

局部根区灌溉下氮形态对番茄光合作用的动态调节

张龙飞,束良佐

(淮北师范大学 生命科学学院/资源植物生物学安徽省重点实验室,安徽 淮北 235000)

摘要:为探讨局部根区灌溉下氮形态对番茄光合作用的动态调节,设置番茄分根培养试验,研究不同灌水方式(正常灌溉、交替根区灌溉、固定根区灌溉)下不同氮形态(铵态氮、硝态氮)对苗期番茄光合指标、叶绿素含量、生物量和水分利用效率的影响。结果表明:局部根区灌溉下,相较于硝态氮,铵态氮可显著增强苗期番茄的光合速率,提高植株的水分利用效率。一个交替周期内,与正常灌溉相比,交替灌溉仍可维持较高的光合速率和生物量,而蒸腾速率显著降低,从而提高了水分利用效率;番茄的净光合速率和叶绿素含量不断降低。因此,综合考虑生物量、光合速率、蒸腾速率和水分利用效率,则灌溉方式为交替灌溉,供应铵态氮处理更有益于番茄的苗期生长,提高苗期番茄的水分利用效率。

关键词:局部根区灌溉;氮形态;光合速率;生物量

中图分类号:S641.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-2767(2016)06-0031-06 DOI:10.11942/j.issn1002-2767.2016.06.0031

近年来,针对全球水资源短缺的问题,局部根区灌溉技术在理论和应用方面均开展了深入的研究^[1]。目前在棉花、玉米、马铃薯、黄瓜、番茄、辣椒和葡萄等农作物上开展的局部根区灌溉试验都在不牺牲光合产物积累量的基础上,显著降低灌水量,提高水分利用效率^[2-9]。局部根区灌溉可以改善果实品质^[10-12],土壤干湿交替有利于改善土壤通气,促进根系的发育,提高根系活力^[13],提高水稻抗氧化保护酶活性^[14],虽然气孔导度和蒸腾速率有所下降,但是光合速率并没有受到明显的影响^[15-16]。

有研究表明,水分和肥料之间存在耦合效应,合适的灌水量和灌水方式可以促进植物对肥料的吸收,而适度施肥同样可以提高土壤水分的利用效率。局部根区灌溉作为一种节水、高产的灌溉方式,要与合适的施肥措施相配合才能分别提高水和肥的利用率。植物生长从土壤中吸收的氮营养主要形态是硝态氮和铵态氮。Schortemeyer等发现两种氮肥等比例混合使用,可以更好地提高作物对水分的利用^[10]。曹琦等发现,硝态氮和铵态氮混施的小麦叶面积、叶绿素含量和根系活力显著高于单独使用某一种氮肥^[17]。两种形态

氮肥对植物生长的促进作用随植物种类不同而不同。周毅等^[18]发现在局部根区灌溉下,铵态氮处理的水稻生物量和水分利用效率明显升高。近年来,关于局部根区灌溉下氮形态对番茄生长影响的研究越来越多。徐飞等发现在番茄的幼苗期,铵态氮对光合和生长的促进作用优于硝态氮^[19]。王海红等^[20]发现玉米局部根区水分胁迫的初期,铵态氮对其生长的促进作用和短期抗旱性高于硝态氮处理;在胁迫后期,硝态氮和混合氮处理表现出较高的抗逆性。周秀杰等^[21]发现铵态氮可以显著提高玉米水氮利用效率。而这些研究主要关注植物在不同发育期内对局部根区灌溉下氮形态的响应,但是对一个交替周期内番茄的生理变化缺乏研究。本试验以盆栽苗期的番茄为试验材料,测定局部根区灌溉时不同氮形态下番茄叶绿素含量、光合速率在一个交替周期内(交替周期指从一次灌水后开始到下一次灌水前为止的时间,本试验的交替周期是7 d)的动态变化,以揭示局部根区灌溉下水氮耦合对苗期番茄生长的调控。

1 材料与方法

1.1 材料

供试番茄品种为中研988,由北京中研益农种苗科技有限公司提供。供试土壤理化性质:pH 7.25,铵态氮 5.80 mg·kg⁻¹,硝态氮 16.24 mg·kg⁻¹,全氮 460.89 mg·kg⁻¹,全磷 512.36 mg·kg⁻¹,全钾 376.32 mg·kg⁻¹,容重 1.29 g·cm⁻³,有机质 12.54 g·kg⁻¹,田间持水量 22.09%。

收稿日期:2016-04-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31071868);教育部高校留学回国人员科研资助项目

第一作者简介:张龙飞(1989-),女,安徽省淮北市人,在读硕士,从事植物生理学研究。E-mail: Zhanglongfei198951@163.com。

通讯作者:束良佐(1969-),男,安徽省芜湖市人,博士,教授,从事植物生理生态学研究。E-mail:shulz69@163.com。

1.2 方法

本试验采用盆栽试验,栽培容器是灰色小桶,规格为长 22 cm、宽 14 cm、高 26 cm,底部用钻头打 4 个孔。栽培容器的正中间用塑料薄膜隔成两个完全相等的根室,阻止两侧进行水分交换。然后在两个根室中各加入 3.5 kg 风干土壤。每盆定植 1 株生长健壮的番茄幼苗,并使幼苗的根系平均分布在两个根室中。

1.2.1 试验设计 本试验设置氮形态和灌溉方式两个因素。向供试土壤中(以土壤含氮量 200 mg·kg⁻¹ 的标准)分别加入 (NH₄)₂ SO₄ 和 Ca(NO₃)₂·4H₂O 形成两种氮形态处理。铵态氮处理的土壤中加入氯化钙以平衡钙离子。同时为了抑制铵态氮的硝化,加入硝化抑制剂双氰胺。同时也向土壤中加入常规养分,以保证番茄正常生长。番茄幼苗(苗龄约 60 d)定植后,进行为期 7 d 的缓苗期,缓苗期间正常灌水。14 d 过后进入水分处理期。共有 3 个水分处理方式:①正常灌溉(Z):两个根室都灌水到田间持水量(θ_f)的 90%;②交替根区灌溉(J):一个根室灌水到 90% θ_f ,另外一个根室干燥处理,每 7 d 干燥区和湿润区交换;③固定根区灌溉(G):整个试验过程中,只对一个根室灌水到 90% θ_f ,另一根室始终干燥。所以共形成铵态氮正常灌溉(AZ)、铵态氮交替根区灌溉(AJ)、铵态氮固定根区灌溉(AG)、硝态氮正常灌溉(XZ)、硝态氮交替根区灌溉(XJ)和硝态氮固定根区灌溉(XG)6 个处理,每个处理重复 8 次。培养期间,白天温度约为 25 ℃,夜间温度约为 15 ℃。因是室内试验,所以白天用高压钠灯补光(光强约为 180 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$),控制补光时间 12 h·d⁻¹,7:00-19:00。交替水分处理 14 d 后,在第 3 个交替周期内进行测定。在此交替周期内交替水分处理第 1 天、交替水分处理第 4 天、交替水分处理第 7 天上午进行测定,测定的指标有光合参数、叶绿素含量、生物量和水分利用效率。

1.2.2 测定项目及方法 选取第 3~5 叶位的完全展开叶,用 Li-cor6400 (Li-cor, USA)测定净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、蒸腾速率(Tr)和胞间 CO₂ 浓度(Ci)。

直接采用便携式叶绿素测定仪 (SPAD, Japan)来进行叶绿素含量测定。

收取番茄植株,在烘箱中烘干后称重,以单株计重。

水分利用效率=单株生物量(g)/单株灌水量(kg)

1.2.3 数据处理 用 SPSS17.0 对数据进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 局部根区灌溉下氮形态对番茄植株净光合速率的影响

由表 1 可知,在一个交替周期内,番茄植株的净光合速率不断降低,第 4 天下降约 10.70%,第 7 天下降约 11.59%。灌溉方式相同时,三次测定铵态氮处理的净光合速率比硝态氮分别提高了 12.42%、12.36%和 11.65%。氮形态相同时,正常灌溉与交替根区灌溉不差异不显著,而固定根区灌溉比正常和交替根区灌溉分别低 23.96%和 23.83%(第 1 天)、31.60%和 30.30%(第 4 天)、32.66%和 32.23%(第 7 天)。

表 1 局部根区灌溉下氮形态对番茄植株净光合速率的影响

Table 1 Effect of nitrogen forms on net photosynthetic rate of tomato under alternate partial root-zone irrigation

| 处理 Treatments | 净光合速率/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) Net photosynthetic rate(Pn) | | |
|------------------|--|-------------------------|--------------------------|
| | 第 1 天 The first day | 第 4 天 The fourth day | 第 7 天 The seventh day |
| | | | |
| AZ | 15.97±0.03 a | 14.85±0.05 a | 13.61±0.10 a |
| AJ | 15.94±0.06 a | 14.62±0.15 a | 12.68±0.25 ab |
| AG | 11.81±0.06 c | 9.82±0.04 c | 8.42±0.07 c |
| XZ | 13.95±0.07 b | 12.96±0.10 b | 11.11±0.04 b |
| XJ | 13.93±0.05 b | 12.68±0.19 b | 11.70±0.04 ab |
| XG | 10.90±0.03 cd | 9.16±0.07 cd | 8.09±0.12 d |

不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。
Different lowercases mean significant difference at 0.05 level among treatments. The same below.

2.2 局部根区灌溉下氮形态对番茄气孔导度的影响

从表 2 可知,灌溉方式相同时,三次测定铵态氮处理的气孔导度比硝态氮处理平均高约 28.77%、29.88%和 38.95%。氮形态相同时,正常灌溉最高,交替灌溉根区比正常灌溉下降 8.10%,固定根区灌溉比正常灌溉下降 39.74%。在一个交替周期内,番茄的气孔导度的变化趋势与光合速率一致,都是不断降低(见表 2)。

表 2 局部根区灌溉下氮形态对番茄植株气孔导度的影响

Table 2 Effect of nitrogen forms on the stomatal conduction of tomato under alternate partial root-zone irrigation

| 处理 Treatments | 气孔导度/(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹) Stoma conductance(Gs) | | |
|------------------|---|-------------------------|--------------------------|
| | 第 1 天 The first day | 第 4 天 The fourth day | 第 7 天 The seventh day |
| AZ | 0.39±0.002 a | 0.35±0.004 a | 0.35±0.013 a |
| AJ | 0.36±0.005 bc | 0.34±0.01 ab | 0.31±0.012 b |
| AG | 0.26±0.008 de | 0.25±0.004 dc | 0.23±0.007 efg |
| XZ | 0.32±0.006 b | 0.30±0.004 b | 0.29±0.008 c |
| XJ | 0.30±0.003 c | 0.27±0.009 c | 0.26±0.005 d |
| XG | 0.18±0.003 f | 0.17±0.001 ef | 0.13±0.004 g |

2.3 局部根区灌溉下氮形态对番茄胞间 CO₂ 浓度的影响

灌溉方式相同时,氮形态对番茄植株胞间 CO₂ 浓度的影响表现为铵态氮高于硝态氮。当氮形态相同时,灌溉方式对胞间 CO₂ 浓度的影响表现为正常灌溉>交替根区灌溉>固定根区灌溉(见表 3)。在一个交替周期内,番茄叶片的胞间 CO₂ 浓度逐渐降低。

表 3 局部根区灌溉下氮形态对番茄植株胞间 CO₂ 浓度的影响

Table 3 Effect of nitrogen forms on intercellular CO₂ concentration of tomato under alternate partial root-zone irrigation

| 处理 Treatments | 胞间 CO ₂ 浓度/(μmol CO ₂ ·mol ⁻¹ air) Intercellular CO ₂ concentration (Ci) | | |
|------------------|---|-------------------------|--------------------------|
| | 第 1 天 The first day | 第 4 天 The fourth day | 第 7 天 The seventh day |
| AZ | 267.44±1.25 a | 256.00±0.65 a | 226.02±0.62 a |
| AJ | 260.73±2.18 c | 248.44±1.35 b | 213.55±0.49 b |
| AG | 259.40±0.76 cd | 235.03±1.99 d | 195.17±1.67 de |
| XZ | 264.74±1.09 b | 248.28±1.02 b | 207.71±1.35 c |
| XJ | 259.06±2.06 cd | 246.27±0.37 bc | 195.55±1.97 de |
| XG | 257.74±0.68 d | 234.13±2.02 d | 175.57±2.87 fg |

2.4 局部根区灌溉下氮形态对番茄植株蒸腾速率的影响

由表 4 可知,灌溉方式相同时,铵态氮处理蒸腾速率比硝态氮处理高约 11.81%。氮形态相同时,蒸腾速率变化规律是正常灌溉>交替根区灌溉>固定根区灌溉,交替根区灌溉比正常灌溉降

低约 6.63%,而固定根区灌溉比正常灌溉降低约 34.12%。在一个交替周期内,各处理组的蒸腾速率不断降低;交替水分处理第 4 天时各处理组普遍降低约 16.84%,第 7 天继续降低约 4.42%。

表 4 局部根区灌溉下氮形态对番茄植株蒸腾速率的影响

Table 4 Effect of nitrogen forms on the transpiration rate of tomato under alternate partial root-zone irrigation

| 处理 Treatments | 蒸腾速率/(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹) Transpiration rate (Tr) | | |
|------------------|---|-------------------------|--------------------------|
| | 第 1 天 The first day | 第 4 天 The fourth day | 第 7 天 The seventh day |
| AZ | 4.88±0.03 a | 4.10±0.02 a | 4.07±0.08 a |
| AJ | 4.51±0.07 b | 3.97±0.06 ab | 3.75±0.11 b |
| AG | 3.65±0.05 de | 3.00±0.03 c | 2.69±0.05 de |
| XZ | 4.59±0.02 b | 4.00±0.06 ab | 3.83±0.05 b |
| XJ | 4.32±0.02 c | 3.63±0.11 b | 3.60±0.03 c |
| XG | 3.10±0.04 ef | 2.28±0.01 de | 2.17±0.05 f |

2.5 局部根区灌溉下氮形态对番茄叶片叶绿素含量的影响

灌溉方式相同时,铵态氮处理的叶片叶绿素含量比硝态氮处理高约 2.59%(第 1 天)、2.07%(第 4 天)和 1.57%(第 7 天);氮形态相同时,正常灌溉和交替根区灌溉差异不显著,固定根区灌溉显著低于正常和交替根区灌溉:平均比正常低 10.23%,比交替根区灌溉低 8.08%(第 1 天)。在一个交替周期内,第 4 天时,叶绿素含量小幅度降低,约 2.37%;第 7 天时,出现大幅度降低,约 7.09%(见表 5)。

表 5 局部根区灌溉下氮形态对番茄植株叶绿素含量的影响

Table 5 Effect of nitrogen forms on the chlorophyll content of tomato under alternate partial root-zone irrigation

| 处理 Treatments | 叶绿素含量 The content of chlorophyll(SPAD) | | |
|------------------|--|-------------------------|--------------------------|
| | 第 1 天 The first day | 第 4 天 The fourth day | 第 7 天 The seventh day |
| AZ | 67.76±0.55 a | 65.91±0.42 a | 59.73±0.50 a |
| AJ | 66.23±0.53 ab | 64.08±0.54 a | 59.27±0.16 ab |
| AG | 60.60±0.40 c | 59.50±0.33 c | 56.60±0.47 c |
| XZ | 65.92±0.32 b | 63.15±0.23 b | 58.90±0.34 b |
| XJ | 64.32±0.37 b | 63.58±0.21 ab | 58.90±0.35 b |
| XG | 59.40±0.36 d | 58.88±0.31 d | 55.13±0.49 d |

2.6 局部根区灌溉下氮形态对番茄植株生物量
和水分利用效率的影响

氮形态对番茄生物量产生显著影响。灌溉方式相同时,铵态氮处理生物量显著高于硝态氮处理,平均比硝态氮处理高约 26.74%。氮形态相同时,灌溉方式对番茄生物量的影响表现为交替根区灌溉下的生物量与正常灌溉差异不显著,而固定根区灌溉比正常灌溉平均下降约 41.44%,比交替根区灌溉下降约 34.52%(见表 6)。

铵态氮处理的水分利用效率显著高于硝态氮,并比硝态氮分别高约 17.82%(Z)、14.06%(J)和 13.54%(G);氮形态相同时,交替根区灌溉的水分利用效率比正常灌溉升高约 24.71%,固定根区灌溉比正常灌溉下降约 6.68%(见表 6)。

表 6 局部根区灌溉下氮形态对番茄植株生物量
和水分利用效率的影响

Table 6 Effect of nitrogen form on the biomass
and water use efficiency of tomato under
alternate partial root-zone irrigation

| 处理 Treatments | 单株生物量/g Biomass per plant | 水分利用效率/(g·kg ⁻¹) Water use efficiency |
|------------------|------------------------------|--|
| AZ | 28.83±0.35 a | 1.19±0.005 c |
| AJ | 25.19±0.82 ab | 1.46±0.002 a |
| AG | 16.34±1.07 d | 1.09±0.006 d |
| XZ | 21.94±0.65 c | 1.01±0.005 ef |
| XJ | 20.06±0.83 c | 1.28±0.003 b |
| XG | 13.26±0.74 e | 0.96±0.006 f |

3 讨论与结论

3.1 氮形态对番茄生物量和光合特性的影响

植物细胞对两种形态氮素的吸收和同化的原理差异很大,对植物生长、发育和生理代谢活动产生影响不同^[22-23]。

周毅等研究水稻分根交替水分胁迫时发现铵态氮处理的生物量和水分利用效率均高于单施硝态氮和混合氮处理^[18]。本试验同样发现铵态氮处理的生物量比硝态氮分别增加了 26.74%。铵态氮处理的生物量显著高于硝态氮可能与植物同化不同形态氮素时所消耗的能量不同有关^[22]。植物根系吸收铵态氮后可直接利用,而吸收硝态氮后需首先在叶绿体内被还原成铵态氮,还原反应需要消耗能量,因此植物每吸收、同化 1 mol 的铵态氮要比吸收、同化 1 mol 的硝态氮节约 15~

16 个 ATP^[24],节约的这部分能量可以用于植物的生长,所以铵态氮处理的生物量高于硝态氮处理。还有研究认为,增施铵态氮时,细胞中的细胞分裂素积累,植物叶面积扩展,提高生物量^[25]。植物的生长和光合作用速率密切相关。灌溉方式相同时,3 次测定铵态氮处理的净光合速率比硝态氮分别提高 12.42%、12.36% 和 11.65%。Rubisco(核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶)是光合作用暗反应过程的关键酶,提高 Rubisco 的含量和活性可提高光合作用的速率。铵态氮进入植物细胞后,立即进入叶绿体,在谷氨酰胺合成酶的催化下与谷氨酸结合生成谷氨酰胺,谷氨酰胺进一步在谷氨酸合成酶的催化下与 α-酮戊二酸结合形成谷氨酸^[26]。在植物体内,谷氨酸通过氨基交换作用合成其它种类的氨基酸和酰胺,促进叶绿体中可溶性蛋白的合成^[27]。在 C₃ 植物体内,Rubisco 的含量占可溶性蛋白总量的 30%~50%,可溶性蛋白含量增加,Rubisco 的数量和活性增加,植物的光合速率显著升高。而硝态氮在叶绿体中的还原需要消耗 ATP 和 NADPH,光合作用暗反应过程中 C₃ 的还原也要消耗 ATP 和 NADPH,两者相互竞争会抑制植物光合速率。植物叶片叶绿素的含量与植物的光合作用密切相关,王正瑞等人发现铵态氮可以提高叶绿素含量^[28]。灌溉方式相同时,一个交替周期内 3 次测定铵态氮处理的叶绿素含量比硝态氮处理高约 2.59%(第 1 天)、2.07%(第 4 天)和 1.57%(第 7 天)。谷氨酸和 α-酮戊二酸是高等植物合成叶绿素的前体物质,铵态氮被吸收后几乎全部被迅速同化为氨基酸和酰胺,然后向地上部分运输,提高谷氨酸和 α-酮戊二酸的含量,从而促进叶绿素的合成。白亚君等认为叶绿素的含量与活性铁的含量与活性密切相关^[29]。张攀伟等发现铵态氮可提高活性铁的含量,促进叶绿素的合成^[25]。叶绿素在细胞内都是与蛋白质结合以复合体的形式存在的^[30],单施铵态氮能明显促进叶绿素-蛋白复合体的形成,导致叶片叶绿素含量升高^[31]。本试验发现,铵态氮处理的水分利用效率显著高于硝态氮,并比硝态氮分别高约 17.82%(Z)、14.06%(J)和 13.54%(G)。王海红等^[20]发现,铵态氮处理的植株叶片木质部汁液和根系中的 ABA 均有升高的趋势。ABA 浓度升高迅速对气孔开度进行调节,不仅影响植物的光合作用,也可以降低植物的蒸腾速率,从而提高了水分利用效

率。铵态氮处理可以促进植物对水分的有效利用,还可能与铵态氮提高植物木质部汁液 pH 有关^[32]。木质部汁液和 ABA 发挥协同作用,共同调节植物的蒸腾作用,使水分利用效率提高。

进一步测定结果表明,在一个交替周期内,第 4 天时,叶绿素含量小幅度降低,约 2.37%;第 7 天时,出现大幅度降低,约 7.09%。植物响应土壤干旱,随着土壤含水量不断下降,叶绿素含量、净光合速率和气孔导度等均显著下降^[33],与本试验的结果一致。这可能是因为随着土壤水分的减少,植物所遭受的胁迫程度升高,细胞内新陈代谢紊乱,活性氧积累导致叶绿素合成受到抑制,而叶绿素降解加快^[34]。

3.2 局部根区灌溉对番茄生物量和光合特性的影响

大量研究结果证明,作为一种节水高产的灌溉方式,交替根区灌溉可以在不显著影响生物量的前提下显著提高水分利用效率。本试验发现交替根区灌溉的总生物量只平均比正常灌溉降低约 10.60%。光合作用是绿色植物制造养料的基本生命活动,是植物生物量增加的主要来源。赵志成等发现与正常灌溉相比,交替灌溉时仍能保持相对适宜的 CO₂ 固定能力和较高的光化学效率,同时可减小叶片气孔导度,降低蒸腾耗水^[35]。本试验发现,氮形态相同时,交替根区灌溉的 Pn 与正常灌溉相比差异不显著,但是 Tr 和 Gs 分别下降 6.63% 和 8.10%。因此生物量下降幅度较小可能与交替灌溉对 Pn 的影响较小,而对 Gs 影响显著有关。Gs 对光合作用和蒸腾作用这两个重要的生理过程都产生影响。交替根区灌溉时,植物根系响应土壤干旱,产生大量脱落酸(ABA)通过木质部运输到地上部分,降低气孔开度。植物体也可以通过升高木质部汁液的 pH 来降低气孔开度^[20]。植物的光合速率随气孔导度下降而下降的速率缓慢,而蒸腾速率随气孔开度的降低直线下降。因此,气孔开度的适度降低,可使蒸腾速率显著下降,而对光合速率影响不明显。有研究表明,叶片叶绿素含量影响植物的光合作用速率,间接影响植物的生长状况^[36]。交替灌溉的叶绿素含量与正常灌溉的差异不显著,所以交替根区灌溉仍可维持较高的生物量。交替灌溉的水分利用效率比正常灌溉升高约 24.71%。交替灌溉的水分利用效率显著提高,这可能是因为交替根区灌溉总灌水量减少,地表土壤蒸发和往土壤深层

渗漏的水分较少,更多的水分被保持在根系周围有效范围内,提高灌溉水分的有效性^[20]。

固定根区灌溉与正常灌溉相比生物量下降 41.44%,水分利用效率下降 6.68%。这可能是因为固定根区灌溉灌水量少,且干燥侧根系长期处于干旱环境导致根系解剖结构发生改变,总根量减少,对干旱的敏感性减弱,根系的功能不能正常发挥^[37-38],从而导致光合速率以及生物量降低。固定根区灌溉的各光合指标与正常灌溉相比均显著降低。可能是固定根区灌溉引起细胞内的可溶性蛋白大量水解,使 Rubisco 的含量和活性显著下降,光合速率受到抑制。还因为水分胁迫严重,叶肉细胞水势进一步下降,气孔开度显著降低,从而抑制光合作用。还可能与固定根区灌溉时水分胁迫严重,导致叶绿体的超微结构发生改变有关^[39]。

固定灌溉的叶绿素含量明显降低,可能是因为固定灌溉时一侧根系持续干旱,导致根系生长受到抑制,影响水分和养分的吸收,阻碍叶绿素的合成。在一个交替周期内,番茄植株的净光合速率不断降低,第 4 天下降约 10.70%,可能是因为土壤干旱引起气孔导度下降,光合作用原料 CO₂ 供应减少;第 7 天下降约 11.59%(见表 1),可能与干旱导致叶片叶绿素含量降低有关。

3.3 结论

局部根区灌溉下,铵态氮处理的苗期番茄的光合速率和水分利用效率均显著强于硝态氮处理。一个交替周期内,与正常灌溉相比,交替根区灌溉仍可维持较高的光合速率和生物量,而蒸腾速率显著降低,因此提高了水分利用效率。一个交替周期内,苗期番茄的净光合速率和叶绿素含量逐渐降低。综合考虑生物量、光合速率、蒸腾速率和水分利用效率,则灌溉方式为交替根区灌溉,供应铵态氮处理更有益于番茄的苗期生长。

参考文献:

- [1] 康绍忠,潘英华,石培泽,等.控制性作物根系分区交替灌溉的理论及试验[J].水利学报,2001(11):80-86.
- [2] 杜太生,康绍忠,王振昌,等.隔沟交替灌溉对棉花生长、产量和水分利用效率的调控效应[J].作物学报,2007(12):1982-1990.
- [3] 潘英华,康绍忠,杜太生,等.交替隔沟灌溉土壤水分时空分布与灌水均匀性研究[J].中国农业科学,2002(5):531-535.
- [4] 梁继华,李伏生,唐梅,等.分根区交替灌溉对盆栽甜玉米水分及氮素利用的影响[J].农业工程学报,2006(10):68-72.
- [5] 王海红,束良佐,周秀杰,等.局部根系水分胁迫下氮形态对

- 玉米幼苗光合特性的影响[J]. 核农学报, 2009, 23(4): 686-691.
- [6] 李平, 王以柔, 陈贻竹, 等. 低温对杂交水稻乳熟期剑叶光合作用和光合产物运输的影响[J]. 植物学报, 1994(1): 45-52.
- [7] 曹琦, 王树忠, 高丽红, 等. 交替隔沟灌溉对温室黄瓜生长及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2010(1): 47-53.
- [8] 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: 2437-2446.
- [9] Dry P R, Lover B R. Factors influencing grapevine vigour and the potential for control with partial rootzone drying[J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 1998, 4: 140-148.
- [10] Schortemeyer 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: 107-115.
- [11] 梁宗锁, 康绍忠, 高俊风, 等. 分根交替渗透胁迫与脱落酸对玉米根系生长和蒸腾效率的影响[J]. 作物学报, 2000(2): 250-255.
- [12] 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(6): 26-32.
- [13] 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(6): 1289-1295.
- [14] 张自常, 李鸿伟, 曹转勤, 等. 施氮量和灌溉方式的交互作用对水稻产量和品质影响[J]. 作物学报, 2013, 39(1): 84-92.
- [15] 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(4): 605-611.
- [16] 张强, 徐飞, 王荣富, 等. 控制性分根交替灌溉下氮形态对番茄生长、果实产量及品质的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3547-3555.
- [17] 曹琦, 王树忠, 高丽红, 等. 交替隔沟灌溉对温室黄瓜生长及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 47-53.
- [18] 周毅, 郭世伟, 宋娜, 等. 供氮形态和水分胁迫对苗期一分蘖期水稻光合与水分利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006(3): 334-339, 345.
- [19] 徐飞, 祝鹏飞, 束良佐, 等. 分根交替灌溉下氮形态对番茄苗期光合日进程的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(1): 123-130.
- [20] 王海红, 束良佐, 周秀杰, 等. 局部根区水分胁迫下氮对玉米生长的影响[J]. 核农学报, 2011, 25(1): 149-154, 168.
- [21] 周秀杰, 王海红, 束良佐, 等. 局部根区水分胁迫下氮形态与供给部位对玉米幼苗生长的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(8): 2017-2024.
- [22] Raven J A, Farquhar G D. The influence of N metabolism and organic acid synthesis on the natural abundance of isotopes of carbon in plants[J]. New Phytologist, 1990, 116(3): 505-529.
- [23] 董园园, 董彩霞, 卢颖林, 等. NH_4^+-N 部分代替 NO_3^--N 对番茄生育中后期氮代谢相关酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2006(2): 261-266.
- [24] Foyer C H, Valadier M H, Migge A, et al. Drought-induced effectson nitrate reductase activity and mRNA and on the coordination ofnitrogen and carbon metabolism in maize leaves[J]. Plant Physiol, 1998, 117: 283-292.
- [25] 张攀伟, 罗金葵, 陈巍, 等. 硝铵比例影响小白菜生长和叶绿素含量的原因探究[J]. 植物营养与肥料学报, 2006(5): 711-716.
- [26] Tang L S, Li Y, Zhang J H. Physiological and yield responses of cotton under partial rootzone irrigation[J]. Field Crops Res, 2005, 94: 214-223.
- [27] Raab K T, Terr Y N. Nitrogen source regulation of growth and photosynthesis in *Betavulgaris*L [J]. Plant Physiol, 1994, 105: 1159-1166.
- [28] 王正瑞, 芮玉奎, 申建波, 等. 氮肥施用量和形态对玉米苗期叶绿素含量的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2009(2): 410-412.
- [29] 白亚君, 母树宏. 植物对铁的吸收运转及铁与叶绿素的关系[J]. 河北农业大学学报, 1994(S1): 121-125.
- [30] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [31] Tam N F Y, Wong Y S. Effect of ammonia concentrations on growth of *Chlorella vulgaris* and nitrogen removal from media[J]. Biore-source Technology, 1996, 57: 45-50.
- [32] 李勇. 氮素营养对水稻光合作用与光合氮素利用率的影响机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [33] Terashima I. Effects of light and nitrogen nutrition on the organization of the photosynthetic apparantus in spinaxh[J]. Plant Cell Environment, 1988, 29: 143-155.
- [34] Ana Lucia S Lima. Photochemical responses and oxidative stress in two clones of *Coffeacanephora* under water deficit conditions[J]. Environmental and Experimental Botany, 2002, 47: 239-247.
- [35] 赵志成, 杨显贺, 李清明, 等. 不同膜下滴灌方式对设施黄瓜生理特性及水分利用效率的影响[J]. 生态学报, 2014, 22(34): 6597-6605.
- [36] 刘少华, 陈国祥, 胡艳, 等. 高产杂交稻“两优培九”功能叶抗氧化系统对水分胁迫的响应[J]. 作物学报, 2004(12): 1244-1249.
- [37] Liu F L, Shahnazari A, Andersen M N and et al. Physiological responses of potato (*Solanum tuberosum* L) to partial root-zone drying: ABA signaling, leaf gas exchange, and water use efficiency[J]. J Exp Bot, 2006, 57(14): 3727-3735.
- [38] 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: 906-915.
- [39] 李尚中, 樊廷录, 王勇, 等. 不同覆膜集雨种植方式对旱地玉米叶绿素荧光特性、产量和水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 458-466.