

微纳米气泡水地下滴灌对紫花苜蓿土壤酶活性与根系脯氨酸的影响

曹雪松¹, 郑和祥¹, 佟长福¹, 李和平¹, 刘瑞春², 郝语新³

(1.水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2.内蒙古自治区鄂尔多斯市杭锦旗防汛抗旱办公室, 内蒙古 鄂尔多斯 017400;

3.晟晨建设有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要:为了探究微纳米气泡水地下滴灌条件下不同溶解氧质量浓度对紫花苜蓿土壤酶活性与根系脯氨酸的影响, 采用田间试验方法, 在地下滴灌灌溉定额相同的条件下设低(WA-1, $1.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、中(WA-2, $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、高(WA-3, $8.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)3个微纳米气泡水溶氧量质量浓度水平和不加气常规灌溉处理(CK), 研究了不同试验处理下紫花苜蓿根际土壤过氧化氢酶、脲酶活性以及根系特征和游离脯氨酸含量的变化。结果表明:微纳米气泡水地下滴灌能明显增加紫花苜蓿根区土壤过氧化氢酶和脲酶活性;在紫花苜蓿不同的生长期, 随着微纳米气泡水溶解氧质量浓度的增加, 土壤过氧化氢酶和脲酶活性呈增大的趋势;相同试验处理条件下, 土壤过氧化氢酶和脲酶活性随着微纳米气泡水地下滴灌次数的增加呈先升后降的趋势;处理WA-3、WA-2、WA-1的土壤过氧化氢酶活性和脲酶活性最大分别为 20.28 、 19.19 、 $16.92 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 13.98 、 13.17 、 $12.07 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 分别比处理CK($13.82 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $9.63 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)增加 46.74% 、 38.86% 、 22.43% 和 45.17% 、 36.76% 和 25.34% ;微纳米气泡水地下滴灌能降低根系游离脯氨酸含量, 处理WA-2根系游离脯氨酸含量最低($51.01 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$), 相较于处理CK($92 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$), 减少 44.55% 。说明微纳米气泡水地下滴灌能够缓解因长时间地下滴灌导致的土壤通透性减弱的现象, 提高土壤氧气扩散率, 增强土壤酶活性, 促进根系的正常生长发育。

关键词:地下滴灌;微纳米气泡水;紫花苜蓿;土壤酶活性;根系特征;根系脯氨酸含量

中图分类号:S275.6;S541⁺.1 **文献标志码:**A

Effects of subsurface drip irrigation with micro-nano bubbled water on soil enzyme activity and root proline of alfalfa

CAO Xuesong¹, ZHENG Hexiang¹, TONG Changfu¹, LI Heping¹, LIU Ruichun², HAO Yuxin³

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Huhhot, Inner Mongolia 010020, China;

2. Office of Flood Control and Drought Relief in Hangjinqi, Ordos City, Inner Mongolia Autonomous Region, Ordos, Inner Mongolia 017400, China;

3. Mengcheng Construction of the Limited Company, Huhhot, Inner Mongolia 010020, China)

Abstract: In order to explore the effects of different dissolved oxygen levels on soil enzyme activity and root proline of alfalfa under the condition of subsurface drip irrigation with micro-nano bubbled water, field trials were used with the same irrigation quota. Three dissolved oxygen mass concentration levels of micro-nano bubbled water (low: $1.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, WA-1; medium: $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, WA-2; and high: $8.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, WA-3) and unfilled conventional irrigation treatment (CK) were set to study the status of catalase, urease activity, root characteristics, and free proline content in roots of alfalfa rhizosphere under different treatments. The results showed that subsurface drip irrigation with micro-nano bubbled water significantly increased the activity of soil catalase and urease in the root zone of alfalfa. During the period, with increasing the dissolved oxygen mass concentration of micro-nano bubbled water, the activities of soil catalase and urease showed an increasing trend. Under the same experimental treat-

ment conditions, the activities of soil catalase and urease showed a trend of rising first and then decreasing with increasing the number of subsurface drip irrigation with micro-nano bubbled water. The maximum soil catalase and urease activities of WA-3, WA-2, and WA-1 were 20.28, 19.19, 16.92 $\text{ml} \cdot \text{g}^{-1}$ and 13.98, 13.17, 12.07 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively, equivalent to increases of 46.74%, 38.86%, 22.43% and 45.17%, 36.76%, 25.34%, respectively, compared with 13.82 $\text{ml} \cdot \text{g}^{-1}$ and 9.63 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ for CK. Micro-nano bubbled water subsurface drip irrigation reduced the free proline content of roots and treatment with WA-2 had the lowest free proline content at 51.01 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, which was a decrease by 44.55% compared with 92 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ for CK. This shows that subsurface drip irrigation with micro-nano bubbled water alleviated the phenomenon of weakened soil permeability caused by long-term subsurface drip irrigation, improved soil oxygen diffusion rate, enhanced soil enzyme activity, promoted aerobic respiration of root system and the growth and development of the whole plant.

Keywords: subsurface drip irrigation; micro-nano bubbled water; alfalfa; soil enzyme activity; root characteristics; root proline content

地下滴灌作为近些年新兴的灌溉方式,由于其提高了灌溉用水效率,在干旱和半干旱地区的农业生产中备受关注^[1-2]。经过 3~4 a 地下滴灌后,作物根区滴灌带滴头附近土壤的水力学特性及土壤结构等会受到不同程度的影响,加之作物根区土壤多年缺乏翻耕,导致作物根系区土壤板结,限制土壤孔隙中 O_2 的扩散与流动性,不利于作物根区土壤与大气之间的气体交换^[3-4],从而造成作物根区缺氧,根系出现不同程度的黑根现象,甚至死亡。因此,如何提高作物根区土壤 O_2 含量,改善作物根区土壤微环境成为当下研究的热点。

作物根系的正常生长离不开 O_2 ,只有根系土壤保持一定的 O_2 环境,作物根系才能维持正常的呼吸作用,发挥其吸收水分和养分的功能^[5]。微纳米气泡水地下滴灌是在原有地下滴灌系统的基础上,在滴灌系统首部安装特定的微纳米气泡发生器,将空气以微纳米级气泡的形式掺入灌溉水中随地下滴灌系统直接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导致的作物根系缺氧,进而影响根区土壤与根系的正常呼吸。国内外学者对加气灌溉已有初步研究,研究成果均表明作物根区通气有利于改善作物根区土壤 O_2 环境,进而保障根系区土壤及微生物呼吸作用,改善根系区土壤微环境,促进作物根系有氧呼吸的顺利进行,保障作物根系对土壤养分与水分的吸收,促进作物生长、提高作物品质,有效缓解作物根区缺氧的实际问题^[6-12]。陈慧等^[13]研究表明加气灌溉增加了平均 2.1% 的土壤硝化细菌数量,减少了平均 9.7% 的土壤反硝化细菌数量;雷宏军等^[14-15]研究表明曝气地下滴灌能促进紫茄对养分的吸收,提高水分利用效率与产量,并且可以促进 N_2O 的排放,较不加气处理增加 35.16%;Du 等^[16-17]研究表明加气灌溉

对土壤生物环境产生积极影响的同时可提高土壤 N 利用率。土壤酶作为土壤生态系统的组分之一,为土壤有机体的代谢提供动力,也是生态系统的生物催化剂,其活性的大小在一定程度上反映了所处土壤的理化性质与土壤肥力,在土壤物质循环和能量转化过程中具有重要作用^[18-19]。

作为氧化还原酶类的过氧化氢酶参与土壤腐殖质组分的合成与土壤形成过程,是表征土壤肥力的重要指标之一;作为水解酶类的脲酶主要功能是水解蛋白质、多糖等大分子物质为易被植物根系吸收的小分子物质,对土壤生态系统中的碳、氮循环具有重要作用,是植物氮素营养的直接来源,可用来表征土壤的氮素状况^[20];脯氨酸作为植物体内最重要的渗透调节物质,当植物体受到不同类型的胁迫时,植物体便会通过渗透调节物质的积累达到对逆境的适应反应。已有报道表明,作物根际土壤中过氧化氢酶和脲酶的活性明显高于非根际土壤^[21],且过氧化氢酶和脲酶的活性随土壤深度的增加而逐渐降低^[22-23]。朱爱民等^[24]研究了秋末刈割对紫花苜蓿根颈游离脯氨酸的影响,建议不在秋末敏感期对紫花苜蓿进行刈割。

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,并且微纳米气泡水地下滴灌条件对紫花苜蓿土壤酶活性和根系游离脯氨酸的影响少见报道。本文将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,由于微纳米气泡的比表面积大、自身增压溶解、上升速度慢、吸附性强、稳定性好、表面带电等特性^[25-28],使灌溉水溶解氧

浓度大幅度升高,更加高效地缓解了根区土壤缺氧。因此,为缓解长时间地下滴灌导致的作物根区土壤板结、土壤湿润体通透性减弱及作物出现黑根现象的现实问题,笔者开展了紫花苜蓿微纳米气泡水地下滴灌试验研究,通过对紫花苜蓿根区土壤酶活性与根系脯氨酸等指标的观测,分析微纳米气泡水地下滴灌对紫花苜蓿土壤酶活性与根系脯氨酸的影响,旨在为多年生牧草微纳米气泡水地下滴灌提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于鄂托克前旗(106°31′~108°30′E,37°37′~38°45′N),多年平均风速 2.7 m·s⁻¹;多年平均日照时数 2 957 h;平均相对湿度 49.7%;多年平均气温 8.0℃;多年平均降水与蒸发量分别为 261.0、2 498.1 mm;无霜期平均为 170 d,最大冻土层深 1.55 m。试验区 100 cm 深土壤类型为砂土,土壤机械组成详见表 1。

1.2 试验材料及种植方法

滴灌系统:滴灌带采用内镶贴片式,壁厚 0.4 mm,滴头间距 0.3 m,额定流量 2.0 L·h⁻¹,4 行紫花苜蓿由 1 条滴灌带进行灌水控制,滴灌带埋深 20 cm,行距 60 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,于每茬紫花苜蓿初花期(开花约 30%)进行刈割。该地区第一茬苜蓿于每年 4 月中旬开始返青,第三茬苜蓿于每年 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 个不同加气水平处理和 1 个常规不加气灌溉处理(CK)作为对照。每个试验处理小区的长和宽分别为 50.0 m 和 8.0 m,为了保证试验数据的可重复性,每个试验处理均采取 3 次重复。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 m²,试验布置见图 1。

表 1 试验区 0~100 cm 土层土壤机械组成
Table 1 Soil mechanical composition of 0~100 cm soil layer in the test area

容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	比重 Soil specific gravity	土壤颗粒分布/% 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

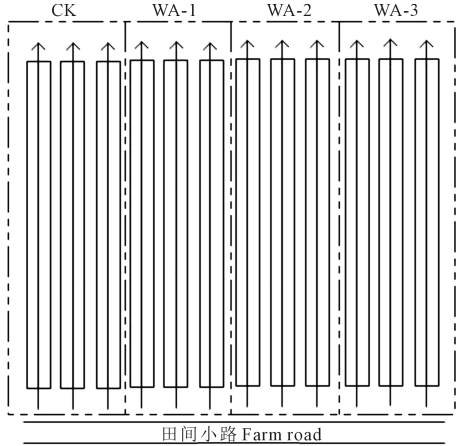
根据前期的研究结果^[29],每个试验小区的灌水定额均为 22.5 mm,灌水日期和灌水次数相同。灌水日期根据 WA-2 处理的适宜含水率下限确定。全年紫花苜蓿第一茬、第二茬、第三茬分别灌水 5、4、5 次,整个紫花苜蓿生长季共灌水 14 次,灌溉定额为 315 mm。由于空气曝气条件下微纳米气泡水溶解氧质量浓度的低氧、饱和状态分别为 1.8、8.2 mg·L⁻¹,故本研究微纳米气泡水溶解氧质量浓度设低、中、高 3 个水平,分别为处理 WA-1(1.8 mg·L⁻¹)、处理 WA-2(5.0 mg·L⁻¹)、处理 WA-3(8.2 mg·L⁻¹),每个处理微纳米气泡水地下滴灌时间均相同,地下滴灌周期为 5~7 d,遇降雨顺延。每个处理和对照均于返青期第一次灌水时施尿素 30 kg·hm⁻²,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

试验区设置有小型农田气象站,主要观测指标有降雨量、相对湿度、日照、气温、风速与风向、气压等气象数据。

地下水观测:利用环刀在试验区取原状土,进行田间持水量室内测定,并与田间的测定结果进行对比,确定了试验区 0~60 cm 土层的田间持水量为 22.86%。采用 HOBO 地下水位自动测定仪(美国)测定试验区地下水水位变化,确定试验区地下水埋深在 1.2~2.0 m。

土壤含水率:每个试验处理地块安装有土壤湿度计,采用烘干法和仪器测定法计算土壤含水率。烘干法使用土钻取土,烘箱烘干;仪器测定采用 HH2 型 TDR 土壤水分测定仪,每根 TDR 管测 3 次,取平均值代表试验小区的土壤含水率。



注:→代表滴灌带,其中箭头表示水流方向。
Note: → represents the drip irrigation belt, where the arrows indicate the direction of flow.

图 1 试验小区布置
Fig.1 Experimental plot layout

紫花苜蓿根系特征:(1)利用 Marquez-Ortiz 法确定根颈直径和分枝数,根颈直径使用游标卡尺测量,分枝数是指从根颈直接长出的分枝数;(2)利用 Johnson 法确定根形态特征:主根直径是指根茎 1 cm 处直径,主根长度是指根茎以下主根至根直径 ≥ 0.1 cm 处的长度;侧根直径是指靠近主根处的直径,侧根数是指离主根 0.5 cm 处的侧根数量,当直径 ≥ 0.1 cm 时计入,当直径 < 0.1 cm 时不计入;根系生物量是指根系的干重。

微纳米气泡水溶解氧质量浓度采用溶解氧测量仪(美国维赛 YSIPro20)测量。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酶活性(过氧化氢酶、脲酶)与根系脯氨酸含量,以紫花苜蓿根系为中心选取土样,土样面积 400 cm²(20 cm $\times$ 20 cm),土样深度 60 cm,混合均匀后作为一个土样。

土壤酶活性与根系脯氨酸测定方法:过氧化氢酶活性测定采用滴定法,其酶活性用每克干土消耗的 0.1 mol $\cdot$ L⁻¹的 KMnO₄溶液数量表示,单位为 ml $\cdot$ g⁻¹;脲酶活性的测定方法为苯酚-次氯酸钠比色法,其酶活性用每克土 1 d 后生成的 NH₃-N 质量表示,单位为 mg $\cdot$ g⁻¹ $\cdot$ d⁻¹;脯氨酸的测定方法采用茚三酮法,单位为 μ mol $\cdot$ g⁻¹。

1.5 数据分析

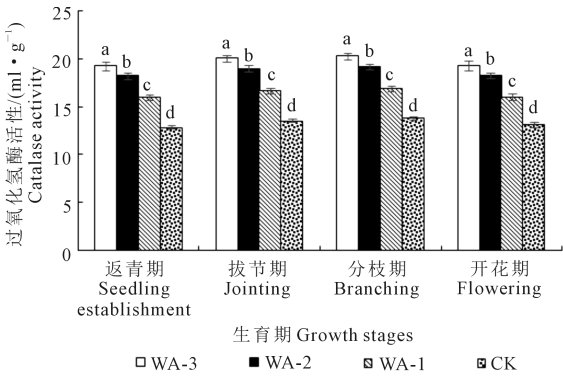
试验数据的分析与绘图软件包括 Excel 2013、OriginPro 8.5 和 SPSS 19.0。

2 结果与分析

2.1 微纳米气泡水地下滴灌对紫花苜蓿根区土壤过氧化氢酶活性的影响

过氧化氢是伴随着土壤微生物与有机物的呼吸作用及生物化学氧化反应的产物,对土壤及其微生物具有一定的毒害作用。过氧化氢酶能促进过氧化氢的分解与氧化,从而降低对土壤和生物体的不利影响。图 2 为不同微纳米气泡水地下滴灌对紫花苜蓿各生育阶段土壤过氧化氢酶活性的影响。从图中可以看出,微纳米气泡水地下滴灌处理土壤中过氧化氢酶活性明显高于处理 CK,处理 WA-3、WA-2 和 WA-1 的 4 个生育期的过氧化氢酶活性均值分别为 19.72、18.67、16.40 ml $\cdot$ g⁻¹,相较于处理 CK 的 13.35 ml $\cdot$ g⁻¹,分别增加 47.72%、39.85%和 22.85%,并且在紫花苜蓿不同生长期,随着微纳米气泡水溶解氧质量浓度的增加,土壤中过氧化氢酶活性呈增大的趋势。

同一试验处理条件下,土壤中过氧化氢酶活性



注:不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平下各处理差异显著,下同。

Note: Different letters indicate the significant difference under the level of $P < 0.05$, the same below.

图 2 微纳米气泡水地下滴灌对紫花苜蓿土壤过氧化氢酶活性的影响

Fig.2 Effect of subsurface drip irrigation with micro-nano bubbled water on alfalfa soil catalase activity

随着微纳米气泡水地下滴灌次数的增加呈先升后降的趋势,在紫花苜蓿分枝期达到最大,处理 WA-3、WA-2 和 WA-1 的土壤过氧化氢酶活性分别为 20.28、19.19、16.92 ml $\cdot$ g⁻¹,相较于处理 CK (13.82 ml $\cdot$ g⁻¹),分别高出 46.74%、38.86%和 22.43%,这是因为紫花苜蓿需在开花初期进行刈割,在分枝期末已经不需要进行灌溉,所以土壤中过氧化氢酶活性在开花期略低于分枝期。

2.2 微纳米气泡水地下滴灌对紫花苜蓿根区土壤脲酶活性的影响

脲酶存在于作物根区土壤大多数细菌及真菌体内,主要作用是分解尿素,产物为氨和二氧化碳,利于作物根系对土壤养分的吸收和利用,所以农业生产中常被用来表征土壤的氮素营养状况。图 3 为微纳米气泡水地下滴灌对紫花苜蓿根区土壤脲酶活性的影响,由图 3 可知,微纳米气泡水地下滴灌处理土壤中脲酶活性明显高于处理 CK,处理 WA-3、WA-2 和 WA-1 的 4 个生育期的过氧化氢酶活性均值分别为 13.56、12.61、11.61 mg $\cdot$ g⁻¹ $\cdot$ d⁻¹,相较于处理 CK (9.03 mg $\cdot$ g⁻¹ $\cdot$ d⁻¹),分别增加 50.17%、39.65%和 28.57%。并且在紫花苜蓿不同的生长期,随着微纳米气泡水溶解氧质量浓度的增加,土壤中脲酶活性呈增大的趋势。

同一试验处理条件下,土壤中脲酶活性随着微纳米气泡水地下滴灌次数的增加呈先升后降的趋势,在紫花苜蓿分枝期达到最大,处理 WA-3、WA-2 和 WA-1 的脲酶活性分别为 13.98、13.17、12.07 mg $\cdot$ g⁻¹ $\cdot$ d⁻¹,相较于处理 CK (9.63 mg $\cdot$ g⁻¹ $\cdot$ d⁻¹),分别高出 45.17%、36.76%和 25.34%,这是因

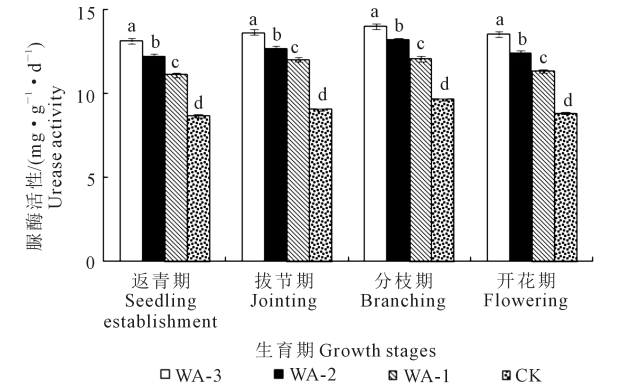


图 3 微纳米气泡水地下滴灌对紫花苜蓿土壤脲酶活性的影响

Fig.3 Effect of subsurface drip irrigation with micro-nano bubbled water on alfalfa soil urease activity

为紫花苜蓿需在开花初期进行刈割,在分枝期末已经不需要进行灌溉,所以土壤中脲酶活性在开花期略低于分枝期。

2.3 微纳米气泡水地下滴灌对紫花苜蓿根系特征的影响

根系是植物吸收水分和养分的主要器官,同时具有合成有机物、支持和固定植株、改变土壤的物理、化学和生物特性以及固持水土等功能。根系特征是牧草水分和养分管理、刈割和放牧利用的基本依据,亦与土壤耕作及作物种植制度等密切相关。表 2 为微纳米气泡水地下滴灌对紫花苜蓿根系特征的影响。从表 2 可知,相同灌溉定额条件下,使用不同灌溉水溶解氧质量浓度的水进行灌溉,紫花苜蓿表现出不同的根系特征。处理 CK、WA-1、WA-2 和 WA-3 的根颈直径分别为 0.937、0.941、0.975 cm 和 0.958 cm,相较于处理 CK,处理 WA-1、WA-2 和 WA-3 分别增大 0.43%、4.06%和 2.24%,微纳米气泡水地下滴灌对根颈直径的影响在 $p<0.05$ 水平下显著。微纳米气泡水地下滴灌对分枝数的影响不显著。微纳米气泡水地下滴灌对主根直径、主根长度、侧根数和根系生物量的影响表现出相似的规律,均是处理 WA-2 最大,处理 CK 的最小,处理 CK 与 WA-1、处理 WA-2 与 WA-3 之间的差异不显著,处理 CK、WA-1 与 WA-2、WA-3 之间在 $p<0.05$ 水平下差异显著;微纳米气泡水地下滴灌对侧根直径的影响为处理 WA-2 的最大,为 0.267 cm,分别比处理 CK、WA-1 和 WA-3 增加 6.07%、5.65%和 4.38%,且与处理 CK、WA-1 和 WA-3 的差异在 $p<0.05$ 水平下显著。以上数据表明,微纳米气泡水地下滴灌能在一定程度上缓解紫花苜蓿根系缺氧的状

表 2 微纳米气泡水地下滴灌对紫花苜蓿根系特征的影响

Table 2 Effect of subsurface drip irrigation with micro-nano bubbled water on root characteristics of alfalfa

根系特征指标 Root characteristic index	处理 Treatment			
	CK	WA-1	WA-2	WA-3
根颈直径/cm Root neck diameter	0.937c	0.941c	0.975a	0.958b
分枝数 Number of branches	6a	6a	6a	6a
主根直径/cm Main root diameter	0.829b	0.832b	1.017a	0.954a
主根长度/cm Main root length	24.4b	24.5b	29.2a	28.7a
侧根直径/cm Lateral root diameter	0.247b	0.248b	0.267a	0.251b
侧根数 Number of side roots	4.8b	5.1b	7.5a	7.1a
根系生物量/g Root biomass	25.27b	25.38b	29.315a	28.617a

况,使滴灌带滴头附近的根系生长旺盛,从而根系比较发达,更利于根系对水肥的高效吸收与利用。

2.4 微纳米气泡水地下滴灌对紫花苜蓿根系脯氨酸含量的影响

脯氨酸广泛在植物体内以游离态存在,主要作用是维持细胞正常的结构以及完成细胞内与细胞间的运输。当植物受到缺氧胁迫时,植物体内蛋白质的合成受到抑制,分解反而被促进,导致植物体通过游离脯氨酸含量的升高来维持其正常的新陈代谢作用。图 4 为微纳米气泡水地下滴灌对紫花苜蓿不同生育期根系游离脯氨酸含量的影响。从图中可以看出,对于处理 CK,随着紫花苜蓿生育期的推进,根系脯氨酸含量呈增大趋势,说明植物体内蛋白质分解被促进,植物根系受到了一定的低氧胁迫,限制了根系有氧呼吸。微纳米气泡水地下滴灌条件下,紫花苜蓿不同生育期根系游离脯氨酸的含量明显低于处理 CK,说明微纳米气泡水地下滴灌能够缓解因长时间地下滴灌导致的土壤通气性减弱的现象,一定程度上促进了蛋白质的合成与根系的有氧呼吸作用,而且随着生育期的推进,同一处理的紫花苜蓿根系脯氨酸含量呈降低趋势,并且同一灌水水平条件下,紫花苜蓿根系脯氨酸含量表现为处理 WA-1>WA-3>WA-2。处理 WA-2 紫花苜蓿根系脯氨酸含量返青期为 $61.33\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,开花期为 $51.01\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,减少 16.83%,而相较于处理 CK 开花期的 $92\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,则减少 44.55%,说明微纳米气泡水地下滴灌能够一定程度上改善长时间地下滴灌造成的根区缺氧的状况,促进根系的呼吸作用。但微纳米气泡水溶解氧质量浓度不宜过大,当超过适宜的微纳米气泡水溶解氧质量浓度后,反而会抑制根系的生长发育,脯氨酸含量增加,说明此时

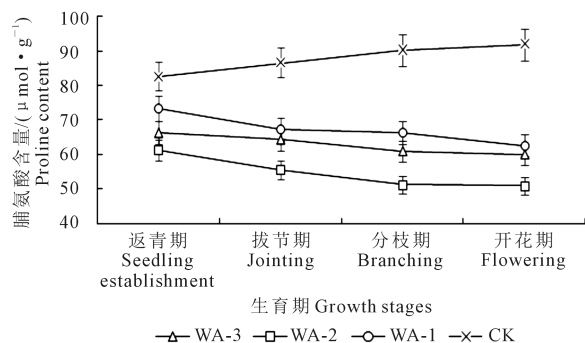


图 4 微纳米气泡水地下滴灌对紫花苜蓿根系脯氨酸含量的影响

Fig.4 Effects of subsurface drip irrigation with micro-nano bubbled water on alfalfa root proline content

微纳米气泡水溶解氧质量浓度已非限制根系生长发育的主要因素。

3 讨 论

土壤是作物生长的基质,作物能否正常生长主要取决于土壤环境。土壤环境因子主要有土壤类型、土壤微环境水分、养分及酶活性等。土壤与土壤微生物的异氧呼吸作用以及作物根系的自养呼吸作用是作物根系和土壤与外界大气进行交换的主要途径^[30],而作物根区土壤的微环境及其通气状况共同影响着土壤呼吸^[31],土壤通气状况不佳直接导致作物根系呼吸作用减弱^[32],进而影响作物根系对土壤微环境养分与水分的吸收与利用,外观表现为作物品质与产量的降低^[33]。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,提高土壤氧气扩散速率^[34],改善土壤通透性,有利于作物根际土壤呼吸,提高土壤酶活性,从而促进作物根系的生长发育,促进植株的光合作用,改善作物长不高、结果少、品质差等现状^[35-36]。Greenway 等^[37]研究结果表明加气灌溉能显著提高土壤微生物活性;朱艳等^[38]研究表明加气灌溉能有效改善土壤通气性,促进根系的呼吸作用。本试验中,微纳米气泡水地下滴灌能够有效提高紫花苜蓿根区土壤过氧化氢酶和脲酶活性,促进了根区土壤及微生物的呼吸作用,这与李元等^[39]研究得出加气灌溉提高土壤酶活性和微生物数量的结论一致。

自然界中诸多逆境因子均能影响或限制植物体的正常生长发育,例如高温、低温、盐渍、干旱、环境污染等。通常情况下,植物遇到胁迫后都会有一个抵御机制,遇到的胁迫不同,植物便产生不同的反应来调节,把胁迫产生的不利影响降到最低。作为植物体内最重要的渗透调节物质,脯氨酸在对抗

胁迫时发挥着关键的作用。Nolte 等^[40]研究表明在细胞质内积累的脯氨酸可作为渗透调节剂或抗冷剂;Voetberg 等^[41]研究表明低水势下脯氨酸积累引起的渗透调节对维持玉米幼根伸长有重要作用;Alia 等^[42]研究表明当绿豆和芥菜受锌胁迫时,植物体内脯氨酸的积累量随自由基的增加而增加;蒋明义等^[43]研究表明氨基酸的积累有利于提高植物抗氧化能力与逆境适应性。本试验中,微纳米气泡水地下滴灌条件下脯氨酸含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缓解长时间地下滴灌造成的根区缺氧的状况,改善土壤通透性,促进根系的呼吸作用,解除根区低氧胁迫,游离脯氨酸含量降低。但微纳米气泡水溶解氧质量浓度不宜过大,当超过适宜的浓度后,反而会抑制根系的生长发育,不利于紫花苜蓿的生长发育。

4 结 论

1)微纳米气泡水地下滴灌能明显提高紫花苜蓿根区土壤过氧化氢酶和脲酶活性;在紫花苜蓿不同的生长期,随着微纳米气泡水溶解氧质量浓度的增加,土壤过氧化氢酶和脲酶活性呈增大的趋势;相同试验处理条件下,土壤过氧化氢酶和脲酶活性随着微纳米气泡水地下滴灌次数的增加呈先升后降的趋势。

2)微纳米气泡水地下滴灌能够缓解因长时间地下滴灌导致的土壤通气性减弱的现象,使紫花苜蓿免受低氧胁迫的危害,根系游离脯氨酸含量明显低于不加气常规灌溉处理,从而促进根系的有氧呼吸作用;但微纳米气泡水溶解氧质量浓度不宜过大,当超过适宜的浓度后,反而会抑制根系的生长发育,不利用紫花苜蓿的生长发育。

参 考 文 献:

- [1] McHugh A D, Bhattarai S, Lotz G, et al. Effects of subsurface drip irrigation rates and furrow irrigation for cotton grown on a vertisol on off-site movement of sediments, nutrients and pesticides[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2008, 28(4):507-519.
- [2] Thompson T L, Doerge T A, Godin R E. Subsurface drip irrigation and fertigation of broccoli: II. Agronomic, economic, and environmental outcomes [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(1): 178-185.
- [3] Barber S A, Katupitiya A, Hickey M, et al. Effects of long-term subsurface drip irrigation on soil structure [C]//Proceedings of the 10th Australian Agronomy Conference. Hobart: The Regional Institute, 2001.
- [4] Loch R J, Grant C G, McKenzie D C, et al. Improving plants' water use efficiency and potential impacts from soil structure change-research investment opportunities [R]. Toowoomba Australia: Cooperative Research Centre Irrigation Futures, Land and Water Australia, 2005.
- [5] 曹雪松, 李和平, 郑和祥, 等. 加气灌溉对根区土壤肥力质量与作

- 物生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(1):183-189.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Chen X, 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Huber S. New uses for drip irrigation-partial root zone drying and forced aeration [D]. Munchen, Germany: Technische Universitat Munchen, MSc, 2000.
- [12] 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.
- [13] 陈慧, 李亮, 蔡焕杰, 等. 加气条件下土壤 N_2O 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.
- [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.
- [15] 雷宏军, 杨宏光, 刘欢, 等. 水肥气耦合滴灌番茄地土壤 N_2O 排放特征及影响因素研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 95-104.
- [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] 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(26):158-164.
- [18] Badiane N N Y, Chotte J, Pate E, et al. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions [J]. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18(3):229-238.
- [19] 王理德, 王方琳, 郭春秀, 等. 土壤酶学研究进展[J]. 土壤, 2016, 48(1): 12-21.
- [20] 韩福贵, 王理德, 王芳琳, 等. 石羊河流域下游退耕地土壤酶活性及土壤肥力因子的相关性 [J]. 土壤通报, 2014, 45(6): 1396-1401.
- [21] Dick R P, Deng S. Multivariate factor analysis of sulfur oxidation and rhodanese activity in soils [J]. *Biogeochemistry*, 1991, 12(2): 87-101.
- [22] 南丽丽, 郭全恩, 曹诗瑜, 等. 疏勒河流域不同植被类型土壤酶活性动态变化[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1):134-139.
- [23] 秦燕, 牛得草, 康健等. 贺兰山西坡不同类型草地土壤酶活性特征[J]. 干旱区研究, 2012, 29(5): 870-877.
- [24] 朱爱民, 张玉霞, 王显国, 等. 秋末刈割对沙地苜蓿冬季根颈抗氧化酶活性及脯氨酸含量的影响[J]. 草地学报, 2018, 26(1): 222-230.
- [25] Ohgaki K, Khanh N Q, Joden Y, et al. Physicochemical approach to nanobubble solutions [J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(3):1296-1300.
- [26] Tasaki T, Wada T, Baba Y, et al. Degradation of surfactants by an integrated nanobubbles/VUV irradiation technique [J]. *Industrial & engineering chemistry research*, 2009, 48(9):4237-4244.
- [27] Bunkin N F, Yurchenko S O, Suyazov N V, et al. Structure of the nanobubble clusters of dissolved air in liquid media [J]. *Journal of biological physics*, 2012, 38(1):121-152.
- [28] Feng W H, Singhal N, Swift S. Drainage mechanism of microbubble dispersion and factors influencing its stability [J]. *Journal of colloid and interface science*, 2009, 337(2):548-554.
- [29] 曹雪松, 李和平, 郑和祥, 等. 地理滴灌对紫花苜蓿耗水, 产量及水分生产率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(5): 256-262.
- [30] 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.
- [31] Orchard V A, Cook F J. Relationship between soil respiration and soil moisture [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1983, 15(4):447-453.
- [32] 雷宏军, 胡世国, 潘红卫, 等. 土壤通气性与加气灌溉研究进展[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 297-308.
- [33] Pendergast L, Bhattarai S P, Midmore D J. Benefits of oxygation of subsurface drip-irrigation water for cotton in a Vertisol [J]. *Crop and Pasture Science*, 2014, 64(12):1171-1181.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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 vertisol [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 217:38-46.
- [37] Greenway H, Armstrong W, Colmer T D. Conditions leading to high CO_2 (> 5 kPa) in waterlogged-flooded soils and possible effects on root growth and metabolism [J]. *Annals of Botany*, 2006, 98(1): 9-32.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] Nolte K D, Hanson A D, Gage D A. Proline accumulation and methylation to proline betaine in Citrus: implications for genetic engineering of stress resistance [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1997, 122(1):8-13.
- [41] Voetberg G S, Sharp R E. Growth of the maize primary root at low water potentials; III. Role of increased proline deposition in osmotic adjustment [J]. *Plant Physiology*, 1991, 96(4):1125-1130.
- [42] Alia K V, Prasad S K, Saradhi P P. Effect of zinc on free radicals and proline in Brassica and Cajanus [J]. *Phytochemistry*, 1995, 39(1):45-47.
- [43] Jiang M Y. Generation of hydroxyl radicals and its relation to cellular oxidative damage in plants subjected to water stress [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1999, 41(3):229-234.