

根区交替灌溉下减施氮肥对葡萄生长、 产量及品质的影响

陈丽楠^{1,2}, 刘秀春¹, 韩晓日², 孙占祥³, 荣传胜¹

(1. 辽宁省果树科学研究所, 辽宁 熊岳 115009; 2. 沈阳农业大学 土地与环境学院, 辽宁 沈阳 110866;

3. 辽宁省农业科学院, 辽宁 沈阳 110161)

摘要: 为了探讨根区交替灌溉与减施氮肥对葡萄产量和品质的影响, 以4年生辽峰葡萄为试材, 设置常规灌溉(CI)和根区交替灌溉(AI)2种灌溉方式, 不施氮(NN, 0 kg/hm² 纯N)、推荐施氮量(RN, 100 kg/hm² 纯N)和习惯施氮量(FN, 200 kg/hm² 纯N)3个氮素水平, 分析不同水氮耦合方式对葡萄新梢生长、树体冗余生长量、光合特性以及果实产量、品质的影响。结果表明, 灌溉方式与施氮量存在显著的互作效应, 以CIFN处理新梢长度最大, 分别比AIRN和AIFN处理提高11.9%和6.8%。同一灌溉方式下, 施氮处理新梢修剪量高于不施氮肥处理($P < 0.01$), 与CI处理相比, AI处理灌溉方式树体新梢修剪量降低21.1%。与CI处理相比, AI处理叶片净光合速率(氮素处理均值)升高, 蒸腾速率降低, 叶片瞬时水分利用效率显著提高, 且AI与RN耦合后叶片瞬时水分利用率最高, 分别比CIRN和CIFN处理提高17.6%和34.0% ($P < 0.05$); AI灌溉方式提高了果实产量、可溶性糖含量和维生素C含量, 且与RN耦合糖酸比显著提高。综合考虑不同水氮耦合处理, 根区交替灌溉与推荐施氮互作可以调控树体生长, 创造良好的光合性状, 提高叶片水分利用效率, 实现节水减肥, 有利于葡萄果实产量和品质的提高。

关键词: 葡萄; 根区交替灌溉; 冗余生长; 瞬时水分利用率; 品质

中图分类号: S663.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2020)02-0123-07

Effects of Nitrogen Reduction under Alternate Root-Zone Irrigation on Grape Growth, Yield and Fruit Quality

CHEN Linan^{1,2}, LIU Xiuchun¹, HAN Xiaori², SUN Zhanxiang³, RONG Chuansheng¹

(1. Liaoning Institute of Pomology, Xiongyue 115009, China; 2. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 3. Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China)

Abstract: The purpose of this study was to discuss the effect on yield and fruit quality of grape by coupling of alternate irrigation method and nitrogen reduction. 4 years old Liaofeng grape (*Vitis vinifera* 'Liaofeng') trees were taken as experimental material. The experiment was conducted with two irrigation methods: alternate partial root-zone drip irrigation (AI) and conventional irrigation (CI), three N applied rates: no N fertilizer applied (NN, 0 kg/ha N), recommended N rate (RN, 100 kg/ha N) and farmer practice N rate (FN, 200 kg/ha N). New shoots growth, redundant growth, leaf photosynthetic characteristics were observed. The results showed that there was a significant interaction between the irrigation methods and N applied rates. The new shoot length of CIFN treatment was the highest, which was 11.9% and 6.8% higher than that of AIRN and AIFN, respectively. At the same irrigation mode, the pruning amount

收稿日期: 2019-08-21

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(201602407)

作者简介: 陈丽楠(1981-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 助理研究员, 博士, 主要从事果树土肥水管理研究。

E-mail: chenlinan81@163.com

通信作者: 孙占祥(1967-), 男, 辽宁新宾人, 研究员, 主要从事旱地耕作制度理论与技术研究。E-mail: sunzx67@163.com

of new shoots of two N applied treatments was higher than NN treatment ($P < 0.01$). The total pruning amount of AI (average of all N treatments) was significantly decreased by 21.1% compared to CI. Pn of AI increased compared to CI, Tr of AI was significantly lower than CI. iWUE of AI increased significantly. And iWUE of AI coupling with RN was highest, which increased by 17.6% and 34.0% compared to CIRN and CIFN. The yield, soluble sugar and Vc contents increased of AI. And sugar-acid ratio of AI coupling with RN was significantly increased. In conclusion, the synergistic effect of alternate root-zone irrigation and recommended nitrogen rate reduced the redundant growth of grape, created good photosynthetic characters, and promoted grape yield and quality.

Key words: Grape; Alternate root-zone irrigation; Redundant growth; iWUE; Quality

辽宁省是我国葡萄的主要产区和优势产区之一,鲜食葡萄面积和产量一直处于全国第 1 位^[1]。葡萄因其生长量大、生长周期长、正常生长结果多,因此需要一定的灌溉条件,现在灌水方式多以传统大水漫灌为主,灌溉水利用率极低,不仅造成了极大的水资源浪费,同时引起果树营养生长旺盛。另外,部分果农为了追求高产,提高经济效益,过量使用化肥,导致果实品质变差,化肥利用率极低,造成化肥资源的严重浪费,环境风险增加。因此,研究节水灌溉和合理施肥制度对提高葡萄园水肥利用效率、改善果实品质等具有重要意义。

近年来,基于根系干旱信号传递与气孔最优调节理论的根区交替灌溉技术被证明是一种高效可行的节水技术^[2]。目前,国内外学者关于根区交替灌溉在促进果树生长、光合特性、水分利用率等方面进行了报道。杜太生等^[3]研究表明,在葡萄根系分区交替滴灌可以调控营养生长与生殖生长,减少生长冗余,提高水分利用效率。DE SOUZA 等^[4]、蔡伟等^[5]研究表明,分根交替灌溉可显著降低气孔开度,降低无效蒸腾,使水分利用效率提高。SHAO 等^[6]研究发现,分根交替灌溉处理在降低气孔导度和蒸腾速率的同时,植株冗余生长和修剪工作量也得到有效降低。马怀宇等^[7]研究表明,苹果半根交替灌溉处理在减少灌水量的同时能维持较高的光合效率。毕彦勇等^[8]研究发现,根系分区交替灌溉处理可抑制油桃新梢生长,果实成熟期较常规灌溉提前,产量未受影响,果实硬度降低,可溶性固形物含量高于常规灌溉,根系分区交替灌溉比常规灌溉节水且水分利用效率提高。ZEGBE 等^[9]研究表明,分根交替灌溉处理苹果可溶性固形物含量比常规灌溉的高。氮素是果树生长发育必需营养元素,不仅需求量较大,而且其吸收利用与水分供应密切相关,灌溉方式和施氮量对果树品质起着决定性作用,在根区交替灌溉方式下,如何合理施肥、提高肥料利用效率和果实品质成为水肥耦合研究的热点,目前交替灌溉与施肥在苹果、黄瓜等作物上已有研究报

道^[10-11],但在葡萄生产中的相关研究尚鲜见报道。鉴于此,选择辽宁省主栽葡萄品种辽峰葡萄为研究对象,研究根区交替灌溉和施氮量耦合对葡萄冗余生长、叶片光合特性以及果实产量和品质的影响,以期对葡萄的优质高效栽培提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

试验于 2018 年在辽宁省果树科学研究所进行。供试果树为 4 年生辽峰葡萄 (*Vitis vinifera* ‘Li-aofeng’),单株双蔓,试验葡萄树在新梢生长期每株两侧蔓各留取 9 个枝条,每侧蔓留 6 串果,以确保枝量和挂果量一致性。株行距为 0.5 m×5.0 m,东西行向,果园病虫害防治、修剪等管理统一进行。果园地势平坦,土壤类型为棕壤土,土壤含有机质 30.68 g/kg、全氮 1.35 g/kg、有效磷 88.6 mg/kg、速效钾 233.9 mg/kg, pH 值 6.86,容重 1.73 g/cm³,田间持水量 33%。

1.2 试验设计

试验设置 2 个灌溉方式:①常规灌溉 (Conventional irrigation, CI),即常规漫灌,采用浇灌模式在树盘内进行充分灌溉,每次灌溉量为 40 L/株;②根区交替灌溉 (Alternate partial root-zone drip irrigation, AI),在距葡萄树基部 10 cm 处的南北两侧铺设 2 条滴灌管,每次灌水时打开一侧滴灌管,另一侧关闭,两侧滴灌管轮流交替灌水,灌水量为 CI 的 1/2,每 20 d 灌溉 1 次,灌溉量采用安装的水表进行计量。每个灌溉方式下设 3 个施氮水平:①不施氮肥 (NN, 0 kg/hm² 纯氮);②推荐施氮量 (RN, 100 kg/hm² 纯氮,即减施氮肥);③习惯施氮量 (FN, 200 kg/hm² 纯氮)。各处理施纯磷 75 kg/hm²、纯钾 150 kg/hm²,于葡萄花后和果实膨大期各施入 50%,氮肥为尿素 (N 46%),磷肥为过磷酸钙 (P₂O₅ 18%),钾肥为硫酸钾 (K₂O 50%)。常规灌溉量和施肥量通过调查农民实际生产确定,优化的氮肥施用量根据土壤养分平衡法公式计算,其中,计划产量为 16 000 kg/hm²。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 新梢生长量 在葡萄萌芽后每株选3个新梢标记,每个处理选择10株求平均值。在新梢摘心前,测定葡萄新梢长度。在葡萄转色期测定新梢粗度。新梢长度采用卷尺测量,新梢粗度用游标卡尺测定第4节位中部位置,精度0.01 mm。

1.3.2 修剪量 整个生育期间共修剪3次,时间分别为6月14日、7月13日和8月5日,对不同时期修剪的新梢分茎秆、叶片、叶柄、卷须等部位称质量,并测含水量,计算全年修剪总量。

1.3.3 光合参数 于果实膨大期在晴朗无云天气9:30—11:00,选取葡萄上部结果枝新梢节间第5片健康叶片(标记),使用Li-6400便携式光合仪测定叶片净光合速率 $[P_n, \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 、蒸腾速率 $[Tr, \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 、气孔导度 $[G_s, \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 等光合参数,并计算瞬时水分利用效率($iWUE$, mmol/mol): $iWUE = P_n/Tr$,每个处理测定5株求平均值。

1.3.4 产量和品质 于9月15日果实成熟期,将每个处理全株果取下称质量,取上中下3串果,将果实混合测定可溶性糖、可滴定酸、维生素C(Vc)含

量等果实品质指标。可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定,可滴定酸含量采用NaOH滴定法测定,Vc含量采用2,6-二氯苯酚吲哚染料滴定法测定^[12]。

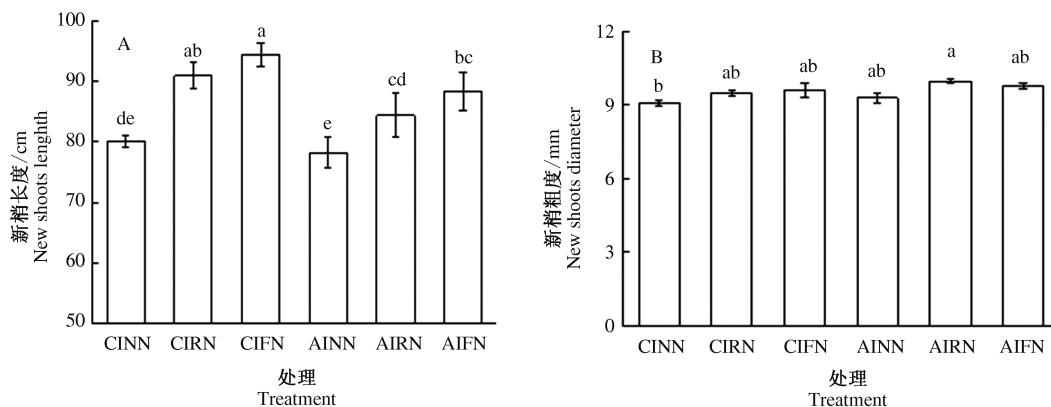
1.4 数据处理

采用Excel 2010进行数据处理,DPS V 7.65软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 根区交替灌溉下减施氮肥对葡萄新梢生长的影响

由图1可知,随着施氮量的增加新梢长度呈现增加趋势。在相同施氮量下,AI处理新梢长度低于CI处理,其中在RN和FN施氮量下2种灌溉方式间新梢长度差异显著($P<0.05$)。从水氮互作来看,以CIFN处理新梢长度最大,分别比AIRN和AIFN处理提高11.9%和6.8%。与CI处理相比,不同施氮量下AI处理新梢粗度增加,灌溉方式和施氮量对新梢粗度的影响均未达显著水平。表明常规漫灌和高施氮量使葡萄新梢旺长,根区交替灌溉在节约50%的灌水量下,与推荐施氮量互作能够调控新梢的生长,降低新梢长度。



不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$),下同
Different small letter mean significant difference at 0.05 level among treatments. The same below

图1 不同灌溉方式与施氮量对葡萄新梢长度(A)和粗度(B)的影响

Fig. 1 Effect of different irrigation methods and N applied rates on new shoots length(A) and diameter(B)

2.2 根区交替灌溉下减施氮肥对葡萄新梢修剪量的影响

修剪量为衡量葡萄营养生长的指标,葡萄生长整个生育期共进行3次修剪,累加得到葡萄树的周年冗余生长量。从表1可知,不同灌溉方式下,施氮处理新梢修剪量高于不施氮肥处理,CI处理下,FN比RN处理总修剪量高6.4%,AI处理下,FN比RN处理总修剪量高18.9%($P<0.05$)。不同部位的修剪量总体以常规灌溉方式下习惯施

氮处理最高。与CI相比,AI处理(氮素处理均值)叶片修剪量降低19.8%,叶柄修剪量降低17.0%,新梢茎秆修剪量降低26.5%,卷须修剪量降低20.8%,树体总修剪量降低21.1%,差异均达显著水平($P<0.05$)。灌溉方式和施氮量对新梢修剪量的影响均达差异极显著水平。表明常规漫灌和高施氮量引起了过量的营养生长,因此带走的养分量也较多,根区交替灌溉处理能够降低葡萄的冗余生长量。

表 1 不同灌溉方式与施氮量对葡萄新梢修剪量的影响
Tab. 1 Effect of different irrigation methods and N applied rates on new shoot pruning quantities

灌溉方式 Irrigation method	施氮水平 N applied rate	叶 Leaf	叶柄 Petiole	茎秆 Stem	卷须 Tendril	总修剪量 Total
CI	NN	75.01±3.40c	5.47±0.39c	19.01±0.38d	0.27±0.01c	99.75±3.57c
	RN	105.81±2.05a	7.59±0.25a	31.77±0.35ab	1.24±0.10a	146.42±1.78ab
	FN	110.98±3.18a	7.39±0.34a	36.10±1.82a	1.37±0.07a	155.84±1.72a
AI	NN	58.85±4.26d	3.79±0.13d	10.72±0.53e	0.23±0.03c	73.59±4.82d
	RN	79.81±1.90bc	6.04±0.28bc	24.57±2.13cd	0.87±0.03b	111.28±3.11c
	FN	95.46±4.26a	7.14±0.16ab	28.56±0.32bc	1.18±0.12ab	132.34±4.78b
项目 Item		显著性 P 值 P value of significance test				
灌溉方式 I		0.003 4 **	0.001 7 **	0.001 4 **	0.008 0 **	0.000 9 **
施氮水平 N		0.002 0 **	0.001 3 **	0.000 1 **	0.000 1 **	0.000 1 **
灌溉×施氮水平 I×N		0.000 1 **	0.000 1 **	0.000 1 **	0.000 1 **	0.000 1 **

注:同栏内同列不同字母表示在 0.05 水平差异显著,下同;*、** 分别表示方差分析显著、极显著。

Note: Different letters in the same column mean significant difference at 0.05 level, the same below; * and ** respectively indicate that the P value reaches significant and extremely significant levels.

2.3 根区交替灌溉下减施氮肥对葡萄叶片光合特性的影响

从图 2 可知,灌溉方式一定下,施氮处理 Pn 显著高于不施氮处理,RN 和 FN 处理叶片 Pn 差异不显著。与 CI 处理相比,AI 处理 Pn 提高,但差异不显著。与 CI 处理相比,AI 处理 Tr 降低 8.9%,Gs 降

低 18.8% ($P<0.05$)。叶片 iWUE 表现为 AIRN 处理最高,分别比 CIRN 和 CIFN 处理提高 17.6% 和 34.0% ($P<0.05$)。表明,根区交替灌溉条件下叶片气孔导度的适度下降,有利于减少奢侈蒸腾,提高水分利用效率,且与 100 kg/hm² 的施氮量耦合有利于葡萄叶片光合能力的提高。

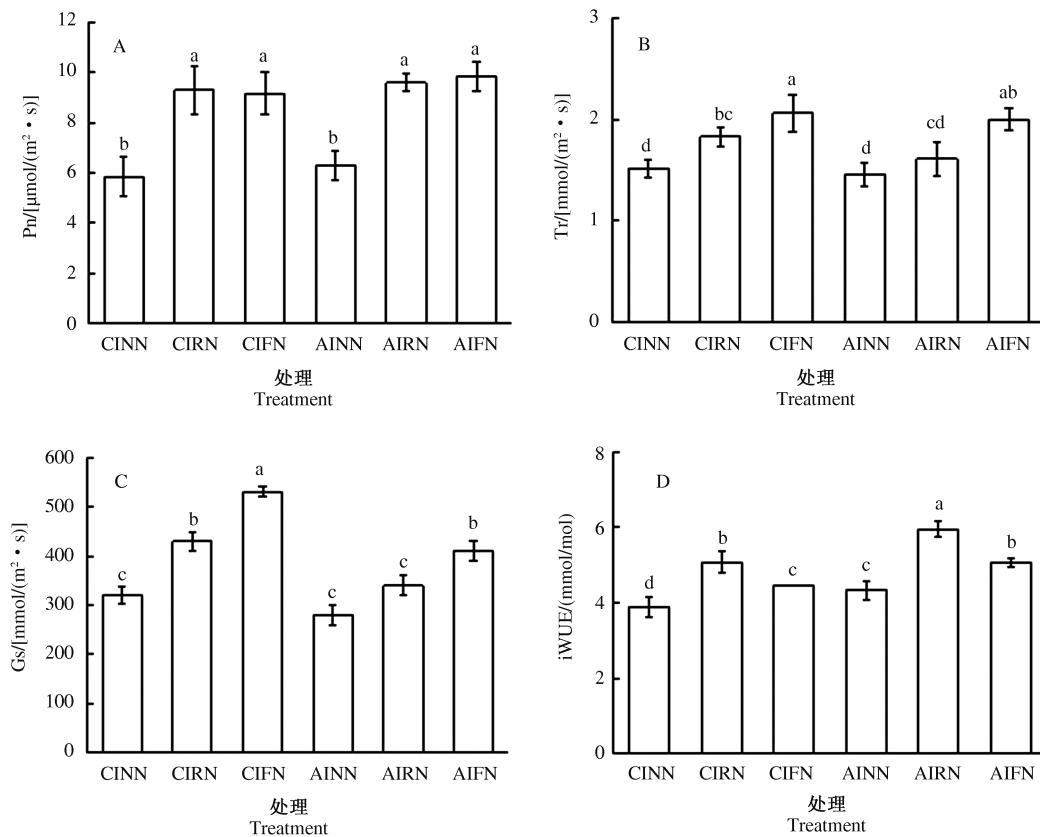


图 2 不同灌溉方式与施氮量对葡萄叶片 Pn(A)、Tr(B)、Gs(C)、iWUE(D) 的影响

Fig. 2 Effect of different irrigation methods and N applied rates on Pn(A), Tr(B), Gs(C), iWUE(D)

2.4 根区交替灌溉下减施氮肥对葡萄产量和品质的影响

如表 2 所示,根区交替灌溉水氮互作可以显著影响葡萄产量和品质。产量表现为施氮处理显著高于不施氮处理,以 AIRN 处理产量最高,分别比 CIRN 和 CIFN 处理提高 6.6% 和 8.6%。相同灌溉方式下,葡萄果实可溶性糖含量均以 RN 处理较高,RN 与 FN 处理差异不显著,显著高于 NN 处理。在 RN 和 FN 施氮量下,AI 处理可溶性糖含量显著高于 CI 处理,从水氮互作来看,以 AIRN 处理可溶性糖含

量最高。在相同施氮量下,AI 处理可滴定酸含量较 CI 处理降低,在相同灌溉模式下,NN 处理葡萄浆果的可滴定酸含量最高,FN 处理葡萄浆果的可滴定酸含量高于 RN 处理。浆果中糖酸比以 AI 灌溉模式下的 RN 最高,糖酸比以 CINN 最低,其次是 CIFN,说明高氮条件下有降低果实糖酸比的风险,从而降低果实的口感。葡萄果实 Vc 含量表现为施氮处理显著高于不施氮处理,相同灌溉方式下 2 个施氮水平间差异不显著,施氮量一定条件下,AI 处理 Vc 含量比 CI 处理提高 7.7% ($P<0.05$)。

表 2 不同灌溉方式与施氮量对葡萄产量和品质的影响

Tab. 2 Effect of different irrigation methods and N applied rates on yield and fruit quality of grape

灌溉方式 Irrigation method	施氮水平 N applied rate	产量/(kg/株) Yield/ (kg/plant)	可溶性总糖含量/% Soluble sugar content	可滴定酸含量/% Titratable acid content	糖酸比 Sugar-acid ratio	Vc 含量/($\times 10^{-2}$ mg/g) Vc content
CI	NN	3.49 \pm 0.17c	15.37 \pm 0.53c	0.63 \pm 0.014a	24.40 \pm 1.36d	4.50 \pm 0.02c
	RN	4.14 \pm 0.20b	16.63 \pm 0.75b	0.54 \pm 0.010cd	30.80 \pm 1.23b	5.16 \pm 0.12b
	FN	4.06 \pm 0.06b	15.90 \pm 0.96bc	0.58 \pm 0.035bc	27.41 \pm 1.27c	5.03 \pm 0.04b
AI	NN	3.54 \pm 0.05c	15.53 \pm 0.83c	0.59 \pm 0.026ab	27.66 \pm 1.66c	4.63 \pm 0.12c
	RN	4.41 \pm 0.03a	18.43 \pm 0.75a	0.51 \pm 0.035d	35.97 \pm 1.13a	5.63 \pm 0.06a
	FN	4.37 \pm 0.01ab	18.29 \pm 0.37a	0.53 \pm 0.004d	34.35 \pm 1.51a	5.56 \pm 0.94a

3 结论与讨论

灌水和施氮量是影响作物生长、产量和品质的主要因素,而采取科学合理的灌溉施肥技术是提高水肥利用效率的关键,分根灌溉技术在实现有效节水的同时能够保障作物产量和品质^[13]。与大田作物相比,果树具有较宽大的根系,且采用宽行距种植,果实品质对灌溉调控的响应更敏感,更具有进行根系分区交替灌溉的条件。本试验结果表明,在新梢生长期根系分区交替灌溉处理(氮素处理均值)降低了葡萄新梢长度,减少了整个生育期的修剪量,说明全根区高灌水量条件下,不仅浪费了水分,而且导致新梢生长过旺,并且本研究通过适宜的灌水根域和氮肥施用量互作调控新梢生长达到较优的生长状态,在保证树体良好生长的情况下减少了葡萄的修剪工作量,实现养分带走量的减少。

许多研究证实,果树进行分区交替灌溉能够使植株蒸腾耗水有效减少,促进了果树叶片的光合作用^[14-16],但是,根区交替灌溉需要在合理施肥的前提下才能取得较好的效果。本试验中,根系分区交替灌溉处理降低了葡萄叶片蒸腾速率和气孔导度,提高了叶片水分利用效率,在常规漫灌+高氮量下净光合速率降低($P>0.05$),表明常规漫灌和过量氮

肥供应不利于光合物质生产,而根区交替灌溉与推荐施氮量耦合有利于葡萄叶片光合能力的提高。

果实生长期是果实产量和品质对水分胁迫反应的敏感时期。一些研究发现,分区灌溉对产量影响不显著,品质显著提高^[17-18],也有研究表明,分区灌溉施肥处理的产量、品质均显著高于不分区灌溉施肥^[15]。相关研究表明,氮素过量还会引起果树枝条生长过旺,果实着色差,果实品质变差^[19-20]。本研究在根区交替灌溉的条件下,减少氮肥供应提高了葡萄产量和果实糖分的积累量,而过量施氮不利于果实可溶性糖含量提高,可滴定酸含量随氮素施用量和水分供应区域(量)的增加而增加,根区交替灌溉和中等施氮量耦合表现出更高的糖酸比,这与董少康等^[21]在草莓上的研究结果一致。表明在根区交替土壤水分胁迫条件下,适量增加氮肥能够显著提高葡萄的果实品质,在葡萄生产中应控制氮肥的施用量并进行合理的水分调控。

在本试验条件下,减少根系灌溉区域(量)和优化施氮量,能够有效地抑制葡萄新梢旺长,降低葡萄冗余生长量。根系分区灌水调控了气孔行为,降低了蒸腾速率,较大幅度减少了植物体水分散失,但光合速率的变化较小,从而提高了叶片水分利用效率。根区交替灌溉与减量施氮耦合对于葡萄产量和品质

具有积极作用。

参考文献:

- [1] 马丽,赵文东,孙凌俊,等. 辽宁省鲜食葡萄栽培现状[J]. 北方果树,2017(4):45-46.
MA L,ZHAO W D,SUN L J,*et al.* Cultivation status of fresh grapevine in Liaoning province[J]. Northern Fruits, 2017(4):45-46.
- [2] KANG S Z,ZHANG J H. Controlled alternate partial root-zone irrigation: Its physiological consequences and impact on water use efficiency[J]. Journal of Experimental Botany, 2004,55(407):2437-2446.
- [3] 杜太生,康绍忠,夏桂敏,等. 滴灌条件下不同根区交替湿润对葡萄生长和水分利用的影响[J]. 农业工程学报,2005,2(11):51-56.
DU T S,KANG S Z,XIA G M,*et al.* Response of grapevine growth and water use to different partial root-zone drying patterns under drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2005,21(11):43-48.
- [4] DE SOUZA C R,MAROCO J P,DOS SANTOS T P,*et al.* Partial rootzone drying: Regulation of stomatal aperture and carbon as simulation in field-grown grapevines (*Vitis vinifera* cv. Moscatel) [J]. Functional Plant Biology, 2003,30(6):653-662.
- [5] 綦伟,翟衡,厉恩茂,等. 部分根区干旱对不同砧木嫁接葡萄光合作用的影响[J]. 园艺学报,2007,34(5):1081-1086.
QI W,ZHAI H,LI E M,*et al.* Effects of partial root-zone drying on photosynthesis of the grape cultivar 'Malvasia' grafted on different rootstocks [J]. Acta Horticulturae, 2007,34(5):1081-1086.
- [6] SHAO G C,ZHANG Z Y,LIU N. Comparative effects of deficit irrigation(DI) and partial root zone drying(PRD) on soil water distribution, water use, growth and yield in greenhouse grown hot pepper[J]. Scientia Horticulture, 2008,119(1):11-16.
- [7] 马怀宇,吕德国,刘国成,等. 不同灌水方式对‘寒富’苹果叶片光合功能和抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学杂志,2012,31(10):2534-2540.
MA H Y,LÜ D G,LIU G C,*et al.* Effects of different irrigation modes on the photosynthetic function and antioxidant enzyme activities of 'Hanfu' apple leaves[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012,31(10):2534-2540.
- [8] 毕彦勇,高东升,王晓英,等. 根系分区灌溉对设施油桃生长发育、产量及品质的影响[J]. 中国生态农业学报,2005,13(4):88-90.
BI Y Y,GAO D S,WANG X Y,*et al.* Influences of partial root-zone irrigation on the growth and development, yield, and quality of nectarine in greenhouse[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005,13(4):88-90.
- [9] ZEGBE J A, Serna-Pérez A. Partial root-zone drying maintains fruit quality of 'Golden Delicious' apples at harvest and postharvest [J]. Scientia Horticulturae, 2011, 127(3):455-459.
- [10] 张利东,高丽红,张柳霞,等. 交替隔沟灌溉与施氮量对日光温室黄瓜光合作用、生长及产量的影响[J]. 应用生态学报,2011,22(9):2348-2354.
ZHANG L D,GAO L H,ZHANG L X,*et al.* Effects of alternative furrow irrigation and nitrogen application rate on photosynthesis, growth and yield of cucumber in solar greenhouse[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011,22(9):2348-2354.
- [11] 张雯,安贵阳,李翠红. 肥水分区调控对苹果光合作用、生长结果和果实品质的影响[J]. 西北农业学报, 2010,19(6):110-114.
ZHANG W,AN G Y,LI C H,*et al.* Influences of alternating partial root-zone irrigation and fertilization on apple photosynthesis, growth and fruit quality [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2010, 19(6):110-114.
- [12] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,1990.
ZHANG Z L. Experimental guidance on plant physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 1990.
- [13] CASPARI H W,NEAL S,ALSPACH P. Partial root-zone drying: A new deficit irrigation strategy for apple? [J]. Acta Horticulturae, 2004,646:93-100.
- [14] 杨素苗. 灌溉方式对红富士苹果根系水分生理特性影响的研究[D]. 保定:河北农业大学,2011.
YANG S M. The effects of irrigation patterns on root water physiological characteristics of red Fuji apple [D]. Baoding: Hebei Agriculture University, 2011.
- [15] 韩小虎,王雷,王珏馨,等. 分根交替灌溉对桃树¹³C分配和光合能力的影响[J]. 核农学报, 2016, 30

- (6):1218-1226.
- HAN X H, WANG L, WANG Y X, *et al.* Effects of partial root-zone alternative irrigation on distribution of ^{13}C assimilate and photosynthesis capability of peach trees [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Science*, 2016, 30 (6):1218-1226.
- [16] 魏钦平, 刘松忠, 王小伟, 等. 分根交替不同灌水量对苹果生长和叶片生理特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(8):2844-2851.
- WEI Q P, LIU S Z, WANG X W, *et al.* Effects of partial root-zone alternative irrigation on growth and leaf physiological characteristics of apple trees [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8):2844-2851.
- [17] 赵志军, 程福厚, 王庆江. 分区交替灌溉对黄冠梨生长结果和果实品质的影响[J]. *中国果树*, 2008(4):13-16.
- ZHAO Z J, CHENG F H, WANG Q J. Effects of partial root-zone alternative irrigation on growth, bear fruit and fruit quality of crown pear [J]. *China Fruits*, 2008(4):13-16.
- [18] 路超, 王金政, 薛晓敏, 等. 不同灌溉方式对苹果生长发育、产量和品质的影响[J]. *江西农业学报*, 2010, 22(10):36-39.
- LU C, WANG J Z, XUE X M, *et al.* Effects of different irrigation ways on growth and development, yield and quality of apple [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2010, 22 (10):36-39.
- [19] 曾艳娟. 施肥对陕西红富士苹果产量和品质的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2011.
- ZENG Y J. Effect of fertilization on yield and quality of Fuji apple in Shaanxi [D]. Yangling: North West Agriculture and Forestry University, 2011.
- [20] 陈磊, 伍涛, 张绍铃, 等. 丰水梨不同施氮量对果实品质形成及叶片生理特性的影响[J]. *果树学报*, 2010, 27(6):871-876.
- CHEN L, WU T, ZHANG S L, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer on fruit quality and leaf physiological metabolism of Hosui pear [J]. *Journal of Fruit Science*, 2010, 27 (6):871-876.
- [21] 董少康, 高凡, 郭家选, 等. 分根灌溉下水氮耦合对草莓果实品质及产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(5):657-667.
- DONG S K, GAO F, GUO J X, *et al.* Effects of water and nitrogen coupling on strawberry yield and quality under partial root-zone irrigation [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(5):657-667.