

# 微纳米气泡水地下滴灌对紫花苜蓿 根际土壤养分和产量的影响

曹雪松<sup>1</sup>, 郑和祥<sup>1\*</sup>, 王 军<sup>1</sup>, 李和平<sup>1</sup>, 冯亚阳<sup>2</sup>, 岳湘鸿<sup>3</sup>

(1.中国水利水电科学研究院 牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020;

2.内蒙古农业大学, 呼和浩特 010018;

3.达拉特旗水土保持工作站, 内蒙古 鄂尔多斯 014300)

**摘 要:**【目的】提出基于高产条件下适宜紫花苜蓿地下滴灌的微纳米气泡水溶解氧质量浓度。【方法】采用田间试验的方法, 在地下滴灌土壤水分控制在 25% FC~75% FC (FC 为土壤田间持水率) 条件下设低 (1.8 mg/L)、中 (5.0 mg/L)、高 (8.2 mg/L) 3 个微纳米气泡水溶氧量质量浓度水平, 以不加气处理为对照 (CK) 研究了紫花苜蓿根际土壤养分和产量状况。【结果】与 CK 相比, 微纳米气泡水地下滴灌提高紫花苜蓿根际土壤速效氮量 13.18%~65.49%、提高速效磷量 7.02%~31.14%, 降低速效钾量 3.34%~15.77%。随着生育期的推进, 土壤速效氮量呈下降趋势, 速效磷、速效钾量呈先升高后降低的趋势。随着微纳米气泡水溶解氧质量浓度的增加, 土壤速效氮、速效磷和速效钾量均降低; 微纳米气泡水溶解氧质量浓度为 5.0 mg/L 时, 紫花苜蓿干草产量最高可达 17 758.95 kg/hm<sup>2</sup>。【结论】微纳米气泡水地下滴灌能够增强根际土壤湿润体的通透性, 促进紫花苜蓿根系的呼吸作用及对营养物质的吸收, 增加干草产量, 推荐地下滴灌紫花苜蓿适宜的微纳米气泡水溶解氧质量浓度为 5.0 mg/L。

**关 键 词:** 加气灌溉; 微纳米气泡水; 地下滴灌; 紫花苜蓿; 根际土壤养分; 产量

中图分类号: S27

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2019429

曹雪松, 郑和祥, 王军, 等. 微纳米气泡水地下滴灌对紫花苜蓿根际土壤养分和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 24-30.

CAO Xuesong, ZHENG Hexiang, WANG Jun, et al. Effects of Subsurface Drip Irrigation with Micro-nano Bubble Water on Rhizosphere Soil Nutrients and Yield of Alfalfa [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 24-30.

## 0 引 言

【研究意义】植物的正常生长发育离不开氧气, 有了氧气, 植物的根系才能维持正常的呼吸作用, 发挥其吸收营养物质和水分的功能。作物根系的呼吸作用不但为植物生命活动供给能源, 而且呼吸作用的中间代谢产物还为植物的物质合成提供了必需的原料<sup>[1]</sup>。然而, 洪涝灾害、地下水位较高、长时间地下滴灌、一次性灌水过多、土壤板结、无土栽培等极易使得作物根际土壤或营养液通气性不畅, 作物根系及微生物呼吸作用减弱, 导致作物呼吸作用和生长发育表现异常的低氧胁迫现象<sup>[2]</sup>。长时间地进行地下滴灌还会影

响滴头附近的土壤结构和水力学特性, 限制作物根区氧气扩散, 进而影响作物根系的有氧呼吸。加气灌溉是通过加气设备将空气或纯氧溶解在灌溉水中以水气混合液和微型气泡的形式随灌溉水输送到作物根区土壤, 向根区通气, 从而解决作物根区土壤通透性不足而引起的作物根区缺氧的短板, 满足作物根系有氧呼吸和土壤中微生物对氧气的需求, 使得农业生产更加高效。【研究进展】加气灌溉 (Aerated irrigation) 作为一种极为节水的新技术<sup>[3]</sup>, 是以水为载体, 通过专用加气设备或微纳米气泡发生装置将空气或纯氧快速溶解于水体并以水气混合液的形式输送到作物根区土壤, 既对作物进行了灌溉, 又满足了作物根系有氧呼吸和土壤中微生物对氧气的需求。国内外学者对加气灌溉已有初步研究, 研究表明加气灌溉能够显著提高作物根际土壤氧环境和导气率, 改善根际土壤微环境和土壤酶活性并保障土壤微生物活动<sup>[4]</sup>, 保障根际土壤呼吸速率, 促进作物根系有氧呼吸的顺利

收稿日期: 2019-12-10

基金项目: 中国水利水电科学研究院科研专项项目 (MK2018J05); 国家“十三五”重点研发计划项目 (2017YFC040320504); 国家青年科学基金项目 (41901052); 内蒙古自然基金项目 (2019MS05001)

作者简介: 曹雪松 (1989-), 男, 河南商丘人。中级工程师, 硕士, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: cxsmks@126.com

通信作者: 郑和祥 (1980-), 男, 山东菏泽人。高级工程师, 博士, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: mkszhx@163.com

进行<sup>[5]</sup>,并能够促进作物根系对根际土壤营养物质和水分的吸收,提高水分利用效率<sup>[6]</sup>,改善土壤酶活性和微生物群落多样性,促进作物生长<sup>[7]</sup>、改善作物品质<sup>[8]</sup>,有效缓解作物根区缺氧的实际问题<sup>[9-10]</sup>;赵丰云等<sup>[11]</sup>研究表明,地下穴贮滴灌根际加气可以有效增加葡萄新梢和茎粗;陈慧等<sup>[12]</sup>研究了加气灌溉对设施番茄地硝化/反硝化细菌数量的影响,结果表明加气较不加气处理增加了土壤硝化细菌数量,平均增加了2.1%,但加气灌溉减小了土壤反硝化细菌数量,平均降低了9.7% ( $P>0.05$ );南茜等<sup>[13]</sup>研究了温度、通气时间等因素对超微米气泡循环加气装置和空气压缩机加气装置2种微灌加气装置溶解氧效果的影响,结果表明超微米气泡悬浮时间比传统曝气方式产生的普通气泡在水中的停留时间长且气泡的存在稳定性更强;雷宏军等<sup>[14]</sup>研究了不同土壤条件下增氧灌溉方式对作物生长、产量及养分利用的影响,结果表明曝气地下滴灌对紫茄生长、水分和养分利用的促进作用较为显著且不同土壤类型下,曝气地下滴灌对砂壤土紫茄产量增产及水分利用效率提升效果最优;Du等<sup>[15-16]</sup>研究表明,加气灌溉不仅有利于提高作物产量,提高水分利用效率(总平均值分别提高19.3%和17.9%),而且可有效改善土壤生物环境,提高N利用率,并将更多N转移至干物质;雷宏军等<sup>[17]</sup>研究了番茄地土壤 $N_2O$ 排放量对水肥气耦合滴灌的响应,结果表明曝气条件下 $N_2O$ 排放总量较对照平均增加35.16%。目前,国内外学者针对加气灌溉研究的加气方式大多集中在传统加气(文丘里加气),即利用偏压射流器吸收天然空气,再使用循环水泵将水往复流经文丘里射流器进行循环曝气,传统的文丘里加气溶解于灌溉水的气泡直径多为毫米级。【创新点】本文将天然空气通过微纳米气泡快速发生装置后,使溶解于灌溉水的气泡直径介于微米级和纳米级之间,由于微纳米气泡的自身增压溶解、比表面积大等特性,使灌溉水溶解氧质量浓度大幅度升高,更加高效地缓解了根区土壤缺氧的短板。【拟解决的关键问题】为缓解长时间地下滴灌导致的土壤湿润体通透性减弱、土壤板结以及作物因根系缺氧出现的黑根现象以及紫花苜蓿微纳米气泡水地下滴灌适宜的溶解氧质量浓度,笔者开展微纳米气泡水地下滴灌紫花苜蓿试验研究,通过对紫花苜蓿根际土壤养分和紫花苜蓿产量和品质等指标的观测,分析微纳米气泡水地下滴灌对紫花苜蓿根际土壤养分和产量的影响,旨在为高产、高效的加气灌溉集成模式提供一定理论依据和技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于鄂托克前旗,其处于毛乌素沙地腹部,地理坐标为东经 $106^{\circ}30'$ — $108^{\circ}30'$ ,北纬 $37^{\circ}38'$ — $38^{\circ}45'$ ,常年盛行南风,多年平均风速2.7 m/s;多年平均气温 $8.0^{\circ}\text{C}$ ;相对湿度平均49.7%;平均沙暴时间16.8 d;年日照时间2 400~3 100 h,平均为2 957 h;多年平均降水量与蒸发量分别为260.6、2 497.9 mm;无霜期170 d,最大冻土层深可达1.55 m。试验区100 cm深土壤类型为砂土,体积质量为 $1.62\text{ g/cm}^3$ ,详见表1。

表1 试验区0~100 cm土层土壤机械组成

| 体积质量                                      |                  | 土壤颗粒分布                       |               |           | 土壤类型<br><br>Soil type |
|-------------------------------------------|------------------|------------------------------|---------------|-----------|-----------------------|
| Bulk<br>density/<br>(g cm <sup>-3</sup> ) | 比重<br>Proportion | Soil particle distribution/% |               |           |                       |
|                                           |                  | 0.05~2 mm                    | 0.002~0.05 mm | <0.002 mm |                       |
| 1.62                                      | 2.71             | 76.85                        | 21.69         | 1.46      | 砂土                    |

### 1.2 试验材料及种植方法

滴灌系统:选用壁厚为0.4 mm的内镶贴片式滴灌管,滴头额定流量为2.0 L/h,滴头间距离为0.3 m,4行紫花苜蓿由1条滴管带进行灌水控制,滴灌管之间的行距为60 cm,滴灌管埋深20 cm。

供试苜蓿品种:紫花苜蓿为4 a生草原2号。

种植方法:紫花苜蓿的种植方法为人工条播,行距设置为15 cm,在紫花苜蓿的初花期进行刈割收贮,因为初花期紫花苜蓿的营养价值最高和适口性更好。该地区第1茬苜蓿于每年4月中旬开始返青,第3茬苜蓿于每年9月底收割并储存。

### 1.3 试验设计

2018年4—10月在鄂尔多斯市鄂托克前旗开展了紫花苜蓿微纳米气泡水地下滴灌田间试验。试验设3个处理和1个对照(CK),每个试验处理长50.0 m,宽8.0 m,每个试验处理划分为3个试验小区作3次重复,每个试验小区宽2 m,试验小区间隔1 m,相邻试验处理间设隔离带,宽度为2 m,试验区总面积1 900  $\text{m}^2$ 。当每个试验处理的含水率降至田间持水率(FC)的25%时开始灌水,灌水上限控制在75% FC,紫花苜蓿第1茬、第2茬、第3茬分别灌水5、4、5次,整个紫花苜蓿生长季共灌水14次,灌溉定额为315 mm。由于空气源曝气条件下微纳米气泡在水中的溶解氧质量浓度低氧状态为1.8 mg/L,饱和状态为8.2 mg/L,故本研究微纳米气泡水溶解氧质量浓度设低、中、高3个水平,分别为WA-1处理(1.8 mg/L)、WA-2处理(5.0 mg/L)、WA-3处理(8.2 mg/L),每

个处理灌水时间和灌水次数均相同,灌水周期 5~7 d,遇降雨顺延。每个处理均于返青期第 1 次灌水时施尿素 30 kg/hm<sup>2</sup>,尿素在滴灌首部的施肥罐里均匀溶于水后随滴灌水流直接作用于苜蓿根区。

#### 1.4 观测指标与方法

利用试验区小型农田气象站对作物生育期内的逐日气温、降雨量、风速、相对湿度、气压、风向等要素进行观测;微纳米气泡由微纳米气泡快速发生装置(北京中农天陆微纳米气泡水科技有限公司)产生,微纳米气泡在水中的溶解氧质量浓度采用美国维赛 YSIPro20 溶解氧测量仪(溶氧仪)精确测量;紫花苜蓿鲜草产量采用样方法测定,样方面积为 1 m<sup>2</sup> 样测量。刈割后对紫花苜蓿鲜质量进行称质量,然后将鲜草放入烘箱,105 ℃ 高温杀青 30 min 后将温度调至 65 ℃,恒温条件下烘 48 h,冷却后取出称其干质量。于每茬紫花苜蓿返青期、拔节期、分枝期、开花期取其根际土壤测定土壤养分量,以紫花苜蓿根系为中心选取土样,土样面积 20 cm×20 cm,土样深度 60 cm,混合均匀后作为 1 个土样。土壤养分测定方法如下:

1) 速效氮:称取 2 g 土样于扩散皿外圈中,加入 2 mL 硼酸指示剂于内圈,然后加入 10 mL 物质的量浓度为 1 mol/L 的氢氧化钠溶液于外圈(用针筒吸取,不需准确,过量即可),涂上甘油,盖上毛薄片,绑上橡皮筋后放置 24 h 后用标准酸(低质量浓度)滴定内圈硼酸即可。

2) 速效磷:称取 1 g 土样于 50 mL 离心管中,加入 20 mL 物质的量浓度为 0.5 mol/L 的碳酸氢钠,放入 25 ℃,220 r/min 的摇床中振荡 30 min,取出后用滤纸过滤到 50 mL 小烧杯中,吸取 5 mL 滤液于 25 mL 容量瓶中,加入 2.5 mL 显色剂后定容,显色 30 min 后测定。

3) 速效钾:称取 0.5 g 土样于 50 mL 离心管中,加入 20 mL 物质的量浓度为 0.5 mol/L 的醋酸铵,放入 25 ℃,220 r/min 的摇床中振荡 30 min,取出后用滤纸过滤到 50 mL 小烧杯中,然后直接用原子吸收分光光度计测定。

#### 1.5 数据分析

使用 Excel 2013、SPSS 19.0 和 Origin Pro 8.5 软件对数据进行整理、分析和绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对紫花苜蓿根际土壤养分的影响

微纳米气泡水地下滴灌条件下紫花苜蓿根际土壤速效氮量明显高于不加气常规处理(图 1);在紫花苜蓿生育期内,根际土壤中速效氮量逐步降低,表

现为返青期>拔节期>分枝期>开花期;在紫花苜蓿的生育期内,根际土壤中速效氮量随着微纳米气泡水溶解氧质量浓度的增加而降低,即 WA-3 处理<WA-2 处理<WA-1 处理。返青期,根际土壤中速效氮量最高的主要原因是返青期追加了基肥(尿素),追加基肥后土壤肥力较好,WA-3、WA-2 处理和 WA-1 处理的根际土壤速效氮量分别比 CK 高出 13.18%、30.31%和 35.64%;拔节期分别高出 20.30%、41.39%和 48.66%;分枝期分别高出 29.87%、51.20%和 56.42%;开花期分别高出 28.39%、56.20%和 65.49%。说明随着微纳米气泡水溶解氧质量浓度的增加,紫花苜蓿根际土壤速效氮量降低,而且降幅也越来越小,而不同生育期的根际土壤速效氮量降幅为开花期>分枝期>拔节期>返青期。

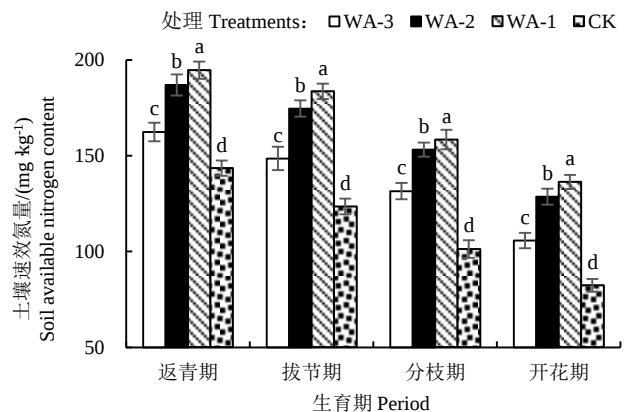


图 1 不同处理紫花苜蓿根际土壤速效氮量

Fig.1 Available nitrogen in rhizosphere soil of alfalfa under different treatments

从图 2 可以看出,紫花苜蓿每个生育期内,微纳米气泡水地下滴灌条件下紫花苜蓿根际土壤速效磷量明显高于不加气常规处理,随着微纳米气泡水溶解氧质量浓度的增加,紫花苜蓿根际土壤速效磷量降低,表明微纳米气泡水地下滴灌能够促进紫花苜蓿根系对土壤中速效磷的吸收,从而降低了土壤中速效磷量。

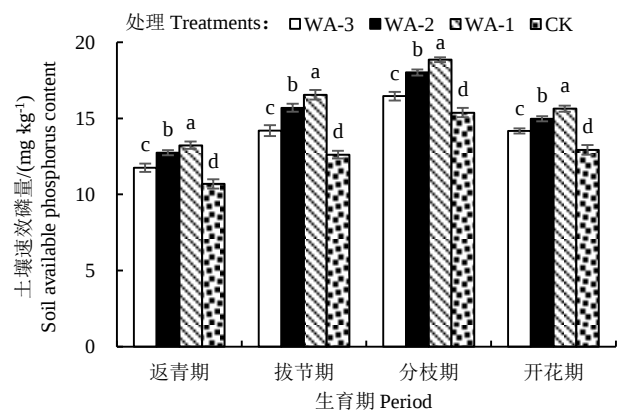


图 2 不同处理紫花苜蓿根际土壤速效磷量

Fig.2 Available phosphorus in rhizosphere soil of alfalfa under different treatments

整个生育期紫花苜蓿根际土壤中速效钾量波动较大, 从返青期到拔节期再到分枝期, 土壤中速效钾量呈增加趋势, 从分枝期到开花期, 土壤中速效钾量呈下降趋势(图 3), 说明此时苜蓿由营养生长转向生殖生长, 而生殖生长需要消耗土壤中大量的速效钾。紫花苜蓿每个生育期内, 微纳米气泡水地下滴灌条件下紫花苜蓿根际土壤速效钾的量明显低于不加气常规处理, 说明微纳米气泡水地下滴灌能够促进紫花苜蓿根系对土壤中速效钾的吸收, 从而降低土壤中速效钾量。紫花苜蓿不同生育期, 土壤中速效钾量是分枝期>拔节期>返青期>开花期, 说明微纳米气泡水地下滴灌促进有机质分解成速效钾的速率大于根系对速效钾的吸收速率, 从而使土壤中速效钾量增加。在开花期, 土壤中速效钾量有较大降幅, 充分说明微纳米气泡加气灌溉能够促进紫花苜蓿根系对土壤中速效钾的吸收。

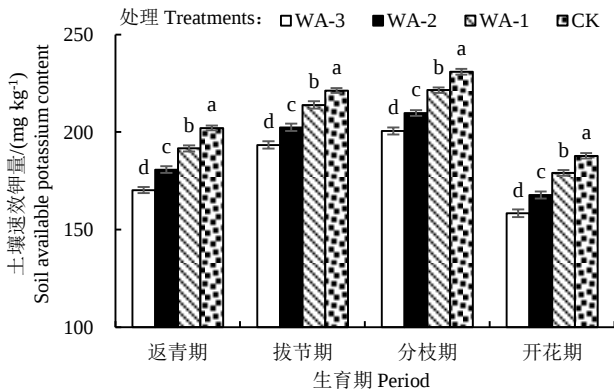


图 3 不同处理紫花苜蓿根际土壤速效钾量

Fig.3 Available potassium in rhizosphere soil of alfalfa under different treatments

## 2.2 微纳米气泡水地下滴灌对紫花苜蓿干草产量的影响

紫花苜蓿生物量积累的快慢最终体现在株高和产量上。不同生育期紫花苜蓿株高和产量的变化尤为明显且具有规律性。从图 4 可以看出, 不同微纳米气泡水溶解氧质量浓度处理下的苜蓿生长总体趋势是一致的, 都是由快到慢的生长趋势, 从返青期到拔节期再到分枝期株高增长较快, 从分枝期到开花期增长速率开始变缓, 此阶段紫花苜蓿光合作产物优先用于生殖器官, 紫花苜蓿也由营养生长逐渐转向生殖生长, 外在表现的生长速率自然下降。随着微纳米气泡水溶解氧质量浓度的增大, 株高随之增大。但 WA-3 处理与 WA-2 处理的株高相差较小, 说明此时微纳米气泡水溶解氧质量浓度已经不是限制紫花苜蓿株高的主要因素, 过高的溶解氧质量浓度反而不利用紫花苜蓿根系对营养元素的吸收, 从而抑制植株的生长。

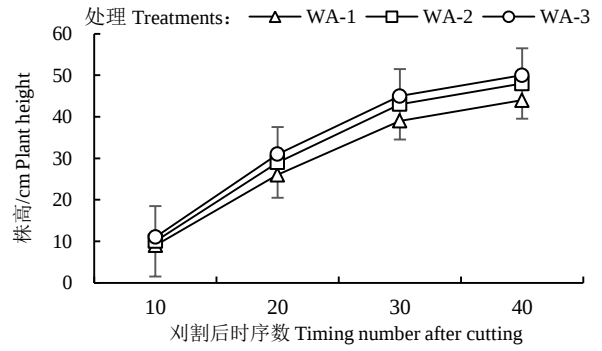


图 4 不同处理紫花苜蓿株高

Fig.4 Plant height of alfalfa under different treatments

当灌水定额一定的条件下, 微纳米气泡加气地下滴灌能够提高紫花苜蓿的产量(图 5); 随着微纳米气泡水溶解氧质量浓度的增加, 紫花苜蓿的干质量呈现“报酬递减”现象。WA-2 处理紫花苜蓿干质量最大, 为 17 758.95 kg/hm<sup>2</sup>, 这说明 WA-2 处理的微纳米气泡水溶解氧质量浓度能够使土壤中形成一个湿度和氧气适宜的条件, 此时土壤中微生物和紫花苜蓿根系活力最大, 能够最大限度地促进根际土壤有机质向营养物质的转化和根系的有氧呼吸作用, 促进根系对营养物质的吸收。

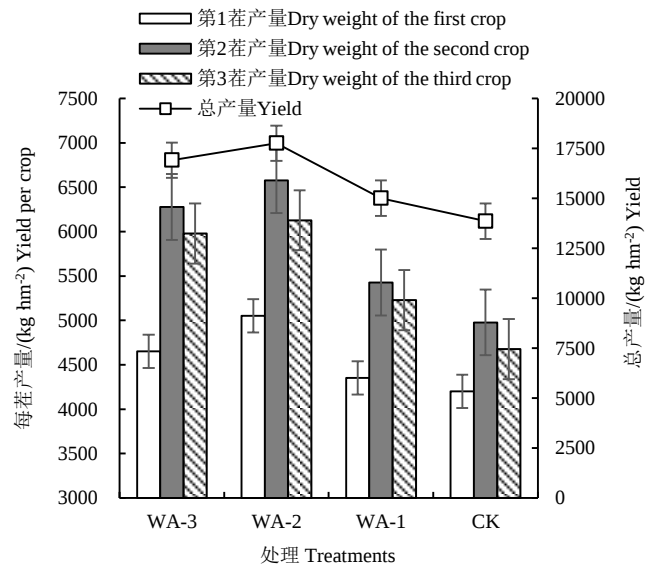


图 5 微纳米气泡水地下滴灌紫花苜蓿干质量

Fig.5 Yield of alfalfa under subsurface drip irrigation with micro-nano bubble water

## 3 讨论

作物根际土壤呼吸是土壤与外界大气进行气体交换的主要途径, 主要包括根际土壤微生物的异氧呼吸作用和作物根系的自养呼吸作用<sup>[18]</sup>, 影响土壤呼吸作用的主要因素有土壤的温湿度及其通气状况<sup>[19]</sup>, 土壤通气状况不佳直接导致作物根系呼吸作用减弱<sup>[20]</sup>, 进而影响作物根系对水分、土壤养分等生长物质的吸

收,外观表现为降低作物产量与品质<sup>[21]</sup>。国内外研究表明,在灌溉过程中通入空气、氧气或含氧物质,能够有效缓解灌水过程中出现的根际土壤缺氧问题,有利于作物根际土壤呼吸以及根系呼吸和发育,促进植株的光合作用,改善作物“长不高、结果少、品质差”等不良现状。土壤氧气扩散速率是最具代表性的土壤通气性指标,也最能反映氧气对作物的有效性。臧明等<sup>[22]</sup>研究表明,增氧灌溉能显著提高土壤氧气扩散速率,且改善效果能持续 24 h 以上。本试验中,微纳米气泡水地下滴灌能明显提高紫花苜蓿根际土壤速效氮、速效磷量,说明微纳米气泡水地下滴灌能够促进根际土壤速效氮、速效磷的合成,且合成速率大于根系吸收的速率,这与赵丰云等<sup>[23]</sup>研究得出加气灌溉能显著提高土壤速效磷量一致;根际土壤速效钾量则降低,这可能是由于根系对速效钾的吸收速率大于土壤速效钾的合成速率,这与 Oo 等<sup>[24]</sup>研究得出加气灌溉能促进植株对养分的吸收一致。

微纳米气泡水地下滴灌将含有微纳米气泡的灌溉水随滴灌带直接输送到作物根际土壤,改善了根际土壤微环境,满足根系生长的需求,有效提高作物生物量积累与产量<sup>[25-26]</sup>。Abuarab 等<sup>[8]</sup>在开罗大学做的玉米试验表明,相较于地下滴灌,加气灌溉下产量分别提高 12.27% (2010 年)和 12.5% (2011 年);Pendergast 等<sup>[27]</sup>研究得出,在地下滴灌灌溉水体中注入 12% 的空气可以提高鹰嘴豆产量 27% (2006 年)和 10% (2007 年);Abuarab 等<sup>[28]</sup>研究得出,加气灌溉改善作物的生长环境,从而提高水分生产率与作物的产量和质量;Li 等<sup>[29]</sup>研究得出,曝气灌溉能显著增加番茄的果实数量、宽度和长度、产量、维生素 C 及番茄红素量;张文正等<sup>[30]</sup>通过对番茄实施微纳米加气灌溉,得出微纳米加气灌溉下番茄株高、茎粗、单株叶面积增长速度较常规灌溉得到显著提高。本试验中微纳米气泡水地下滴灌改善了紫花苜蓿根际土壤微环境的养分状况,增强了土壤通透性,促进了根系有氧呼吸作用与根系对营养物质的吸收,增强了植株的光合作用,从而增加了紫花苜蓿干物质的积累,外在表现为植株高度的增加与产量的提高,这与 Chen 等<sup>[31]</sup>、Lei 等<sup>[32]</sup>研究成果一致。

## 4 结 论

1) 微纳米气泡水地下滴灌能明显提高紫花苜蓿根际土壤速效氮、速效磷量,降低速效钾量;随着生育期的推进,土壤速效氮量呈下降趋势,即速效氮量表现为返青期>拔节期>分枝期>开花期,速效磷、速效钾量呈先升高后降低的趋势;随着微纳米气泡水

溶解氧质量浓度的增加,土壤速效氮、速效磷和速效钾量均降低。

2) 微纳米气泡水地下滴灌能够增加紫花苜蓿干草产量。随着微纳米气泡水溶解氧质量浓度的增加,紫花苜蓿干草产量都会呈“报酬递减”现象。当灌水定额为 22.5 mm、微纳米气泡水溶解氧质量浓度为 5.0 mg/L 时,紫花苜蓿干草产量最高可达 17 758.95 kg/hm<sup>2</sup>。

## 参考文献:

- [1] ATKIN O K, EDWARDS E J, LOVEYS B R. Response of root respiration to changes in temperature and its relevance to global warming[J]. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 141-154.
- [2] 汪天, 王素平, 郭世荣, 等. 植物低氧胁迫伤害与适应机理的研究进展[J]. *西北植物学报*, 2006, 26(4): 847-853.  
WANG Tian, WANG Suping, GUO Shirong, et al. Research advances about Hypoxia-stress damage and Hypoxia-stress-adapting mechanism in plants[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, 26(4): 847-853.
- [3] SU N H. Generalisation of various hydrological and environmental transport models using the Fokker-Planck equation[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2004, 19(4): 345-356.
- [4] BHATTARAI S P, HUBER S, MIDMORE D J. Aerated subsurface irrigation water gives growth and yield benefits to zucchini, vegetable soybean and cotton in heavy clay soils[J]. *Annals of Applied Biology*, 2004, 144(3): 285-298.
- [5] NIU W Q, FAN W T, PERSAUD N, et al. Effect of post-irrigation aeration on growth and quality of greenhouse cucumber[J]. *Pedosphere*, 2013, 23(6): 790-798.
- [6] CHEN X M, DHUNGEL J, BHATTARAI S P, et al. Impact of oxygation on soil respiration, yield and water use efficiency of three crop species[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2011, 4(4): 236-248.
- [7] 尹晓霞, 蔡焕杰. 加气灌溉对温室番茄根区土壤环境及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(3): 33-37.  
YIN Xiaoxia, CAI Huanjie. Effects of aeration irrigation on soil environment and yield of tomato in greenhouse[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(3): 33-37.
- [8] 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.
- [9] HUBER S. New Uses for Drip Irrigation—Partial Root Zone Drying and Forced Aeration[D]. Muenchen, Germany: Technische Universitat Munchen, MSc, 2000.
- [10] NIU W Q, GUO Q, ZHOU X B, et al. Effect of aeration and soil water redistribution on the air permeability under subsurface drip irrigation[J].

- Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(3): 815-820.
- [11] 赵丰云, 郁松林, 孙军利, 等. 加气灌溉对温室葡萄生长及不同形态氮素吸收利用影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 228-234.
- ZHAO Fengyun, YU Songlin, SUN Junli, et al. Effect of rhizosphere aeration on growth and aabsorption, distribution and utilization of  $\text{NH}_4^+$ -N and  $\text{NO}_3^-$ -N of red globe grape seedling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 228-234.
- [12] 陈慧, 李亮, 蔡焕杰, 等. 加气条件下土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放对硝化/反硝化细菌数量的响应[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 303-311.
- CHEN Hui, LI Liang, CAI Huanjie, et al. Response of soil  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes to soil nitrifying and denitrifying bacteria under aerated irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 303-311.
- [13] 南茜, 黄修桥, 韩启彪, 等. 两种典型微灌加气装置溶解氧效果试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(4): 59-64.
- NAN Xi, HUANG Xiutiao, HAN Qibiao, et al. Experimental study on oxygen dissolution in two micro-devices for aerated irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(4): 59-64.
- [14] 雷宏军, 王露阳, 潘红卫, 等. 紫茄生长及养分利用对增氧地下滴灌的响应研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 8-14.
- LEI Hongjun, WANG Luyang, PAN Hongwei, et al. The efficacy of oxygenation in improving growth and nutrients use efficiency of greenhouse purple eggplant[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(3): 8-14.
- [15] DU Y D, NIU W Q, GU X B, et al. Crop yield and water use efficiency under aerated irrigation: A meta-analysis[J]. Agricultural Water Management, 2018, 210: 158-164.
- [16] DU Y D, NIU W Q, ZHANG Q, et al. Effects of nitrogen on soil microbial abundance, enzyme activity, and nitrogen use efficiency in greenhouse celery under aerated irrigation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2018, 82(3): 606-613.
- [17] 雷宏军, 杨宏光, 刘欢, 等. 水肥气耦合滴灌番茄地土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放特征及影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 95-104.
- LEI Hongjun, YANG Honguang, LIU Huan, et al. Characteristics and influencing factors of  $\text{N}_2\text{O}$  emission from greenhouse tomato field soil under water-fertilizer-air coupling drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(11): 95-104.
- [18] 肖胜生, 熊永, 段剑, 等. 基于组分区分的南方红壤丘陵土壤呼吸对植被类型转换的响应[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 123-131.
- XIAO Shengsheng, XIONG Yong, DUAN Jian, et al. Responses of soil respiration to vegetation type conversion in south hilly red soil based on main components[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(14): 123-131.
- [19] ORCHARD V A, COOK F J. Relationship between soil respiration and soil moisture[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1983, 15(4): 447-453.
- [20] 雷宏军, 胡世国, 潘红卫, 等. 土壤通气性与加氧灌溉研究进展[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 297-308.
- LEI Hongjun, HU Shiguo, PAN Hongwei, et al. Advancement in research on soil aeration and oxygation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(2): 297-308.
- [21] PENDERGAST L, BHATTARAI S P, MIDMORE D J. Benefits of oxygation of subsurface drip-irrigation water for cotton in a Vertosol[J]. Crop & Pasture Science, 2013, 64(12): 1 171-1 181.
- [22] 臧明, 雷宏军, 潘红卫, 等. 增氧地下滴灌改善土壤通气性促进番茄生长[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 109-118.
- ZANG Ming, LEI Hongjun, PAN Hongwei, et al. Aerated subsurface drip irrigation improving soil aeration and tomato growth[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(23): 109-118.
- [23] 赵丰云, 杨湘, 董明明, 等. 加气灌溉改善干旱区葡萄根际土壤化学特性及细菌群落结构[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 119-126.
- ZHAO Fengyun, YANG Xiang, DONG Mingming, et al. Aeration irrigation improving grape rhizosphere soil chemical properties and bacterial community structure in arid area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(22): 119-126.
- [24] OO A, SUDO S, MATSUURA S, et al. Aerated irrigation and pruning residue biochar on  $\text{N}_2\text{O}$  emission, yield and ion uptake of komatsuna[J]. Horticulturae, 2018, 4(4): 33.
- [25] 朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 等. 加气灌溉对番茄植株生长、产量和果实品质的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 199-211.
- ZHU Yan, CAI Huanjie, SONG Libing, et al. Impacts of oxygation on plant growth, yield and fruit quality of tomato[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 199-211.
- [26] BHATTARAI S P, PENDERGAST L, MIDMORE D J. Root aeration improves yield and water use efficiency of tomato in heavy clay and saline soils[J]. Scientia Horticulturae, 2006, 108(3): 278-288.
- [27] PENDERGAST L, BHATTARAI S P, MIDMORE D J. 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.
- [28] ABUARAB M E, EL-MOGY M M, HASSAN A M, et al. The effects of root aeration and different soil conditioners on the nutritional values, yield, and water productivity of potato in clay loam soil[J]. Agronomy, 2019, 9(8): 418.
- [29] LI Y, NIU W Q, DYCK M, et al. Yields and nutritional of greenhouse tomato in response to different soil aeration volume at two depths of subsurface drip irrigation[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 39307.
- [30] 张文正, 翟国亮, 王晓森, 等. 微纳米加气灌溉对温室番茄生长、产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(10): 24-27.
- ZHANG Wenzheng, ZHAI Guoliang, WANG Xiaosen, et al. Aerating irrigation with mixed nano-micro air bubbles increases growth, yield and quality of greenhouse tomato[J]. Journal of Irrigation and Drainage,

- 2017, 36(10): 24-27.
- [31] CHEN X M, DHUNGEL J, BHATTARAI S P, et al. Impact of oxygenation on soil respiration, yield and water use efficiency of three crop species[J]. Journal of Plant Ecology, 2011, 4(4): 236-248.
- [32] LEI H J, 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.

## Effects of Subsurface Drip Irrigation with Micro-nano Bubble Water on Rhizosphere Soil Nutrients and Yield of Alfalfa

CAO Xuesong<sup>1</sup>, ZHENG Hexiang<sup>1\*</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>, LI Heping<sup>1</sup>, FENG Yayang<sup>2</sup>, YUE Xianghong<sup>3</sup>

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,

Huhhot 010020, China; 2. Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China;

3. Dalate Qi Soil and Water Conservation Work Station, Ordos 014300, China)

**Abstract:** 【Background】 The normal survival of animals cannot be separated from oxygen, and the normal growth and development of plants cannot be separated from oxygen. With oxygen, the plant's root system can maintain normal breathing and exert its function of absorbing nutrients and water. The respiration of crop roots not only supplies energy for plant life activities, but also the intermediate metabolites of respiration provide the necessary raw materials for plant material synthesis. However, flood disasters, high groundwater levels, excessive one-time irrigation, compacted soil, and soilless cultivation can easily make the soil rhizosphere soil or nutrient solution poorly ventilated, and the crop roots and microbial respiration are weakened, leading to crops Hypoxic stress with abnormal respiration and growth. Aerated irrigation skillfully solves the short board shortfall of oxygen in the crop root zone caused by insufficient soil permeability in the crop root zone, making agricultural production more efficient. 【Objective】 This study is to explore the effects of different dissolved oxygen levels on the rhizosphere soil nutrients and yield of alfalfa under the condition of subsurface drip irrigation with micro-nano bubble water and to analyze the quality of dissolved oxygen in micro-nano bubble water suitable for subsurface drip irrigation of alfalfa based on high yield. 【Method】 The field test method was used, with the irrigation quota of 75% FC (where FC is the field water capacity in the soil), and three micro-nano bubbles water dissolved oxygen mass concentration levels (low (1.8 mg/L), medium (5.0 mg/L) and high (8.2 mg/L)) were set. The effects of mass concentration of dissolved oxygen in different micro-nano bubbles on the rhizosphere soil nutrients and yield of alfalfa under subsurface drip irrigation were analyzed. 【Result】 Compared with the non-aerated treatment, subsurface drip irrigation with micro-nano bubble water can increase the available nitrogen in the rhizosphere of alfalfa by 13.18%~65.49%, increase the available phosphorus by 7.02%~31.14%, and reduce the available potassium by 3.34%~15.77%. With the growth period, the content of available nitrogen in the soil showed a downward trend, and the content of available phosphorus and available potassium increased first and then decreased. With the increase of the dissolved oxygen mass concentration in micro-nano bubble water, the content of available nitrogen, available phosphorus and available potassium in the soil decreased. Excessive dissolved oxygen mass concentration in micro-nano bubble water does not utilize the absorption of nutrients by alfalfa root system, thereby inhibiting the plant growth and reducing the yield. When the irrigation quota was 22.5 mm and the dissolved oxygen content of micro-nano bubbles was 5.0 mg/L, the maximum yield of alfalfa hay was 17 758.95 kg/hm<sup>2</sup>. 【Conclusion】 Subsurface drip irrigation with micro-nano bubble water can enhance the permeability of moist bodies in rhizosphere soil, promote the respiration of alfalfa roots and absorption of nutrients, and increase hay production. It is recommended that the concentration of dissolved oxygen in micro-nano bubble water of alfalfa under subsurface drip irrigation is 5.0 mg/L.

**Key words:** aerated irrigation; micro-nano bubble water; subsurface drip irrigation; alfalfa; rhizosphere soil nutrients; yield

责任编辑: 赵宇龙