

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

雷宏军¹, 刘欢¹, Bhattarai Surya², Balsys Ron³, 潘红卫¹

(1. 华北水利水电大学水利学院, 郑州 450046; 2. 澳大利亚中央昆士兰大学医学与应用科学学院, 罗克汉普顿 4702;
3. 澳大利亚中央昆士兰大学工程与技术学院, 罗克汉普顿 4702)

摘要: 曝气滴灌过程中水、氧、气传输均匀性是评价曝气灌溉质量的重要指标。活性剂的添加和传输方式的优选对曝气滴灌传输过程中微气泡的存在和溶解氧的保持有重要意义。为提高水气耦合物在滴灌过程中传输的距离和均匀性, 该文采用 Mazzei 1078 文丘里空气射流器进行曝气增氧, 以空气和氧气为供试气源, 研究活性剂 BS1000 浓度 (0、1、2 和 4 mg/L) 和传输方式 (单向和双向) 对曝气滴灌下水、氧、气传输特性的影响。结果表明: 曝气导致单向传输下流量均匀性略有下降, 但可显著提高灌溉水中溶解氧和掺气比例; 随着活性剂浓度的增加, 掺气比例显著增加 ($P<0.05$); 活性剂的添加促进了氧气曝气下溶解氧的增加; 溶氧均匀性和流量均匀性随着活性剂浓度的增加无显著性变化, 但单向传输下 4 mg/L BS1000 的出气均匀性较未添加活性剂显著降低; 双向传输的流量均匀性、溶氧均匀性和出气均匀性分别在 95%、96% 和 67% 以上, 较单向传输分别平均提高 14.00%、4.05% 和 30.64% ($P<0.05$), 是曝气滴灌长程管道传输推荐的布置方式。研究结果为曝气滴灌过程中灌溉技术参数优化和管道的科学布置提供理论依据。

关键词: 溶解氧; 传输; 灌溉; 曝气滴灌; 微气泡; 掺气比例; 均匀性

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.012

中图分类号: S275.6; Q178.1⁺11

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-19-0088-07

雷宏军, 刘欢, Bhattarai Surya, Balsys Ron, 潘红卫. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.012 <http://www.tcsae.org>

Lei Hongjun, Liu Huan, Bhattarai Surya, Balsys Ron, Pan Hongwei. 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(19): 88—94. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.012 <http://www.tcsae.org>

0 引言

协调土壤水气环境以维持根系正常的新陈代谢和良好的根区环境, 是灌溉追求的目标^[1]。常规灌溉中土壤水溶解氧 (dissolved oxygen, DO) 含量仅仅依靠土壤孔隙中的空气向土壤水对流扩散产生, 且含量较低^[2]。灌溉水进入土壤驱替了土壤孔隙中的空气而短暂破坏了土壤水气平衡, 造成作物根系缺氧, 称之为灌溉悖论^[2-3]。根区土壤缺氧胁迫影响着土壤微生物的活动和根系对水分和养分的吸收^[4-5]。曝气滴灌 (aerated drip irrigation, ADI) 是将超饱和的水氧耦合物或超富氧的水气两相流通过滴灌或地下滴灌协调输送至作物根区的一种新型的高效节水灌溉技术^[2,6], 可有效缓解作物根区的缺氧状况, 提高作物的水肥利用效率, 增加作物的产量^[6-8]。曝气滴灌传输过程中气泡的凝聚和溶解氧的逃逸是限制曝气滴灌传输效果的制约因素。那么, 如何将水、氧和气均匀的输送至作物根区显得至关重要。

关于曝气滴灌传输过程中掺气比例 (gas void fraction, GVF) 的测量对明确水气传输规律有重要意义。

由于管道的不透明性, Calzavarini 等^[9]利用气泡探针碰撞时间序列的统计分析来量化处于湍流状态下的微气泡。利用高速相机来连续监测气泡, 通过气泡图像孔隙率可估算出掺气总量^[10]。雷宏军等^[11]通过曝气水黏度和掺入气体体积的变化关系计算出平均掺气比例, 但无法实时监测传输过程中掺气量的变化。Torabi 等^[12]利用充满水的集气瓶倒扣于水槽中收集曝气掺入的气体, 但该方法只能收集体积较大的气泡。微气泡因其稳定性和溶解能力的存在, 可大幅提高曝气水中溶解氧^[13]。较大气泡而言, 微气泡因其气泡直径较小可避免气泡直接上升聚合而导致气泡的湮灭^[14], 为曝气灌溉水气长距离均匀传输提供了可能。

目前关于曝气滴灌的水、氧、气传输均匀性和传输距离有一定的研究。Torabi 等^[15]研究了活性剂添加浓度和连接器类型及尺寸对流量均匀性的影响, 结果表明活性剂的添加可提高传输过程的流量均匀性。雷宏军等^[11]研究了不同活性剂浓度和工作压力下水气耦合物在较短滴灌带 (66 m) 中的传输均匀性, 结果表明出水均匀性和出气均匀性分别达到 95% 和 70%。由于气泡浮力的存在, 微气泡在长距离传输中会导致气泡的凝聚。大气泡在灌溉过程中更易从向上埋设的滴头逃逸而造成气泡损失。Pendergast 等^[16]通过棉花田间栽培试验表明 250 m 以内的管道铺设长度是曝气滴灌的有效铺设长度, 可使空气顺利到达作物根区。为了进一步明确水气耦合物的极限传

收稿日期: 2018-04-03 修订日期: 2018-08-10

基金项目: 国家自然科学基金 (U1504512); 河南省科技创新人才项目 (174100510021); 华北水利水电大学研究生创新课题 (YK2017-02)

作者简介: 雷宏军, 湖北大冶人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。Email: hj_lei2002@163.com

输长度, Bhattarai 等^[10]研究了生物降解活性剂 BS1000 浓度和滴头的埋设方位对气泡轮廓和传输有效性的影响, 结果表明 BS1000 较低浓度下水气耦合物于传输 200 m 后出现分离。目前水气耦合物的传输距离仍是限制曝气滴灌技术推广的重要影响因素之一。

本研究旨在明确曝气滴灌下水、氧、气在滴灌带中的传输特性, 拟实现水氧气的长距离均匀输送。试验中利用简易真空装置和排水法相结合的方法及溶解氧测定仪监测曝气水的掺气比例和溶解氧, 探究生物降解活性剂 BS1000 浓度和传输方式对掺入气体传输规律和溶解氧变化特性的影响。研究结果可为曝气滴灌过程中参数的优化及管道的布置提供理论依据, 对实际生产有一定的指导意义。

1 材料和方法

1.1 试验装置

试验布置示意图如图 1 所示。试验中采用的循环曝气装置可产生巨量的微纳米气泡, 储水罐的体积为 500 L, 水泵的型号为 HJ-620E(台州韩进泵业有限公司), 文丘里空气射流器型号为 Mazzei 1078。供试纯氧由氧气罐供应, 纯度达 99.99%, 可通过减压阀调控供氧流量和供氧压力。通过自动控制系统可维持曝气和供水过程中压力稳定, 压力误差为 ± 0.005 MPa。非压力补偿式滴灌带型号为 JOHNDEERE, 滴头间距为 0.33 m, 额定流量为 1.20 L/h, 额定工作压力为 0.10 MPa。试验中滴灌带从曝气装置出水口接入, 通过 T 型三通首尾相连, 于地面水平铺设。

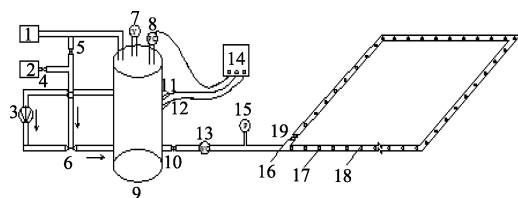


图 1 试验布置示意图
Fig.1 Schematic diagram of experimental layout

1.2 试验设计

试验中设置了滴灌带单向传输(首尾不相连)和双向传输(首尾相连)2种传输方式、空气曝气和氧气曝气(记为 AA 和 OA)2种曝气气源和 0、1、2 和 4 mg/L(记为 C_0 、 C_1 、 C_2 和 C_3)4 个 BS1000 活性剂浓度, 共 16 个处理, 每个处理 3 次重复。试验中通过首部压力表(图 1, 压力表)控制供水压力, 单向传输和双向传输的首部供水压力均设置为 0.10 MPa(滴灌带额定工作压力), 系统研究滴灌带额定工作压力下不同组合方案对传输过程中

流量、掺气比例、溶解氧和水气均匀性的影响。曝气过程中将空气压缩机或氧气罐打开, 通过压力自动控制装置维持储水罐的曝气压力为 0.10 MPa。在水气两相流长程输送过程中, 200 m 可能是气泡传输有效性保持的极限距离^[10], 故试验中将滴灌带长度设置为 200 m。曝气完成后, 将滴灌带首部的闸阀打开, 待滴灌带中水气耦合物运行稳定(单向传输, 10 min; 双向传输, 7 min)时开始试验。试验中于每个采样点接入 T 型三通, 监测沿程掺气量、溶解氧和压力; 并将各采样点处滴灌带垫起 10 cm, 以便接取滴头出流量。滴头流量通过定时监测采样点出流量计算。采样点压力通过精密压力表相连 T 型三通测量。溶解氧和水温通过便携式 Fibox 4 光纤微氧传感器测定(Presens, Germany), 精度为 0.01。活性剂 BS1000 是醇烷氧基化物(Crop Care Australia Pty, Murarrie, Queensland Australia), 可生物降解, 临界胶束浓度为 1~5 mg/L。

1.3 指标测定及计算

1.3.1 掺气比例

循环曝气过程中产生数量巨大的微纳米气泡, 与水混掺且不易与水分离。试验中采用简易的真空装置收集水气耦合物, 利用排水法进行掺气比例的测量。掺气量测量装置如图 2 所示。

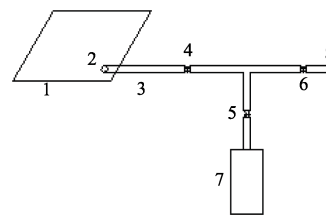


图 2 掺气比例测量装置
Fig.2 Measuring devices of gas void fraction

在测量沿程掺气量时, 将变径接头与采样点 T 型三通相连, 并将球阀 1 和球阀 2 打开, 利用真空泵将真空袋及真空吸管中的空气抽出; 待真空袋被抽为真空, 关闭球阀 2 和球阀 1; 打开 T 型三通、球阀 3 和球阀 1 即可完成滴灌带采样点处水气耦合物的收集。收集水量以 400~500 mL 为宜。收集完成后, 关闭球阀 1, 将水气耦合物静置 1 h。

待收集的水气耦合物实现水气分离, 即可利用排水法收集气体, 利用式(1)计算掺气比例(gas void fraction, GVF)。

$$GVF = (W_1 - W_2) / (W_3 - W_4) \times 100\% \quad (1)$$

式中 GVF 为掺气比例, %; W_1 为集气瓶+满水的质量, g; W_2 为集气瓶+瓶中剩余水的质量; W_3 为真空袋+水气耦合物的质量, g; W_4 为真空袋的质量, g。

1.3.2 均匀性

流量均匀性(Christiansen uniformity coefficient, CUC)的计算采用克里斯琴森公式^[17], 如式(2)、(3)、

(4) 所示。

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - M| \quad (3)$$

$$CUC = (1 - D/M) \times 100\% \quad (4)$$

式中 CUC 为均匀性, %; x_i 为第 i 个滴头的流量, L/h; M 为滴头的平均流量, L/h; D 为各滴头流量与平均流量差值绝对值的平均值, L/h。溶氧均匀性和出气均匀性的计算同流量均匀性的计算, 计算时只需将相应采样点的流量换为溶解氧浓度和掺气比例即可。试验中利用 SPSS22 软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 不同组合方案对流量及流量均匀性的影响

空气和氧气曝气下活性剂浓度对滴灌带沿程流量及压力变化无显著影响, 因此, 该文中仅列出空气曝气无活性剂添加条件下单向传输和双向传输的流量及压力沿程变化, 见图 3。单向传输时, 压力和流量均随着传输距离的增加而减小。双向传输时, 压力和流量随着传输距离的增加呈现先减小后增加的趋势。

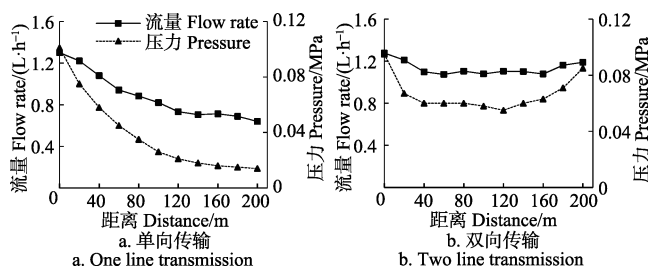


图3 曝气滴灌下不同传输方式的压力及流量变化

Fig.3 Flow rate and pressure in different transmission modes under aerated drip irrigation

不同组合条件下流量及流量均匀性列于表 1。单向传输时, 未曝气 (NA)、空气曝气 (AA) 和氧气曝气 (OA) 条件下滴头平均流量分别为 0.95、0.94 和 0.94 L/h; 双向传输时, NA、AA 和 OA 条件下滴头平均流量均为 1.21 L/h。滴头流量随着活性剂浓度的增加无显著性差异 ($P>0.05$)。

曝气可导致单向传输下流量均匀性略有下降。单向传输时, 处理 AAC₂ 和 AAC₃ 的流量均匀性较 NA 减小了 3.48% 和 3.22% ($P<0.05$), 而 AAC₀ 和 AAC₁ 的流量均匀性较 NA 无显著性差异; 处理 OAC₀ 和 OAC₂ 的流量均匀性较 NA 分别减小了 1.53% 和 2.28% ($P<0.05$), 而 OAC₁ 和 OAC₃ 的流量均匀性较 NA 无显著性差异。

单向传输时, C₀~C₃ 浓度的流量均匀性在 82% 以上; 双向传输时, C₀~C₃ 浓度的流量均匀性在 95% 以上且无显著性差异 ($P>0.05$), 故活性剂浓度的增加对流量均匀性无影响。双向传输的流量均匀性高于单向传输的流量均匀性 ($P<0.05$)。较单向传输而言, NA、AA 和 OA 双向传输的流量均匀性分别提高了 12.69%、15.00%、14.31%, 故双向传输的流量均匀性平均提高 14.00%。

表 1 不同组合条件下流量及流量均匀性

Table 1 Flow rate and flow rate Christiansen uniformity coefficient (CUC) under different combination treatments

传输方式 Transmission types	曝气类型 Aeration type	活性剂浓度 Surfactant concentrations (mg·L ⁻¹)	组合名称 Combinations	流量 Flow rate/(L·h ⁻¹)	流量均匀性 Flow rate CUC/%
单向传输 One line transmission	未曝气 (NA) No aeration	0	NAC ₀	0.95±0.004b	85.17±0.15b
		0	AAC ₀	0.94±0.009b	84.90±0.30b
		1	AAC ₁	0.94±0.011b	84.50±1.08bc
		2	AAC ₂	0.93±0.011b	82.21±0.92f
	空气曝气 (AA) Air aeration	4	AAC ₃	0.93±0.003b	82.43±0.58ef
		0	OAC ₀	0.94±0.011b	83.87±0.64cd
		1	OAC ₁	0.95±0.012b	84.55±0.82bc
		2	OAC ₂	0.94±0.003b	83.23±0.61de
		4	OAC ₃	0.93±0.011b	84.25±0.11bc
	氧气曝气 (OA) Oxygen aeration	0	NAC ₀	1.21±0.004a	95.98±0.15a
		0	AAC ₀	1.21±0.001a	95.70±0.40a
		1	AAC ₁	1.20±0.012a	95.93±0.45a
		2	AAC ₂	1.20±0.015a	95.89±0.45a
双向传输 Two line transmission	空气曝气 (AA) Air aeration	4	AAC ₃	1.21±0.013a	96.52±0.96a
		0	OAC ₀	1.22±0.007a	96.17±0.79a
		1	OAC ₁	1.21±0.013a	95.99±0.47a
		2	OAC ₂	1.20±0.012a	96.41±0.11a
	氧气曝气 (OA) Oxygen aeration	4	OAC ₃	1.21±0.018a	96.48±0.31a

注: 同列下不同字母表示显著性差异 ($P<0.05$), 下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$). Same as below.

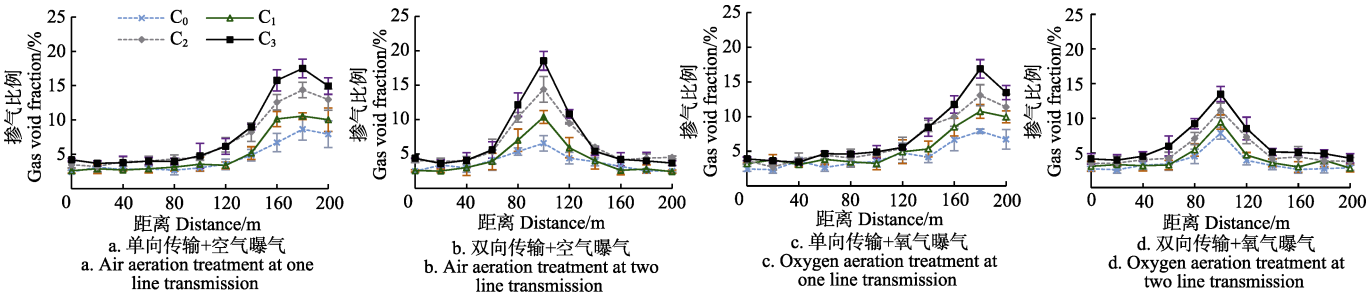
2.2 不同组合方案对掺气比例及出气均匀的影响

图 4 列出了不同组合条件下沿程掺气比例的变化。

单向传输时, 掺气比例随着传输距离的增加呈现增加的趋势, 在传输距离 160~200 m 明显增加, 且 200 m 处掺气比例略有下降。双向传输时, 掺气比例随着传输距离的增加呈现先增加后减小的趋势, 在传输距离 80~120 m 明显增加。

不同组合条件下掺气比例和出气均匀性列于表 2。双向传输的掺气比例低于单向传输的掺气比例 ($P<0.05$)。AA 条件下, 双向传输 C₀~C₃ 的掺气比例较单向传输平均减小 14.14%; OA 条件下, 双向传输 C₀~C₃ 的掺气比例较单向传输平均减小 19.12%。

掺气比例随着活性剂浓度的增加而显著增加 ($P<0.05$)。单向传输下, 处理 AAC₁、AAC₂ 和 AAC₃ 的掺气比例较 AAC₀ 分别增加了 17.42%、60.41% 和 80.32%; 处理 OAC₁、OAC₂ 和 OAC₃ 的掺气比例较 OAC₀ 分别增加了 25.00%、55.05% 和 69.27%。双向传输下, AAC₂ 和 AAC₃ 的掺气比例较 AAC₀ 增加了 68.09% 和 83.51% ($P<0.05$), 而 AAC₁ 的掺气比例较 AAC₀ 无显著性差异 ($P>0.05$); OAC₂ 和 OAC₃ 的掺气比例较 OAC₀ 增加了 45.22% 和 81.18% ($P<0.05$), 而 OAC₁ 的掺气比例较 OAC₀ 无显著性差异 ($P>0.05$)。



注：C₀、C₁、C₂ 和 C₃ 分别为添加活性剂 BS1000 浓度为 0、1、2 和 4 mg·L⁻¹。
Note: C₀, C₁, C₂ and C₃ are the concentration of BS1000 at 0, 1, 2 and 4 mg·L⁻¹, respectively.

图 4 不同组合条件下沿程掺气比例的变化
Fig.4 Gas void fraction (GVF) along a drip tape under different combination treatments

表 2 不同组合条件下掺气比例和出气均匀性					
Table 2 Gas void fraction and gas flow CUC under different combination treatments					
传输方式 Transmission types	曝气类型 Aeration type	活性剂 浓度 Surfactant concentrations (mg·L ⁻¹)	组合名称 Combina- tions	掺气比例 GVF/%	出气均匀性 Gas flow CUC/%
单向传输 One line transmission	空气曝气 (AA) Air aeration	0	AAC ₀	4.42±0.11f	53.73±4.34e
		1	AAC ₁	5.19±0.05e	52.40±3.43e
		2	AAC ₂	7.09±0.37bc	52.28±2.07e
		4	AAC ₃	7.97±0.11a	48.53±3.79f
	氧气曝气 (OA) Oxygen aeration	0	OAC ₀	4.36±0.35f	56.94±3.85c
		1	OAC ₁	5.45±0.25e	56.88±4.42cd
		2	OAC ₂	6.76±0.41cd	56.08±4.52cd
		4	OAC ₃	7.38±0.33b	53.70±2.99e
双向传输 Two line transmission	空气曝气 (AA) Air aeration	0	AAC ₀	3.76±0.30gh	67.71±1.09ab
		1	AAC ₁	4.29±0.14fg	67.03±2.98b
		2	AAC ₂	6.32±0.30d	70.99±2.47ab
		4	AAC ₃	6.90±0.12bc	71.48±2.72ab
	氧气曝气 (OA) Oxygen aeration	0	OAC ₀	3.56±0.20h	68.35±1.00ab
		1	OAC ₁	4.25±0.58fgh	72.01±1.54a
		2	OAC ₂	5.17±0.75e	71.03±0.91ab
		4	OAC ₃	6.45±0.39d	72.39±2.62a

由表 2 可得，单向传输的出气均匀性在 48% 以上，且 4 mg/L (C₃) 的 BS1000 添加浓度下出气均匀性较 C₀ 显著降低 ($P<0.05$)。单向传输下，AAC₃ 和 OAC₃ 的出气均匀性较 AAC₀ 和 OAC₀ 分别降低了 9.68% 和 5.69% ($P<0.05$)。双向传输的出气均匀性在 67% 以上且无显著性差异 ($P>0.05$)。另外，单向传输下，氧气曝气的出气均匀性高于空气曝气。单向传输下，处理 OAC₀、OAC₁、OAC₂ 和 OAC₃ 的出气均匀性较 AA 各相应浓度水平分别提高了 5.97%、8.55%、7.27% 和 10.65% ($P<0.05$)。

双向传输的出气均匀性较单向传输显著提高 ($P<0.05$)。双向传输下 AAC₀、AAC₁、AAC₂ 和 AAC₃ 的出气均匀性较单向传输分别提高了 26.02%、27.92%、35.79% 和 47.29%；双向传输下 OAC₀、OAC₁、OAC₂ 和 OAC₃ 的出气均匀性较单向传输分别提高了 20.04%、26.60%、26.66% 和 34.80%，故双向传输的出气均匀性较单向传输平均提高 30.64%。

2.3 不同组合方案对溶解氧及溶氧均匀性的影响

表 3 列出了不同组合条件下溶解氧和溶氧均匀性。

空气曝气和氧气曝气可显著提高灌溉水中的溶解氧 ($P<0.05$)。单向传输下，AA 和 OA 条件下 C₀~C₃ 浓度的溶解氧较 NA 平均提高了 160.80% 和 617.05%；双向传输下，AA 和 OA 条件下 C₀~C₃ 浓度的溶解氧较 NA 平均提高了 185.26% 和 643.23%。氧气曝气的溶解氧较空气曝气显著提高 ($P<0.05$)。单向传输时，OA 条件下 C₀~C₃ 浓度的溶解氧较 AA 平均增加了 174.92%；双向传输时，OA 条件下 C₀~C₃ 浓度的溶解氧较 AA 平均增加了 160.07%。

表 3 不同组合条件下溶解氧和溶氧均匀性
Table 3 DO and DO CUC under different combination treatments

传输方式 Transmission types	曝气类型 Aeration type	活性剂 浓度 Surfactant concentrations (mg·L ⁻¹)	组合名称 Combina- tions	温度 Temp. /°C	溶解氧 DO/(mg·L ⁻¹)	溶氧均匀性 DO CUC/%
单向传输 One line transmission	未曝气 (NA) No aeration	0	NAC ₀	20.6	5.16±0.05g	95.92±1.26d
		0	AAC ₀	25.4	12.84±0.08f	93.34±0.67fg
		1	AAC ₁	21.2	13.12±0.35ef	92.80±0.62g
		2	AAC ₂	24.1	13.99±1.46def	93.62±1.50ef
	空气曝气 (AA) Air aeration	4	AAC ₃	24.7	13.88±0.14def	93.95±0.69ef
		0	OAC ₀	22.3	34.22±1.10c	97.66±0.72abc
		1	OAC ₁	22.3	37.30±0.84a	97.80±0.73ab
		2	OAC ₂	23.5	37.94±1.11a	98.37±0.38a
双向传输 Two line transmission	未曝气 (NA) No aeration	4	OAC ₃	24.5	38.54±0.93a	97.76±0.23ab
		0	NAC ₀	21.2	5.02±0.06g	96.99±0.96bcd
		0	AAC ₀	20.4	13.89±0.29def	97.33±0.29abc
		1	AAC ₁	22.2	14.15±1.56de	96.47±0.21bcd
	空气曝气 (AA) Air aeration	2	AAC ₂	21.9	14.69±0.62d	97.07±1.46abc
		4	AAC ₃	23.4	14.55±0.28d	97.97±0.05ab
	氧气曝气 (OA) Oxygen aeration	0	OAC ₀	21.5	35.47±0.60bc	98.62±0.16a
		1	OAC ₁	22.0	37.75±0.73a	98.37±0.27a
		2	OAC ₂	23.1	37.90±0.64a	97.23±1.32abc
		4	OAC ₃	23.6	38.12±0.14a	98.24±0.37ab

活性剂的添加促进了氧气曝气下溶解氧的增加 ($P<0.05$)，而随着活性剂浓度的增加无显著性差异 ($P>0.05$)。单向传输时，OAC₁、OAC₂ 和 OAC₃ 的溶解氧较 OAC₀

分别提高了 9.00%、10.87% 和 12.62%；双向传输时， OAC_1 、 OAC_2 和 OAC_3 的溶解氧较 OAC_0 分别提高了 6.43%、6.85% 和 7.47%。

由表 3 可得，各组合条件的溶氧均匀性随着活性剂浓度的增加无显著性差异 ($P>0.05$)，表明活性剂的添加对传输过程中溶氧均匀性无影响。单向传输的溶氧均匀性在 92% 以上，双向传输的溶氧均匀性在 96% 以上。另外，单向传输下，氧气曝气的溶氧均匀性高于空气曝气 ($P<0.05$)。单向传输下，处理 OAC_0 、 OAC_1 、 OAC_2 和 OAC_3 的溶氧均匀性较 AA 各相应浓度水平分别提高了 4.63%、5.39%、5.07% 和 4.06%。

空气曝气下双向传输的溶氧均匀性较单向传输有所提高 ($P<0.05$)，而氧气曝气下无显著性差异 ($P>0.05$)。双向传输下 AAC_0 、 AAC_1 、 AAC_2 和 AAC_3 的溶氧均匀性较单向传输提高了 4.27%、3.95%、3.69% 和 4.28%，故空气曝气双向传输下溶氧均匀性平均提高到 4.05%。综合考虑传输过程中流量均匀性、溶氧均匀性和出气均匀性，双向传输是曝气滴灌推荐的管道布置方式，为曝气滴灌长距离输送提供理论依据。

3 讨 论

3.1 不同组合方案对流量及流量均匀性的影响

滴灌系统的工作压力对滴头流量的恒定和气泡的保持有积极的作用，并且沿程压力和滴头流量呈显著正相关^[11,18]。单向传输时，沿程压降明显，导致长程输水时滴头流量差异较大，流量均匀性较低；双向传输时，沿程压降较小，滴头流量稳定，故双向传输的流量均匀性高于单向传输的流量均匀性。

3.2 不同组合方案对掺气比例及出气均匀性的影响

表面活性剂的使用及其添加浓度对气泡的产生数量、大小、分布特性有明显的影响^[19]。表面活性剂是良好的起泡剂^[20]，具有一定的分散性，可降低微气泡表面黏度而使其均匀分散于水中，维持气泡的稳定^[21]。随着活性剂浓度的增加，大量活性剂分子汇聚于微气泡的表面，降低了气泡内部压力，促进微气泡数量的增加^[22]，故掺气比例随着活性剂浓度的增加而增加。

根据气泡形态的差异，水气两相流可分为泡状流、弹性流和泡状-弹状混合流等流型^[23-24]。泡状流以微气泡均匀散乱的形态分布于滴灌带中。凝聚的气泡贴着管壁逐渐向前推进的流型为弹状流^[25]。Bhattarai 等^[26]研究表明水气耦合物在滴灌带传输过程中由于气泡的凝聚推移，在管道中历经微气泡、大气泡和气泡团聚体的转变。压力降低导致微气泡凝聚，会加速气泡从滴头逃逸^[10]，削弱曝气滴灌的传输效果。试验中采用循环曝气装置产生的水气耦合物在传输过程中经历泡状流到泡状-弹状混合流的流型转变。单向传输下沿程压降明显，气泡凝聚的几率大，管道中产生的贴着管壁逐渐向前推移的泡状-弹状混合流聚集于管道的 160~200 m，故掺气比例随着传输距离的增加呈现增加的趋势，与 Bhattarai 等^[10]研究结果一致。泡状-弹状混合流中气泡团聚体沿管道迁移的推动力主要是滴头流量的损失。单向传输时尾部的滴头

流量较小而造成凝聚的气泡无法全部到达 200 m 处，这可能是导致尾部的掺气比例略小于 180 m 处的原因。微气泡随着活性剂浓度增加而增加的同时，气泡凝聚亦加剧，且汇聚于 160~200 m 处，故单向传输下 4 mg/L BS1000 的出气均匀性较未添加活性剂显著降低。

双向传输时，进入首部和尾部的水气耦合物为泡状流。由于压力的减小和传输过程中部分微气泡的碰撞凝聚，气泡团聚体停滞于滴灌带中部 80~120 m，故双向传输时滴灌带中部掺气比例较高。双向传输下压力的保持较单向传输更稳定，有效阻止了微气泡的凝聚，故双向传输的掺气比例略低于单向传输，而其出气均匀性呈现相反的趋势。

3.3 不同组合方案对溶解氧及溶氧均匀性的影响

采用 Mazzei 1078 文丘里进行曝气过程中，产生的微气泡由于气泡内压力的存在而导致微气泡直径逐渐减小直至湮灭的行为，增加了曝气水中的溶解氧^[27]，故曝气可显著提高灌溉水中的溶解氧。水中溶解氧含量与温度、盐度和氧分压密切相关^[28]。纯氧曝气的氧分压较空气曝气提高了 5 倍，故纯氧曝气条件下的溶解氧较空气曝气显著提高。活性剂的添加增加了微气泡的数量，加快了氧传质过程^[29]，增加了曝气水中的溶解氧含量。随着活性剂浓度的增加，微气泡产生数量持续增加^[11,30]，但加大了气泡碰撞凝聚的几率，故活性剂的添加促进了氧气曝气下溶解氧的增加，而随着活性剂浓度的增加无显著性差异。

由于微气泡成分的差异，微氧气泡较微气泡更易溶于水^[26-27]，削弱了微氧气泡的凝聚，弥补了溶解氧的逃逸，造就了单向传输下氧气曝气的出气均匀性和溶氧均匀性高于空气曝气。双向传输的沿程压力较稳定，对削弱传输过程中溶解氧的逃逸有重要意义，导致空气曝气双向传输的溶氧均匀性高于单向传输。地下滴灌系统的流量及压力因埋于地下受到土壤等因素的影响而发生变化^[18]。那么，曝气地下滴灌的溶解氧、掺气比例及水、氧、气均匀性是否会受到影响，有待进一步研究。

4 结 论

该文以空气和氧气为供试气源，系统研究了活性剂 BS1000 浓度和传输方式对曝气滴灌下滴灌带水气传输特性的影响，得到如下结论：

1) 曝气导致单向传输下流量均匀性在传输过程中略有下降。双向传输下各活性剂浓度的流量均匀性在 95% 以上，较单向传输平均提高 14.00%。

2) 单向传输时，掺气比例随着传输距离的增加呈现增加的趋势；双向传输时，掺气比例随着传输距离的增加呈现先增加后减小的趋势；掺气比例随着活性剂浓度的增加而增加；单向传输下 4 mg/L BS1000 的出气均匀性较未添加活性剂显著降低，而双向传输差异不显著；双向传输的出气均匀性在 67% 以上，较单向传输平均提高到 30.64%。

3) 曝气可显著提高灌溉水中的溶解氧。氧气曝气的溶解氧较空气曝气显著提高；氧气曝气下活性剂的添加

促进了溶解氧的增加, 而随着活性剂浓度的增加无显著性差异; 双向传输的溶氧均匀性在 96% 以上且活性剂的添加对溶氧均匀性无影响; 空气曝气双向传输的溶氧均匀性较单向传输平均提高 4.05%。

综合考虑曝气滴灌下流量均匀性、溶氧均匀性和出气均匀性, 双向传输是曝气滴灌推荐的连接方式, 为实现水、氧、气长距离均匀传输提供理论依据。

[参 考 文 献]

- [1] Dhungel J, Bhattarai S P, Midmore D J. Aerated water irrigation (oxygenation) benefits to pineapple yield, water use efficiency and crop health[J]. *Advances in Horticultural Science*, 2012, 26(1): 3—16.
- [2] Ben-Noah I, Friedman S P. Aeration of clayey soils by injecting air through subsurface drippers: Lysimetric and field experiments[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 176: 222—233.
- [3] Su N, Midmore D J. Two-phase flow of water and air during aerated subsurface drip irrigation[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 313(3): 158—165.
- [4] Bhattarai S P, Su N, Midmore D J. Oxygenation unlocks yield potentials of crops in oxygen-limited soil environments[J]. *Advances in Agronomy*, 2005, 88(5): 313—377.
- [5] 雷宏军, 杨宏光, 冯凯, 等. 循环曝气灌溉条件下小白菜生长及水分与养分利用[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(11): 13—18.
Lei Hongjun, Yang Hongguang, Feng Kai, et al. Impact of continuous aerating irrigation on growth, water use efficiency and nutrient uptake of pak choi growing in different soils[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(11): 13—18. (in Chinese with English abstract)
- [6] Abuarab M, Mostafa E, Ibrahim M. Effect of air injection under subsurface drip irrigation on yield and water use efficiency of corn in a sandy clay loam soil[J]. *Journal of Advanced Research*, 2013, 4(6): 493—499.
- [7] Lee J W, Lee B S, Kang J G, et al. Effect of root zone aeration on the growth and bioactivity of cucumber plants cultured in perlite substrate[J]. *Biologia*, 2014, 69(5): 610—617.
- [8] Bhattarai S P, Midmore D J, Pendergast L. Yield, water-use efficiencies and root distribution of soybean, chickpea and pumpkin under different subsurface drip irrigation depths and oxygenation treatments in vertisols[J]. *Irrigation Science*, 2008, 26(5): 439—450.
- [9] Calzavarini E, Berg T H V D, Toschi F, et al. Quantifying microbubble clustering in turbulent flow from single-point measurements[J]. *Physics of Fluids*, 2008, 20(4): 040702.
- [10] Bhattarai 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]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 75: 137—143.
- [11] 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 cycle aeration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(22): 63—69. (in Chinese with English abstract)
- [12] Torabi M, Midmore D J, Walsh K B, et al. Analysis of factors affecting the availability of air bubbles to subsurface drip irrigation emitters during oxygenation[J]. *Irrigation Science*, 2013, 31(4): 621—630.
- [13] Xu Q, Nakajima M, Ichikawa S, et al. A comparative study of microbubble generation by mechanical agitation and sonication[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2008, 9(4): 489—494.
- [14] 张磊, 刘平, 刘春, 等. 微气泡及其在环境污染控制中的应用[J]. *河北工业科技*, 2011, 28(1): 59—63.
Zhang Lei, Liu Ping, Liu Chun, et al. Microbubbles and its application in control of environmental pollution[J]. *Hebei Journal of Industrial Science and Technology*, 2011, 28(1): 59—63. (in Chinese with English abstract)
- [15] Torabi M, Midmore D J, Walsh K B, et al. Improving the uniformity of emitter air bubble delivery during oxygenation[J]. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 2014, 140(7): 06014002.
- [16] Pendergast L, Bhattarai S P, Midmore D J. Benefits of oxygenation of subsurface drip-irrigation water for cotton in a Vertosol[J]. *Crop & Pasture Science*, 2013, 64(11): 1171—1181.
- [17] Stewart B A, Howell T A, Stewart B A, et al. *Encyclopedia of Water Science*[M]. New York: Marcel Dekker Incorporation, 2003.
- [18] 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): 189—191.
Bai Dan, Song Lixun, Wang Xiaoyu, et al. Experiment on the relationship between flow and pressure of subsurface drip irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(8): 189—191. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘艳艳, 李彦鹏, 朱婷婷. 表面活性剂对中尺度气泡形状及速度的调控研究[J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(10): 93—97.
Liu Yanyan, Li Yanpeng, Zhu Tingting, et al. Study on modulating shape and velocity of meso-scale bubble using surfactants[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, 45(10): 93—97. (in Chinese with English abstract)
- [20] Hanwright J, Zhou J, Evans G M, et al. Influence of surfactant on gas bubble stability[J]. *Langmuir*, 2005, 21(11): 4912—4920.
- [21] Lee D H, Cody R D, Kim D J, et al. Effect of soil texture on surfactant-based remediation of hydrophobic organic-contaminated soil[J]. *Environment International*, 2002, 27(8): 681—688.
- [22] Tasoglu S, Demirci U, Muradoglu M. The effect of soluble surfactant on the transient motion of a buoyancy-driven bubble[J]. *Physics of Fluids*, 2008, 20(4): 040805.
- [23] 杨建, 张鸣远, 苏玉亮, 等. 气液两相泡状流界面浓度的研究[J]. *化学工程*, 2002, 30(5): 34—37.
Yang Jian, Zhang Mingyuan, Su Yuliang, et al. Study on the area concentration of air-water bubbly flow[J]. *Chemical*

- Engineering, 2002, 30(5): 34–37. (in Chinese with English abstract)
- [24] Choi C, Yu D I, Kim M. Surface wettability effect on flow pattern and pressure drop in adiabatic two-phase flows in rectangular microchannels with T-junction mixer[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2011, 35(6): 1086–1096.
- [25] Wren E, Baker G, Azzopardi B J, et al. Slug flow in small diameter pipes and T-junctions[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2005, 29(8): 893–899.
- [26] Bhattarai S P, Balsys R J, Wassink D, et al. The total air budget in oxygenated water flowing in a drip tape irrigation pipe[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2013, 52(6): 121–130.
- [27] 吕越, 刘春, 吴克宏. 微气泡曝气中微气泡收缩特性研究[J]. *河北工业科技*, 2012, 29(6): 352–356.
- Lü Yue, Liu Chun, Wu Kehong. Characteristics of microbubble's shrinkage in microbubble aeration[J]. *Hebei Journal of Industrial Science and Technology*, 2012, 29(6): 352–356. (in Chinese with English abstract)
- [28] 张莹莹, 张经, 吴莹, 等. 长江口溶解氧的分布特征及影响因素研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(8): 1649–1654.
- Zhang Yingying, Zhang Jing, Wu Ying, et al. Characteristics of dissolved oxygen and its affecting factors in the Yangtze estuary[J]. *Environmental Science* 2007, 28(8): 1649–1654. (in Chinese with English abstract)
- [29] McClure D D, Lee A C, Kavanagh J M, et al. Impact of Surfactant addition on oxygen mass transfer in a bubble column[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2015, 38(1): 44–52.
- [30] Lei H, Bhattarai S, Balsys R, et al. Temporal and spatial dimension of dissolved oxygen saturation with fluidic oscillator and Mazzei air injector in soil-less irrigation systems[J]. *Irrigation Science*, 2016, 34(6): 421–430.

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

Lei Hongjun¹, Liu Huan¹, Bhattarai Surya², Balsys Ron³, Pan Hongwei¹

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

2. School of Medical and Applied Science, CQUniversity, Rockhampton, QLD 4702, Australia;

3. School of Engineering and Technology, CQUniversity, Rockhampton, QLD 4702, Australia)

Abstract: Aerated drip irrigation (ADI) is a technique to aerate the rhizosphere by aerated water through the drip irrigation system. The dissolved oxygen (DO) in water, water flow rate and gas flow uniformity are the essential indexes for the evaluation of irrigation quality in ADI. The use of biodegradable surfactant BS1000 and the optimization of transmission modes are of great significance in the existence of microbubble and the retention of DO in water during ADI. To increase the uniformity of gas, oxygen and water and the delivery distance under ADI, transmission characteristics, i.e., gas-oxygen-water mixture produced by aerated irrigation system using Mazzei 1078 venturi air injector, were studied. The impacts of gas source and surfactant on gas-water coupling transmission along a long-distance drip tape in one or two line layout were investigated. Totally 16 combinations were tested, including 2 types of gas (air and oxygen), 2 transmission modes (one and two line transmission), and 4 levels of BS1000 concentrations (0, 1, 2 and 4 mg/L), respectively. During the experiment, parameters and uniformities of water flow rate, DO, gas void fraction (GVF), and water flow rate were observed. The DO and GVF of irrigation water along a drip tape were monitored by a dissolved oxygen meter and a vacuum device of gas void fraction measurement. Main results were given as below. Aeration treatment resulted in the slight reduce in the uniformity of water flow rate during one line transmission under ADI along a drip tape, but the DO concentration and GVF in irrigation water were significantly increased at the level of 0.05. The DO concentration in air and oxygen aerated water were increased by 160.80% and 617.05% compared with non-aerated treatment during one line transmission. However, DO levels in air and oxygen aerated water were increased by 185.26% and 643.23% compared with non-aerated treatments during two line transmission. Use of biodegradable surfactant BS1000 concentration brought an increase in GVF. Under the condition of air aerated treatment during one line transmission, the GVF at 1, 2 and 4 mg/L of BS1000 were significantly increased by 17.42%, 60.41% and 80.32% than the non-use of surfactant treatment, respectively. Similarly, under the condition of oxygen aerated treatment during one line treatment, GVF at 1, 2 and 4 mg/L of BS1000 were significantly increased by 25.00%, 55.05% and 69.27% in contrast to non-use of surfactant treatment. The use of BS1000 had a positive effect on the DO under ADI. With the increasing of BS1000 concentration, there was no significant difference neither in uniformity of DO nor water flow rate. However, compared to non-use of BS1000, the uniformity of gas flow at 4 mg/L of BS1000 was significantly decreased during one line transmission. The uniformity of water flow rate, DO and gas flow during two line transmission under ADI were higher than 95%, 96% and 67%. Compared to one line transmission, the uniformity of water flow rate, DO and gas flow during two line transmission were increased by 14.00%, 4.05% and 30.64%, respectively. Two line transmission was an optimal connection mode under ADI at the long distance of water delivery under ADI. This research will provide valuable information for optimization of aerated technique parameters and drip tape layout under ADI.

Keywords: dissolved oxygen; transmissions; irrigation; aerated drip irrigation; microbubble; gas void fraction; uniformity