

加气灌溉对温室葡萄生长及不同形态氮素吸收利用影响

赵丰云^{1,2} 郁松林^{1,2} 孙军利^{1,2} 蒋宇^{1,2} 刘怀锋^{1,2} 于坤^{1,2}

(1.石河子大学农学院,石河子 832003; 2.特色果蔬栽培生理与种质资源利用兵团重点实验室,石河子 832003)

摘要:为探讨地下穴贮滴灌条件下根际注气对“红地球”葡萄幼苗生长及不同形态氮素吸收代谢的影响,以2年生“红地球”葡萄幼苗为试验材料,通过地下穴贮滴灌注气技术和¹⁵N示踪技术研究根际注气条件下葡萄对铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)吸收、分配和利用的影响。研究表明,地下穴贮滴灌根际注气可促进葡萄新梢增长,茎粗增加,显著提高葡萄新梢、细根等植株干物质量的积累。在同一灌水周期内,地下穴贮滴灌根际注气可提高叶片叶绿素、净光合速率,延缓植株胁迫,但对植株叶片瞬时水分利用效率具有负面影响。通过氮同位素示踪标记表明,地下穴贮滴灌条件下无论是否注气,葡萄新生部位对硝态氮的征调能力、吸收利用效率均显著高于铵态氮;与不注气相比,注气处理可显著促进新生部位对硝态氮的吸收,抑制铵态氮的吸收利用。地下穴贮滴灌根际注气可促进葡萄的生长,提高叶片光合效率,¹⁵N示踪表明根际注气并未影响葡萄根系对硝态氮的偏好,在地下穴贮滴灌注气条件下氮素形态宜选择硝态氮作为氮肥来源。

关键词:地下穴贮滴灌;根际注气;葡萄;铵态氮;硝态氮;吸收分配
中图分类号: S274 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)01-0228-07

Effect of Rhizosphere Aeration on Growth and Aabsorption, Distribution and Utilization of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N of Red Globe Grape Seedling

ZHAO Fengyun^{1,2} YU Songlin^{1,2} SUN Junli^{1,2} JIANG Yu^{1,2} LIU Huaifeng^{1,2} YU Kun^{1,2}
(1. College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi 832003, China

2. The Key Laboratory of Characteristics of Fruit and Vegetable Cultivation and Utilization of Germplasm Resources of the Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi 832003, China)

Abstract: In order to investigate the effect of rhizosphere aeration on NH₄⁺-N and NO₃⁻-N absorption and metabolism of red globe grape seedlings, the experiment was done by taking 2-year old red globe grape seedling as test material, through subsurface drip irrigation (SDI) with tanks technique and ¹⁵N tracer technique to study effect of the rhizosphere aeration treatment on plant growth and NH₄⁺-N and NO₃⁻-N absorption, distribution and utilization. The results showed that rhizosphere aeration under SDI with tanks could promote the growth of new shoots, increase the stem diameter, and especially significantly increase the dry matter accumulation of new shoots and fine roots. In the same irrigation period, rhizosphere aeration under SDI with tanks increased the SPAD value and net photosynthetic rate of the leaves, but it had negative effects on the instantaneous water use efficiency of the plant leaves. The nitrogen isotope tracer results showed that grape new organs on the NO₃⁻-N Ritchie ability, absorption and utilization efficiency were significantly higher than that of NH₄⁺-N under aeration treatment and without aeration treatment, and the results showed that rhizosphere aeration under SDI with tanks did not affect the nitrate preference of grape plants. The results also showed that gas injection treatment can significantly promote the absorption of nitrate uptake and utilization of new organs, inhibition of ammonium nitrogen, which suggested that nitrate nitrogen should be selected as nitrogen source under the condition of rhizosphere aeration under SDI with tanks.

Key words: subsurface drip irrigation with tanks; aeration in rhizosphere; grape; NH₄⁺-N; NO₃⁻-N; absorption and distribution

收稿日期: 2017-10-21 修回日期: 2017-11-11
基金项目: 国家自然科学基金项目(31360464、31760550)和兵团重大科技计划项目(2016AA002)
作者简介: 赵丰云(1988—),女,博士生,主要从事果树节水灌溉技术及生理生态研究,E-mail: fengyunzhao_grape@163.com
通信作者: 于坤(1985—),男,副教授,主要从事果树逆境生理及分子机制研究,E-mail: yukun409@163.com

0 引言

施肥是农业增产的重要措施,随着农业集约化程度的不断提高,近年来化肥施用量呈逐年上升趋势^[1]。过量施肥,不仅导致肥料利用率下降,增加种植成本,而且对环境造成污染^[2]。因此在提高作物产量与品质的大目标下,研究如何减少化肥施用量、提高化肥利用率具有重要意义。氮素是果树生长的重要养分元素,对果树器官建造、物质代谢、果实产量及品质的形成等都有不可替代的作用^[3]。硝态氮、铵态氮与尿素(酰胺态氮)是植物可利用的氮素形态,也是生产中常用的氮肥形态。不同氮素形态吸收、利用途径的差异可能导致作物品质的不同^[4]。近年研究表明,以合适的比例施用硝态氮、铵态氮能更好地促进作物的生长发育^[5]。杨阳等^[6]认为葡萄以硝铵比 70/30 施用时,总生物量(鲜质量、干质量)、根系和新梢生长量最大。

目前中国设施葡萄面积超过 $1.33 \times 10^5 \text{ hm}^2$,是世界最大的设施葡萄生产国。设施生产的高度集约化、过度灌溉、农业机械碾压、过量施肥、少中耕等因素均导致土壤紧实,造成根区低氧胁迫,限制了设施葡萄产量、品质的提升^[7]。氮素是对土壤通气条件反应最敏感的元素之一,研究表明,植物在根系生长发育、氮素利用过程中存在根际溶氧量和氮素形态的互作效应^[8]。在缺氧条件下,反硝化作用增强,土壤中的氮素损失严重,降低植物对氮素的吸收利用效率^[9-10]。在稻田增氧中发现,根际溶氧量与氮吸收代谢密切相关,同时根际溶氧量可影响土壤中铵硝配比以及氮的淋失与挥发,调控稻田根际溶氧量是解决中低产田氮肥利用效率偏低问题的有效途径之一^[11-12]。

地下滴灌条件下进行加气灌溉是目前耕作模式研究的热点^[13-14]。前人研究表明,增加土壤氧气含量可以改善水肥吸收速率,利于作物生长发育,提高产量^[15]。然而目前关于地下滴灌加气灌溉的研究报道主要集中于番茄^[16]、甜瓜^[17]、玉米^[18]等一年生作物,对葡萄等多年生果树的研究报道还比较少,关于地下滴灌条件下根际注气对葡萄生长发育及不同氮素形态吸收利用的研究尚未见报道。

地下穴贮滴灌“水肥气”一体化技术是根据干旱区林果生产实际需求,为有效解决地表滴灌导致的根系上浮及传统地下滴灌根区浸润范围小、对果树等多年生作物不适用等问题,将滴灌技术与束怀瑞院士提出的“穴贮肥水技术”有机结合而开发出的一项新的节水滴灌方法。前期研究表明,该技术

在促进多年生果树根系下扎、节水、提高果实产量等方面具有一定优势^[19-20]。本研究以 2 年生红提葡萄幼苗为材料,采用¹⁵N 示踪法,通过地下穴贮滴灌“水肥气”一体化装置^[21]实现供水、注气,旨在阐明设施条件下地下穴贮滴灌根际注气对葡萄幼苗生长发育及葡萄不同氮素形态吸收利用、分配的影响规律,以期为地下穴贮滴灌根际注气条件下合理施肥、提高肥料利用率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2016 年 3—12 月在石河子大学农学院实验站温室内完成。供试土壤为黏质壤土,有机质质量比 13.61 g/kg,速效磷质量比 43.6 mg/kg,速效钾质量比 305 mg/kg,硝态氮质量比 44.7 mg/kg,铵态氮质量比 58.4 mg/kg,pH 值 6.56。试验设注气与不注气 2 组,每 9 株葡萄每株施入 1.3 g ¹⁵NH₄NO₃,9 株每株施入 1.3 g NH₄¹⁵NO₃; ¹⁵NH₄NO₃、NH₄¹⁵NO₃ 丰度均为 10.28% (上海化工研究院生产)。试验开始前每株葡萄施入硫酸钾 0.84 g、过磷酸钙 2.28 g 做基肥,同时施入双氰胺 0.02 g (纯氮的 5%) 做氮稳定剂。于 2016 年 5 月 9 日将粗细均匀、长势一致的 2 年生“红地球”葡萄幼苗定植在盆口上径 35 cm、下径 30 cm、高 25 cm 的花盆中,各处理生长条件和栽培管理均保持一致。滴灌系统及注气处理均采用自主开发的地下穴贮滴灌系统(图 1),包括水泵、主管、光伏注气装置(图 2)、开关、地下穴贮装置。于 2016 年 6 月 20 日开始进行注气处理,注气方式为灌后加压注气。通过太阳能电池板发电提供电能,用空气压缩机进行注气,气体压力平衡箱平衡气体压力。根据预试验注气频率设定为一天一次,注气时间持续 20 min。

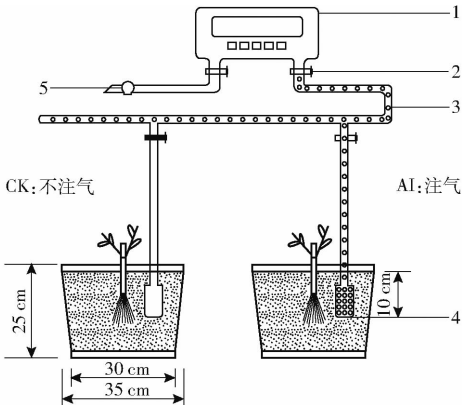


图 1 地下穴贮滴灌水肥气一体化系统
Fig. 1 SDI water-fertilizer-gas integration system
1. 水肥气一体化装置 2. 开关阀 3. 主管 4. 地下穴贮装置
5. 水泵

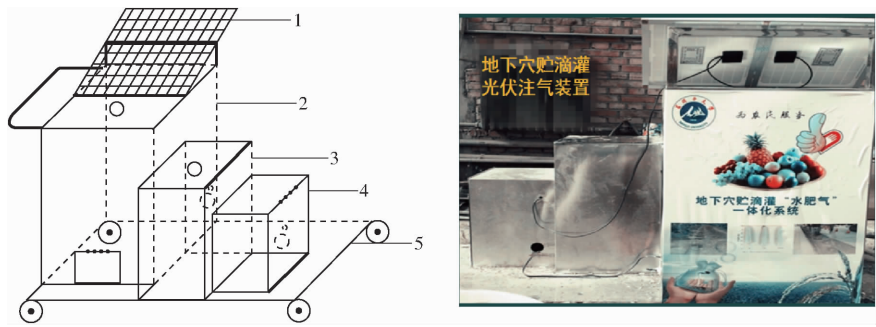


图 2 光伏注气装置

Fig. 2 Photovoltaic gas injection device

1. 太阳能电池板 2. 贮气箱 3. 气体压力平衡箱 4. 电池调控箱 5. 底板

1.2 测定指标与方法

1.2.1 生长指标及植株生物量测定

新梢长度用米尺测量,茎粗用电子游标卡尺测量。植株生物量测定为注气处理 60 d 后,每处理选取 5 株长势一致的葡萄进行破坏性取样,将植株整体分为叶、新梢、老枝、新枝、细根 (< 2 mm)、粗根 (> 2 mm) 6 部分。根系取样采用分层取样法,冲洗时将根系及土体放置在 100 目钢筛上,按照清水、洗涤剂、清水、1% 盐酸、3 次去离子水的处理顺序进行冲洗,随后放入干燥箱于 105℃ 杀青 15 min,75℃ 干燥至恒质量并称量。称量后样品电磨粉碎过 150 目筛,装袋备用。

1.2.2 植株光合性能测定

同一灌水周期后 1、3、5、7、9 d 测定葡萄叶片叶绿素含量、光合参数。叶绿素含量用便携式 SPAD 仪测定,光合参数使用 LI-6400 型光合测定系统测定。测定时选取充分受光、植株新梢向下第 5、6、7 片叶,每处理选取生长一致的植株 5 株(重复 5 次),对叶片净光合速率、气孔导度和瞬时水分利用效率等参数进行测定。测定时采用开放气路,CO₂ 气体采自相对稳定的 2~3 m 的空中,借助人工光源,光强稳定在 1 350 μmol/(m²·s),测定时间为北京时间 11:00—12:00。

1.2.3 植株¹⁵N 标记样品采集与测定

装袋样品进行氮含量及氮丰度测定,全氮用凯氏定氮法测定^[13]。测定¹⁵N 丰度值的仪器为 ZHT-03 型质谱计(北京分析仪器厂),由中国农业科学院原子能利用研究所进行测定。

计算公式为

$$\omega_1 = (m_1 - m_2) / (m_3 - m_2) \times 100\%$$

式中 ω_1 ——¹⁵N 肥分配势(Ndff),%

m_1 ——植物样品中¹⁵N 丰度,%

m_2 ——自然丰度,%

m_3 ——肥料中¹⁵N 丰度,%

$$\omega_2 = \omega_1 m_6 / m_7 \times 100\%$$

式中 ω_2 ——氮肥利用率,%

m_6 ——相关部位全氮量,g

m_7 ——总施肥量,g

1.3 数据处理及统计方法

用 Excel 2013 和 SPSS 19 软件进行数据统计分析,AutoCAD 2007 和 SigmaPlot 13.0 软件作图,多重比较采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 对葡萄新梢长度、茎粗生长速率的影响

由图 3a 可知,在处理前 30 d,新梢长度注气处理与不注气处理之间差异并不显著。在处理后 40、50 d,加气灌溉的新梢长度分别比对照高 28.57%、25.52%,差异均显著。不同处理下葡萄新梢生长量实测值与 Logistic 方程曲线拟合,注气处理拟合为 $y = 8.79 / (1 + 1.09e^{-9.67x})$,不注气处理拟合为 $y = 6.94 / (1 + 4.63e^{-7.86x})$,表明 2 个处理的葡萄新梢生长均符合 Logistic 曲线“S”的规律。

根际注气处理对葡萄茎粗的影响在注气后 40 d 内,处理间未见明显差异(图 3b),在注气后 50、60 d 注气处理的葡萄茎粗分别比不注气处理高 6.42%、8.94%,差异显著。表明根际注气对葡萄茎粗影响主要体现在生长后期,即葡萄新梢停止

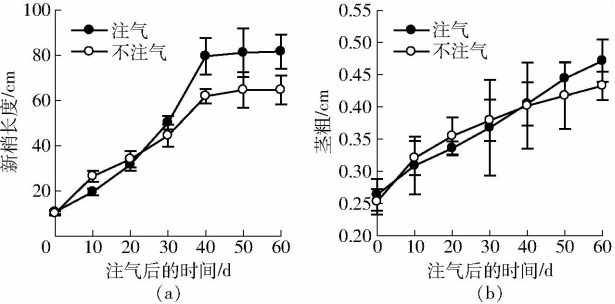


图 3 地下穴贮滴灌根际注气对葡萄新梢长度、茎粗生长速率的影响

Fig. 3 Effects of rhizosphere aeration through SDI with tanks on growth rate of shoot length and stem diameter of grape

快速生长后。

2.2 对葡萄不同部位干物质质量的影响

由表 1 可知,地下穴贮滴灌根际注气处理条件下细根、新枝、新梢的干物质质量均高于不注气处理,其中细根(<2 mm)、新梢干物质质量注气分别

比不注气处理高 20.48%、34.78%,差异极显著;新枝注气处理比不注气处理高 7.80%,差异显著。对于粗根(>2 mm)和老枝注气和 不注气间差异不显著,表明根际注气处理可显著提高“红地球”葡萄新部位的干物质积累,对植株老部位影响不大。

表 1 地下穴贮滴灌根际注气对“红地球”葡萄不同部位干物质质量的影响

Tab.1 Effects of rhizosphere aeration through SDI with tanks on dry matter weight of different structures of ‘Red Globe’ grapes								g
处理	叶	新梢	老枝	新枝	细根(<2 mm)	粗根(>2 mm)	植株	
注气	27.53 ± 1.54 ^a	2.17 ± 0.19 ^a	14.62 ± 0.89 ^a	18.23 ± 1.32 ^a	13.53 ± 1.18 ^a	19.75 ± 1.35 ^a	94.83 ± 7.62 ^a	
不注气	24.67 ± 1.92 ^b	1.61 ± 0.18 ^b	14.89 ± 0.89 ^a	16.91 ± 1.92 ^b	11.23 ± 0.83 ^b	20.03 ± 1.55 ^a	89.34 ± 8.49 ^a	

注:表中数据为 3 次重复的均值 ± 标准误差。每列数据后不同小写字母表示差异达 5% 显著水平,下同。

2.3 对一个灌水周期内的叶绿素及光合特性的影响

同一灌水周期内葡萄叶片叶绿素含量呈逐渐升高的趋势,其中在灌水后 1~3 d,叶绿素含量变化幅度最大,在整个灌水周期注气处理的叶绿素含量均高于不注气处理(图 4a)。叶片净光合速率同一滴灌周期呈先升高后降低的趋势,呈单峰曲线(图 4b)。在灌水后 1 d,注气处理与不注气处理的净光合速率未见明显差异;灌水后 5 d,注气处理比不注气处理的净光合速率高 13.67%,差异显著。在灌水后 5、7 d 注气处理的葡萄叶片气孔导度分别比不注气高 36.84%、60.02%,差异显著,表明注气处理可在同一灌水周期后期提高叶片的气孔导度。由图 4d 可知,在整个灌水周期内,葡萄叶片瞬时水分利用效率在灌水后 1、5、7 d 注气处理均显著低于不注气处

理,表明加气灌溉并未有效提高植株水分利用效率。

2.4 对葡萄不同部位¹⁵N 肥分配势(Ndff)的影响

各部位¹⁵N 占全株¹⁵N 总量的百分率表示肥料氮在树体内的分布及在各部位的迁移规律,反映了植株对¹⁵N 的征调能力。由表 2 可知,对于同一处理,¹⁵N 主要分配在叶中,其次为新枝,表明叶、新枝在各部位中对¹⁵N 的征调能力最强。对于不同处理,注气处理的葡萄新梢、新枝和细根(<2 mm)对铵态氮的征调能力显著低于不注气处理,对硝态氮的征调能力却显著高于不注气处理,表明注气能够提高新生部位对硝态氮的征调能力。

表 2 地下穴贮滴灌根际注气对葡萄不同部位¹⁵N 肥分配势(Ndff)的影响

Tab.2 Effects of rhizosphere aeration by SDI with tanks on distribution rate of ¹⁵ N in different parts of ‘Red Globe’ grapes					%
不同部位	NH ₄ ⁺ -N		NO ₃ ⁻ -N		
	不注气	注气	不注气	注气	
叶	20.46 ± 3.29 ^a	20.59 ± 3.54 ^a	30.70 ± 2.73 ^a	31.51 ± 3.18 ^a	
	26.37 ± 2.72 ^a	14.54 ± 1.38 ^b	34.09 ± 2.87 ^b	36.76 ± 3.43 ^a	
新梢	20.61 ± 2.59 ^a	21.30 ± 2.72 ^b	30.80 ± 4.11 ^a	32.76 ± 4.09 ^a	
新枝	9.35 ± 1.54 ^b	11.11 ± 1.39 ^a	14.19 ± 1.66 ^a	14.31 ± 1.52 ^b	
老枝	12.99 ± 1.25 ^a	13.62 ± 1.74 ^b	17.37 ± 2.73 ^b	19.58 ± 2.43 ^a	
细根(<2 mm)	10.67 ± 0.90 ^a	11.11 ± 1.21 ^a	15.14 ± 1.90 ^a	15.83 ± 1.70 ^a	
粗根(>2 mm)					

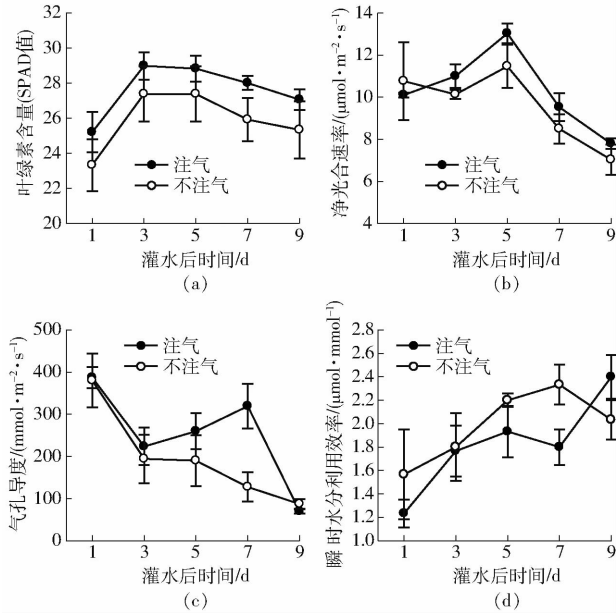


图 4 地下穴贮滴灌根际注气对设施葡萄幼苗叶绿素及光合特性的影响

Fig.4 Effects of rhizosphere aeration through SDI with tanks on SPAD value and photosynthetic characteristics of ‘Red Globe’ grapes

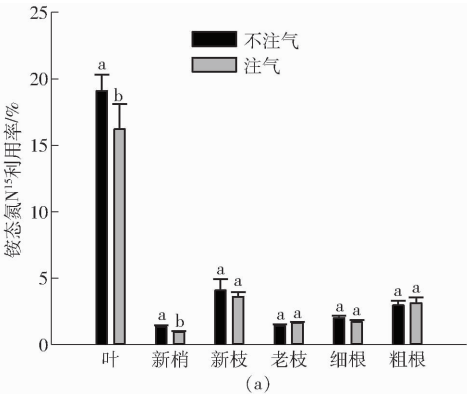
2.5 对不同部位¹⁵N 吸收量的影响

由表 3 可知,对于铵态氮,葡萄各部位的¹⁵N 吸收量由大到小依次表现为叶、新枝、粗根、细根、老枝、新梢;对于硝态氮,葡萄各部位的¹⁵N 吸收量由大到小依次表现为叶、新枝、细根、粗根、新梢、老枝。

表 3 地下穴贮滴灌根际注气对不同部位¹⁵N 吸收量的影响

Tab.3 Effects of rhizosphere aeration by SDI with tanks on ¹⁵N absorption in different parts of ‘Red Globe’ grapes

不同部位	mg			
	NH ₄ ⁺ -N		NO ₃ ⁻ -N	
	不注气	注气	不注气	注气
叶	74.28 ± 10.00 ^a	75.27 ± 11.71 ^a	140.77 ± 2.61 ^a	138.53 ± 3.96 ^a
新梢	6.04 ± 0.59 ^a	4.60 ± 0.83 ^b	15.39 ± 0.21 ^b	16.29 ± 0.14 ^a
新枝	18.55 ± 3.77 ^a	16.30 ± 3.67 ^a	31.44 ± 0.47 ^a	30.49 ± 2.06 ^a
老枝	6.33 ± 1.17 ^a	7.34 ± 1.95 ^a	10.68 ± 1.43 ^a	10.38 ± 1.12 ^a
细根 (<2 mm)	9.04 ± 0.55 ^a	7.64 ± 1.60 ^b	17.23 ± 0.31 ^b	21.19 ± 0.56 ^a
粗根 (>2 mm)	13.48 ± 1.93 ^a	14.14 ± 0.78 ^a	17.10 ± 1.25 ^a	17.64 ± 1.72 ^a



对于注气与不注气处理,注气处理的葡萄新梢、细根 (<2 mm)对铵态氮的吸收量显著低于不注气处理,其他部位间差异不显著;对于硝态氮的吸收,注气处理的葡萄新梢、细根 (<2 mm)对硝态氮的吸收量则显著高于不注气处理,表明地下穴贮滴灌根际注气能够促进新梢、细根对硝态氮的吸收,降低铵碳氮的吸收。

2.6 对不同部位¹⁵N 利用率的影响

图 5 表明在铵态氮利用方面,注气处理葡萄叶片、新梢、新枝、细根的氮素利用率均低于不注气处理,其中叶片氮素利用率比不注气低 15.06%,达到显著水平;在硝态氮利用方面,注气处理葡萄新梢、新枝、细根的氮素利用率分别比不注气处理高 37.36%、11.44%、22.97%,达到显著水平。对于同一处理,葡萄同部位对硝态氮的利用率均高于铵态氮,表明注气条件下葡萄仍然表现出喜硝特性。

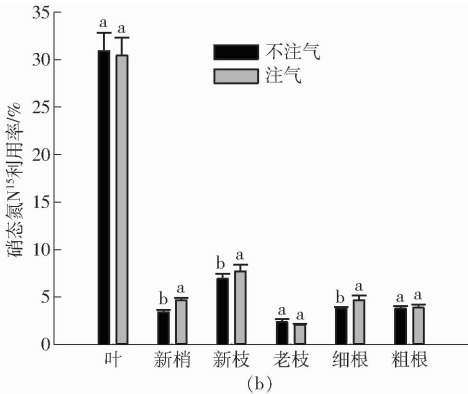


图 5 地下穴贮滴灌根际注气对设施葡萄不同部位¹⁵N 吸收利用率的影响

Fig.5 Effects of rhizosphere aeration by SDI with tanks on utilization rate of ¹⁵N in ‘Red Globe’ grape

3 讨论

大量研究表明,加气灌溉能显著提高作物的产量和质量,尤其是在粘土和盐渍化严重的土壤中^[22-23]。通过地下滴灌可促进玉米生长,单株叶面积增加 1.48 倍,籽粒灌浆茎粗、株高、单株籽粒数较高^[24]。但以往研究主要是传统地下滴灌^[25-26]中进行,地下穴贮滴灌在结构设计上与传统地下滴灌有较大区别,因此验证地下穴贮滴灌加气灌溉的有效性对于地下滴灌技术在果树上的推广具有一定的实践意义。本研究通过对葡萄植株新梢生长、茎粗、干物质质量的分析表明,在地下穴贮滴灌条件下进行灌后注气,葡萄新梢生长速度明显加快,新梢、新枝等葡萄新生部位干物质积累量增加显著,表明地下穴贮滴灌条件下进行灌后注气能够促进植株新生部位生长,与传统地下滴灌条件下进行注气的效果一致^[17]。

根系受到胁迫条件下会促进 ABA、乙烯的产

生,进而促进气孔关闭,叶片光合速率下降,光合同化物积累受阻进而影响作物生长^[27]。本研究发现,地下穴贮滴灌条件下注气通过改变土壤通气环境,提高了同一灌水周期内葡萄的叶绿素含量、叶片净光合速率。叶片气孔导度与气孔开闭有关,也显示植株受胁迫程度,本研究中对灌水后期,叶片气孔导度注气处理显著高于不注气处理,表明通过加气灌溉可有效缓解植株的胁迫,提高叶片光合速率。但对叶片瞬时水分利用效率的分析表明,加气滴灌对提高植株叶片水平上的水分利用效率有负面影响,未表现出单叶水平上的节水效应。

硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)作为作物吸收利用的两种主要形态氮源,低氧下植株 NO₃⁻-N 或者 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 吸收总量是否下降仍存在诸多争议,如低氧环境下大豆对 NO₃⁻-N 的吸收较有氧下降低,而西红柿缺氧环境下对 NO₃⁻-N 吸收有所增加^[28-29]。NIU 等^[30]和李元等^[17]认为根际通气能够增强根区土壤酶活性,改善根区土壤微环

境,提高根系的水肥吸收效率,但目前对加气灌溉条件下不同形态氮素吸收利用的研究还未见报道。氮同位素示踪技术能深入细致研究施入氮肥的去向及在作物体内的分配利用,为作物氮肥运筹管理提供理论依据^[31]。本研究通过氮示踪标记技术表明,无论进行注气处理还是不注气处理,葡萄新生部位对硝态氮的征调能力、吸收利用效率均显著高于铵态氮,表明注气与不注气并未影响葡萄根系对硝态氮的偏好。土壤硝化作用是供给作物生长发育所需氮素的关键过程,硝化作用分为两个阶段完成,即氨氧化和亚硝酸氧化过程。氨氧化(亚硝化)作用是硝化作用的第一个反应步骤,也是限速步骤,是全球氮循环的中心环节^[32]。本研究结果表明,地下穴贮滴灌条件下根际注气较不注气可促进新生部位对硝态氮的吸收,抑制铵态氮的吸收利用,这可能由于加气灌溉提高了根系的吸收活力,促进了 NO₃⁻-N 的吸收。NH₄⁺-N 施入土壤后除部分发生硝化作用形成 NO₃⁻-N 进而被作物吸收外^[33],还有相当部分形成氨,加气则促进了氨的挥发。

地下滴灌条件下进行加气灌溉是一种良好的水气协调供应方式,可有效促进植株生长^[34]、果实产

量增加和品质提高^[18,22],是未来设施农业研究的热点方向之一。但同时通过本研究及前人研究发现,根区加气灌溉抑制氨态氮的吸收、降低叶片瞬时水分利用效率、促进 CO₂、N₂O 等温室气体挥发等^[35]负面问题。因此需对加气灌溉时期、频率、强度等进行更加深入的研究,以发挥这一新型模式的最大效益。

4 结论

(1)地下穴贮滴灌根际注气可促进葡萄新梢增长,茎粗增加,显著提高新梢、细根等植株干物质量的积累。在同一灌水周期内,地下穴贮滴灌根际注气可提高叶片叶绿素含量、净光合速率,延缓植株胁迫,但对植株叶片瞬时水分利用效率具有负面效果。

(2)通过氮同位素示踪标记表明,地下穴贮滴灌条件下无论是否注气,葡萄新生部位对硝态氮的征调能力、吸收利用效率均显著高于铵态氮,表明注气或不注气条件下葡萄根系均对硝态氮具有偏好性。地下穴贮滴灌根际注气较不注气处理可显著促进新生部位对硝态氮的吸收,抑制铵态氮的吸收利用,在注气条件下宜选择硝态氮作为氮肥来源。

参 考 文 献

- 1 LU C, TIAN H. Global nitrogen and phosphorus fertilizer use for agriculture production in the past half century: shifted hot spots and nutrient imbalance[J]. Earth System Science Data, 2017, 9(1):1-33.
- 2 TIAN Y, WANG Q, ZHANG W, et al. Reducing environmental risk of excessively fertilized soils and improving cucumber growth by *Caragana* microphylla-straw compost application in long-term continuous cropping systems [J]. Science of the Total Environment, 2016, 544: 251-261.
- 3 CHOI S T, KIM S C, AHN G H, et al. Effects of different leaf-fruit ratios on uptake and partitioning of N and K in ‘Uenishiwase’ persimmon trees[J]. Scientia Horticulture, 2016, 212: 69-73.
- 4 XING Y, MA X. Effect of different nitrogen forms on tobacco seedling root growth and nitrogen utilization[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2016, 22(4): 52-61.
- 5 YUAN X, ZHANG L, NING N, et al. Photosynthetic physiological response of *radix isatidis* (*Isatis indigotica* Fort.) seedlings to nicosulfuron[J]. Plos One, 2014, 9(8):e105310.
- 6 杨阳,郑秋玲,裴成国,等. 不同硝铵比对霞多丽葡萄幼苗生长和氮素营养的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2):370-375.
YANG Yang, ZHENG Qiuling, PEI Chengguo, et al. Effects of NO₃⁻-N/NH₄⁺-N ratios on Chardonnay grape seedling growth and nitrogen nutrition[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(2): 370-375. (in Chinese)
- 7 SMITH P, HABERL H, POPP A, et al. How much land-based greenhouse gas mitigation can be achieved without compromising food security and environmental goals? [J]. Global Change Biology, 2013, 19:2285-2302.
- 8 JAMPEETONG A, BRIX H. Oxygen stress in *Salvinia natans*: interactive effects of oxygen availability and nitrogen source[J]. Environ Experiment Botany, 2009, 66:153-159.
- 9 CAMERON K C, DI H J, MOIR J L. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review[J]. Annals of Applied Biology, 2013, 162(162): 145-173.
- 10 LIMAMIA M, DIAB H, LOTHIER J. Nitrogen metabolism in plants under low oxygen stress[J]. Planta, 2014, 239(3): 531-541.
- 11 赵霞,徐春梅,王丹英,等. 根际溶氧量对分蘖期水稻生长特性及其氮素代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(18): 3733-3742.
ZHAO Xia, XU Chunmei, WANG Danying, et al. Effect of rhizosphere oxygen on the growth characteristics of rice and its nitrogen metabolism at tillering stage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(18): 3733-3742. (in Chinese)
- 12 胡志华,朱练峰,林育炯,等. 根际氧浓度对水稻产量及其氮素利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2015, 29(4): 382-389.
HU Zhihua, ZHU Lianfeng, LIN Yujiong, et al. Effects of rhizosphere oxygen concentration on rice grain yield and nitrogen utilization[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2015, 29(4): 382-389. (in Chinese)
- 13 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.
- 14 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.
- 15 ITYEL E, BEN-GAL A, SILBERBUSH M, et al. Increased root zone oxygen by a capillary barrier is beneficial to bell pepper irrigated with brackish water in an arid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 131: 108–114.
- 16 朱艳,蔡焕杰,宋利兵,等. 加气灌溉下气候因子和土壤参数对土壤呼吸的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(12): 223–232. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161227&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.027.
- ZHU Yan, CAI Huanjie, SONG Libing, et al. Effects of climatic factors and soil parameters on soil respiration under oxygation conditions[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12): 223–232. (in Chinese)
- 17 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/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(8): 121–129. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150818&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.018.
- LI Yuan, NIU Wenquan, ZHANG Mingzhi, et al. Effects of aeration rhizosphere soil enzyme activities and soil microbes for muskmelon plastic greenhouse[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(8): 121–129. (in Chinese)
- 18 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(11–12): 1171–1181.
- 19 于坤,郁松林,刘怀锋,等. 地下穴贮滴灌系统的设计及其对赤霞珠葡萄生长和水分利用效率的影响[J]. *果树学报*, 2014, 31(3): 386–393.
- YU Kun, YU Songlin, LIU Huaifeng, et al. Design of underground container of reserving fertilizer and water drip irrigation system and its effects on the plant growth and water use efficiency of “Cabernet Sauvignon” Grape[J]. *Journal of Fruit Science*. 2014, 31(3): 386–393. (in Chinese)
- 20 于坤,郁松林,刘怀锋,等. 不同根区交替滴灌方式对赤霞珠葡萄幼苗根冠生长的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 113–120.
- YU Kun, YU Songlin, LIU Huaifeng, et al. Effects of alternative partial root-zone drip irrigation on growth of root and shoot of Carbernet Sauvignon grape seedlings[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(4): 113–120. (in Chinese)
- 21 于坤,赵丰云,郁松林,等. 基于地下穴贮滴灌系统的水肥气一体化设备:201620438446.7[P]. 2016–05–15.
- 22 SHAHIEN M M, ABUARAB M E, MAGDY E. Root aeration improves yield and water use efficiency of irrigated potato in sandy clay loam soil[J]. *International Journal of Advanced Research*, 2014, 2(10): 310–320.
- 23 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 oxygation treatments in vertisols[J]. *Irrigation Science*, 2008, 26: 439–450.
- 24 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.
- 25 LI Y, NIU W, 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: 39307.
- 26 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.
- 27 BAI T, LI C, LI C, et al. Contrasting hypoxia tolerance and adaptation in *Malus* species is linked to differences in stomatal behavior and photosynthesis[J]. *Physiologia Plantarum*, 2013, 147(4): 514–523.
- 28 OLIVEIRA H C, SODEK L. Effect of oxygen deficiency on nitrogen assimilation and amino acid metabolism of soybean root segments[J]. *Amino Acids*, 2013, 44(2): 743–755.
- 29 OLIVEIRA H C, FRESCHI L, SODEK L. Nitrogen metabolism and translocation in soybean plants subjected to root oxygen deficiency[J]. *Plant Physiology & Biochemistry*, 2013, 66(5): 141–149.
- 30 NIU Wenquan, ZHANG Xuan, JIA Zongxia, et al. Effects of rhizosphere ventilation on soil enzyme activities of potted tomato under different soil water stress[J]. *Clean-Soil Air Water*, 2012, 40(3): 225–232.
- 31 丁宁,彭玲,安欣,等. 不同时期施氮矮化苹果对¹⁵N的吸收、分配及利用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(2): 572–578.
- DING Ning, PENG Ling, AN Xin, et al. Absorption, distribution and utilization of dwarf apple trees to ¹⁵N applied in different growth stages[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* 2016, 22(2): 572–578. (in Chinese)
- 32 SHEN J P, ZHANG L M, ZHU Y G. Abundance and composition of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia oxidizing archaea communities of an alkaline sandy loam under different long-term fertilization practices[J]. *Environmental Microbiology*, 2008, 10(6): 1601–1611.
- 33 王旭洋,范兴科. 滴灌条件下施氮时段对土壤氮素分布的影响研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(3): 182–189.
- WANG Xuyang, FAN Xingke. Effect of nitrogen application time on the distribution of soil nitrogen under drip fertigation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(3): 182–189. (in Chinese)
- 34 LI Y, JIA Z, NIU W, et al. Effect of post-infiltration soil aeration at different growth stages on growth and fruit quality of drip-irrigated potted tomato plants (*Solanum lycopersicum*) [J]. *Plos One*, 2015, 10(12): e0143322.
- 35 HOU H, CHEN H, CAI H, et al. CO₂ and N₂O emissions from Lou soils of greenhouse tomato fields under aerated irrigation[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 132: 69–76.