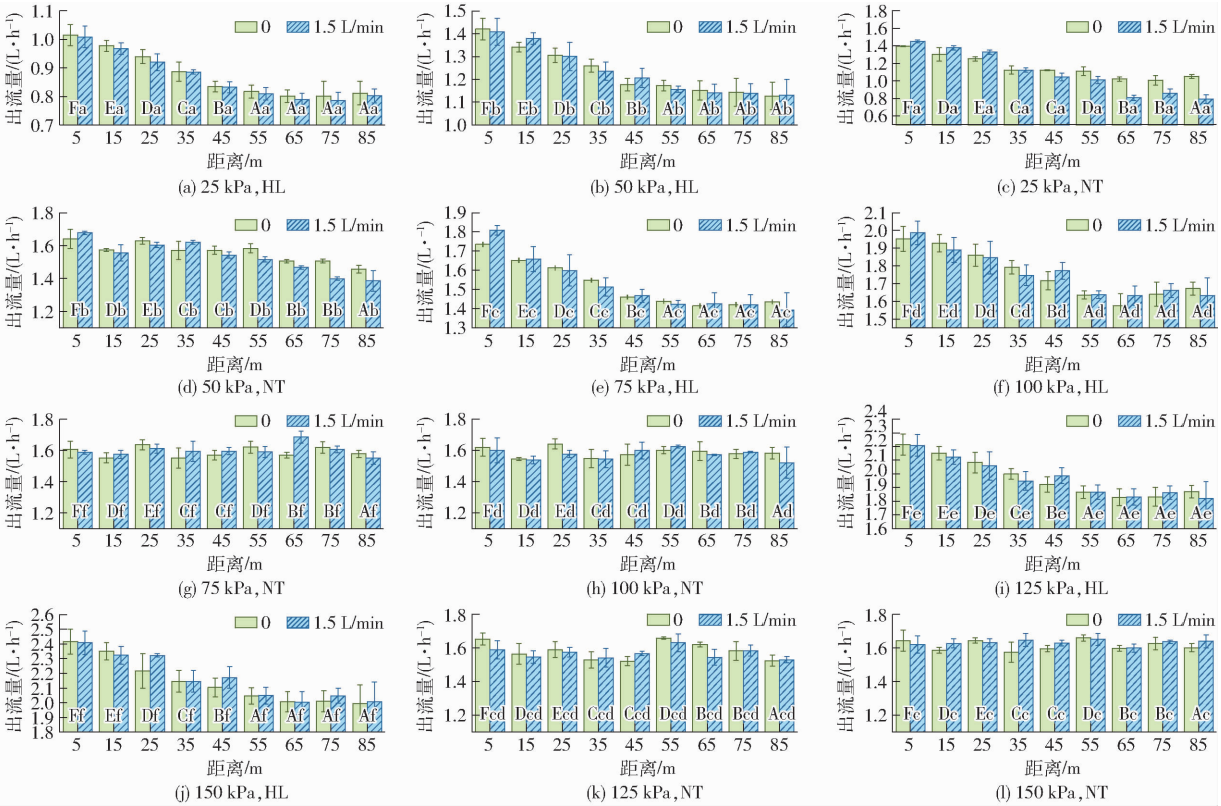

图 3　不同工况下灌水器出流量沿程变化

Fig.3　Variation of emitter flow rate under different working conditions

HL 在各压力水平下均表现为出流量随距离增加而下降,末端(85 m)出流量相对于首端(5 m 处)的下降较为显著。当不加氧时,工作压力从 25 kPa 增至 150 kPa,其衰减幅度在 14.36% ~20.66%;加氧条件下的衰减幅度与之相近,在 16.66% ~22.98%之间。且不同工况下加氧与不加氧出流量误差均小于 0.1 L/h。

相比之下,NT 变化受压力区间影响明显,在 25、50 kPa 下出流量沿程下降;当工作压力达到并超过 75 kPa 时,出流量下降趋于平缓。表明此压力补偿式灌水器的启动压力小于 75 kPa。不加氧条件下,75 ~150 kPa 压力对应的末端流量衰减幅度分别为 2.58%、1.70%、2.43%和 7.79%;加氧条件下除压力 25 kPa 衰减较大(45.32%)外,其余压力下衰减幅度均小于 5%(-1.20% ~4.95%)。当工作压力不小于启动压力 75 kPa 时,不同工况下加氧与不加氧出流量误差均小于 0.12 L/h。

方差分析结果如表 3 所示。对于 HL,P 与 L 对出流量有极显著影响($p<0.001$),其中 P 为主导因子($\eta^2\approx0.919$),L 次之($\eta^2\approx0.065$);进氧速率及相关交互项均不显著,且效应量极小($\eta^2<0.01$),说明微纳米加氧对 HL 出流量影响有限。对于 NT,P 与 L 同样为极显著影响($p<0.001$),其中 P 为首要因子($\eta^2\approx0.772$),其次为压力与测点距离交互作用($\eta^2\approx0.118$)和测点距离($\eta^2\approx0.055$)。尽管进氧速率及部分交互项达到统计显著,但其效应量均较小($\eta^2<0.02$),表明在本试验条件下,加氧处理未实质性改变系统原有水力特征。

表 3 不同因素对灌水器出流量影响的方差分析

Tab.3 ANOVA analysis of influence of different factors on emitter discharge

灌水器类型	因素	F	p	η^2	灌水器类型	因素	F	p	η^2
HL	测点距离 L	162.114	<0.001	0.065	NT	测点距离 L	57.975	<0.001	0.055
	工作压力 P	3 673.401	<0.001	0.919		工作压力 P	1 301.815	<0.001	0.772
	进氧速率 O	0.027	0.871	<0.01		进氧速率 O	13.810	<0.001	<0.01
	$L\times P$	1.510	0.034 1	<0.01		$L\times P$	24.882	<0.001	0.118
	$L\times O$	1.011	0.429	<0.01		$L\times O$	5.394	<0.001	0.018
	$P\times O$	0.456	0.809	<0.01		$P\times O$	7.993	<0.001	<0.01
	$L\times P\times O$	0.377	1.000	<0.01		$L\times P\times O$	3.741	<0.001	0.018

2.2 不同工况对灌水器出流均匀系数的影响

两种灌水器的出流均匀系数均随工作压力的升高而改善,但其变化模式与达到稳定所需的压力区间存在明显差异(图 4)。HL 在各压力下出流均匀系数均高于 90%,且随压力升高仅呈现小幅增加。当工作压力由 25 kPa 升至 150 kPa 时,不加氧和加氧条件下出流均匀系数分别提升 2.14 个百分点和 1.85 个百分点。多重比较表明,HL 在低压区间(25 ~75 kPa)及高压区间(50 ~150 kPa)内差异均不显著,说明对于 HL,压力超过 75 kPa 后继续增压对均匀性的提升效果有限。试验工况内,加氧与不加氧的出流均匀系数差值的绝对值在 0.10% ~0.74%之间,表明加氧并为显著影响 HL 出流均匀性。

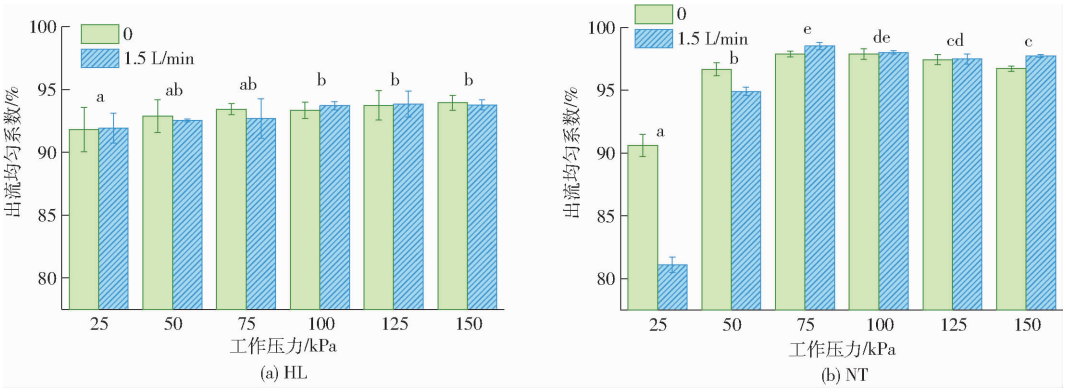

图 4 不同工况下滴灌带的出流均匀系数

Fig.4 Outflow uniformity coefficient of drip irrigation belt under different working conditions

NT 的出流均匀系数对压力的响应更敏感,表现为“快速增加后趋于稳定”。从 25 kPa 到 150 kPa,NT 的出流均匀系数在不加氧条件下提升了 6.11 个百分点,在加氧条件下提升了 16.63 个百分点。25 kPa 时出流均匀系数在同处理下最低,0、1.5 L/min 处理下分别为 90.59%、81.10%;当压力升至 50 kPa

时，出流均匀系数显著提高，0、1.5 L/min 处理下分别提升至 96.67%、94.91%，且在 75 kPa 后进入稳定高值区（96.70% ~97.87%；97.47% ~98.51%），出流均匀系数大于 96%，表明压力补偿机制在 $P \geqslant 75$ kPa 时得到充分发挥。当压力大于75 kPa 时，加氧与不加氧的出流均匀系数差值的绝对值在 0.04% ~1.02%之间，即加氧并未显著影响 NT 出流均匀性。

方差分析结果如表 4 所示。HL 的出流均匀系数主要受 P 影响显著（$p < 0.05$，$\eta^2 \approx 0.40$），而 O 及其与 P 交互对 HL 均匀系数的影响均不显著（$p > 0.05$）。表明 HL 的出流均匀性主要由工作压力决定。NT 中 P、O 及其交互作用均达到极显著水平（$p < 0.001$），且 P 为主导因子（$\eta^2 \approx 0.829$），交互项次之（$\eta^2 \approx 0.146$），进氧速率虽然为极显著但为小效应（$\eta^2 \approx 0.024 < 0.06$）。表明 NT 出流均匀性主要受压力控制，进氧速率影响相对有限。

表 4　不同因素对出流均匀系数的显著性分析

Tab. 4　ANOVA analysis of different factors on outflow uniformity coefficient

灌水器类型	因素	F	p	η^2	灌水器类型	因素	F	p	η^2
HL	工作压力 P	3.376	0.019	0.400	NT	工作压力 P	731.145	<0.001	0.829
	进氧速率 O	0.107	0.747	<0.01		进氧速率 O	119.146	<0.001	0.024
	$P \times O$	0.224	0.949	0.030		$P \times O$	129.234	<0.001	0.146

2.3　不同工况对溶氧量的影响

在加氧条件下，总体来看，两类滴灌带溶氧量均随距离增加而衰减，随工作压力升高后趋于稳定（图 5、6）。对于 HL，当距离从 5 m 增至 85 m 时，不同工作压力下（25 ~ 125 kPa），溶氧量分别降低 17.88%、11.61%、5.83%、3.75%、5.03%、5.42%。相同距离下，当压力从 25 kPa 升至 150 kPa 时，各测点（5 ~85 m）溶氧量增幅分别为 18.36%、21.63%、24.19%、25.14%、28.18%、32.29%、30.43%、33.13%、36.33%。125 kPa 和 150 kPa 之间的溶氧量无显著性差异（$p > 0.05$），表明溶氧量随压力提升存在饱和效应。表明一定范围内提高工作压力可

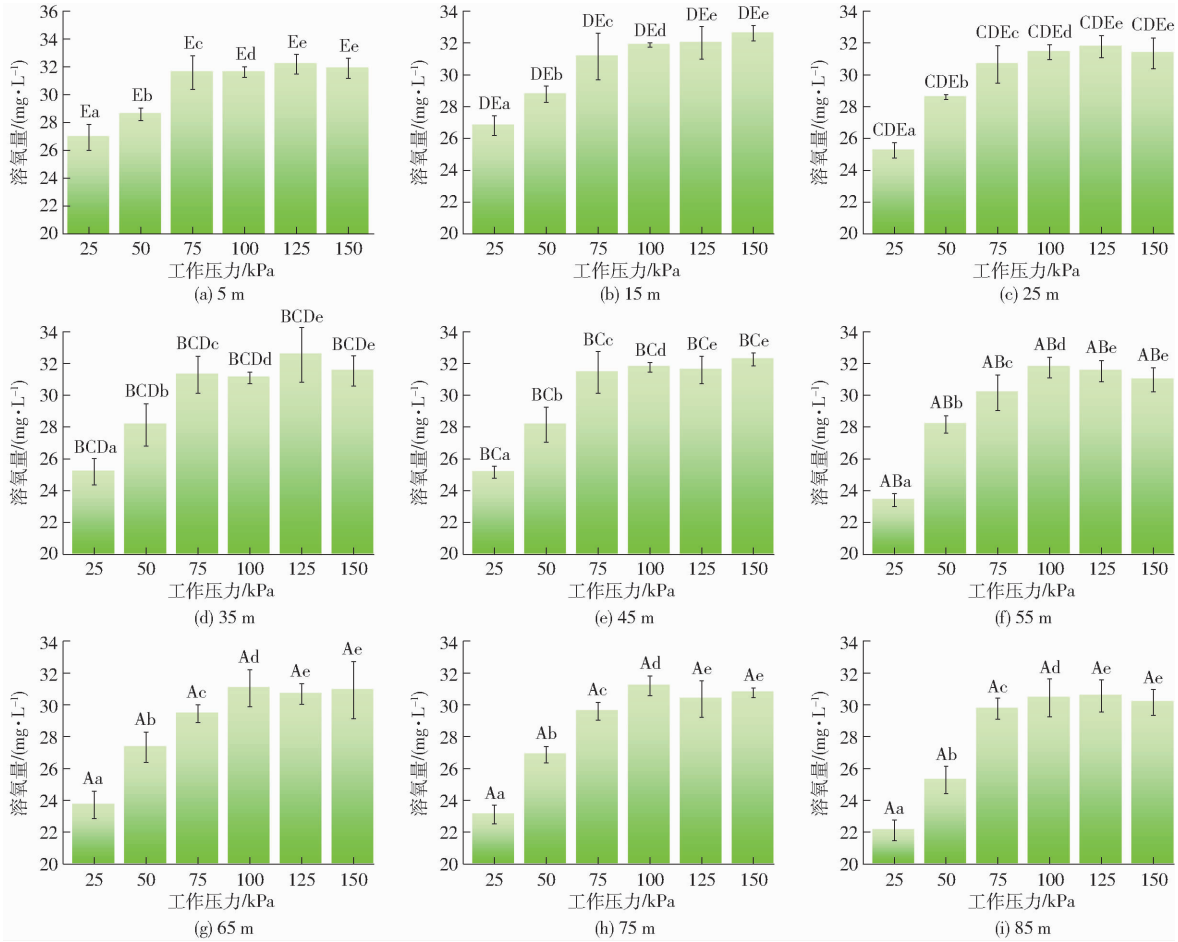

图 5　不同测点下 HL 滴灌带在不同压力下的溶氧量变化

Fig. 5　Changes of dissolved oxygen in HL drip irrigaiton belt under different pressures at different measuring points

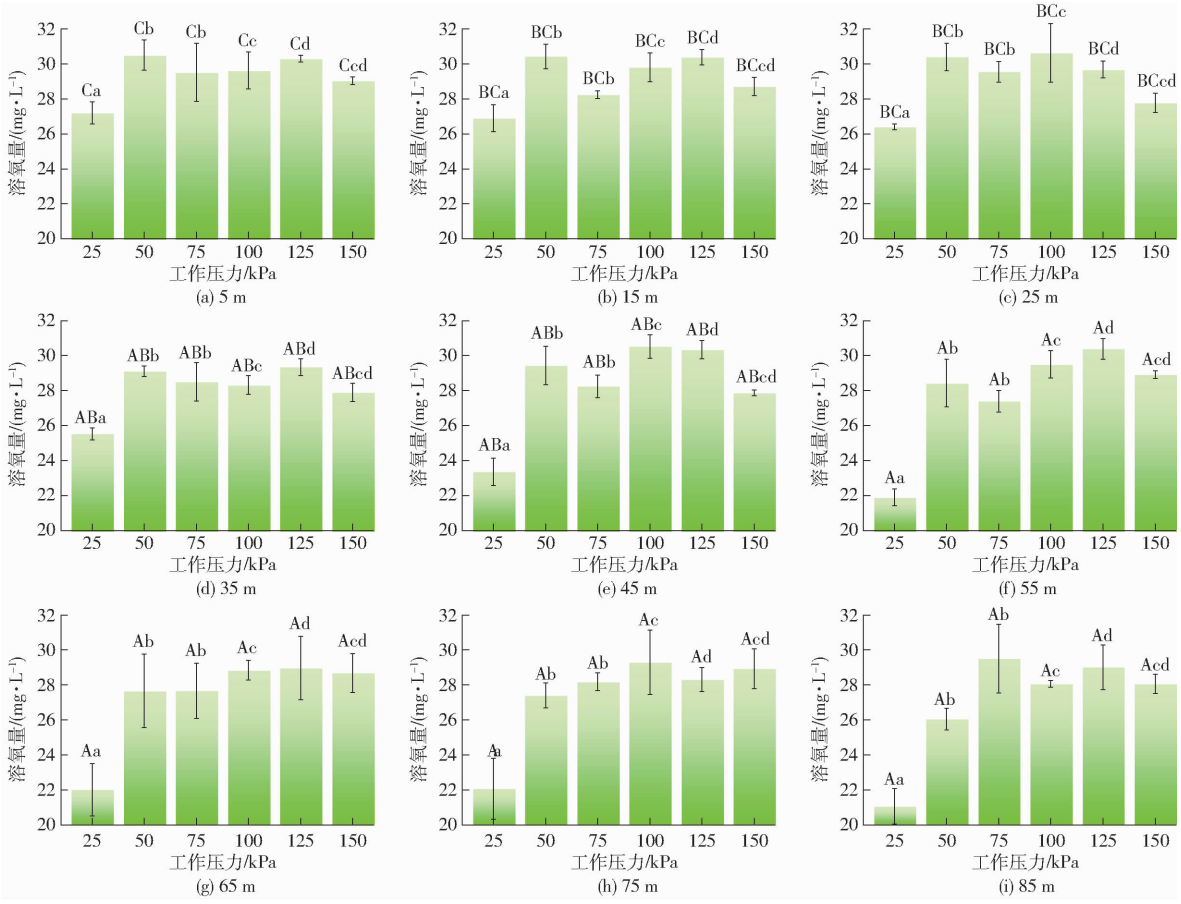

图 6 不同测点下 NT 滴灌带在不同压力下的溶氧量变化

Fig. 6 Changes of dissolved oxygen in NT drip irrigaiton belt under different pressures at different measuring points

有效减缓 HL 中溶氧量沿程衰减。

对于 NT,当测点距离由 5 m 增至 85 m 时,不同工作压力下(25 ~ 125 kPa)溶氧量分别降低 22.61%、14.62%、10.07%、5.30%、4.29%、3.31%。低工作压力下(25、50 kPa)衰减显著。当压力从 25 kPa 升高到 150 kPa 时,在不同测点距离条件下(5 ~ 85 m),溶氧量增幅分别为 6.73%、6.73%、5.23%、9.24%、19.35%、32.07%、30.30%、31.14%、33.35%。组间显著性差异分析表明,相同距离下,工作压力 50、75 kPa 之间,100、150 kPa 之间,125、150 kPa 之间对溶解氧无显著性差异($p > 0.05$),其它工作压力时,表现较显著。表明不同压力水平间的溶氧量浓度存在统计差异,但随着工作压力的升高其衰减曲线的斜率明显变缓,即系统进入相对稳定的溶氧量传输区间。

溶氧量的方差分析如表 5 所示。对于 HL,P 与 L 均为极显著因素($p < 0.001$),其中 P 的效应量 $\eta^2 \approx 0.773$,为大效应;L 的效应量 $\eta^2 \approx 0.061$,为中等效应。两者交互作用($P \times L$)不显著。对于 NT,P 同样是极显著的主导因素($p < 0.001$,$\eta^2 \approx 0.585$),测点距离 L 对溶氧量的影响也极显著($p < 0.001$,$\eta^2 \approx 0.074$),两者交互作用($P \times L$)不显著。表明在本试验条件下,两类滴灌带溶解氧传输均主要受工作压力调控,测点距离效应主要体现为沿程损失累积。

表 5 不同因素对溶解氧含量的显著性分析

Tab. 5 ANOVA of effects of different factors on dissolved oxygen of emitters

灌水器类型	因素	F	p	η^2
HL	工作压力 P	260.658	< 0.001	0.773
	测点距离 L	12.880	< 0.001	0.061
	$L \times P$	0.235	1.000	< 0.01
NT	工作压力 P	98.668	< 0.001	0.585
	测点距离 L	7.856	< 0.001	0.074
	$L \times P$	0.440	0.999	0.021

2.4 不同工况对溶氧量均匀系数的影响

不同工作压力下,两种灌水器的溶氧量均匀系数变化如图 7 所示。两类灌水器在 25 kPa 时溶氧量均匀系数均最低,随压力升高明显改善,但变化趋势存在差异。单因素方差分析(表 6),工作压力对两种灌水器的溶氧量均匀系数均有极显著影响($p < 0.01$)。HL 的溶氧量均匀系数随压力升高呈先增后降趋势,25 kPa 时最低,为 94.42%,100 kPa 时达到最高,为 98.46%,随后略有下降。多重比较显示,25 kPa 压力下的溶氧量均匀系数与其他所有

压力水平均存在显著差异，而 75 kPa 至 150 kPa 之间的溶氧量均匀系数无显著差异，说明压力提升至 75 kPa 以上即可较好保证 HL 的溶氧均匀性。

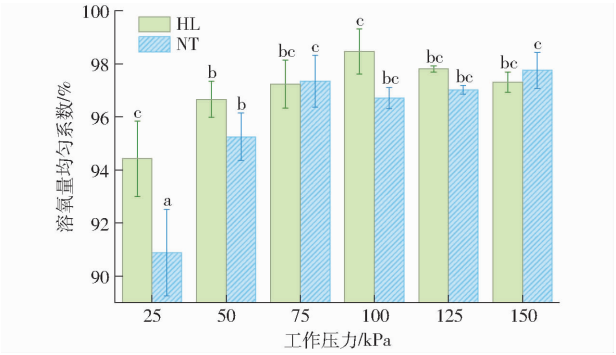

图 7　不同工作压力下溶氧量的分布均匀性

Fig. 7　Distribution uniformity of dissolved oxygen under different working pressures

表 6　不同工作压力对灌水器溶氧量均匀系数的显著性分析

Tab. 6　ANOVA analysis of different working pressure on uniformity of dissolved oxygen in emitter

灌水器类型	F	p
HL	8.351	0.001
NT	23.446	<0.001

NT 的溶氧量均匀系数随压力升高表现为快速增加后趋于稳定。25 kPa 时最低，为 90.89%。在 75 kPa 时已达到较高水平(97.34%)，并在 100 ~ 150 kPa 区间维持稳定(97.10% ~97.34%)。这一变化趋势与 NT 在高压下稳定的出流特性相呼应。统计结果表明，$P \geqslant 75$ kPa 后，溶氧量均匀系数在不同压力间无显著差异。表明，75 kPa 是确保 NT 灌水器获得高溶氧均匀性的临界工作压力。

3　讨论

本研究表明，工作压力和测点距离是影响两类灌水器出流量的主导因素。而 MNBO 对出流量及其均匀性的实际影响总体较小，这与刘燕芳等[24]的研究结果基本一致。不同于雷宏军等[30]在活性剂循环曝气滴灌系统中观察到的滴头流量下降现象，本研究所采用的 MNBO 滴灌方式未显著降低系统出流性能。其原因可能在于，本试验未进行活性剂处理，不足以显著改变连续水相粘性与气泡密度，更有研究表明，微纳米气泡的形成、收缩和消失过程有助于减弱水的氢键网络[31]，加速水分子的流动性，且微气泡在有压管道中的实际体积较小，对水流断面的扰动有限。因此，在本试验条件下，MNBO 对滴灌系统水流传输性能的影响可以忽略。

研究表明工作压力和测点距离是影响 MNBO 滴灌系统 DO 传输的主导因素，其中工作压力的作用更为突出。两类滴灌带在试验条件下均表现出 DO 随测点距离增加而衰减、随工作压力升高先升高后平稳的规律。且 25 kPa 为低压边界试验工况，不作为工程推荐运行压力。说明输配过程中 DO 损失普遍存在，而提高工作压力能够有效增强系统的溶氧维持能力。该结果与饶晓娟等[23]50 m 毛管增氧滴灌系统中观察到的 DO 沿程衰减规律一致。与刘燕芳等[24]在 20 m 增氧灌溉试验中滴灌管中部和末端溶氧量略高于首部的结果相比，本研究在 90 m 长距离输配条件下表现出明显的沿程衰减特征。说明 DO 沿程变化规律与输送距离密切相关，在较短管长条件下，微纳米气泡持续溶解对局部 DO 具有补偿作用，而当管长增大后，气泡逸散、聚并及 DO 损失的累积效应逐渐占主导。

从机理上看，较高工作压力可提高管内静压水平，压缩气泡体积，抑制浮升、聚并和逸散，使微纳米气泡保持较小粒径和较高分散度，从而维持较大的气液传质界面，减缓溶氧量沿程衰减[30]。但当压力升至 125 ~ 150 kPa 后，溶氧量提升幅度趋于平缓，表明系统存在“压力增益递减”特征。这与 Pang 等[21]的研究结果一致，说明过高压力并不能持续等比例提高系统溶氧水平。其可能原因在于，过强剪切可能诱发气泡过度破碎、再聚并或局部迁移，从而削弱 DO 分布改善效果。因此，工程上应强调适宜压力区间，而非单纯追求高压运行。此外，两类灌水器在 DO 传输中的响应差异表明，滴灌带类型不仅影响流量调节机制，还决定了增氧水在长距离输配中的稳定性边界。压力补偿式滴灌带在达到补偿压力后可提供更稳定的水力边界条件[32-33]；相比之下，非压力补偿式滴灌带对压力变化更敏感，更依赖合理的工作压力。

4　结论

(1)加氧处理对系统水力性能的扰动有限。不同工况下，HL 加氧与不加氧出流量误差均小于 0.1 L/h，出流均匀系数差值在 0.10% ~0.74% 之间；工作压力 75 kPa 以上时，NT 加氧与不加氧出流量误差均小于 0.12 L/h，出流均匀系数差值在 0.04% ~1.02% 之间。与不加氧相比，加氧条件下 HL 灌水器出流量的效应量 $\eta^2 < 0.01$(极小效应)，NT 为 $\eta^2 < 0.06$(小效应)；表明在本试验供氧条件下，微纳米增氧未实质性改变系统原有水力特征。

(2)工作压力是影响 DO 输配的主要因素。对出流量而言，工作压力对 HL 与 NT 的偏效应量分别约为 0.919 与 0.772。对 DO 传输而言，两类滴灌带均表现为溶氧量随测点距离增加而下降、随工作压

力先升高后趋于稳定的趋势,表明在一定范围内提高压力能够有效缓解沿程溶氧量衰减。HL 和 NT 分别在工作压力大于等于 100 kPa 和 75 kPa 时系统进入相对稳定的 DO 传输区间。

(3)不同灌水器类型对应的适宜运行压力区间存在明显差异。HL 在 100 kPa 时溶氧量均匀性最佳(98.46%),继续升压后改善并不显著($p > 0.05$);NT 在 75 kPa 以上时可同时实现溶氧量均匀系数大于 97%。从水量、溶氧均匀性协同保障以及工程应用的角度看,HL 工作压力宜 100 kPa 以上,NT 工作压力不应小于 75 kPa。合理匹配灌水器类型与运行压力,是实现微纳米增氧滴灌系统稳定输水输氧和提升工程应用效果的关键,对长距离增氧滴灌系统的参数优化与运行调控具有参考价值。

参 考 文 献

[1] Ouyang Z, Tian J, Yan X, et al. Micro-nano oxygenated irrigation improves the yield and quality of greenhouse cucumbers under-film drip irrigation[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 19453.

[2] 王贺, 牛文全, 延廷霖, 等. 加气滴灌和生物炭对盐碱土理化性质和棉花产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2025, 43(5): 138 – 147.
Wang He, Niu Wenquan, Yan Tinglin, et al. Effects of aerated drip irrigation and biochar on physical and chemical properties of saline-alkali soil and cotton yield[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2025, 43(5): 138 – 147. (in Chinese)

[3] Baram S, Weinstein M, Evans J, et al. Drip irrigation with nanobubble oxygenated treated wastewater improves soil aeration [J]. Scientia Horticulturae, 2022, 291: 110550.

[4] 于珍珍, 汪春, 王宏轩, 等. 增氧灌溉技术应用现状与展望[J]. 农机化研究, 2025, 47(8): 292 – 300.
Yu Zhenzhen, Wang Chun, Wang Hongxuan, et al. Tillage depth control of high horsepower tractors based on position-force-sliding of main-secondary-least grading[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(8): 292 – 300. (in Chinese)

[5] Gil P, Ferreyra R, Barrera C, et al. Improving soil oxygenation with hydrogen peroxide injection into heavy clay loam soil: effect on plant water status, CO_2 assimilation and biomass of avocado trees[C]//6th International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops, 2009: 557 – 564.

[6] Zhou Q, Bai Y, Chai Z, et al. Effect of aerated irrigation on soil microenvironment and cotton growth promotion[J]. Engenharia Agricola, 2023, 43(2): e20230002.

[7] Du Y, Niu W, Gu X, et al. Crop yield and water use efficiency under aerated irrigation: a meta-analysis[J]. Agricultural Water Management, 2018, 210: 158 – 164.

[8] 黄俊, 贾琦, 李志杰, 等. 微纳米气泡灌溉对设施番茄种植的影响机制研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2025, 58(5): 531 – 540.
Huang Jun, Jia Qi, LI Zhijie, et al. Effect of micro/nano bubble irrigation on greenhouse tomato cultivation[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2025, 58(5): 531 – 540. (in Chinese)

[9] Wei C, Zhu Y, Zhang J, et al. Evaluation of cuitable mixture of water and air for processing tomato in drip irrigation in Xinjiang oasis[J]. Sustainability, 2021, 13(14): 7845.

[10] Liang Y, Wu M, Zhang J, et al. Synergy between aerated drip and biodegradable film enhances sustainable maize production in arid oasis[J]. European Journal of Agronomy, 2025, 165: 127535.

[11] Zhang Y, Yao B, Niu P, et al. Optimizing growth and yield in mulched cotton through aerated subsurface drip irrigation in southern Xinjiang[J]. Agriculture, 2025, 15(2): 135.

[12] Pendergast L, Bhattarai S, Midmore D. Evaluation of aerated subsurface drip irrigation on yield, dry weight partitioning and water use efficiency of a broad-acre chickpea (*Cicer arietinum*, L.) in a vertosol[J]. Agricultural Water Management, 2019, 217: 38 – 46.

[13] 王德哲, 孙超祥, 李慧琴, 等. 加气灌溉设备设计与性能试验[J]. 农机化研究, 2025, 47(8): 214 – 219, 224.
Wang Dezhe, Sun Chaoxiang, Li Huiqin, et al. Design and performance test of aerated irrigation equipment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(8): 214 – 219, 224. (in Chinese)

[14] Wang T, Wang Z, Zhang J Z, et al. Application effect of different oxygenation methods with mulched drip irrigation system in Xinjiang[J]. Agricultural Water Management, 2023, 275: 108024.

[15] 王剑, 刘正亮, 王夺, 等. 加气滴灌旋流式微纳米气泡发生器运行工况优化[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 357 – 369, 401.
Wang Jian, Liu Zhengliang, Wang Duo, et al. Working condition optimization of swirling micro and nano bubble generator for aerated drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 357 – 369, 401. (in Chinese)

[16] Wang Y, Liu N, Zhang J, et al. Effects of aeration on hydraulic and anti-clogging performance of subsurface drip irrigation emitters[J]. Irrigation Science, 2025, 43(6): 1237 – 1253.

[17] 孙昊, 莫彦, 李光永, 等. 地下滴灌加气技术研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(10): 34 – 40.
Sun Hao, Mo Yan, Li Guangyong, et al. Development in aerated subsurface drip irrigation: a review[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(10): 34 – 40. (in Chinese)

[18] Wang J, Cui Y, Wu K, et al. Micro/nanobubble-aerated drip irrigation affects saline soil microenvironments and tomato growth by altering bacterial communities[J]. Soil and Tillage Research, 2024, 239: 106034.

[19] Wang H, Wang J, Li G, et al. Performance test of venturi aerators for subsurface drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2022, 148(3): 06022001.

[20] Essah S, Holm D. Air injection of subsurface drip irrigation water improves tuber yield and quality of russet potato[J]. American Journal of Potato Research, 2020, 97(4): 432 - 438.

[21] Pang J, Gao F, Hamani A, et al. Changes in dissolved oxygen concentration in an aerated drip irrigation system under different drip emitters[J]. Irrigation Science, 2023, 41(6): 749 - 759.

[22] 雷宏军, 刘欢, Bhattarai S, 等. 气源及活性剂对曝气滴灌带水气单双向传输均匀性的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 88 - 94.
Lei Hongjun, Liu Huan, Bhattarai S, et al. Impacts of gas source and surfactant on gas-water coupling transmission along a long-distance drip tape in one or two line layout under aerated drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(19): 88 - 94. (in Chinese)

[23] 饶晓娟, 王治国, 付彦博, 等. 不同氧浓度下灌溉系统中溶解氧变化规律[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(11): 981 - 986.
Rao Xiaojuan, Wang Zhiguo, Fu Yanbo, et al. Variation of dissolved oxygen concentration in drip irrigation system at different oxygation concentrations[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(11): 981 - 986. (in Chinese)

[24] 刘燕芳, 王国萃, 王传涛, 等. 微纳米曝气滴灌系统中气泡传输特性及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(17): 88 - 96.
Liu Yanfang, Wang Guocui, Wang Chuantao, et al. Bubble transport characteristics and their influencing factors in micronano aeration drip irrigation system[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(17): 88 - 96. (in Chinese)

[25] 李浩. 加气滴灌管网水肥气分布特征及灌水器堵塞规律研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020: 39 - 62.
Li Hao. Study on the water, fertilization and aeration distribution characteristics of aerated drip irrigation, and the clogging of emitters[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020: 39 - 62. (in Chinese)

[26] Muhammad T, Zhou B, Liu Z, et al. Effects of phosphorus fertigation on emitter clogging in drip irrigation system with saline water[J]. Agricultural Water Management, 2021, 243: 106392.

[27] 陈信强, 樊家畅, 吴华锋, 等. 融合可逆实例归一化及 Informer 编解码的船速预测[J]. 上海海事大学学报, 2025, 46(4): 1 - 9.
Chen Xinqiang, Fan Jiachang, Wu Huafeng, et al. Ship speed prediction integrating reversible instance normalization and Informer encoding and decoding[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2025, 46(4): 1 - 9. (in Chinese)

[28] 王楚彪, 熊涛, 张磊, 等. 桉树无性系生长性状基因型与环境互作效应及优良无性系选择[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(5): 951 - 960.
Wang Chubiao, Xiong Tao, Zhang Lei, et al. Genotype × environment interaction on growth traits of Eucalyptus clones and selection of elite clones[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2023, 40(5): 951 - 960. (in Chinese)

[29] Lakens D. Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: a practical primer for *t*-tests and ANOVAs [J]. Frontiers in Psychology, 2013, 4: 863.

[30] 雷宏军, 臧明, 张振华, 等. 循环曝气压力与活性剂浓度对滴灌带水气传输的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 63 - 69.
Lei Hongjun, Zang Ming, Zhang Zhenhua, et al. Impact of working pressure and surfactant concentration on air-water transmission in drip irrigation tape under cyclic aeration[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(22): 63 - 69. (in Chinese)

[31] Tsuge H. Micro and nanobubbles: fundamentals and applications[M]. New York: CRC Press, 2014.

[32] 喻黎明, 余家锐, 李娜, 等. 压力补偿式灌水器补偿腔结构参数对颗粒运动的影响[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 338 - 349.
Yu Liming, Yu Jiarui, Li Na, et al. Effect of pressure-compensated irrigator compensation chamber structure parameters on particle movement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 338 - 349. (in Chinese)

[33] 张桂林, 喻黎明, 李莎莎, 等. 压力补偿式灌水器水力性能及抗堵塞性能试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(6): 124 - 131.
Zhang Guilin, Yu Liming, Li Shasha, et al. Study on hydraulic performance and anti-clogging performance of pressure compensating emitters[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(6): 124 - 131. (in Chinese)