

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170938

董少康, 高凡, 郭家选, 沈元月, 张雨桐, 郑然. 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, SHEN Y Y, ZHANG Y T, ZHENG R. 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

分根灌溉下水氮耦合对草莓果实品质及产量的影响*

董少康¹, 高凡^{1,2**}, 郭家选^{1,2**}, 沈元月^{1,2}, 张雨桐¹, 郑然¹

(1. 农业应用新技术北京市重点实验室/北京农学院资源与环境系 北京 102206; 2. 北京林果业生态环境功能提升协同创新中心 北京 102206)

摘要: 本文采用盆栽分根固定干湿灌溉试验研究了水氮耦合对草莓果实品质及产量的影响。试验设置水分和氮肥 2 个因素, 草莓根区设置湿润与干旱(A/B)两个区域, 湿润一侧(A)全生育期内土壤相对含水量均为 80%±5%, 干旱一侧(B)土壤相对含水量设置为 20%±5%(重度水分胁迫)、35%±5%(中度水分胁迫)、50%±5%(轻度水分胁迫)3 个处理水平; 施氮量设置 0.5 g(N)·kg⁻¹(低氮)、0.75 g(N)·kg⁻¹(中氮)、1 g(N)·kg⁻¹(高氮)3 个处理水平, 对照处理(即常规生产模式, CK)A/B 两区域均为 80%±5%土壤相对含水量、中氮[0.75 g(N)·kg⁻¹]水平。研究结果表明: 1)分根干湿灌溉显著减少了草莓全生育期灌溉水量, 提高了草莓的水分利用效率(WUE), 全生育期内干旱一侧(B)土壤相对含水量为 20%±5%、35%±5%和 50%±5%的水分处理总灌溉水量分别为 14.77 L·株⁻¹、16.62 L·株⁻¹和 18.47 L·株⁻¹, 较 CK 处理(24.62 L·株⁻¹)分别减少 40.0%、32.5%和 25.0%; 以中度水分胁迫中氮水平的草莓水分利用效率(WUE)最高, 为 13.55 g·L⁻¹, 较 CK 处理提高 47.1%, 而产量没有明显减少; 耦合分根干湿灌溉和施氮处理, 轻度水分胁迫中氮水平下草莓果实产量最高, 较 CK 处理提高 4.4%。2)从对草莓果实品质影响角度分析, 中氮及中度水分胁迫处理的草莓果实中 Vc 含量、可溶性糖含量、有机酸含量和糖酸比分别比 CK 处理增加 63.3%、12.5%、3.9%和 8.3%。综合考虑不同水氮耦合处理对草莓果实品质、产量、水分利用效率及对农业环境安全的影响, 以湿润一侧(A)保持土壤相对含水量为 80%±5%、干旱一侧(B)保持土壤相对含水量为 35%±5%, 且 0.75 g(N)·kg⁻¹施氮水平为设施草莓生产适宜的水肥管理模式。

关键词: 草莓; 分根灌溉; 施氮量; 水氮耦合; 品质; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S668.4; S275.3 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2018)05-0657-11

Effects of water and nitrogen coupling on strawberry yield and quality under partial root-zone irrigation*

DONG Shaokang¹, GAO Fan^{1,2**}, GUO Jiakuan^{1,2**}, SHEN Yuanyue^{1,2}, ZHANG Yutong¹, ZHENG Ran¹

(1. Beijing Key Laboratory of New Technology in Agricultural Application / Department of Resources and Environment, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China; 2. Beijing Collaborative Innovation Center for Eco-environmental Improvement with Forestry and Fruit Trees, Beijing 102206, China)

Abstract: The effect of water and nitrogen application on efficient utilization of water and fertilizer under partial root-zone irrigation

* 国家自然科学基金项目(31471837)、北京市自然科学基金重点项目(6171001)和科技北京百名领军人才培养计划项目(LJ201612)资助

** 通信作者: 高凡, 主要研究方向为水资源与水环境, E-mail: gaofan@bua.edu.cn; 郭家选, 主要研究方向为农业水资源利用, E-mail: guojiakuanjx@163.com

董少康, 主要研究方向为草莓水肥高效利用及产量与品质调控。E-mail: dskxiwang@163.com

收稿日期: 2017-10-18 接受日期: 2017-12-29

* This study was funded by the National Natural Science Foundation of China (31471837), the Key Project of Beijing Natural Science Foundation (6171001) and the Science and Technology Beijing 100 Leading Talent Training Program (LJ201612).

** Corresponding authors: GAO Fan, E-mail: gaofan@bua.edu.cn; GUO Jiakuan, E-mail: guojiakuanjx@163.com

Received Oct. 18, 2017; accepted Dec. 29, 2017

has attracted the attention of scientists around the globe. In order to improve the quality and yield of strawberry along with the utilization efficiency of water and fertilizer, this study examined the effects of integrated water and nitrogen management on the yield and quality of strawberry under partial root-zone irrigation. The main objective of the study was to provide a scientific basis for highly efficient utilization of water and fertilizer of strawberry. In the experiment, two factors (water and nitrogen) were set up with three levels for each factor. The roots of strawberry were well distributed in two zones — wetting and drying zones (A/B). The relative water content of soil was $80\% \pm 5\%$ in the wetting zone (A). For the drying zone (B), the relative water content was in three levels, which were $20\% \pm 5\%$ (sever water stress, SS), $35\% \pm 5\%$ (moderate water stress, MS) and $50\% \pm 5\%$ (light water stress, LS). At the same time, nitrogen fertilizer was set at 3 levels, which were respectively $0.50 \text{ g(N)·kg}^{-1}$ (lower N, LN), $0.75 \text{ g(N)·kg}^{-1}$ (medium N, MN) and $1.00 \text{ g(N)·kg}^{-1}$ (high N, HN). The two (A and B) zones of control (CK) were $80\% \pm 5\%$ of soil relative water content and medium nitrogen [$0.75 \text{ g(N)·kg}^{-1}$] fertilize rate (i.e., the conventional production mode). Based on the test data, the growth, quality and yield of strawberry under different water and nitrogen conditions were analyzed and evaluated using Principal Component Analysis (CPA) and polynomial fitting. The main findings of the study were as follows. 1) Due to partial root-zone irrigation, water utilization significantly dropped while water use efficiency (WUE) improved during the growth period of strawberry. The rates of irrigation water under SS, MS and LS treatments were respectively 14.77 L, 16.62 L and 18.47 L per plant. Compared with the control treatment (which was 25 L·plant^{-1}), irrigate rates for 3 treatments dropped respectively by 40.0%, 32.5% and 25.0%. Under MSMN treatment, WUE of strawberry was 13.55 g·L^{-1} , 47.1% higher than that under CK treatment; but the yield change was not significant. The yield of strawberry was the highest under LSMN treatment among all treatments, which increased 4.4% over that under CK treatment. 2) The contents of Vc, soluble sugar, organic acid and sugar acid ratio of strawberry fruits under MSMN treatment were respectively 63.32%, 12.48%, 3.90% and 8.31% higher than that under CK treatment. The effects of integrated water and nitrogen management on the yield, quality and WUE of strawberry indicated that the most suitable model of water and nitrogen management for the production of strawberry was $0.75 \text{ g(N)·kg}^{-1}$ nitrogen rate with relative soil water content of $80\% \pm 5\%$ in the wet zone and $35\% \pm 5\%$ in the dry zone (i.e., MSMN).

Keywords: Strawberry; Partial root-zone irrigation; Nitrogen application rate; Water and nitrogen coupling; Quality; Yield; Water use efficiency

我国水资源匮乏严重, 农业生产中化学肥料过量投入, 特别是设施园艺集约化生产区域存在日趋严重的农业水环境恶化问题^[1-2]。草莓(*Fragaria × ananassa* Duch.)是我国主要的设施栽培作物之一, 其总产量和栽培面积均居世界首位^[3], 但生产中存在着严重的水肥资源浪费现象。因此, 急需改变设施草莓生产中大水大肥的粗放管理模式, 提高草莓的水肥利用效率与果实品质。草莓根系浅、持续结果能力强、水肥需求量大, 使其对土壤水分及肥料极为敏感^[4], 土壤含水量过高和过低均会显著影响草莓的生长发育、产量及品质^[5-6]; 同时, 氮肥施用量过多或过少会严重影响草莓的果实产量, 甚至降低草莓的果实品质^[7]。植物根系对环境因素的响应会为地上部输送相关信号并起到生理调控的作用。因此, 基于作物感知缺水的根源信号理论而产生的分根灌溉(partial root-zone irrigation)影响机理受到了国内外研究人员的广泛关注^[8-19]。干旱土壤一侧的植物根系通过感应水分胁迫而产生了脱落酸(ABA)化学信号, 输送到地上部并通过抑制植物叶面积生长及降低气孔导度减少蒸腾耗水; 同时, 湿润土壤一侧的植物根系为植株供给足够的水分以满足植物的生理需水^[11]。分根灌溉技术在显著减少灌溉水量

的同时可以改善果实品质, 促进植物根系的生长发育^[12-14], 使其在大田作物和果树的栽培上得到广泛应用^[15-18]。目前, 关于亏缺灌溉、分根灌溉、氮肥调控分别对草莓生长和果实品质影响的研究已经有较多文献报道^[6,11,19-20], 研究结果表明适度水分亏缺、适宜施氮量以及 1/2 分根灌溉技术不仅可以保证草莓产量, 还可以显著提高草莓果实品质。然而, 前述文献只对水氮调控或分根交替灌溉某一方面开展了研究, 而对于分根灌溉下水氮耦合对草莓果实品质及产量影响的研究少见报道。分根交替灌溉工作量大, 在高密度型作物上应用较差; 而基于分根灌溉的节水机理, 固定分根干湿灌溉的工作量较小, 适用性更强^[21-22]。因此, 本文采用盆栽方法研究了固定分根干湿灌溉下水氮耦合对草莓果实品质及产量的影响机制, 为改善草莓果实品质和提高草莓水肥利用效率, 以及科学制定设施草莓高效节水节肥生产技术提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2016 年 9 月 5 日—2017 年 6 月 20 日在北京农学院校内科研基地日光温室中进行。供试材

料为当地主栽品种‘红颜’,草莓生长发育期间日光温室空气温度为(25±5)℃,空气相对湿度为80%±5%。试验采用盆栽方式,栽培盆内径长宽高分别为38 cm、19.5 cm和20 cm,用隔板将盆等分为A与B两个区域,在A/B两区域分别填入略低于隔板的等量基质,每盆基质总重为4.5 kg,盆内种植1株草莓,移栽时将草莓根系平均分布于隔板两侧。试验基质为草炭:蛭石:珍珠岩:腐熟鸡粪按体积比4:2:2:1混合配制(N 16.3 g·kg⁻¹, P₂O₅ 15.4 g·kg⁻¹, K₂O 8.5 g·kg⁻¹),有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为296.27 g·kg⁻¹、496.12 mg·kg⁻¹、21.07 mg·kg⁻¹和79.27 mg·kg⁻¹,基质饱和体积含水量为50%。

1.2 试验设计

采用盆栽分根灌溉试验进行水氮耦合对草莓生长、果实品质和产量的影响研究。于2016年9月5日开始,遮荫条件下正常灌水缓苗15 d,2016年9月20日开始同时进行水分和氮肥处理,至2017年6月20日结束。草莓根区设置湿润与干旱(A/B)两个区域,湿润一侧(A)全生育期内土壤相对含水量均为80%±5%,干旱一侧(B)全生育期内土壤相对含水量设置为水分轻度胁迫(LS)50%±5%、中度胁迫(MS)35%±5%和重度胁迫(SS)20%±5% 3个处理。根据便携式土壤水分测定仪(EM50型, Decagon, USA)对A/B两侧15 cm深的土壤水分实时监测信息,当土壤相对含水量降至该水胁迫处理的控制下限时进行灌水,至其控制上限时停止灌水。总施氮量设置为低氮(LN)0.5 g(N)·kg⁻¹、中氮(MN)0.75 g(N)·kg⁻¹和高氮(HN)1 g(N)·kg⁻¹ 3个处理。水氮耦合进行2因素3水平随机试验,共9个处理,即水分轻度胁迫低氮(LSLN)、轻度胁迫中氮(LSMN)、轻度胁迫高氮(LSHN)、中度胁迫低氮(MSLN)、中度胁迫中氮(MSMN)、中度胁迫高氮(MSHN)、重度胁迫低氮(SSLN)、重度胁迫中氮(SSMN)、重度胁迫高氮(SSHN),对照处理(CK)A/B两个区域的土壤相对含水量均为80%±5%、施氮量均为中氮[0.75 g(N)·kg⁻¹](即常规生产模式)。草莓分根灌溉下水氮耦合试验处理的土壤相对含水量与施氮量如表1所示,每个处理重复4次。此外,所有处理均施纯磷0.15 g·kg⁻¹和纯钾0.8 g·kg⁻¹,根据草莓生育期的氮磷钾需求量,分别在苗期(2016年9月20日)、始花期(2016年10月20日)和果实膨大期(2016年11月20日)进行3次追肥,每次均为LN 0 g·kg⁻¹, MN 0.25 g·kg⁻¹, HN 0.33 g·kg⁻¹, P 0.05 g·kg⁻¹, K 0.27 g·kg⁻¹,且均匀

施入A/B两侧。尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含P₂O₅ 15%)和硫酸钾(含K₂O 50%)为试验施用肥料,均为颗粒状水溶性固态肥料,施用前使肥料在水中充分溶解,结合灌水均匀施入试验盆栽基质中。

表1 草莓分根灌溉下水氮耦合试验处理
Table 1 Treatments of water and nitrogen coupling on strawberry in partial root-zone irrigation

水分处理 Water treatment	土壤相对含水量 Relative soil water content (%)		氮肥处理 Nitrogen treatment	施氮量 Nitrogen rate [g(N)·kg ⁻¹]
	A 侧 Zone A	B 侧 Zone B		
CK	80	80	CK	0.75
LS	80	50	LN	0.50
MS	80	35	MN	0.75
SS	80	20	HN	1.00

1.3 测定指标与方法

在草莓全生育期内,选择2017年2月14日、4月14日、6月14日9:00—11:00测定草莓的株高、茎粗、叶面积,每个处理随机选择3株草莓进行测定。在测定草莓叶面积时,随机选取5片成龄叶称总重,用直径为1 cm的打孔器将每片叶打孔,将所得5个打孔圆片称重,并根据公式(1)计算叶面积。

$$S=(S' \times M)/(5 \times M') \quad (1)$$

式中: S 为叶面积(cm²), S' 为5个圆片总面积(cm²), M 为5片叶总重(g), M' 为5个圆片总重(g)。

在草莓全生育期内,测量并记录每个处理的成熟果重和数量,最后计算其单株累计产量。同时,随机选取颜色相近且完好的成熟果实,测定草莓果实品质指标。其中,可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定,有机酸含量采用0.05 mol·L⁻¹ NaOH滴定法测定,维生素C含量采用2,6-二氯酚酚滴定法测定,可溶性固形物含量采用0~20%手持式折光仪测定,可溶性蛋白含量采用考马斯-G250染色法测定^[23-24]。

在草莓生育期内,采用EM50土壤含水量监测系统实时监测15 cm深度的土壤体积含水量,记录30 min的平均值;每次灌水均记录灌水量。

在草莓生育期内,于2017年2月16日、4月16日和6月16日,随机采集0~20 cm的适量基质混匀,将所采基质风干、过1 mm筛,用1 mol·L⁻¹ NaOH碱解扩散法测定基质碱解氮含量,每个处理重复测定3次。

在收获草莓第5果序果实后(2017年6月20日)采收草莓整株样品,用清水清洗、晾干后,测量草莓地上生物量鲜重、根长及根鲜重等指标,通过地上部鲜重与根鲜重之比计算根冠比。

草莓的水分利用效率(WUE)(g·L⁻¹)按公式(2)计算:

$$WUE=Y/I \quad (2)$$

式中: Y 为草莓单株产量(g), I 为单株草莓全生育期灌水量(L)

土壤的相对含水量(RWC)(%)按公式(3)计算:

$$RWC=VWC/SVWC \times 100\% \quad (3)$$

式中: VWC 为土壤体积含水量(%); SVWC 为土壤饱和和体积含水量(%)。

1.4 数据处理与统计分析

试验数据采用 SAS(version 9.00, SAS Institute Inc. Cary, NC, USA.)软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 草莓生育期土壤相对含水量与含氮量的变化特征

草莓生育期内, LS、MS、SS和CK处理不同分区(A/B)灌溉处理后, 15 cm深度处土壤的相对含水量分别保持在 $80\% \pm 5\%$ / $50\% \pm 5\%$ 、 $80\% \pm 5\%$ / $35\% \pm 5\%$ 、 $80\% \pm 5\%$ / $20\% \pm 5\%$ 和 $80\% \pm 5\%$ / $80\% \pm 5\%$ 。LS、MS和SS处理的草莓全生育期总灌溉水量分别为 $18.47 \text{ L} \cdot \text{株}^{-1}$ 、 $16.62 \text{ L} \cdot \text{株}^{-1}$ 和 $14.77 \text{ L} \cdot \text{株}^{-1}$, 较CK处理的 $24.62 \text{ L} \cdot \text{株}^{-1}$ 分别减少25.0%、32.5%和40.0%。水氮耦合后, SSMN处理的草莓WUE最高, 达 $15.30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 较CK处理草莓WUE提高了66.1%; 而LSLN处理的草莓WUE最低, 仅为 $6.40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 比CK处理草莓WUE低30.5%; 其他水氮耦合处理的草莓WUE均高于CK处理(表2)。因此, 分根干湿灌溉方式可以显著减少草莓全生育期灌水量, 进而提高草莓WUE。

表 2 不同水氮处理下草莓单株产量及水分利用效率(WUE)
Table 2 Yield per plant and water use efficiency (WUE) of strawberry under different water and nitrogen treatments

处理 Treatment	单株 全生育期灌水量 Irrigation at whole growth period per plant (L)	单株产量 Yield per plant (g)	单株水分 利用效率 Water use effi- ciency ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)
CK	24.62	226.78±9.26a	9.21±0.38d
LSLN	18.47	118.22±4.83d	6.40±0.26e
LSMN	18.47	236.36±9.65a	12.80±0.52b
LSHN	18.47	182.45±7.45b	9.88±0.40d
MSLN	16.62	191.49±7.82b	11.52±0.47c
MSMN	16.62	225.24±9.20a	13.55±0.55b
MSHN	16.62	184.03±7.51b	11.07±0.45c
SSLN	14.77	164.49±6.72c	11.13±0.45c
SSMN	14.77	226.01±9.23a	15.30±0.62a
SSHN	14.77	196.68±8.03b	13.31±0.54b

表中数据为平均值±标准差, 同列不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。Data in the table are mean ± std., different lowercase letters in the same column mean significant differences at 0.05 level.

为研究同一施氮水平下不同水分胁迫处理对土壤氮素残留的影响, 本研究仅对 MN 水平下不同水分胁迫处理的土壤氮素残留情况进行了考察。碱解氮能够反映土壤近期内氮素供应情况, 如图 1 所示, AB 两侧土壤氮素(碱解氮)含量均随时间变化呈下降趋势, 然而, 在不同的草莓生育期, 不同水分胁迫处理的土壤氮素残留有明显区别。

在草莓生育前期(2016年9月—2017年2月中旬), 草莓的总生物量增加较快, 需要吸收大量氮素; 湿润区域(A侧)的土壤氮素残留检测结果显示, LSMN 处理低于CK处理, 而MSMN和SSMN处理均高于CK处理, 这说明LSMN处理促进了湿润区域(A侧)草莓对土壤中氮素的吸收, 而MSMN和SSMN处理抑制了湿润区域(A侧)草莓对土壤中氮素的吸收且达到了显著水平。同样, 干旱区域(B侧)草莓对土壤中氮素的吸收受到了不同程度的抑制, 且MSMN和SSMN处理对氮素吸收的抑制作用达显著水平。该研究结果说明在同一施氮条件下, 不同水分胁迫处理会影响生育前期草莓对氮素的吸收能力。

在草莓生育中期(2017年2月中旬—4月中旬), 草莓果实产量快速增加, 氮素的吸收量也较大; 湿润区域(A侧)土壤氮素残留与CK处理无显著性差异, 而干旱区域(B侧)土壤氮素残留均高于CK处理, LSMN处理的土壤氮素残留高于MSMN和SSMN处理, 且LSMN处理与CK处理相比达显著水平, 该结果表明MSMN和SSMN处理下草莓对氮素的吸收相对较高, 这可能是在补偿水分胁迫所造成的影响。

在草莓生长结束后(2017年6月16日), A/B两区域CK处理的土壤氮素残留为 $(472.6 \pm 25.6) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 湿润区域(A侧)LSMN、MSMN和SSMN处理的土壤氮素残留分别为 $(527.9 \pm 9.4) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(548.0 \pm 13.9) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(531.5 \pm 10.0) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 比CK处理分别高11.7%、16.0%和12.5%, 且与CK处理差异显著; 而LSMN、MSMN和SSMN处理之间没有显著性差异。干旱区域(B侧)LSMN、MSMN和SSMN处理的土壤氮素残留均高于CK处理, 分别高7.2%、13.7%和18.6%, 且LSMN、MSMN和SSMN处理之间有显著性差异。

2.2 分根灌溉下水氮耦合对草莓生长的影响

如图2和表3所示, 分根灌溉下水氮耦合可以显著影响草莓株高、茎粗、叶面积及根系的生长。2017年2月14日、4月14日和6月14日分别测量了不同处理的草莓株高、茎粗、叶面积(图2)。在草莓生育中后期(2017年2月14日至2017年6月14日), 草莓株高

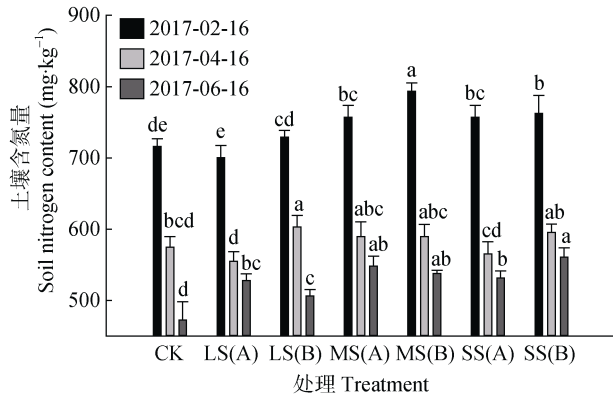


图 1 中氮施肥下不同水分胁迫对土壤碱解氮含量的影响

Fig. 1 Effects of different water stresses on contents of soil alkaline nitrogen with medium nitrogen treatments

同一时间不同字母表示在 0.05 水平差异显著。Different lowercase letters at the same time mean significant differences at 0.05 level.

在 LSLN、SSMN 处理下随时间呈逐渐降低趋势, 在 LSMN、LSHN、MSMN 和 MSHN 处理下随时间呈逐渐增加趋势, 且草莓生长状况较好; 而在 CK、MSLN、SSLN 和 SSHN 处理下先降低后增加趋势。此外, 在中高施氮水平下, 在 LS 和 MS 处理下草莓株高随时间呈逐渐增加趋势。草莓茎粗在 LSLN、SSLN 处理下随时间先增加后降低, 在其他处理下随时间逐渐增加; 草莓茎粗在草莓生育中期明显低于 CK 处理, 而在草莓生育后期 LSHN、MSMN、MSHN 和 SSHN 处理均高于 CK 处理, 但是差异不显著。与 CK 处理相似, MSMN 和 MSHN 处理的草莓叶面积随时间呈逐渐增大趋势, 而 LSHN、MSLN 和 SSLN 处理的草莓叶面积随时间呈逐渐缩小趋势。此外, 在 LN 处理下, 草莓结果末期的草莓叶面积均明显缩小。

在收获草莓第 5 果序果实后测量草莓地上部鲜重、A/B 两侧根鲜重及根长, 并根据测量指标计算根冠比(表 3)。由表 3 可以看出, 水氮因子及水氮耦合对草莓地上部鲜重、A/B 两侧根鲜重及根长和根冠比均具有显著影响。在土壤水分胁迫下, 除 MSMN 和 SSHN 处理地上部鲜重与 CK 间不存在显著性差异外, 其余水氮耦合处理的草莓地上部鲜重均显著低于 CK。不同水氮耦合对草莓 A 侧根鲜重的影响则相反, 除了 LSLN 处理, 其余耦合处理均具有明显的促进作用, 而 B 侧根鲜重只有 LSMN、MSMN 和 MSMN 处理优于 CK 处理; 水分胁迫情况下水氮耦合处理除了 MSLN 处理对干旱区域根生长有促进作用外, 干湿区域的根长均出现不同程度的抑制。水氮耦合在对草莓地上部及根系生长造成影响的基础上, 改变了草莓根冠比的变化。例如 LS 处理下随着施氮量的增加, 草莓根冠比呈现先增加后降低的变化趋势; 而在 MS

和 SS 处理水平下, 则呈现逐渐降低的变化趋势; 并且除 LSLN 处理外, 其余不同水氮耦合处理的根冠比均高于 CK 处理, 其中 SSLN 处理的根冠比最高, 其次为 MSLN 处理, 其根冠比分别为 0.44 ± 0.01 和 0.37 ± 0.01 , 与 CK 处理对比, 分别增加 120%和 85%。如表 3 所示, 差异显著性检验结果表明, 水分胁迫、施氮量以及水氮耦合对草莓地上部鲜重、A/B 两侧根重与根长、根冠比的影响均达到极显著水平。

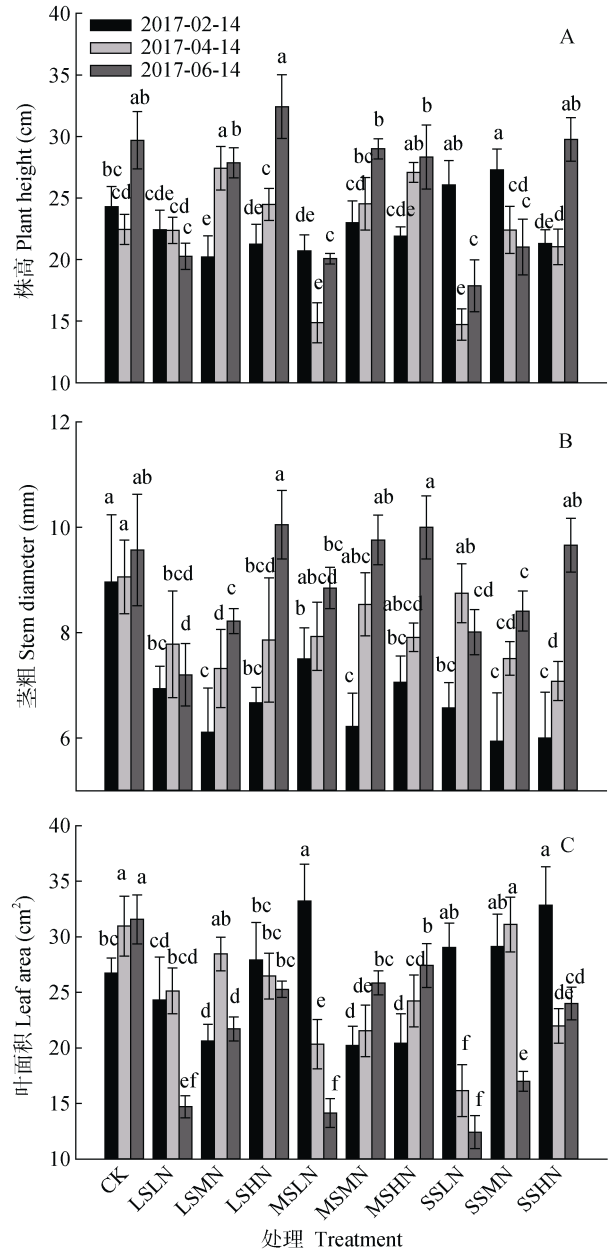


图 2 分根灌溉下水氮耦合对草莓株高(A)、茎粗(B)及叶面积(C)的影响

Fig. 2 Effects of water and nitrogen coupling on the plant height (A), stem diameter (B) and leaf area (C) of strawberry under partial root-zone irrigation

同一调查时期不同字母表示在 0.05 水平差异显著。Different lowercase letters at the same time mean significant differences at 0.05 level.

表 3 分根灌溉下水氮耦合对草莓根系生长的影响
Table 3 Effects of water and nitrogen coupling on root growth of strawberry under partial root-zone irrigation

处理 Treatment	地上部鲜重 Shoot fresh weight (g)	根鲜重 Root fresh weight (g)		根长 Root length (cm)		根冠比 Root-shoot ratio
		A 侧 Zone A	B 侧 Zone B	A 侧 Zone A	B 侧 Zone B	
CK	115.30±3.03a	10.09±0.55gA	12.54±0.32cA	33.63±1.81aA	33.17±1.21bA	0.20±0.01g
LSLN	65.49±2.95e	6.40±0.22hA	5.93±0.25eA	27.53±1.88cA	27.97±0.96cA	0.19±0.00g
LSMN	91.98±3.60c	13.28±1.18fA	14.55±0.98bA	27.57±0.94cA	26.17±1.80cdA	0.30±0.01c
LSHN	100.82±7.07b	13.28±0.34fA	11.76±0.74cB	30.83±0.81bA	31.57±1.13bA	0.25±0.01f
MSLN	77.47±4.40d	17.09±0.44cA	11.82±0.54cB	23.77±0.60eB	27.57±0.94cA	0.37±0.01b
MSMN	115.83±2.95a	16.32±0.44cdA	17.66±0.73aA	23.67±0.76eA	26.17±1.85cdA	0.29±0.01cd
MSHN	106.13±4.38b	15.31±0.38deA	14.01±0.51bB	29.83±1.02bB	36.67±0.99aA	0.28±0.01de
SSLN	53.53±3.17f	14.38±0.35efA	9.14±0.45dB	26.33±0.68cdA	26.27±0.88cdA	0.44±0.01a
SSMN	104.57±6.22b	20.13±1.52bA	9.33±0.42dB	24.57±0.61deA	23.97±1.74dA	0.28±0.00e
SSHN	121.97±4.32a	24.56±0.80aA	4.52±0.15fB	20.57±0.62fB	26.07±1.84cdA	0.24±0.00f
显著性检验 (<i>F</i> 值) Significance test (<i>F</i> value)						
水分因素 Water	20.46**	301.19**	311.53**	57.73**	25.93**	174.90**
氮肥因素 Nitrogen	251.46**	111.91**	173.65**	8.32**	42.80**	164.02**
水分×氮肥 Water × nitrogen	19.22**	55.35**	70.29**	36.35**	10.06**	216.13**

同列不同小写字母或同行不同大写字母表示在 0.05 水平差异显著; *, ** 分别表示 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平影响显著。Different lowercase letters in the same column or different capital letters in the same row indicate significant differences at 0.05 level. *, ** mean significant effects at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively.

2.3 分根灌溉下水氮耦合对草莓果实品质的影响

如表 4 所示, 分根灌溉下水氮耦合可以改变草莓果实的品质。随着施氮量的增加, LS 处理的草莓果实中 Vc、可溶性固形物和有机酸含量呈先增加而后降低的变化趋势, 而糖酸比则以 LN 处理最高, 且不同施氮处理间存在显著性差异; 可溶性糖与可溶性蛋白差异不显著。在 MN 处理下, 随水分胁迫程度的增强, 草莓果实中的 Vc 含量、可溶性糖和有机酸含量逐渐减小且差异显著, 其他品质指标差异不明显。差异显著性检验结果表明, 水分胁迫、施氮量以及水氮耦合对草莓果实中 Vc 含量、糖酸比的影响均达到显著水平, 如 LSLN、SSMN、MSMN 处理的草莓果实糖酸比显著高于 CK 处理, 分别高 26.81%、8.45% 和 8.31%; 而可溶性蛋白主要受水分胁迫影响, 有机酸主要受施氮量的影响。此外, 水氮耦合对可溶性固形物与可溶性糖没有显著影响。

本研究以 Vc(X_1)、可溶性蛋白(X_2)、可溶性固形物(X_3)、可溶性糖(X_4)、有机酸(X_5)和糖酸比(X_6)共 6 个草莓果实品质指标作为评价因子, 采用主成分分析法评价不同水氮耦合处理对草莓果实品质的影响作用。结果表明(表 5), 前 3 个主成分的累计贡献率为 85.95%, 可以较好地代替上述 6 个品质指标来评价与判断草莓综合品质, 由此采用第 1、2、3 主成分作为草莓果实品质评价的综合指标, 获取草莓果实评价因子与前 3 个主成分的关系式和综合评值[公

式(4)~(7), 表 6], 根据对草莓果实品质的综合评价, LSMN 和 MSMN 水氮耦合处理的草莓果实品质综合评值(*F*)分别为 28.64 和 26.44, 是农业生产中提升草莓果实品质的适宜水氮耦合管理模式。

$$F_1 = 0.328507X_1 + 0.330842X_2 + 0.431564X_3 + 0.539257X_4 - 0.163737X_5 + 0.527988X_6 \quad (4)$$

$$F_2 = 0.520883X_1 - 0.278838X_2 + 0.310745X_3 - 0.109882X_4 + 0.668821X_5 - 0.308176X_6 \quad (5)$$

$$F_3 = -0.227463X_1 + 0.819170X_2 - 0.114844X_3 + 0.075859X_4 + 0.461802X_5 - 0.212170X_6 \quad (6)$$

$$F = 0.4684F_1 + 0.2636F_2 + 0.1274F_3 \quad (7)$$

2.4 分根灌溉下水氮耦合对草莓单株产量的影响

从不同水氮耦合处理的草莓最终产量来看, LSLN 处理草莓单株累计产量最低, 为 118.22 g·株⁻¹, 比 CK 处理(产量 226.78 g·株⁻¹)低 47.87%, 而 LSMN、MSMN、SSMN 处理的草莓单株累计产量分别为 236.36 g·株⁻¹、225.24 g·株⁻¹、226.01 g·株⁻¹, 与 CK 处理的产量相近, 但分别节约灌溉水量 24%、32% 和 40%, 同时大幅度降低土壤氮素淋洗。另外, 从草莓单株累计产量(图 3)可以看出, 在相同水分胁迫程度下, 均为 MN 施氮水平下的草莓单株累计产量最高; 在 LN 施氮水平下, LS、MS、SS 及 CK 处理间草莓的单株产量均存在显著性差异; MN 施氮水平下, LS、MS、SS 及 CK 处理间草莓的单株产量差异均不显著; 而在 HN 施氮水平下, LS、MS、SS

表 4 分根灌溉下水氮耦合对草莓果实品质的影响
Table 4 Effects of water and nitrogen coupling on quality of strawberry under partial root-zone irrigation

处理 Treatment	Vc 含量 Vc content [mg(FW)·100g ⁻¹]	可溶性蛋白含量 Soluble protein content [mg(FW)·g ⁻¹]	可溶性固形物 Soluble solids content (%)	可溶性糖含量 Soluble sugar content (%)	有机酸含量 Organic acid content (%)	糖酸比 Sugar acid ratio
CK	47.96±1.75e	0.65±0.02a	10.37±0.21d	5.77±0.02bcd	0.77±0.04cd	7.46±0.38bcd
LSLN	66.81±1.19c	0.67±0.05a	11.17±0.49b	6.76±0.50 a	0.71±0.02e	9.46±0.47a
LSMN	86.19±1.54a	0.66±0.03a	11.80±0.26a	6.70±0.25a	0.90±0.03a	7.46±0.48bcd
LSHN	59.66±1.94d	0.66±0.03a	10.67±0.31cd	6.30±0.82abc	0.82±0.01bc	7.71±0.88bc
MSLN	49.41±3.18e	0.62±0.03ab	10.40±0.10cd	5.47±0.28d	0.81±0.02bcd	6.76±0.45d
MSMN	78.33±1.09b	0.63±0.11a	11.20±0.46b	6.49±0.44ab	0.80±0.01bcd	8.08±0.57b
MSHN	41.57±3.28f	0.71±0.02a	10.47±0.15cd	5.80±0.61bcd	0.83±0.05bc	7.03±0.74cd
SSLN	65.38±3.52c	0.50±0.04c	10.87±0.21bc	5.62±0.11cd	0.81±0.03bcd	6.93±0.29cd
SSMN	26.98±2.82h	0.67±0.12a	11.30±0.10b	6.14±0.40abcd	0.76±0.06de	8.09±0.71b
SSHN	33.65±0.44g	0.52±0.06bc	10.30±0.20d	5.68±0.20cd	0.84±0.01b	6.75±0.25d
显著性检验(F 值) Significance test (F value)						
水分因素 Water	336.68**	6.54**	8.02**	7.67**	0.18	8.05**
氮肥因素 Nitrogen	164.03**	1.95	25.63**	3.72*	6.94**	3.87*
水分×氮肥 Water × nitrogen	182.80**	3.04*	1.19	1.18	13.05**	8.11**

同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著; *, ***P*<0.05 和 *P*<0.01 水平影响显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level; *, ** mean significant effect at *P* < 0.05 and *P* < 0.01 levels, respectively.

表 5 草莓果实品质评价主成分的特征值、贡献率和累积贡献率
Table 5 Eigenvalues, contribution proportions and cumulative contribution proportions of main principle components for strawberry quality

主成分 Principle component	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution proportion (%)	累积贡献率 Cumulative contribution proportion (%)
1	2.81	46.84	46.84
2	1.58	26.36	73.21
3	0.76	12.74	85.95
4	0.45	7.46	93.40
5	0.39	6.56	99.97
6	0.00	0.03	100.00

处理间草莓的单株产量差异不显著, 但是不同胁迫处理草莓的单株产量与 CK 相比较均差异显著。为定量分析分根灌溉条件下土壤相对含水量和施氮量对草莓单株产量的影响, 对草莓单株产量、施氮量和土壤相对含水量的关系进行拟合分析[公式(8)], 如图 4 所示, 随着水分胁迫程度的增强与施氮量的增加, 草莓单株累计产量均呈抛物线的变化趋势, 拟合结果显示当土壤相对含水量为 30.63%、施氮量为

0.78 g·kg⁻¹ 时, 草莓单株累计产量最高, 达 239.79 g, 比 CK 处理增加 5.74%。

表 6 不同水氮处理下草莓果实品质综合评判结果
Table 6 Comprehensive evaluation of strawberry quality for different water and nitrogen treatments

处理 Treatment	F ₁	F ₂	F ₃	F	排序 Sort
CK	27.37	25.60	-12.35	18.00	7
LSLN	35.51	34.90	-17.10	23.65	3
LSMN	41.03	45.94	-21.08	28.64	1
LSHN	31.75	31.69	-15.04	21.31	5
MSLN	27.31	26.65	-12.57	18.22	6
MSMN	38.41	41.44	-19.44	26.44	2
MSHN	25.11	22.46	-10.75	16.31	8
SSLN	32.89	35.08	-16.38	22.57	4
SSMN	21.42	14.72	-7.79	12.92	10
SSHN	22.16	18.44	-9.02	14.09	9

$$Z = -308.09 + 1.849 5X + 1 336.08Y - 0.057 3X^2 + 2.135 1XY - 901.002Y^2 \quad (8)$$

式中: *Z* 为单株产量(g·株⁻¹), *X* 为土壤相对含水量(%), *Y* 为施氮量(g·kg⁻¹)。

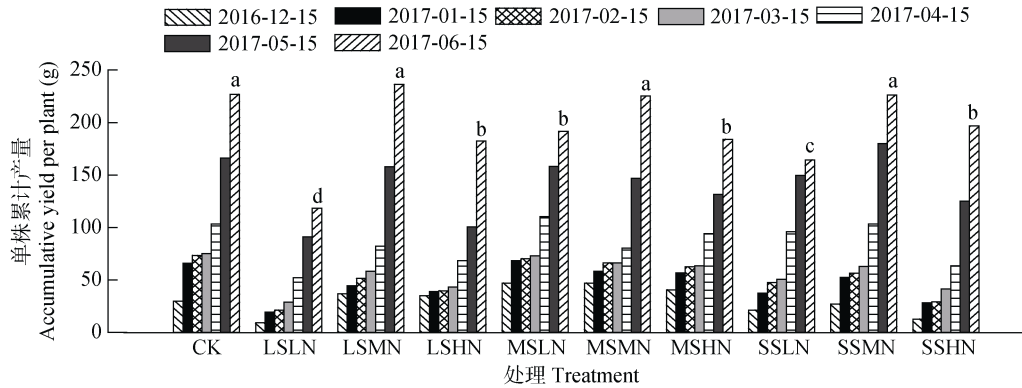


图 3 分根灌溉下水氮耦合对单株草莓总产量的影响

Fig. 3 Effect of water and nitrogen coupling on accumulative yield per plant under partial root-zone irrigation

不同小写字母表示草莓总产量在 0.05 水平差异显著。Different lowercase letters mean significant differences in total strawberry yield among treatments at 0.05 level.

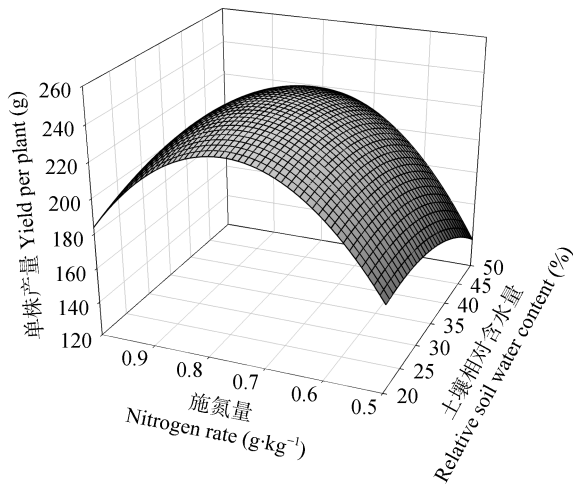


图 4 施氮量、土壤相对含水量与单株草莓产量的关系
Fig. 4 Relationship of strawberry yield per plant with nitrogen and relative water content of soil

3 讨论与结论

3.1 讨论

灌水量和施氮量是影响设施园艺植物生长、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、作物产量和品质的关键，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^[10,25-26]。采用盆栽方法固定根区干湿区域进行草莓灌溉和施肥的分区管理，可以有效避免大田试验情况下土壤水分和养分的水平侧移，以及植物根系的干湿区域间侧向生长所引起的影响，进而研究分根灌溉方式下水氮耦合对草莓产量和果实品质的影响。本文的研究结果表明在轻度和中度土壤水分胁迫条件下，适量增加氮肥能够显著提高草莓的果实品质和水分利用效率，并且对草莓产量没有显著影响。

分根灌溉方式下水氮耦合可以通过诸多方面调

控植物果实品质和产量的高低，例如水分胁迫信号 (ABA) 的传导、叶片气孔开度、根系及地上部生长、生理代谢、碳水化合物运移等。植物生理学家关于植物分根灌溉节水机理的研究主要集中于根冠通讯信号 ABA 的传输及其对气孔传导的影响研究，随着人们深入系统研究发现气孔运动的系统信息调控机理异常复杂，主要体现‘应答强度’的多变性和不同植物中‘气孔敏感度’的多变性^[27-31]，例如葡萄 (*Eucalyptus botryoides* Sm.) 顶端的叶片气孔导度比在底部的叶片受到更严重的抑制^[32]。分根干湿灌溉对植物干旱一侧的根系生长影响与土壤水分胁迫程度高低或胁迫时间长短有关，有研究发现马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.)^[33] 和龙舌兰 (*Agave americana* L.)^[34] 固定根区灌溉干旱侧根系长期处于干旱条件下会导致根系结构发生改变，根量减少，根对干旱的敏感性减弱，根系功能受到抑制，这与本研究中 SS 水分处理下草莓干旱一侧根系生长受到严重抑制的结果相一致。然而，在适度土壤水分胁迫情况下干旱侧植物根系生长的抑制作用相对较弱，例如本研究中 LS 水分处理下草莓 A/B 两侧根量没有显著差异，说明长期固定根区灌溉在合理调控干旱侧土壤含水量的情况下不会造成植物根量显著减少。另外，大量研究表明，植物在经受水分胁迫时，干旱侧根系水分传导会下降 50%~70%，但复水后植物会有大量新根形成，根系水分传导迅速恢复，并超过始终充分灌水的处理^[10,35-36]。

土壤水分胁迫情况下，适宜的水氮耦合可以促进植物对氮的吸收代谢，进而改善植物果实品质。轻度水分胁迫可以提高植物根系 NR、GS 及 GOGAT 氮代谢酶活性，并且适度增施氮肥不仅可以提高植物根系氧化力、总吸收面积和活跃吸收面积等^[37-39]，而

且可以改善植物的光合特性并促进植株生长^[8,40]。本研究发现长期处于干旱区域的草莓根系生长受到明显抑制,但是湿润侧草莓的根量因为显著增加而具有强烈的水氮吸收补偿效应,以缓解水分胁迫对草莓生长造成的不利影响。同时,研究表明在水分胁迫下重度施氮,植物根系 NR、GS 及 GOGAT 氮代谢酶活性并没有得到改善^[39],高氮水平下草莓果实中可溶性蛋白和可溶性糖含量均低于中低施氮处理^[7],本研究中 SSHN 处理草莓果实中的 Vc 含量、可溶性糖含量及糖酸比均显著降低,可见水分胁迫时重施氮肥将降低果实品质,只有适当减少灌水量和增施氮肥才可以提高植物果实的内在品质^[41-44]。在生产实践中推广利用分根灌溉技术,通过水氮合理调控,在保证产量的同时提高草莓品质,节约灌溉用水,减少对农业水环境的污染具有重要意义。

本研究采用盆栽草莓的试验方法,在理论上研究了分根灌溉下水氮耦合对草莓品质和产量调控的可行性,并得出了分根灌溉下盆栽草莓的适宜土壤相对含水量和施氮量。然而,盆栽基质与大田土壤在物理性状、理化性质等方面仍有不同,而且盆栽与大田对分根灌溉技术的应用方式也不同,因此分根灌溉下水氮耦合应用到草莓大田栽培还需开展进一步的相关研究。

3.2 结论

分根灌溉显著减少了草莓全生育期灌溉水量,提高了草莓的 WUE,LS、MS 和 SS 处理下总灌溉水量较 CK 处理(25 L·株⁻¹)分别减少 25.0%、32.5%和 40.0%。除 MSHN、SSMN 和 SSHN 处理外,其他水氮耦合处理的草莓果实品质综合评价均优于 CK 处理。综合考虑不同水氮耦合处理对草莓果实品质、产量、水肥利用效率及对农业环境安全的影响,MSMN 处理下的草莓 WUE 为 13.55 g·L⁻¹,较 CK 处理提高 47.1%,草莓果实中 Vc 含量、可溶性糖含量、有机酸含量和糖酸比分别比 CK 处理高 63.3%、12.5%、3.9%和 8.3%,为设施草莓生产较适宜的水肥管理模式。

参考文献 References

- [1] 陈广锋,杜森,江荣风,等.我国水肥一体化技术应用及研究现状[J].中国农技推广,2013,29(5):39-41
CHEN G F, DU S, JIANG R F, et al. Application and research status of water and fertilizer integration technology in China[J]. China Agricultural Technology Extension, 2013, 29(5): 39-41
- [2] 黄国勤,王兴祥,钱海燕,等.施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策[J].生态环境,2004,13(4):656-660

- HUANG G Q, WANG X X, QIAN H Y, et al. Negative impact of inorganic fertilizers application on agricultural environment and its countermeasures[J]. Ecology and Environment, 2004, 13(4): 656-660
- [3] 田孝威,宋峰,包永信,等.温室草莓栽培管理技术[J].农业科技通讯,2018,(2):216-217
TIAN X W, SONG F, BAO Y J, et al. Cultivation and management techniques of strawberry in greenhouse[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2018, (2): 216-217
- [4] YUAN B Z, SUN J, NISHIYAMA S. Effect of drip irrigation on strawberry growth and yield inside a plastic greenhouse[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(2): 237-245
- [5] 王燕,蔡焕杰,陈新明,等.根区局部控水无压地下灌溉对番茄生理特性及产量、品质的影响[J].中国农业科学,2007,40(2):322-329
WANG Y, CAI H J, CHEN X M, et al. Effects of crop root-zone non-pressure subirrigation on tomato physiological characteristics, yield and quality[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(2): 322-329
- [6] 刘明池,小島孝之,田中宗浩,等.亏缺灌溉对草莓生长和果实品质的影响[J].园艺学报,2001,28(4):307-311
LIU M C, TAKAYUKI K, MUNEHIRO T, et al. Effect of soil moisture on plant growth and fruit properties of strawberry[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2001, 28(4): 307-311
- [7] 隋静,姜远茂,彭福田,等.施氮水平对草莓果实品质的影响[J].落叶果树,2007,39(1):1-3
SUI J, JIANG Y M, PENG F T, et al. Quality of strawberry fruit as influenced by nitrogen supplied at different levels[J]. Deciduous Fruits, 2007, 39(1): 1-3
- [8] DAVIES W J, HARTUNG W. Has extrapolation from biochemistry to crop functioning worked to sustain plant production under water scarcity?[C]//Proceeding of the 4th International Crop Science Congress. Brisbane, Australia: CDROM, 2004: 26
- [9] 梁宗锁,康绍忠,胡炜,等.控制性分根交替灌水的节水效应[J].农业工程学报,1997,13(4):58-63
LIANG Z S, KANG S Z, HU W, et al. Effect of controlled roots divided alternative irrigation on water use efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 1997, 13(4): 58-63
- [10] 杜太生,康绍忠,胡笑涛,等.果树根系分区交替灌溉研究进展[J].农业工程学报,2005,21(2):172-178
DU T S, KANG S Z, HU X T, et al. Research progress of alternate partial rootzone irrigation on fruit tree[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2): 172-178
- [11] 王翠玲,孙协平,宋凯,等.有限性灌溉对设施草莓产量及水分利用效率的影响[J].水土保持学报,2009,23(5):133-137
WANG C L, SUN X P, SONG K, et al. Influence of limited irrigation on yield and water use efficiency of strawberry in greenhouse[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(5): 133-137
- [12] SCHORTEMAYER M, FEIL B, STAMP P. Root morphology and nitrogen uptake of maize simultaneously supplied with ammonium and nitrate in a split-root system[J]. Annals of

- Botany, 1993, 72(2): 107–115
- [13] 梁宗锁, 康绍忠, 石培泽, 等. 隔沟交替灌溉对玉米根系分布和产量的影响及其节水效益[J]. 中国农业科学, 2000, 33(6): 26–32
LIANG Z S, KANG S Z, SHI P Z, et al. Effect of alternate furrow irrigation on maize production, root density and water-saving benefit[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(6): 26–32
- [14] 胡田田, 康绍忠, 原丽娜, 等. 不同灌溉方式对玉米根毛生长发育的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1289–1295
HU T T, KANG S Z, YUAN L N, et al. Effects of different irrigation patterns on the growth of maize root hair[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1289–1295
- [15] 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
- [16] MOUSAVI S F, SOLTANI-GERDEFARAMARZI S, MOSTAFAZADEH-FARD B. Effects of partial rootzone drying on yield, yield components, and irrigation water use efficiency of canola (*Brassica napus* L.)[J]. Paddy and Water Environment, 2010, 8(2): 157–163
- [17] 杜太生, 康绍忠, 张建华. 不同局部根区供水对棉花生长与水分利用过程的调控效应[J]. 中国农业科学, 2007, 40(11): 2546–2555
DU T S, KANG S Z, ZHANG J H. Response of cotton growth and water use to different partial root zone irrigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(11): 2546–2555
- [18] ROMERO-CONDE A, KUSAKABE A, MELGAR J C. Physiological responses of citrus to partial rootzone drying irrigation[J]. Scientia Horticulturae, 2014, 169: 234–238
- [19] 宋曼曼, 夏俭利. 不同氮素水平对草莓生长的影响[J]. 安徽农学通报, 2013, 19(11): 55
SONG M M, XIA J L. Effects of different nitrogen levels on strawberry growth[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2013, 19(11): 55
- [20] 王连新, 曾峰, 张继祥. 分根灌溉对草莓光合特性及水分利用效率的影响[J]. 山东农业科学, 2009, (3): 22–24
WANG L X, ZENG F, ZHANG J X. Effects of partial root zone irrigation on photosynthesis characteristics and water use efficiency of strawberry[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2009, (3): 22–24
- [21] 董彦红, 赵志成, 张旭, 等. 分根交替滴灌对管栽黄瓜光合作用及水分利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 269–276
DONG Y H, ZHAO Z C, ZHANG X, et al. Improvement of alternate partial root-zone drip irrigation on photosynthesis and water use efficiency of cucumbers[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(1): 269–276
- [22] 武永军, 刘红侠, 梁宗锁, 等. 分根区干湿交替对玉米光合速率及蒸腾效率的影响[J]. 西北植物学报, 1999, 19(4): 605–611
WU Y J, LIU H X, LIANG Z S, et al. Photosynthesis rate and transpiration efficiency change by alternately drying and wetting on maize plant[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 1999, 19(4): 605–611
- [23] 蔡庆生. 植物生理学实验[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2013
CAI Q S. Physiology Experiments[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2013
- [24] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000
LI H S. Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000
- [25] LOVEYS B, GRANT J, DRY P, et al. Progress in the development of partial rootzone drying[J]. Australian Grapegrower and Winemaker, 1997, 402: 18–20
- [26] CASPARI H W, NEAL S, ALSPACH P. Partial rootzone drying. A new deficit irrigation strategy for apple[J]. Acta Horticulturae, 2004, 646: 93–100
- [27] YAO C, MORESHET S, ALONI B. Water relations and hydraulic control of stomatal behaviour in bell pepper plant in partial root drying[J]. Plant Cell Environment, 2001, 24: 227–235
- [28] COMSTOCK J P. Hydraulic and chemical signalling in the control of stomatal conductance and transpiration[J]. Journal of Experimental Botany, 2002, 53: 195–200
- [29] SPERRY J S, HACKE U G, OREN R, et al. Water deficits and hydraulic limits to leaf water supply[J]. Plant, Cell and Environment, 2002, 25: 251–263
- [30] KHALLIL A A M, GRACE J. Does xylem sap ABA control the stomatal behaviour of water-stressed sycamore seedlings?[J]. Journal of Experimental Botany, 1993, 44: 1127–1134
- [31] WILKINSON S. pH as a stress signal[J]. Plant Growth Regulation, 1999, 29: 87–99
- [32] LI B, FENG Z, XIE M, et al. Modulation of the root-sourced ABA signal along its way to the shoot in *Vitis riparia* × *Vitis labrusca* under water deficit[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62: 1731–1741
- [33] LIU F L, SHAHNAZARI A, ANDERSEN M N, et al. Physiological responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) to partial root-zone drying: ABA signalling, leaf gas exchange, and water use efficiency[J]. Journal of Experimental Botany, 2006, 57(14): 3727–3735
- [34] NORTH G B, NOBEL P S. Changes in hydraulic conductivity and anatomy caused by drying and rewetting roots of agave deserti (Agavaceae)[J]. American Journal of Botany, 1991, 78(7): 906–915
- [35] 唐立松, 张建龙, 李彦, 等. 植物对土壤水分变化的响应与控制性分根交替灌溉[J]. 干旱区研究, 2005, 22(1): 90–93
TANG L S, ZHANG J L, LI Y, et al. Response of plants to the change of soil moisture content and the controlled alternative partial root-zone irrigation[J]. Arid Zone Research, 2005, 22(1): 90–93
- [36] MITCHELL P D, CHALMERS D J, JERIE P H, et al. The use of initial withholding of irrigation and tree spacing to enhance

- the effect of regulated deficit irrigation on pear trees[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1986, 111(6): 858-861
- [37] ANDERSON E L. Corn root growth and distribution as influenced by tillage and nitrogen fertilization[J]. Agronomy Journal, 1987, 79(3): 544-549
- [38] 徐国伟, 王贺正, 翟志华, 等. 不同水氮耦合对水稻根系形态生理、产量与氮素利用的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 132-141
XU G W, WANG H Z, ZHAI Z H, et al. Effect of water and nitrogen coupling on root morphology and physiology, yield and nutrition utilization for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 132-141
- [39] 孙永健, 孙园园, 李旭毅, 等. 水氮互作下水稻氮代谢关键酶活性与氮素利用的关系[J]. 作物学报, 2009, 35(11): 2055-2063
SUN Y J, SUN Y Y, LI X Y, et al. Relationship of activities of key enzymes involved in nitrogen metabolism with nitrogen utilization in rice under water-nitrogen interaction[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(11): 2055-2063
- [40] JIAO D Y, XIANG M H, LI W G, et al. Dry-season irrigation and fertilisation affect the growth, reproduction, and seed traits of *Plukenetia volubilis* L. plants in a tropical region[J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2012, 87(4): 311-316
- [41] 隋岩, 冯志文, 王翠玲, 等. 水肥耦合对设施草莓生长、产量品质及水分利用效率的影响[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2011, 42(3): 369-375
SUI Y, FENG Z W, WANG C L, et al. Effects of water and fertilizer coupling on growth, yield and quality and water use efficiency of strawberry in greenhouse[J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science, 2011, 42(3): 369-375
- [42] 郑洪波, 李亚莉, 耿庆龙, 等. 不同氮素水平下的草莓生长状况研究[J]. 新疆农业科学, 2017, 54(1): 104-109
ZHENG H B, LI Y L, GENG Q L, et al. Strawberry growth under different nitrogen levels[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2017, 54(1): 104-109
- [43] 万春雁, 糜林, 李金凤, 等. 苗期不同水分处理对草莓花芽分化及果实早熟化的影响[J]. 果树学报, 2016, 33(12): 1523-1531
WAN C Y, MI L, LI J F, et al. Effect of different water treatments at seedling stage on flower bud differentiation and prematurity of strawberry[J]. Journal of Fruit Science, 2016, 33(12): 1523-1531
- [44] 谢安坤, 李志宏, 张云贵, 等. 不同施氮水平对番茄产量、品质及土壤剖面硝态氮的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011, (1): 26-29
XIE A K, LI Z H, ZHANG Y G, et al. Effect of different application of nitrogen on yield and quality of tomato and nitrate in soft profile[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2011, (1): 26-29