doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.033

加气滴灌旋流式微纳米气泡发生器运行工况优化

王　剑　刘正亮　王　夺　陈　瑞　王秀礼
(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 加气滴灌能有效提高水肥利用效率和作物产量,在加气系统中形成大量均匀的微纳米气泡,并提高灌溉水中溶解氧浓度,是加气滴灌长距离水气均匀传输的关键。基于旋流剪切破碎原理设计了一种微纳米气泡发生器并优化其工作参数。通过单因素试验分析、高速摄影技术和溶氧检测试验,研究了系统运行压力和进气量对气泡特征(直径、数量和均匀度)和溶氧量的影响,最终结合响应面优化试验,确定装置最优加气效果下的运行压力与进气量组合,结果表明:压力控制在 300 ~ 400 kPa 内,生成的气泡和溶氧效果相较其他压力工况下更好。在进气量 1% ~5% 内,采用 1% 进气量时小气泡的直径分布最佳、平均直径最小,而 5% 进气量下装置生成气泡速率更快。5% 以上的大进气量会使装备停止运行后 60 μm 以下的小气泡数量偏少,并显著增大微气泡的平均直径,缩短气泡持续时间。同时,溶氧试验表明,增加进气量能显著提高溶氧效率以及最终氧含量。通过响应优化求解,得出装置以压力 350 kPa 和进气量 2% 的工况运行,能够以最低能耗达到最优加气效果。此工况下,装置最终生成小气泡直径 d_{32} 为 68.6 μm,增氧速率约 0.81 mg/(L·min),溶氧稳定后溶氧量变化量为 1.08 mg/L,气泡维持时间可达 323 s。

关键词: 地下滴灌; 微纳米气泡; 溶解氧; 工况优化
中图分类号: S275.6　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)02-0357-13　　**OSID**:

Working Condition Optimization of Swirling Micro and Nano Bubble Generator for Aerated Drip Irrigation

WANG Jian　LIU Zhengliang　WANG Duo　CHEN Rui　WANG Xiuli
(*Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: Aerated drip irrigation can effectively improve crop production efficiency and crop yield. The formation of a large number of uniform smaller micro-bubbles in the aerated system and the improvement of dissolved oxygen concentration in irrigation water are the key to the long distance uniform water and air transport of aerated drip irrigation. The working conditions of a micro- and nano-bubble generator designed was optimized based on the principle of cyclonic shear fragmentation. Through one-way test analysis, high-speed photography and dissolved oxygen meter, the influence of system operating pressure and air inlet on bubble characteristics (count, diameter and uniformity) and dissolved oxygen was studied. Finally, combined with the response surface RSM optimization test, the combination of operating pressure and air inlet under the optimal aerating effect of the device was determined. The results showed that the generation of bubbles and dissolved oxygen effect were better when the pressure was controlled within 300 ~ 400 kPa. In the range of 1% ~ 5% of air inlet, the best diameter distribution and the smallest average diameter were obtained with 1% of air inlet, while the rate of bubble generation was higher with 5% of air inlet. Meanwhile, the dissolved oxygen test showed that increasing the air intake significantly increased the dissolved oxygen efficiency as well as the final oxygen content. Through the response optimization solution, it was concluded that the plant could operate at a pressure of 350 kPa and an air intake of 2% with the lowest energy consumption. Under this condition, the final diameter of the small bubbles generated by the device was 68.6 μm, the rate of oxygen enhancement was about 0.81 mg/(L·min), the net increase in dissolved oxygen after stabilization was 1.08 mg/L, and the bubble dissipation time was up to 323 s.

Key words: subsurface drip irrigation; micro-nano bubbles; dissolved oxygen; working condition optimization

收稿日期: 2024-09-28　修回日期: 2024-10-29
基金项目: 江苏省农业科技自主创新项目(CX(21)3078)和国家自然科学基金项目(51709130)
作者简介: 王剑(1986—),男,副研究员,博士,主要从事节水灌溉新技术研究,E-mail: wangjiannsw@163.com

0 引言

加气地下滴灌技术将空气或氧气加入作物根区,可以较好地缓解灌水后土壤孔隙中含氧量降低现象,增强土壤呼吸和根系活力[1-2]。土壤通透性和含氧量的提升可有效改善土壤微生物群落结构和土壤酶活性,进而增强对土壤腐殖质或有机质的分解能力,提高作物对养分的吸收能力和水肥利用效率,降低化肥尤其是氮肥施用量[3-4]。

滴灌系统中常用的加气方式为利用空气压缩机和文丘里喷射器将气体注入灌溉管道中,但空气在水中的溶解度极低。文献[5-7]表明此种传统加气方式产生较大的气泡,气体在滴灌带传输中发生融合并过早逸出,造成水气传输的不均匀性。文献[8]使用压差文丘里管的曝气水进行滴灌时也发现,随着滴灌带长度的增加,曝气水中的溶氧量会逐渐降低。

微纳米气泡是气体在水中的理想载体,利于气体浓度的快速提升和在滴灌管道中的长距离稳定传输[9],非常适合加气滴灌系统中的水气均匀输送。但是,目前大多数微纳米气泡发生装置结构复杂,价格昂贵,多用于污水处理及河道湖泊污染治理等领域[10],尚难以在农业生产中大规模使用。因此,研究高效的微纳米加气装备,将空气以微气泡和溶解氧的形式输送到作物根区对加气滴灌的发展有着重要意义。

根据气泡生成方法,可将其分为溶气释气法、电解法、光催化法和分散空气法等[11-12]。其中,分散空气法借助高速旋流所产生的剪切效果,能快速生成大量高浓度、高均匀度的微气泡[13],且装置具有溶氧效率高、体积小等优点[14],能很好地应用于加气滴灌中。文献[15]利用该原理设计了一种旋流式气泡发生器,并研究了其结构参数对气泡特性的影响,但运行压力和进气量等工作参数对气泡的影响尚不明确。

因此,本文针对该旋流式气泡发生装置的运行工况展开试验设计,改变试验系统的运行压力和进气量,采用高速摄影技术和溶氧检测试验观测不同工况下生成的气泡特征和溶氧效果,通过单因素试验分析,分别评价系统运行压力与进气量对装置加气效果的影响。最终结合响应面优化试验,以低能耗为目标,确定装置最优加气效果下的运行压力与进气量组合,以期为加气滴灌提供更多技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

1.1.1 装置结构

图 1 为旋流式气泡发生器的三维图与内部结构,其内腔是与进口流道相切的椭球体,气液混合经加压进入内部空腔后,从内壁表面向两侧发生高速旋动,旋流过程中会产生离心力,将气液混合流分离,并且会在中轴处产生气体负压轴。最后,在装置两侧设置的喷孔处,通过内外液体间的速度差形成的旋流剪切作用,将处于负压轴中的气体破碎形成微小气泡并向外喷出[16]。如图 1b 所示,装置主要结构参数为内腔长轴长度 L_1、短轴长度 L_2、进口直径 d_1和喷孔直径 d_2。本研究试验时,装置结构参数分别为:长轴长度 80 mm、短轴长度 45 mm、进口直径 12 mm 和喷孔直径 3 mm。

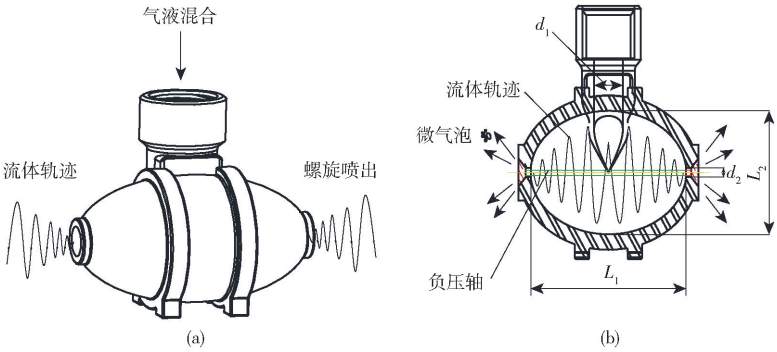


图 1 旋流式气泡发生装置外部模型与内部剖视图

Fig. 1 External model and internal sectional view of swirl flow bubble generator

1.1.2 试验系统与方法

试验回路系统及其组成如图 2 所示。其中,水箱既能提供水源,也是产生和观测气泡的区域,回水管与进水管与水箱相连使整个系统形成闭合回路。系统运行时,通过调节阀门来控制系统的回水量和压力,利用旋涡泵具备的自吸能力,在水泵进水口前加装文丘里管,通过针形阀和气体流量计来控制进气量。气体进入管路系统后经水泵初步破碎形成气液混合流,加压输送到试验装置中。气泡发生器浸没在水箱中,系统运行后不断产生气

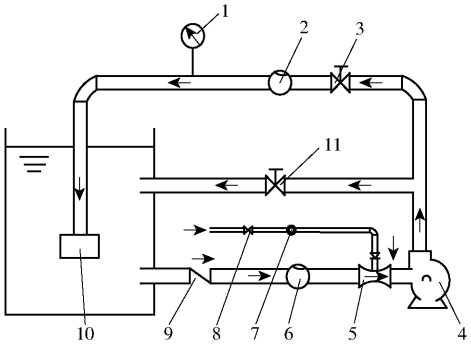


图 2　试验回路系统简图

Fig. 2　Test circuit system diagram

1. 压力表　2、6. 流量计　3、11. 阀门　4. 泵　5. 文丘里管　7. 气体流量计　8. 针形阀　9. 逆止阀　10. 气泡发生器

泡，浓度随着时间的推移不断升高，直到饱和。整套管路系统可支撑 600 kPa 的最大压力和2 m^3/h 的最大流量。

针对运行压力优化试验，固定系统进气量为进水量的 1%，设计运行压力 100 ~ 500 kPa，各水平压力差为 50 kPa，共 9 个试验处理。针对进气量优化的试验，固定系统压力为 300 kPa，设计进气量为水流量的 0.5% ~ 10%，共设 9 个试验处理。分别观测并统计不同工况下生成的气泡直径、数量、均匀度、溶解氧质量浓度的变化以及气泡消散时间 t（水溶液由乳浊态变为透明态所需的静置时间）作为加气效果的评价指标，进行变压力和变进气量工况的单因素试验及响应面交互组合试验，确定适宜装置运行的工作条件。

1.2　数据采集

1.2.1　气泡图像采集与特征提取

图 3a 为观测气泡的试验布置图，试验温度 10℃，水箱装水量 40 L。气泡特征会随时间不断改变，大多数直径较大（大于 50 μm）的气泡在水中的滞留时间不多于 200 s[17]，因此将试验总时长定为 5 min，其中前 2 min 为装置加气总时长，后 3 min 为加气停止后的观测时长。采集装置运行 90 s（记为 90R）时和加气停止后 60 s（记为 120R60S，120R 表示装置运行总时长）时的气泡图像。运行试验回路装置，将运行压力与进气量调至预设值，通过高速摄影仪和 Image J 软件捕捉并提取气泡特征[18]。为防止气泡数量过多造成拍摄区内大量堆叠，将水箱定制为带有特定观测区的 L 型透明亚克力水箱，观测区域尺寸为 30 cm × 30 cm，并在水箱后设置高均匀度的平行面光源以提供足够亮度。



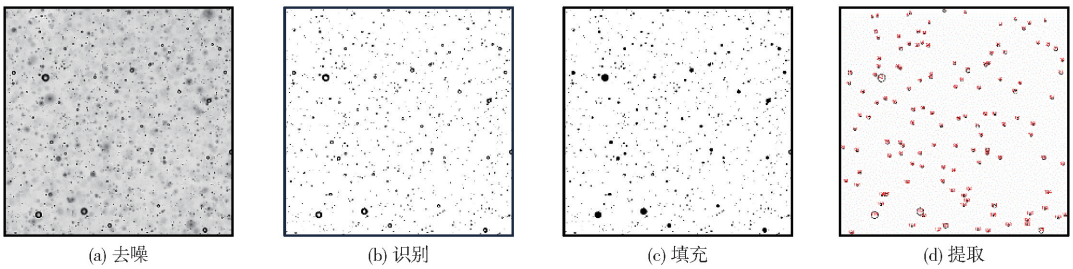
(a) 微气泡观测试验　　(b) 溶氧变化观测试验

图 3　装置水力试验布置图

Fig. 3　Installation of hydraulic test layout

摄像部分采用 i - SPEED 3 型高速摄影仪，拍摄时长为 1 s，使用 Tokina MACRO 型镜头（下文简称 T 镜头）观测大气泡，视野范围 1 cm × 1 cm，可观测直径 60 ~ 500 μm的微气泡。使用 Navitar 7X 型镜头（下文简称 N 镜头）观测小气泡，视野范围 2.5 mm × 2.5 mm，可观测直径 10 ~ 120 μm 的微气泡。从每段录像中分散选取 10 幅图像进行后处理，提取气泡特征。

使用 Image J 软件对气泡进行检测和处理，图 4 为 T 镜头观测下的气泡处理流程。图 4a 步骤为去噪：将原图像转为 8 bit 灰度图，消除背景噪声；图 4b 步骤为识别：利用背景与气泡边缘的灰度差异进行气泡识别[19]，设置合适的阈值突显气泡轮廓；图 4c 步骤为填充：填充边界封闭的气泡空白区域为



(a) 去噪　(b) 识别　(c) 填充　(d) 提取

图 4　拍摄图像处理与气泡信息提取流程

Fig. 4　Process program that took pictures and extracted bubble information

黑色,便于直径检测;图 4d 步骤为提取:根据像素面积的等效性,提取像素范围 9 ~ 500,圆度范围 0.85 ~ 1.00 的气泡颗粒,统计所有符合条件的气泡并测量直径,引入索特尔平均直径 d_{32}[20] 和克里斯琴森均匀系数 C_U。

1.2.2 溶解氧测定

测定溶氧量时,在图 2 所示的试验回路系统中,采用方形水箱,注水量 20 L,同样按上述方法运行装置,调节试验回路至预设压力和进气量,使用 Fibox 4 型溶氧仪实时监测水中溶解氧浓度。试验时水温手动输入,将光纤探头置于水体中部来确保结果的精确性,每隔 10 s 记录一次并保存,在每次试验前更换水源,使水中溶解氧浓度初始值保持稳定。试验水温 10℃,时长 7 min,前 2 min 为装置运行时间,后 5 min 为加气停止后的静置时间,在改变工作压力和进气量后,记录这段时间溶解氧浓度的变化情况。测试装置溶氧变化的试验布置,如图 3b 所示。

2 结果与讨论

2.1 装置运行压力优化

2.1.1 压力对气泡生成影响

不同运行压力工况下,90R 和 120R60S 时水箱中水气混合效果如图 5 所示,运行压力越大,装置的水气混合效果越好,且在压力小于 300 kPa 时,效果提升更明显。

表 1 为不同工作压力下装置运行流量与气泡的

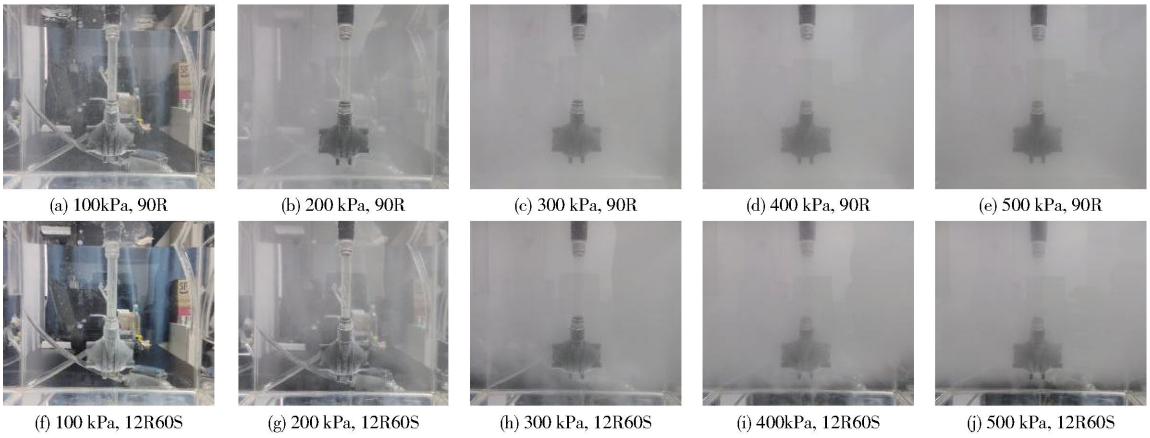


图 5 不同压力下装置运行的水气混合效果

Fig. 5 Water-air mixing effects of device operation at different pressures

表 1 不同工作压力下装置运行流量与气泡消散时间

Tab. 1 Device operating flow rate and bubble dissipation time for different pressures

压力/kPa	装置流量 Q/(L·min^{-1})	气泡消散时间 t/s
100	5.4	(81.0 ± 9.8)^{e}
150	7.5	(124.7 ± 9.1)^{d}
200	8.4	(165.0 ± 6.2)^{c}
250	9.7	(61.3 ± 6.7)^{b}
300	10.5	(317.3 ± 12.3)^{a}
350	11.4	(328.0 ± 6.1)^{a}
400	12.1	(333.7 ± 13.3)^{a}
450	12.7	(332.7 ± 9.5)^{a}
500	13.4	(332.7 ± 8.7)^{a}

注:同列数据不同字母表示差异显著(P < 0.05),下同。

消散时间,可以看出,装置流量随工作压力的增大而增加,但其增量逐渐递减。气泡的消散时间 t 随运行压力增大而先增大后不变。结合方差分析可知,气泡消散时间 t 受装置运行压力影响极显著(P < 0.01),对不同压力下气泡消散时间的差异性分析表明,压力小于 300 kPa 时影响显著,大于 300 kPa 时压力对气泡消散时间无显著影响,说明装置运行压力过小,导致气泡破碎不足,生成气泡直径偏大,从而使气泡的持续时间较短[21]。

通过高速摄影拍摄不同压力下,90R 和 120R60S 时的气泡预处理图,如图 6、7 所示。压力 100 kPa 时,装置仅生成少量的大气泡,且在停止运行 1 min 时,观测区的气泡已全部消散;压力 200 kPa 时,装置停止后大气泡基本消失,仅剩少量的较小微气泡。因此,旋流式气泡发生装置的最低运行压力应大于 200 kPa,否则无法实现预定的加气效果。此外,随着压力增大,装置运行期间的大气泡数量明显增多,但同时也产生了少量尺寸极大的气泡,增大了气泡平均直径,降低了气泡均匀度。如图 7 所示,观察装置停止后剩余气泡,发现压力由 200 kPa 提升至 300 kPa 时,水中微气泡数量提升程度最大。

不同压力下气泡数量与直径分布的结果如图 8 所示:装置运行期间(图 8a、8b),压力 300 kPa 下的 60 ~ 150 μm 大气泡数量提升最多,较压力 200 kPa 大气泡数量提高约 2 倍,而压力 400 kPa 则对 10 ~ 50 μm 小气泡数量提升最大。从频率分布来看,压力 300 kPa 时运行生成的大气泡直径分布情况略优于其他压力,且装置工作压力的变化对运行

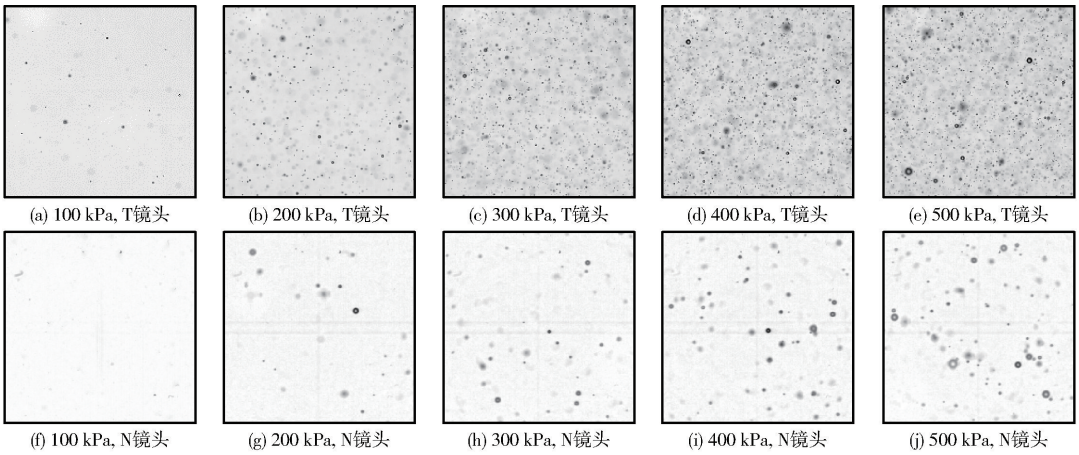


图 6　不同压力下 90R 时拍摄的气泡预处理图

Fig. 6　Bubble preprocess pictures taken at different pressures at 90R

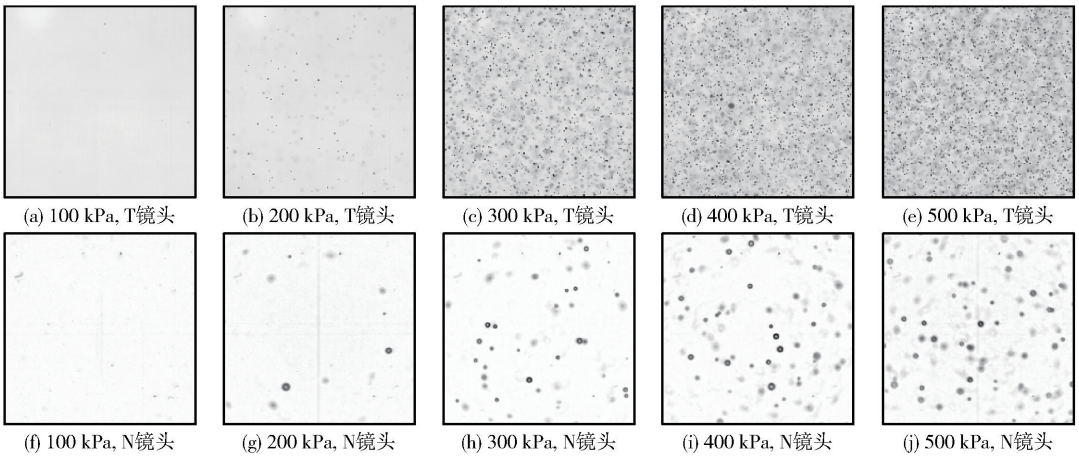


图 7　不同压力下 120R60S 时拍摄的气泡预处理图

Fig. 7　Bubble preprocess pictures taken at different pressures at 120R60S

时生成气泡的直径分布影响不大。

根据图 8c、8d 可得，压力同样在 300 kPa 时，对停止后各直径区间内气泡数量的提升最明显，且小气泡的频率分布更加集中。压力 400 ~ 500 kPa 时，更利于停止后 60 ~ 100 μm 大气泡数量的提升，但在 10 ~ 60 μm 小气泡数量上与 300 kPa 时差别不大。

通过对各压力下装置生成气泡特征的方差分析（表 2），结果表明压力对除装置停止后的均匀度以外的气泡指标均影响显著。进一步观察各气泡指标随运行压力的变化，如图 9 所示（同线不同字母表示差异显著，$P < 0.05$，下同）。运行期间：大气泡数量将在压力增大到 350 kPa 时达到峰值，继续增大压力后气泡数量略微波动，与压力 350 kPa 时无显著差异。小气泡数量随压力的增大呈线性增加趋势，在压力 400 kPa 下小气泡数量约为压力 250 kPa 时的两倍。装置停止后：气泡数量虽同样随压力的增大而增加，但在压力增大到 300 kPa 后，其增速有所下降。此外，由于运行压力在 200 kPa 及以下时，装置停止后观测到的气泡数量极少，每幅拍摄图像中提取到的气泡指标不具有统计学意义，因此，在分析气泡平均直径和均匀度受运行压力变化的影响时，将从压力 250 kPa 开始统计分析。

装置运行期间，气泡直径随压力的增大而呈先减小后增大的趋势，压力 300 kPa 或 350 kPa 时大气泡的平均直径最小，且相较于其他水平差异显著。其中，压力 350 kPa 下的大气泡平均直径，相较于水平中的最大直径减少约 25 μm，小气泡直径则较最差水平减少约 20%。装置停止后，气泡平均直径随运行压力的增大而增大，且小气泡直径的增大趋势更加明显，压力 500 kPa 下小气泡直径，较压力 300 kPa 时增大约 17%。

压力对运行期间大气泡的均匀度影响较大，而对停止后气泡的均匀度影响不显著。装置运行期间，气泡均匀度随压力的增大而呈先增大后减小的趋势，且在压力 350 kPa 或 400 kPa 时均匀度最高，其中大气泡的均匀度约 81%，小气泡的均匀度约 65%。

综合上述不同压力对气泡特征影响的分析，压力小于 300 kPa 时，气泡数量少且最小直径偏大，气泡持续时间短。压力在 300 ~ 400 kPa 时，气泡数量

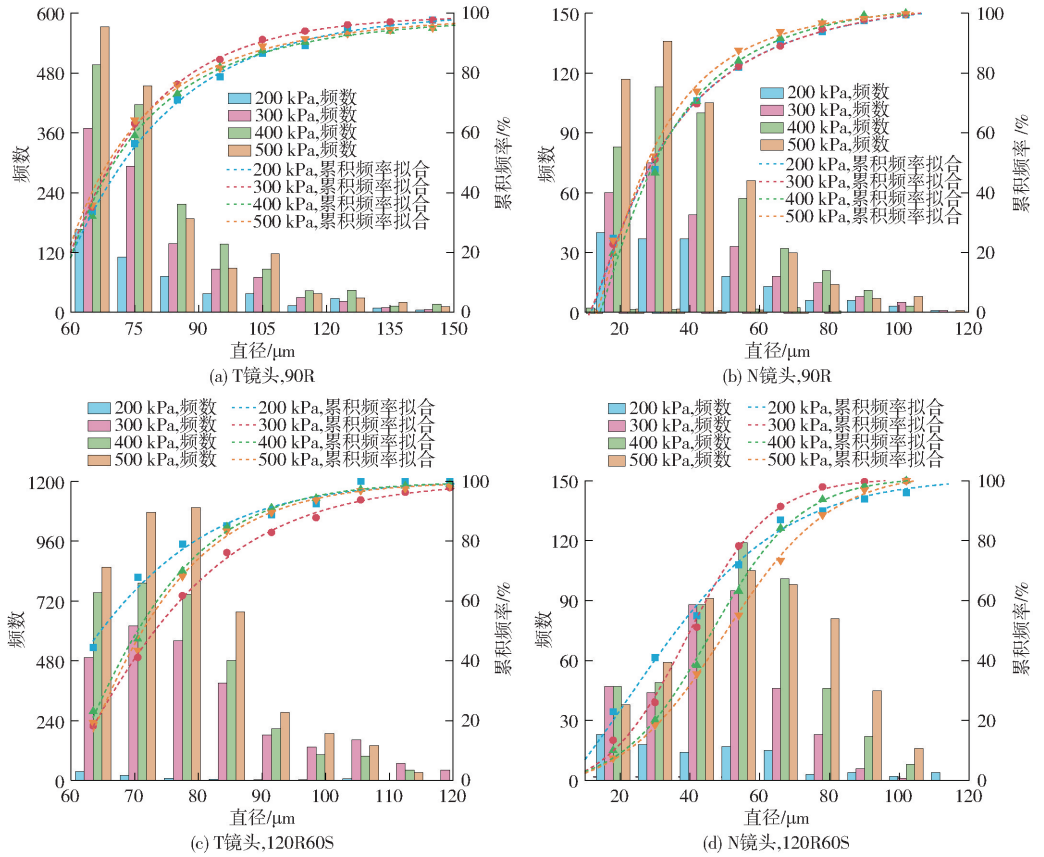


图 8 两镜头观测 90R 和 120R60S 时各运行压力的气泡直径分布

Fig. 8 Bubble diameter distribution for different pressures at 90R and 120R60S observed by two lenses

表 2 各工作压力下装置生成气泡特征的方差分析

Tab. 2 ANOVA of features of bubbles generated by device at each pressure

指标		T 镜头		N 镜头	
		F	*P*	*F*	*P*
90R	数量	349.049	**	78.931	**
	直径 d_{32}	10.078	**	3.469	*
	均匀度 C_U	7.751	**	2.719	*
120R60S	数量	76.028	**	1 934.193	**
	直径 d_{32}	52.060	**	7.190	**
	均匀度 C_U	14.400	**	2.136	0.096

注:当 $P>0.05$ 时,显示 P 值;当 $0.05>P\geqslant0.01$ 时,显示 * 表示影响显著;当 $P<0.01$ 时,显示 ** 表示影响极显著,下同。

显著增多,且直径更小,均匀度更高。压力大于 400 kPa 时,相较于 300 ~ 400 kPa,虽能生成更多的气泡,但会增大气泡的平均直径。因此在气泡生成效果方面,应控制运行压力在 300 ~ 400 kPa,且在此范围内,尽可能地增大压力,达到最佳的气泡破碎效果,增加气泡数量。

2.1.2 压力对溶氧影响

图 10(图 10b 中的溶氧量变化量是以初始溶氧量为基准的变化量)为水温 10℃下,装置以不同压力运行后,水中溶氧量随时间的变化情况。压力 100 kPa 时,运行 2 min 后能增加水中溶解氧含量至饱和溶氧量(11.29 mg/L)[22],且停止运行后的 5 min 内仍能维持水中饱和溶解氧含量稳定。压力提高到 200 kPa 时,装置运行的增氧效果将使水中溶氧量突破饱和水平,形成过饱和状态,运行 2 min 后溶氧量增加约 0.6 mg/L,并在停止后无明显衰减趋势。压力 300 ~ 500 kPa 时,运行时的增氧效果较低压力工况明显改善,且增势随运行时间并未减缓,但均在运行停止后的 1 min 内,出现明显的溶氧衰减,之后溶氧浓度维持稳定。

由图 10b 可看出,压力增到 400 kPa 和 500 kPa 时,装置运行时的增氧效果差异不大,均较水中初始溶氧量提高约 1.8 mg/L,但在停止溶氧后的衰减段,压力 500 kPa 时的溶氧衰减程度较 400 kPa 提高 21.8%。根据停止后溶氧变化稳定的阶段来看,不同运行压力的最终溶氧浓度由高到低的排序为:400、300、500 kPa。这表明过高的运行压力,不仅不利于溶氧含量的进一步提升,反而会加快溶氧的衰减。而运行压力由 300 kPa 提升至 400 kPa 时,最终的溶氧量也仅增加不到 0.15 mg/L,需从经济角度考虑是否要因溶氧浓度的小幅度提升而承担额外增加的能耗。

由表 3 可知,不同压力对装置运行的增氧效果以及溶氧衰减均影响极显著($P<0.01$)。90R 时的

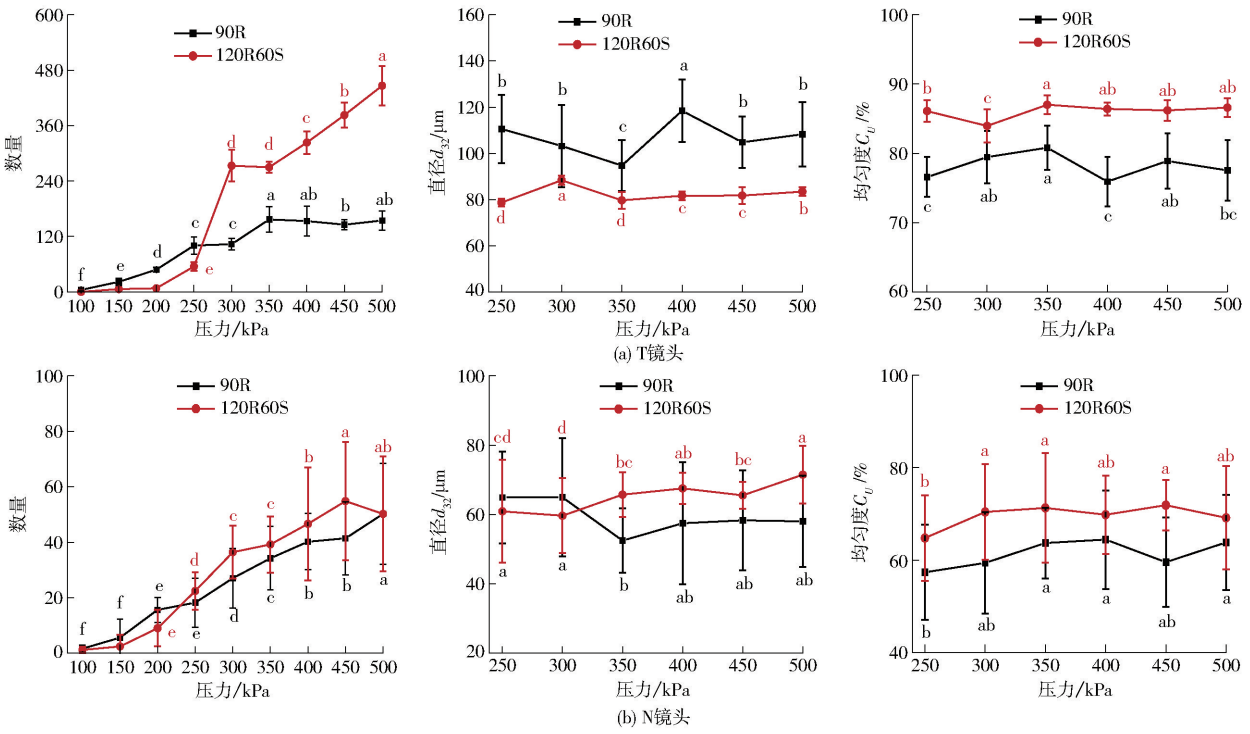


图 9　装置生成的气泡特征随运行压力的变化

Fig. 9　Variations of device generated bubble features with operating pressure

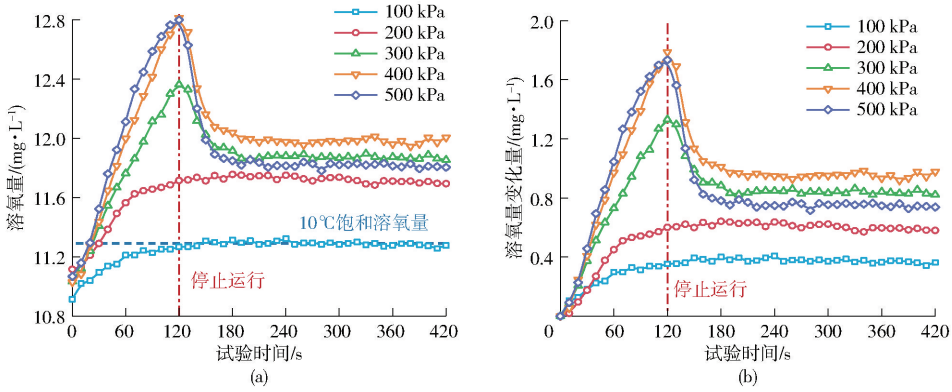


图 10　在不同压力下装置运行的溶氧量及溶氧量变化量曲线

Fig. 10　Dissolved oxygen and its change curves for device at different pressures

增氧效果随压力的增大而增大，且压力 500 kPa 下的增氧量显著优于 300 ~ 350 kPa，但与 400 kPa 无显著差异。由溶氧衰减程度可以看出，停止后短时间的溶氧衰减量仍与运行压力成正比，压力 450 ~ 500 kPa 的衰减量显著高于 350 ~ 400 kPa。进一步比较溶氧稳定时（120R60S）的溶氧量变化量，发现压力 400 kPa 下的最终溶氧效果虽优于其他压力工况，但与 250 ~ 500 kPa 间其余压力下的溶氧效果无显著差异。

经上述分析可知，压力对溶氧效果影响显著，压力在 300 kPa 以下时，增大压力对装置增氧效果提升明显，压力 300 ~ 400 kPa 时，整体溶氧效果较好，并能在停止后的 5 min 内维持过饱和溶解氧浓度稳定，以 400 kPa 为例，运行后水中最终溶氧浓度仍高于饱和溶氧量约 6. 5% 。

2. 2　装置进气量优化

2. 2. 1　进气量对气泡生成的影响

表 4 为不同进气量下装置的运行流量 Q 和气泡消散时间 t 的均值。可以看出，装置运行停止后，水中微气泡消散时间随进气量的增加而显著减少，具体表现为，进气量 0. 5% ~ 3% 时的气泡消散时间显著多于进气量 4% ~ 6% ，又显著多于进气量 8% 和 10% 的观测结果。

图 11 为 90R 和 120R60S 时不同进气量下各直径区间的气泡分布。运行期间（图 11a、11b），进气量的提高对 60 ~ 150 μm 大气泡频率分布影响不明显，3% 进气量下的大气泡直径分布略优于其他水平，在 60 ~ 120 μm 区间内的气泡数量随进气量的提高而明显增多。运行时小气泡直径分布表明，直径 50 μm 以上气泡的数量和累积频率随着进气量的增

表 3 不同压力下装置在 90R、120R 与 120R60S 的溶氧量及溶氧量变化量

Tab. 3 Dissolved oxygen and its change for devices with different operating pressures at 90R, 120R and 120R60S time mg/L

压力/kPa	溶氧量				溶氧量变化量		
	初始值	90R	120R	120R60S	90R	120R60S	|60S|
100	10.91^{b}	11.23^{d}	11.27^{d}	11.31^{d}	0.31^{e}	0.40^{d}	−0.05^{e}
150	10.99^{ab}	11.35^{d}	11.40^{d}	11.55^{c}	0.37^{e}	0.56^{cd}	−0.15^{e}
200	11.11^{ab}	11.66^{c}	11.72^{c}	11.76^{c}	0.54^{e}	0.64^{bcd}	−0.04^{e}
250	10.95^{b}	11.73^{c}	11.95^{c}	11.75^{c}	0.78^{d}	0.80^{abc}	0.19^{d}
300	11.03^{ab}	12.12^{b}	12.36^{b}	11.92^{ab}	1.08^{c}	0.88^{ab}	0.45^{c}
350	11.16^{a}	12.34^{ab}	12.64^{a}	11.91^{ab}	1.18^{bc}	0.75^{abc}	0.73^{b}
400	11.03^{ab}	12.42^{a}	12.82^{a}	12.04^{a}	1.39^{ab}	1.01^{a}	0.78^{b}
450	11.03^{ab}	12.45^{a}	12.85^{a}	11.89^{ab}	1.42^{a}	0.86^{ab}	0.96^{a}
500	11.07^{ab}	12.59^{a}	12.80^{a}	11.85^{ab}	1.52^{a}	0.78^{abc}	0.95^{a}

注：120R 为装置运行 120 s，溶氧量指标均为 3 次试验的平均值；溶氧量变化量中 90R 和 120R60S 的结果是以初始溶氧量为基准的变化量；|60S| 的结果是以 120R 时的溶氧量为基准，120R60S 时的溶氧量减少量，负值表示溶氧量增加量，下同。

表 4 不同进气量下装置运行流量与气泡消散时间

Tab. 4 Device flow rate and bubble dissipation time for different air intakes

进气量/%	装置流量 Q/(L·min^{-1})	气泡消散时间 t/s
0.5	10.5	(315.0 ± 20.5)^{a}
1	10.5	(317.3 ± 12.3)^{a}
2	10.5	(322.3 ± 7.1)^{a}
3	10.5	(313.3 ± 5.9)^{a}
4	10.5	(288.3 ± 9.0)^{b}
5	10.5	(278.0 ± 2.6)^{b}
6	10.5	(283.0 ± 2.6)^{b}
8	10.5	(248.7 ± 2.9)^{c}
10	10.5	(217.0 ± 8.9)^{d}

加而提高。

装置停止后(图 11c、11d)，3% 进气量下的大气泡直径分布明显优于其他水平，60% 以上的大气泡集中在直径 80 μm 以下，增加进气量主要使 75 ~ 100 μm 区间的大气泡数量显著提升。对于小气泡而言，进气量过高反而使停止后 10 ~ 60 μm 内的微气泡数量有所减少，气泡累积频率表明，此时 1% 进气量更利于装置生成直径更小的微气泡。同时，由于气泡完全消散时间与停止后水中小气泡直径和数量关系密切，对小气泡的直径分布统计也解释了过高的进气量反而会缩短水中微气泡的消散时间。

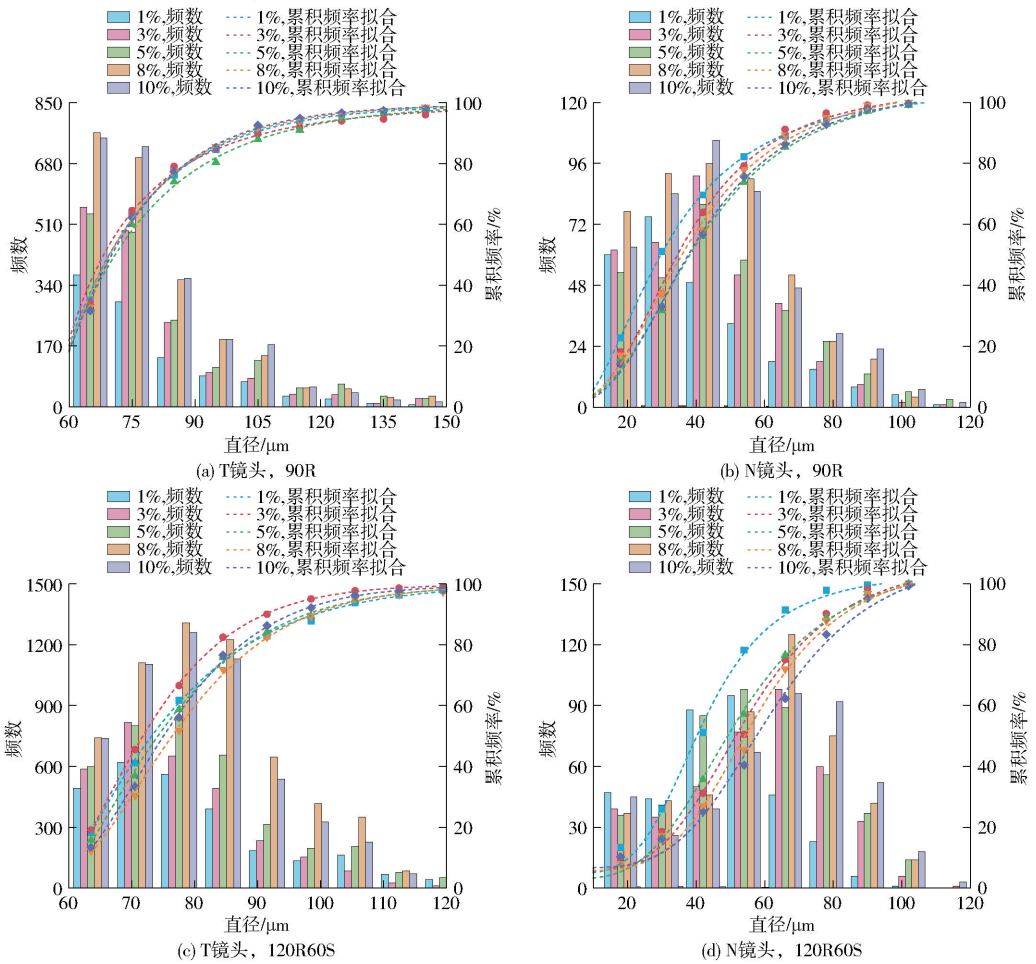


图 11 两镜头观测 90R 和 120R60S 时不同进气量的气泡直径分布

Fig. 11 Bubble diameter distribution for different air intake at 90R and 120R60S observed by two lenses

表 5 为不同进气量下装置生成的气泡特征的方差分析。结果表明装置运行时，进气量仅对微气泡的数量影响显著，而在停止期间，进气量对气泡数量、直径和均匀度均影响显著。这说明进气量的增加使装置运行时，对各直径区间气泡数量的提升较为均匀，且在运行阶段不会出现大量的气泡融合或破碎不均匀的现象，避免生成尺寸异常的大气泡，影响整体气泡直径和均匀度。

表 5　不同进气量下装置生成气泡特征的方差分析

Tab. 5　ANOVA of features of bubbles generated by device at each air intake

指标		T 镜头		N 镜头	
		F	*P*	*F*	*P*
运行 90R	数量	92. 301	**	6. 005	**
	直径 d_{32}	1. 421	0. 221	1. 774	0. 115
	均匀度 C_U	1. 592	0. 162	1. 710	0. 130
停止 120R60S	数量	732. 907	**	6. 399	**
	直径 d_{32}	19. 971	**	12. 683	**
	均匀度 C_U	9. 756	**	4. 635	**

分析气泡特征随进气量的变化趋势（图 12），可以看出各时刻微气泡的数量（图 12a、12b）随进气量的增加均显著提升，并在进气量 8% 时达到峰值。此进气量下，大气泡的数量较进气量 1% 时提升 125%，停止后小气泡的数量较进气量 1% 时提升 30%。在平均直径上（图 12c、12d），大进气量（5% 及以上）使停止后微气泡平均直径显著大于进气量 1% ~3% 时的气泡直径，且对小气泡直径的影响更加明显。同样以进气量 8% 为例，其停止后大气泡平均直径较进气量 3% 仅增大约 6. 6 μm，而小气泡直径较进气量 1% 增大 20% 以上。对于均匀度而言（图 12e、12f），进气量在 1% ~10% 变化，对停止后水中气泡均匀度影响的差异基本不显著，其大气泡均匀度位于 85% ~87% 之间，小气泡均匀度均在 67% ~71% 之间。气泡均匀度受进气量影响显著的原因是个别直径水平的气泡均匀度偏低，如进气量 0. 5% 对应小气泡的均匀度显著低于其他水平。

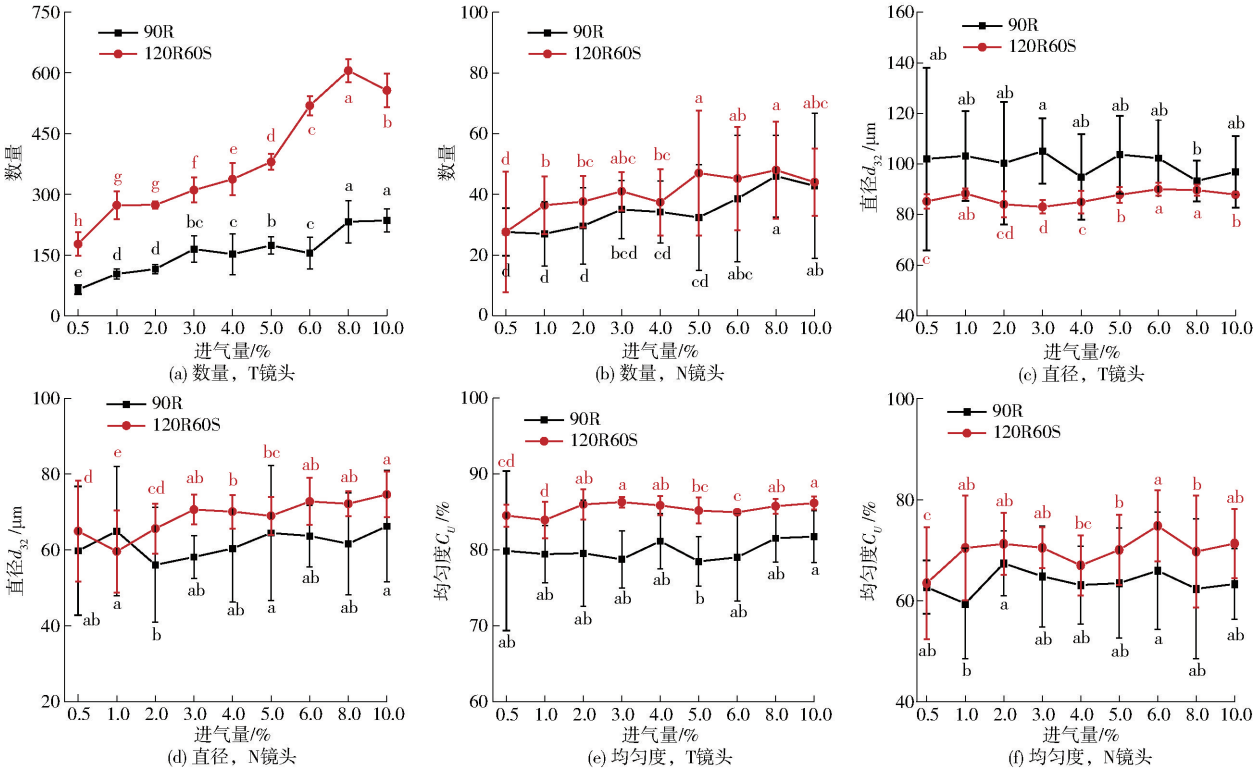


图 12　装置生成的气泡特征随进气量的变化

Fig. 12　Variations of device generated bubble features with air intake

综合上述进气量对气泡特征的影响分析，发现进气量的增加虽能显著提高各时期气泡的总体数量，但对 50 μm 以下的小气泡数量提升并无帮助，相反 5% 以上的大进气量还会使停止后 60 μm 以下的气泡数量偏少，并显著增大微气泡平均直径，缩短气泡持续时间。因此，在实际应用中，应控制装置进气量为 1% ~5%，追求气泡的生成效率时，可采用进气量 5%，而想要延长气泡持续时间，则应采用进气量 1%，综合二者因素折中考虑，可采用进气量 3%。

2. 2. 2　进气量对溶氧影响

装置运行时增氧效果（图 13）随进气量的增加而显著增强，运行 2 min 时进气量每增加 1%，水中溶氧量便增加约 0. 2 mg/L。停止 1 min 后水中溶氧量同样随进气量的增加而有所提升，但进气量增加

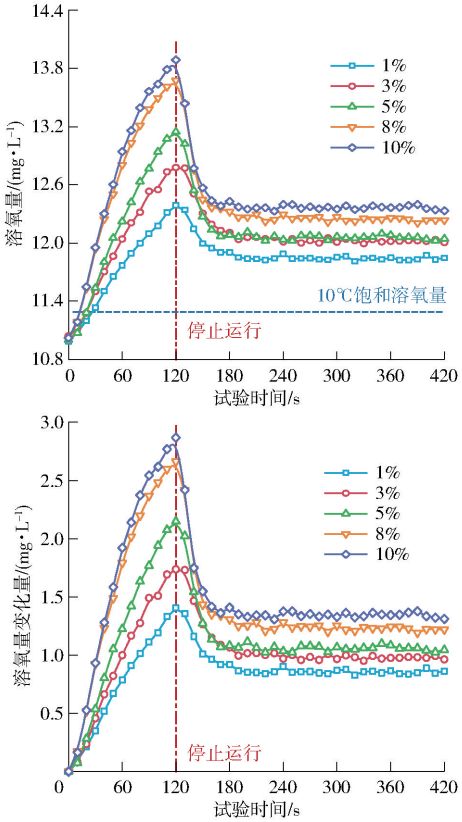


图 13 装置在不同进气量下运行的溶氧量及溶氧量变化量曲线

Fig. 13 Dissolved oxygen and its change curves for device at different air intakes

的同时也加剧了溶氧衰减,因而最终提升效果有限。其中进气量 10% 处理的最终溶氧量稳定在 12.43 mg/L,较进气量 1% 时溶氧结果仅增加 0.54 mg/L,提升了约 4.5%。由表 6 可知,3 个指标受进气量影响均极显著($P<0.01$)。通过对进气量所带来溶氧变化的差异性比较可知,装置在溶氧过程中,进气量每改变 1%,都会对水中氧含量的增加和衰减影响显著。而装置停止后水中溶氧量较为稳

表 6 不同进气量下装置在 90R、120R 与 120R60S 的溶氧量及溶氧量变化量

Tab. 6 Dissolved oxygen and its change for devices with different air intakes at 90R, 120R and 120R60S time

mg/L

进气量/%	溶氧量				溶氧量变化量		
	初始值	90R	120R	120R60S	90R	120R60S	|60S|
0.5	10.97	11.85	12.09	11.84	0.89^{g}	0.87^{de}	0.25^{g}
1	10.98	12.10	12.39	11.90	1.11^{f}	0.92^{cde}	0.48^{f}
2	10.99	11.96	12.23	11.83	0.97^{fg}	0.84^{e}	0.40^{f}
3	11.04	12.53	12.78	12.11	1.49^{e}	1.07^{bc}	0.67^{e}
4	11.08	12.76	13.16	12.11	1.68^{d}	1.03^{bcd}	1.06^{d}
5	11.00	12.77	13.15	12.08	1.77^{d}	1.08^{b}	1.07^{d}
6	10.98	12.96	13.37	12.11	1.99^{c}	1.13^{b}	1.26^{c}
8	11.01	13.38	13.68	12.32	2.37^{b}	1.31^{a}	1.35^{b}
10	11.02	13.57	13.89	12.43	2.54^{a}	1.41^{a}	1.46^{a}

定时的分析显示,进气量需增加约 3 个百分点,才会显著提升水体最终含氧量。

综合上述进气量对装置溶氧的影响,可见提高进气量对水中氧含量的提升尤为显著。就追求高溶氧量而言,控制进气量为 10%,最利于装置溶氧速率和稳定后氧含量的提升。但高进气量会显著增大停止后水中剩余微气泡的平均直径,不利于微气泡在灌溉水中的持续时间,文献[23]研究了曝气水灌溉过程中气泡的动态变化,其数据规律与本研究一致。另外,文献[24]研究了滴灌过程中溶解氧含量的变化,表明不同含氧量的灌溉水在进入土壤后,提取的土壤滤液中氧含量无显著差异。因此,在加气水中提高氧含量方面,认为实际生产中只需将灌溉水最终输送到土壤前的氧含量提高至饱和状态即可。

2.3 压力与进气量响应面优化

2.3.1 响应曲面试验设计

通过对运行压力与进气量工况的单因素试验分析,结合装置加气效果与加气滴灌实际生产需求,明确适宜运行工况区间为:压力 200 ~400 kPa,进气量 1% ~5%。因此,本试验围绕压力与进气量两因素已知的较优区间范围,采用响应面法(RSM)[25]中的中心复合表面设计(CCF)补充开展相关水力试验,两因素对应水平的上下限分别为:压力下限 200 kPa、上限 400 kPa;进气量下限 1%、上限 5%。

为了更直观地展现旋流式气泡发生装置的最终加气效果,不再考虑装置运行阶段生成气泡特征,具体试验响应指标分别为:120R60S 时小气泡的数量,记为 N_c;120R60S 时小气泡的平均直径,记为 N_d;以及气泡消散时间 t。溶氧方面的响应指标为:90R 时溶氧量变化量记为 D_{01};120R60S 时水中溶氧稳定后溶氧量变化量记为 D_{02}。其中,选取的小气泡数量和平均直径指标,能间接反映装置加气滴灌中气体实际传输的有效距离。此外,由于两因素均未对水中小气泡的均匀度产生显著影响,因而并未将之作为响应指标。对溶氧效果指标的选取中,通过 D_{01} 能够反映装置实际增氧效率,D_{02} 则表示装置最终的溶氧性能。

2.3.2 试验结果与回归分析

中心复合表面设计(CCF)的变量和上述响应指标的观测结果如表 7 所示。不同工况下的运行流量仅与压力有关,装置在压力 200 ~400 kPa 下的流量为 8.6 ~12.1 L/min。此外,试验结果表明不同运行工况下,N 镜头观测下的小气泡平均直径变化范围在 59.2 ~74.6 μm 之间,气泡消散时间 t 变化范围为 165 ~334 s。

表 7　响应曲面法试验设计与各指标观测结果

Tab. 7　Response surface method experimental design and observations of indicators

序号	压力/kPa	进气量/%	流量 Q/(L·min^{-1})	气泡(N 镜头)			溶氧量变化量/(mg·L^{-1})	
				数量	直径/μm	消散时间 t/s	90R	120R60S
1	200	1	8.6	10	64.5	165	0.54	0.64
2	400	1	8.6	48	66.5	334	1.39	1.01
3	200	5	8.6	16	69.2	291	1.04	0.85
4	400	5	12.1	56	74.6	252	2.80	1.45
5	200	3	12.1	14	66.8	244	0.80	0.82
6	400	3	12.1	46	74.5	285	2.18	1.14
7	300	1	10.5	35	59.2	317	1.11	0.92
8	300	5	10.5	46	70.1	278	1.77	1.08
9	300	3	10.5	44	68.9	320	1.66	0.95
10	300	3	10.5	41	70.7	309	1.73	1.21
11	300	3	10.5	42	71.3	311	1.71	1.14
12	300	3	10.5	37	72.9	295	1.51	1.09
13	300	3	10.5	41	69.5	314	1.53	1.09

注：试验采用响应曲面法中的 CCF 法设计，为确保后续拟合模型的准确性，表中全部气泡指标均为 10 幅拍摄图像提取气泡特征的均值；模型中心点个数设为 5 个，即进行 5 次重复试验取值。

将表 7 中各响应指标的试验结果进行方差分析，得到压力与进气量及二者的交互作用分别对气泡特征与溶氧量变化量影响的显著性，结果如表 8、9（表中 A、B 分别表示压力、进气量编码值；A 为 −1、0、1 时，分别表示 200、300、400 kPa；B 为 −1、0、1 时，分别表示 1%、3%、5%）所示。表中模型对全部响应指标的影响均显著（$P<0.05$），且失拟项中的 $P>0.05$ 表明模型失拟不显著，即数据与模型拟合良好[26]。

表 8　不同工况下装置生成气泡特征方差分析

Tab. 8　ANOVA of features of bubbles generated by device under different working conditions

来源	数量 N_c		直径 N_d		消散时间 t	
	F	P	F	P	F	P
A	262.03	*	7.89	*	18.5	*
B	13.53	*	19.22	*	0.014	0.9091
AB	0.13	0.729	0.611	0.460	40.96	*
A^2	32.74	*	2.18	0.184	18.13	*
B^2	0.32	0.588	9.33	*	0.71	0.427
失拟	1.43	0.358	3.18	0.147	5.82	0.061

表 9　不同工况下装置溶氧量变化量方差分析

Tab. 9　ANOVA of change in dissolved oxygen by device under different working conditions

来源	90R 溶氧量增量 D_{O1}		120R60S 溶氧量增量 D_{O2}	
	F	P	F	P
A	214.92	*	31.08	*
B	88.65	*	12.42	*
AB	17.14	*	1.43	0.272
A^2	1.03	0.343	1.42	0.273
B^2	3.32	0.111	0.60	0.463
失拟	1.40	0.366	0.88	0.522

分别剔除响应指标中不显著的影响因子，重新计算并利用各显著因素构建响应指标的回归模型。

装置停止运行 1 min 后，N 镜头观测下小气泡数量模型（$R^2=0.977$）为

$$N_c=40.86+18.33A+4.17B-9.19A^2 \quad (1)$$

装置停止运行 1 min 后，N 镜头观测下小气泡平均直径模型（$R^2=0.778$）为

$$N_d=70.64+2.52A+3.93B-3.29B^2 \quad (2)$$

装置运行期间 90 s 时，水中溶氧量变化量的模型（$R^2=0.959$）为

$$D_{O1}=1.52+0.665\,5A+0.427\,4B+0.230\,2AB \quad (3)$$

装置停止运行 1 min 后，水中溶氧量变化量模型（$R^2=0.789$）为

$$D_{O2}=1.03+0.213\,7A+0.135\,1B \quad (4)$$

装置运行 2 min 停止后，水中微气泡完全消散时间 t 的模型（$R^2=0.916$）为

$$t=306.33+28.45A+0.7833B-51.85AB-44.65A^2 \quad (5)$$

经验证上述全部模型的偏差值均小于 10%，说明回归方程对上述气泡特征和溶氧变化具有良好的预测性。利用原始模型绘制各指标的响应曲面，如图 14 所示，分析压力与进气量交互作用对加气效果的影响。

由图 14a 可知，进气量的增加能促进压力增大时实现更多的气泡破碎量。响应曲面弯曲趋势表明，运行压力的增大能加快气泡的生成，但压力过高时出现了增速放缓的趋势，而提高进气量能进一步提升气泡破碎效率。如图 14b 所示，小气泡的平均直径随压力与进气量的增大呈现增大趋势，在进气量大于 2% 时，增加压力对气泡直径增大的影响尤为明显。这表明运行压力较高时（大于 300 kPa），应控制进气量在 2% 以内，避免气泡直径偏大或不均匀。

如图 14c、14d 所示，压力增大时，适当提高进气量有助于装置实现更快的溶氧速率，并提升溶氧稳定后的溶氧量变化量。溶氧量变化量随运行工况的递增趋势表明，推荐装置运行压力每增加100 kPa，控制进气量提高 2%，以实现最佳的溶氧效果。由图 14e 可知，运行压力增大的同时减少进气量更有助于气泡消散时间的延长，表明高压力与小进气量的组合，有助于提高气泡破碎程度，减小气泡的最小直径。此外，根据等高线图来看，压力小于 300 kPa

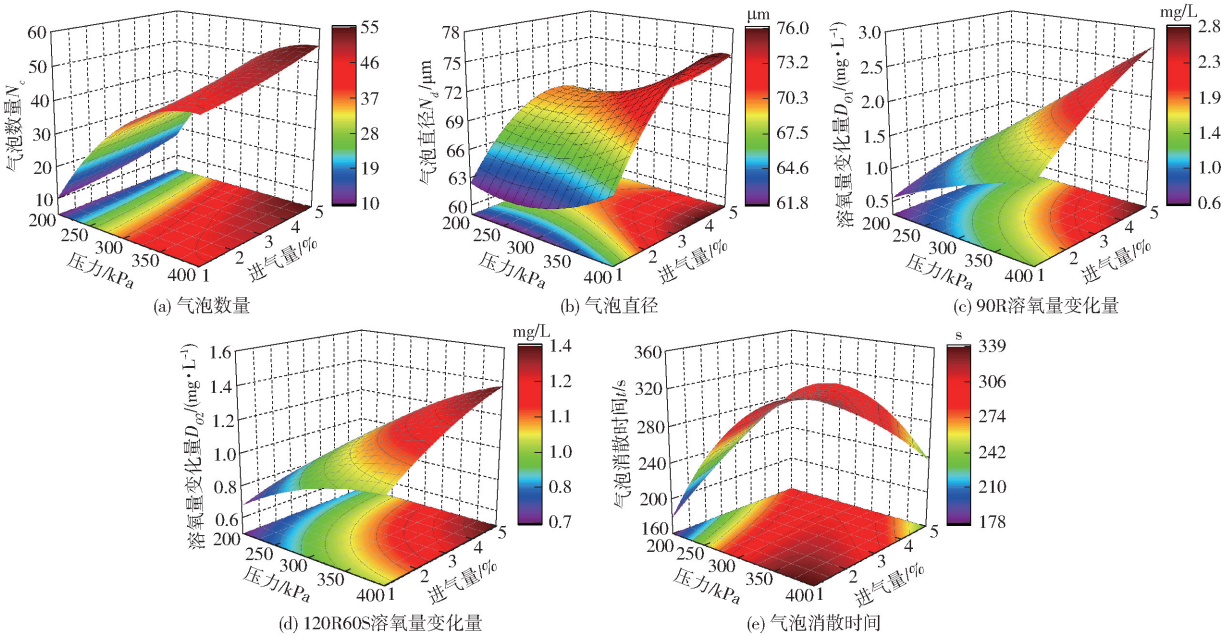


图 14 各响应指标的压力与进气量交互效应

Fig. 14 Pressure and air intake interaction effect for each response value scale

时增大进气量,而压力大于 300 kPa 时减少进气量,更有助于气泡消散时间的延长。推测小压力工况下,适当提高进气量能够增加装置生成微小气泡的概率,或提高装置总体生成小气泡的数量,延长气泡消散时间。为保证气泡消散时间多于 5 min,应控制装置运行压力大于 300 kPa,进气量小于 4%。

2.3.3 响应结果优化

由于装置运行压力与进气量对上述各响应指标的影响规律和程度不同,利于某一响应指标的工况参数,可能会在另一指标中表现较差,因此不存在一组特定运行工况使所有响应指标均达到期望值。采用 Design-Expert 中的响应优化器,通过设置不同因素与响应的期望指标及其重要程度,求解对应最优取值,具体变量期望值的设置如表 10 所示。在加气装置满足良好加气效果的情况下,期望运行压力降到最低,以减少额外支出,取得更好的经济效益。故将压力因素的重要程度设为最高(5 级),其余反映加气效果的气泡特征与溶氧结果指标的重要程度设为 3 级,将反映运行期间增氧速率的指标(D_{O1})设为 2 级,进行优化计算。

表 10 不同因素与响应指标的期望设置

Tab. 10 Expectations setting for different factors and response indicators

变量	目标	下限	上限	重要程度
压力/kPa	望小	250	400	*****
进气量/%		1	5	***
气泡数量 N_c	望大	40	80	***
气泡直径 N_d/μm	望小	50	70	***
D_{O1}/(mg·L^{-1})	望大	1.5	3.0	**
D_{O2}/(mg·L^{-1})	望大	1.0	1.5	***
气泡消散时间 t/s	望大	300	350	***

注:在重要程度中利用 * 的个数表示重要级别,共设 1 ~ 5 级。

通过响应优化计算求解,可得装置运行压力 350 kPa、进气量 2% 时,能够最大程度满足上述期望指标。此时,装置最终在 2.5 mm × 2.5 mm 观察面内生成小气泡数量 45 个,平均直径 68.6 μm,运行 2 min 内增氧速率约 0.81 mg/(L·min),溶氧稳定后较初始溶氧量增加 1.08 mg/L,气泡消散时间可达 323 s。模拟运行 3 次试验结果的 95% 置信区间分别为:气泡数量 40.6 ~ 50.2 个,平均直径 64.9 ~ 72.4 μm,90R 溶氧量变化量 1.43 ~ 1.81 mg/L,120R60S 溶氧量变化量 0.92 ~ 1.24 mg/L,气泡消散时间 295.2 ~ 350.9 s。

3 结论

(1)当压力小于 300 kPa 时,增大压力对气泡数量提升最为明显。当压力为 300 ~ 400 kPa 时,增大压力有利于生成更小的微气泡。当压力大于 400 kPa 时,会增大气泡平均直径,减小均匀度。压力提升至 300 kPa 时,溶氧效果较低压力工况时明显改善,继续增大压力至 400 kPa,能显著提高装置运行时的增氧性能,但最终溶氧效果的差异并不显著。因此,压力控制在 300 ~ 400 kPa,生成气泡和溶氧效果较优。

(2)增加进气量能显著提高各时期气泡的总量,但对 50 μm 以下小气泡数量的提升并无帮助。进气量大于 5% 时还会减少停止后小气泡数量,增

大气泡平均直径。当进气量为 1% ~5% 时，1% 进气量时小气泡直径分布最佳，气泡平均直径最小。5% 进气量时，气泡生成速率更快。增加进气量能显著提高溶氧效率和最终氧含量。因此，1% ~5% 的进气量能够使装置达到最佳破碎气泡效果。

(3)进气量的增加促进压力增大时实现更多的气泡破碎量，当压力大于 300 kPa 时，提高进气量会明显降低气泡破碎效果，此时应控制进气量在 2% 以下，有助于延长气泡消散时间。压力增大时，适当提高进气量能提高溶氧效率和稳定后的溶氧量变化量。通过响应优化求解，装置以压力 350 kPa 和进气量 2% 的工况运行，能以最低能耗达到最优加气效果。

参 考 文 献

[1] 朱艳，蔡焕杰，宋利兵，等. 加气灌溉改善温室番茄根区土壤通气性[J]. 农业工程学报，2017，33(21)：163 - 172.
ZHU Yan，CAI Huanjie，SONG Libing，et al. Oxygation improving soil aeration around tomato root zone in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE，2017，33(21)：163 - 172.（in Chinese）

[2] 牛文全，郭超. 根际土壤通透性对玉米水分和养分吸收的影响[J]. 应用生态学报，2010，21(11)：2785 - 2791.
NIU Wenquan，GUO Chao. Effects of rhizosphere soil permeability on water and nutrient uptake by maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2010，21(11)：2785 - 2791.（in Chinese）

[3] ZHOU Y，BASTIDA F，LIU Y，et al. Selenium fertigation with nanobubbles influences soil selenium residual and plant performance by modulation of bacterial community[J]. Journal of Hazardous Materials，2022，423：127114.

[4] 李元，牛文全，张明智，等. 加气灌溉对大棚甜瓜土壤酶活性与微生物数量的影响[J]. 农业机械学报，2015，46(8)：121 - 129.
LI Yuan，NIU Wenquan，ZHANG Mingzhi，et al. Effects of aeration on rhizosphere soil enzyme activities and soil microbes for muskmelon in plastic greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2015，46(8)：121 - 129.（in Chinese）

[5] GOORAHOO D，CARSTENSEN G，ZOLDOSKE D F，et al. Using air in sub-surface drip irrigation (SDI) to increase yields in bell peppers[J]. International Water and Irrigation Review，2002，22(2)：39 - 42.

[6] GOORAHOO D，ADHIKARI D，ZOLDOSKE D，et al. Application of airjection irrigation to cropping systems in California[C]//The International Water Technology and Ozone V Conference. Fresno，2007.

[7] TORABI M，MIDMORE J D，WALSH B K，et al. Analysis of factors affecting the availability of air bubbles to subsurface drip irrigation emitters during oxygation[J]. Irrigation Science，2013，31(4)：621 - 630.

[8] BHATTARAI S，BALSYS R，EICHLER P，et al. Dynamic changes in bubble profile due to surfactant and tape orientation of emitters in drip tape during aerated water irrigation[J]. International Journal of Multiphase Flow，2015，75：137 - 143.

[9] 蔡九茂，翟国亮，吕谋超，等. 微纳米气泡在农业灌溉领域的应用展望[J]. 灌溉排水学报，2016，35（增刊 1）：102 - 107.
CAI Jiumao，ZHAI Guoliang，LÜ Mouchao，et al. Application and prospect of micro-nano bubble in agriculture irrigation areas[J]. Journal of Irrigation and Drainage，2016，35(Supp. 1)：102 - 107.（in Chinese）

[10] 熊永磊，杨小丽，宋海亮. 微纳米气泡在水处理中的应用及其发生装置研究[J]. 环境工程，2016，34(6)：23 - 27.
XIONG Yonglei，YANG Xiaoli，SONG Hailiang. Review on application of micro-nano bubble in water treatment and its generator[J]. Environmental Engineering，2016，34(6)：23 - 27.（in Chinese）

[11] 田立平，鞠玲，王晓波，等. 微纳米气泡制备技术及应用研究[J]. 能源与环境，2020(4)：69 - 73.

[12] 奚永兰，王成成，叶小梅，等. 微纳米气泡在厌氧消化中的应用研究进展[J]. 化工进展，2023，42(8)：4414 - 4423.
XI Yonglan，WANG Chengcheng，YE Xiaomei，et al. Research progress on the application of micro/nano bubbles in anaerobic digestion[J]. Chemical Industry and Engineering Progress，2023，42(8)：4414 - 4423.（in Chinese）

[13] 邓久帅，李浙昆，何伟，等. 一种旋流式微泡发生器及生成微泡的方法：CN201410324868.7[P]. 2017 - 01 - 25.

[14] TERASAK K，HIRABAYASHI A，NISHINO T，et al. Development of microbubble aerator for waste water treatment using aerobic activated sludge[J]. Chemical Engineering Science，2011，66(14)：3172 - 3179.

[15] 王剑，王夺，王秀礼，等. 加气滴灌旋流式微纳米气泡发生装置成泡特性及结构优化[J]. 农业工程学报，2024，40(14)：33 - 43.
WANG Jian，WANG Duo，WANG Xiuli，et al. Bubble characteristics and structure optimization of the swirling micro and nano bubble generator for aerated drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE，2024，40(14)：33 - 43.（in Chinese）

[16] 杨涛，李浙昆，张永忍，等. 旋流式微泡发生器的设计与试验研究[J]. 水利水电技术，2016，47(5)：141 - 144.
YANG Tao，LI Zhekun，ZHANG Yongren，et al. Design and experimental study of rotational-flow micro-bubble generator[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2016，47(5)：141 - 144.（in Chinese）

[17] 廖世双，欧乐明，周伟光. 空化过程微纳米气泡性质及其对细粒矿物浮选的影响[J]. 中国有色金属学报，2019，29(7)：1567 - 1574.
LIAO Shishuang，OU Leming，ZHOU Weiguang. Micro-nano bubbles properties induced by hydrodynamic cavitation and their influences on fine mineral flotation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2019，29(7)：1567 - 1574.（in Chinese）

（下转第 401 页）

Information Processing Systems, 2018, 32: 10750－10760.
[16] XU W, WAN Y. ELA: efficient local attention for deep convolutional neural networks[J]. arXiv Preprint, arXiv:2403.01123, 2024.
[17] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-excitation networks[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 7132－7141.
[18] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. Cbam: convolutional block attention module[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). 2018: 3－19.
[19] ZHOU X, SUN G, XU N, et al. A method of modern standardized apple orchard flowering monitoring based on S－YOLO[J]. Agriculture, 2023, 13(2): 380.
[20] GAO A, GENG A, ZHANG Z, et al. Dynamic detection method for falling ears of maize harvester based on improved YOLO－V4[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(3): 22－32.
[21] 司永胜,孔德浩,王克俭,等. 基于 CRV－YOLO 的苹果中心花和边花识别方法[J]. 农业机械学报,2024,55(2):278－286.
SI Yongsheng, KONG Dehao, WANG Kejian, et al. Recognition of apple king flower and side flower based on CRV－YOLO [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(2):278－286. (in Chinese)
[22] 王金鹏,何萌,甄乾广,等. 基于改进 COF－YOLO v8n 的油茶果静态与动态检测计数方法[J]. 农业机械学报,2024,55(4):193－203.
WANG Jinpeng, HE Meng, ZHEN Qianguang, et al. *Camellia oleifera* fruit static and dynamic detection counting based on improved COF－YOLO v8n[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(4):193－203. (in Chinese)
[23] 冀汶莉,刘洲,邢海花. 基于 YOLO v5 的农田杂草识别轻量化方法研究[J]. 农业机械学报,2024,55(1):212－222,293.
JI Wenli, LIU Zhou, XING Haihua. Lightweight method for identifying farmland weeds based on YOLO v5[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(1):212－222,293. (in Chinese)
[24] 吴仪邦,陈喆,李喆,等. 基于改进 YOLOv9 的禁垦陡坡地违规耕种区遥感影像检测方法[J]. 农业工程学报,2024,40(17):197－204.
WU Yibang, CHEN Zhe, LI Zhe, et al. Detecting illegal cultivation of step slopes from remote sensing images using improved YOLOv9[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(17): 197－204. (in Chinese)
[25] QIU X, CHEN Y, CAI W, et al. LD－YOLOv10: a lightweight target detection algorithm for drone scenarios based on YOLOv10[J]. Electronics, 2024, 13(16): 3269－3269.

(上接第 369 页)

[18] PÉREZ-GARIBAY R, MARTÍNEZ-RAMOS E, RUBIO J. Gas dispersion measurements in microbubble flotation systems[J]. Minerals Engineering, 2011, 26(1): 34－40.
[19] BRODER D, SOMMERFELD M. Planar shadow image velocimetry for the analysis of the hydrodynamics in bubbly flows[J]. Measurement Science & Technology, 2007, 18(8): 2513－2528.
[20] RAZZAQUE M, AFACAN A, LIU S, et al. Bubble size in coalescence dominant regime of turbulent air-water flow through horizontal pipes[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2003, 29(9): 1451－1471.
[21] 陈自豪,郭雪岩. 高剪切力下气泡聚并与破碎特性的数值研究[J]. 能源研究与信息, 2024, 40(1): 35－44.
CHEN Zihao, GUO Xueyan. Numerical study of bubble coalescence and breakup characteristics under high shear force[J]. Energy Research and Information, 2024, 40(1): 35－44. (in Chinese)
[22] 张朝能. 水体中饱和溶解氧的求算方法探讨[J]. 环境科学研究,1999,12(2): 54－55.
ZHANG Chaoneng. Study on calculation method of saturation values of dissolved oxygen in waters[J]. Research of Environmental Sciences, 1999, 12(2): 54－55. (in Chinese)
[23] BHATTARI S P, BALSYS R J, EICHLER P, et al. Dynamic changes in bubble profile due to surfactant and tape orientation of emitters in drip tape during aerated water irrigation[J]. Int. J. Multiph. Flow, 2015, 75: 137－143.
[24] JIE P, FUKUI G, MOUNKAILA K A H, 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.
[25] GAO Y, XU J, LUO X, et al. Experiment research on mix design and early mechanical performance of alkali-activated slag using response surface methodology (RSM)[J]. Ceramics International, 2016, 42(10): 11666－11673.
[26] GULUM M, YESILYURT M K, BILGIN A. The performance assessment of cubic spline interpolation and response surface methodology in the mathematical modeling to optimize biodiesel production from waste cooking oil[J]. Fuel, 2019, 255: 115778.