

# 加气灌溉对番茄植株生长、产量和果实品质的影响

朱艳<sup>1,2</sup> 蔡焕杰<sup>1,2</sup> 宋利兵<sup>1,2</sup> 陈慧<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 试验设置了作物-皿系数  $k_{cp}$  为 0.6 (W1) 和 1.0 (W2) 2 个灌水水平、15 cm (D1) 和 25 cm (D2) 2 种滴头埋深和加气灌溉 (O)、地下滴灌 (S, 不加气灌溉作为对照) 2 种灌水方式, 采用 3 因素完全随机设计, 共 8 个处理, 以揭示加气灌溉不同灌水水平和滴头埋深对温室番茄根区土壤通气性、植株生长发育、产量和果实品质的影响。结果表明: 加气灌溉有效改善了土壤通气性, 与不加气地下滴灌相比, 土壤氧气含量增大了 6.42% ( $P < 0.05$ ), 0~40 cm 土层土壤体积含水率下降了 5.29%。同时, 加气灌溉下番茄植株茎粗和叶面积分别显著增大了 4.55% 和 16.21%, 开花日期推后了 2 d 左右, 开花时长存在延长的趋势, 果实干质量显著增大了 23.57%, 单株产量、单果质量和水分利用效率分别显著增大了 29.04%、23.93% 和 28.11%。加气灌溉下番茄果实中番茄红素、维生素 C、可溶性糖的含量和糖酸比分别显著增大了 37.73%、31.43%、32.30% 和 45.64%。因此, 加气灌溉在促进植株生长发育、提高番茄产量的同时有效提高了果实品质, 改善了果实风味。灌水水平由 0.6 增大到 1.0 也明显促进了番茄植株的生长发育、提高了果实产量, 虽然随果实中番茄红素、可溶性糖含量的下降, 果实品质有所降低, 但灌水水平对果实品质的影响效应低于加气灌溉, 且灌水水平的提高和加气灌溉对番茄产量产生显著的交叉影响效应。因此考虑各处理对番茄生长发育、产量和果实品质的综合影响,  $k_{cp}$  为 1.0 灌水水平下加气灌溉是本试验条件下较优的加气灌溉模式。

**关键词:** 番茄; 加气灌溉; 土壤通气性; 生长; 产量; 果实品质

中图分类号: S152.7; S512.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)08-0199-13

## Impacts of Oxygation on Plant Growth, Yield and Fruit Quality of Tomato

ZHU Yan<sup>1,2</sup> CAI Huanjie<sup>1,2</sup> SONG Libing<sup>1,2</sup> CHEN Hui<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Oxygation, which can impose aerated water to root zoon through Mazzei injector and subsurface drip irrigation (SDI) line, has been effectively overcoming problems associated with hypoxic soil environment induced by SDI and showing yield potentials and great application prospects. The objective of this study was to explore the impacts of oxygation under different irrigation levels and emitter depths conditions on soil aeration, plant growth, fruit yield and quality. Plot experiments were conducted in a greenhouse during tomato growing season (from Apr. 11, 2016 to Jul. 2, 2016) under the oxygation (O) and SDI (S) conditions with two different irrigation levels correlated with crop - pan coefficients ( $k_{cp}$ ) being 0.6 (W1) and 1.0 (W2) and two different emitter depths of 15 cm (D1) and 25 cm (D2), respectively. Consequently, there was a total of eight treatments (W1D1O, W1D1S, W2D1O, W2D1S, W1D2O, W1D2S, W2D2O and W2D2S) and replied three times, and the plots followed a randomized complete design. In order to assess the benefits of oxygation on soil aeration, variations of soil oxygen concentration ( $O_s$ ) and soil volumetric water content ( $\theta_v$ ) were investigated. Meanwhile, plant height, stem diameter, leaf area, yield of per plant and fruit weight at harvest were measured, and blooming date and the period of flowering were recorded, and the lycopyene, vitamin C, soluble sugar and organic acid contents of fruit were analyzed in order to study the impacts of oxygation on plant

收稿日期: 2017-05-26 修回日期: 2017-06-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400200)和国家自然科学基金项目(51171798)

作者简介: 朱艳(1989—),女,博士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: zhuyan2015@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 蔡焕杰(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业节水与水资源高效利用研究, E-mail: caihj@nwsuaf.edu.cn

growth, yield and fruit quality. The results showed that oxygation appeared to improve soil aeration effectively accompanied with  $O_2$  significantly increased by 6.42% ( $P < 0.05$ ) and  $\theta_v$  decreased by 5.29%, compared with no-aerated SDI. Meanwhile, stem diameter and leaf area with oxygation were significantly 4.55% and 16.21% higher than SDI, respectively ( $P < 0.05$ ). On other hands, compared with SDI treatments, flowering was about 2 days later and the flowering period showed a tendency to prolong under oxygation conditions. What's more, fruit dry weight in the biomass compositions was significantly increased by 23.57% and yield of per plant, fruit weight and water use efficiency with oxygation were significantly 29.07%, 23.93% and 28.11% higher than no aeration SDI, respectively. Thus, oxygation significantly stimulated plant growth and development, and then improved yield by controlling soil water - air ratio and ameliorating soil aeration. What's more, compared with no-aerated SDI, the lycopene, vitamin C and soluble sugar contents and sugar/acid ratio of fruit under oxygation conditions were significantly increased by 37.73%, 31.43%, 32.30% and 45.64%, respectively. Thus, not only fruit yield, but also fruit quality and taste benefitted from oxygation. On other hands, although increasing irrigation level from 0.6 to 1.0 also stimulated plant growth and development, and then increased fruit yield, lycopene and soluble sugar contents of fruit were significantly decreased. In other words, yield increased with irrigation level increasing, but fruit quality declined. But the effects of irrigation level were less intensive than the positive effects of oxygation on fruit quality. What's more, oxygation and increasing irrigation level interactively affected on yield. Thus, when all of fruit quality factors, plant growth and development and yield were considered together, combinations of oxygation and the 1.0 irrigation level (W2D10 and W2D20) were the preferable treatments.

**Key words:** tomato; oxygation; soil aeration; growth; yield; fruit quality

## 引言

番茄可以在多种土壤类型中生长,但也是对含水量较高、通气性较差的土壤最敏感的作物之一<sup>[1]</sup>。虽然地下滴灌灌水效率高<sup>[2-4]</sup>,但地下滴灌也易受多种因素影响导致作物根区缺氧。地下滴灌滴头埋设在地下,灌水比较集中<sup>[5-6]</sup>,易在灌水时甚至灌水后一段时间在滴头附近形成持续的饱和湿润区<sup>[7-8]</sup>,进而导致滴头附近土壤缺氧。尤其是滴头埋深较大时,滴头附近土壤得不到有效的翻耕<sup>[9]</sup>,更易导致滴头附近土壤缺氧。MAROUELLI等<sup>[10]</sup>和MACHADO等<sup>[11]</sup>的研究表明,与埋深20 cm处理相比,滴头埋深为40 cm时,番茄产量分别下降了32%和2.5%。而且作物根系优先生长在滴头附近<sup>[11]</sup>,更加剧了滴头附近土壤缺氧对作物根系的危害。另一方面,地下滴灌灌水频率较高<sup>[3]</sup>,会间断导致土壤含水率增大。土壤含水率过高会增大土壤氧气运输路径的曲折程度<sup>[12]</sup>,降低土壤氧气的可利用性和扩散性<sup>[13]</sup>;另外较高的土壤含水率也增大了对土壤氧气的需求量,因为土壤微生物的生长繁殖很大程度上依赖于土壤含水率的增大<sup>[14]</sup>,而且由于土壤中大部分氧气是以气态形态存在<sup>[15]</sup>,因此土壤含水率的增大也会减少土壤中氧气的储存量。加气灌溉利用文丘里加气设备,在地下滴灌的基础上,将水气混合液和微型气泡输送到作物根区土壤<sup>[5,9]</sup>,因此加气灌溉可调控土壤中的水气比,进而有效改善地下滴灌下作物根区缺氧状况。

因地下滴灌根区土壤缺氧限制作物根系生长、根系呼吸和土壤微生物呼吸,会进一步阻碍离子吸收、养分运输等,进而影响作物新陈代谢和生长发育<sup>[5-6,16]</sup>。BHATTARAI等<sup>[7,9]</sup>研究表明加气灌溉下土壤氧气含量显著增大,灌水时加气灌溉下土壤氧气含量的下降(25%)也明显低于不加气灌溉(45%)。CHEN等<sup>[17]</sup>的研究表明加气灌溉下土壤呼吸显著增大了42%~100%。因此加气灌溉在保留地下滴灌灌水效率高等优点的基础上,又有效增大了土壤氧气含量,缓解了灌水时土壤湿润区造成的土壤缺氧,改善了作物根系土壤微环境,进而促进作物生长、提高作物产量<sup>[5,8-9,18-19]</sup>。本文针对不同灌水水平和滴头埋深条件,以不加气地下滴灌为对照,研究加气灌溉对温室番茄根区土壤通气性、植株生长发育、产量和果实品质的影响,进而探索较优的加气灌溉模式。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

试验在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室(北纬34°20′、东经108°24′,海拔高度为521 m)的日光温室内进行。温室内土壤类型为壤土,土壤质地为粉砂质粘壤土。土壤中砂粒、粉粒和黏粒的质量分数分别为26.0%、33.0%、41.0%;0~40 cm土层每10 cm为一个划分层的土壤干容重分别为1.27、1.34、1.42、1.37 g/cm<sup>3</sup>;0~60 cm土层内的田间持水量为32.1%(体积含水

率)。试验地年平均日照时长为 2 163.8 h, 无霜期为 210 d。

## 1.2 试验方法与设计

试验番茄品种为金鹏 10 号, 属中早熟品种。试验地内每垄垄长 4 m, 垄宽 0.8 m, 垄中间水平埋设管径 16 mm 的地下滴灌管, 滴头流量为 4 L/h, 间距为 35 cm, 距离作物茎秆 10 cm。每垄移植 11 株番茄苗, 株距 35 cm。临近的两垄之间用埋深 100 cm 的塑料膜隔开, 防止侧渗。1 垄即为 1 个试验小区。于 2016 年 4 月 4 日进行移植, 移植时保证番茄幼苗为 3 叶 1 心至 4 叶 1 心, 移植当天浇透底水, 以保证番茄幼苗的成活。一般 7~10 d 缓苗, 试验于 2016 年 4 月 11 日正式开始。三穗时打顶, 其他试验日常管理措施, 如整枝、覆膜等, 均按照当地管理措施进行。番茄全生育期时长 89 d, 生育期划分为苗期(04-11—04-19)、开花期(04-20—04-25)、结果期(04-26—06-03)和成熟期(06-04—07-02)。

通过放置在番茄冠层 20 cm 处的 E601 型标准蒸发皿测得的蒸发量控制灌水量。灌水在 08:00—12:00 之间进行, 周期为 3 d 或 4 d 一次, 灌水量以灌水间隔内每天 08:00 测定的蒸发量为依据, 计算公式<sup>[20]</sup>为

$$W = AE_{pan}k_{cp} \quad (1)$$

式中  $W$ ——灌溉水量, L

$A$ ——单个滴头控制的小区面积, 取 0.14 m<sup>2</sup>  
(0.35 m × 0.4 m)

$E_{pan}$ ——2 次灌水时间间隔内的蒸发量, mm

$k_{cp}$ ——作物-皿系数

试验采用 3 因素完全随机设计, 设计 2 种灌水方式、2 个灌水水平和 2 种滴头埋深。2 种灌水方式分别为加气灌溉(O)和地下滴灌(S, 不加气灌溉作为对照处理); 2 个灌水水平(W)依据  $k_{cp}$  取值 0.6、1.0, 分别表示为 W1 和 W2; 2 种滴头埋深(D)分别为 15 cm(D1)和 25 cm(D2)。试验共 8 个处理, 分别为 W1D1O、W1D1S、W2D1O、W2D1S、W1D2O、W1D2S、W2D2O 和 W2D2S, 每个处理 3 次重复, 1 次重复即为 1 个小区, 试验共 24 个小区。

加气灌溉试验中, Mazzei287 型文丘里加气设备安装于地下滴灌管道的首端, 在管道的进出水口均装有压力表, 通过调节管道调节阀, 保证灌水时每垄进口压力为 0.1 MPa, 出口压力为 0.02 MPa, 灌水管中多余的水回流到供水水桶中, 由排气法测得进水量占灌溉水量的 17%<sup>[21]</sup>。加气灌溉在灌水的同时吸入空气, 因此在相同灌水量下, 加气灌溉的灌水时间相比于不加气灌溉会相对延长<sup>[7,9]</sup>。本试验条件下每灌 1 L 水, 加气灌溉下的灌水时间比不加气

灌溉延长约 3 min<sup>[22]</sup>。

## 1.3 测定指标与方法

### 1.3.1 番茄根系土壤通气性的测定

(1) 土壤氧气含量( $O_s$ ): 利用光纤式氧气测量仪连接氧气敏感探针测定。选择每垄靠近中间的一株植株提前插入探针, 探针插入深度为 10 cm, 距离作物茎秆 5 cm, 插入探针时造成的土壤孔洞用湿土封实后, 重新覆盖好塑料薄膜, 尽可能避免大气对土壤空气的扰动。1 个氧气测量仪可同时连接 2 个氧气敏感探针。本试验中有 1 个氧气测量仪, 因此有 2 个小区可同时测定。待探针基本稳定后(约 1 min 后)开始记录数据, 将仪器设置为每 15 s 记录 1 次数据, 大约记录 3~4 min 后将探针拔出更换到其他 2 个小区。仪器具体使用方法参照文献[21-22]。从 4 月 11 日起, 每隔 10~15 d 左右测定一次, 共测定 7 次。在 12:00—14:00 之间测定, 有研究表明, 这期间测得的土壤氧气含量可以代表当天的平均值<sup>[9]</sup>。

(2) 土壤含水率: 利用铝盒取土烘干法测定 0、10、15、20、25、30、40 cm 土层之间的土壤质量含水率( $\theta_s$ )。取土点距离地下滴灌管道 10 cm 左右。土壤体积含水率( $\theta_v$ )为土壤质量含水率与土壤干容重的乘积。土壤体积含水率与土壤氧气含量在同一天测定。

### 1.3.2 番茄生长指标、产量和果实品质的测定

(1) 番茄形态指标和干物质积累量的测定: 番茄果实收获前每个小区选择 2 株长势均匀的植株分别利用卷尺和游标卡尺测其株高和茎粗, 利用打孔法<sup>[23]</sup>测其叶面积。然后进行植株破坏, 将地上部分分为茎、叶和果 3 部分, 同时, 挖取植株的地下部分, 尽可能将根系收拾干净、洗净、擦干。分别称取各部分鲜质量, 待干燥后分别称其干质量。

(2) 开花期时间和时长的记录: 番茄植株开始开花时, 分别记录每株的开花时间和时长。开花期时长以每个小区 1/2 以上的植株进入开花期时开始, 进入坐果期时结束。

(3) 产量测定: 每个小区选择 5 株长势均匀的植株测其产量, 以单株计, 包括单株产量、单果质量和果实数目的记录。

(4) 番茄果实品质测定: 收获期间每垄随机选择 4 个成熟果实进行品质分析。利用蒽酮比色法测其可溶性糖含量<sup>[23]</sup>, 酸碱滴定法测其有机酸含量<sup>[23-24]</sup>, 钼蓝比色法测其维生素 C 含量<sup>[23]</sup>, 紫外分光光度法测定番茄红素含量<sup>[25-26]</sup>。

## 1.4 数据处理与分析

采用 SPSS 17.0 统计软件进行显著性分析和相

关关系分析。用 SigmaPlot 12.0 进行绘图分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 加气灌溉对温室番茄根区土壤通气性的影响

在番茄整个生长季内,各处理土壤氧气含量基本均呈现先增加后减小的趋势(图1,图中不同字母表示同一次测量中处理间差异显著( $P < 0.05$ ),下同)。总体而言,加气灌溉下土壤氧气含量明显高于不加气灌溉处理,且相同灌水和滴头埋深条件下的加气和不加气灌溉处理间土壤氧气含量

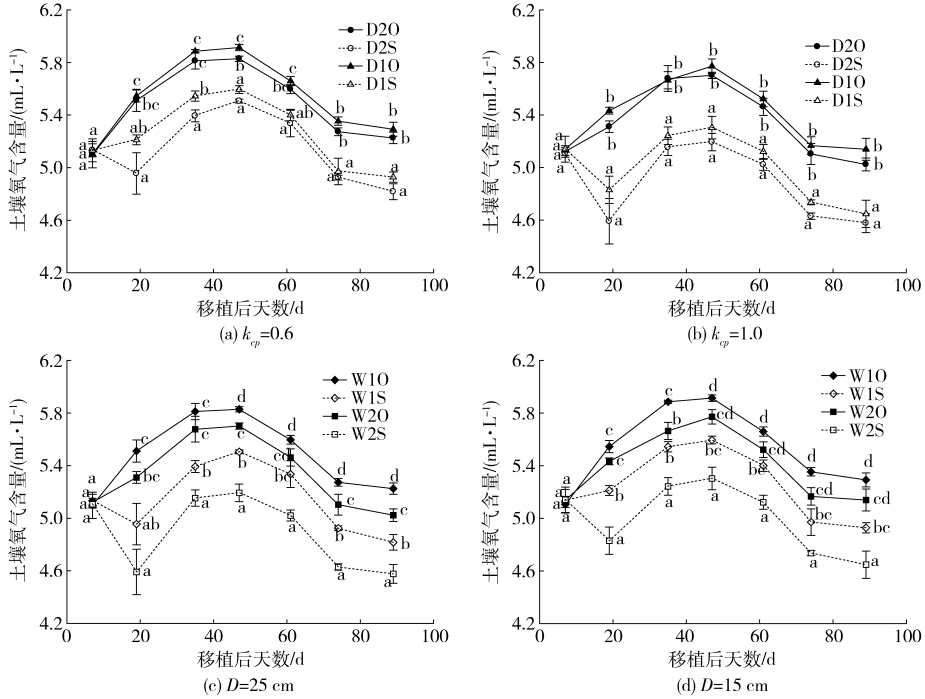


图1 温室番茄根区土壤氧气含量的变化

Fig.1 Variations of soil oxygen concentration in root zone of greenhouse tomato

番茄整个生长季内,处理 W1D10、W1D1S、W1D20 和 W1D2S 土壤氧气含量平均值分别为 5.537、5.255、5.478、5.152 mL/L。由此可知, $k_p$  为 0.6 水平下,滴头埋深 15 cm 处理的土壤氧气含量较埋深 25 cm 的处理增大了 1.49%;同时,该灌水水平下加气灌溉较不加气灌溉土壤氧气含量显著增大了 5.52% (图 1a)。处理 W2D10、W2D1S、W2D20 和 W2D2S 土壤氧气含量平均值分别为 5.405、5.062、5.343、4.896 mL/L,因此, $k_p$  为 1.0 时,滴头埋深 15 cm 的处理与 25 cm 的处理相比,土壤氧气含量增大了 2.18%;同时,该灌水水平下加气灌溉较不加气灌溉处理土壤氧气含量显著增大了 7.35% (图 1b)。另外,比较 W1D20、W1D2S、W2D20 和 W2D2S 处理可知,在滴头埋深为 25 cm 时,随着灌水水平的增大,土壤氧气含量下降了 3.68%,且在此埋深下加气灌溉较不加气灌溉土壤氧气含量显著增大了 7.15% (图 1c)。同理,比较

均存在显著性差异( $P < 0.05$ )。相同灌水水平下,滴头埋深 15 cm 的加气和不加气灌溉处理的土壤氧气含量均分别高于埋深 25 cm 的加气和不加气处理(图 1a、1b),但仅在  $k_p$  为 0.6 时,个别测定点间存在显著性差异( $P < 0.05$ )。相同滴头埋深下,随着灌水水平  $k_p$  由 0.6 增大到 1.0,土壤氧气含量减小(图 1c、1d),且部分测定点间存在显著性差异( $P < 0.05$ ),尤其是相同滴头埋深的加气灌溉处理间大部分测定点存在显著性差异( $P < 0.05$ )。

W1D10、W1D1S、W2D10 和 W2D1S 处理可知,在滴头埋深为 15 cm 时,随灌水水平的增大土壤氧气含量下降了 3.00%,且该埋深下加气灌溉较不加气灌溉土壤氧气含量显著增大了 5.71% (图 1d)。

综合以上可知,加气灌溉较不加气灌溉土壤氧气含量显著增大了 6.42% ( $P < 0.05$ )。滴头埋深 15 cm 的处理较 25 cm 的处理土壤氧气含量增大了 1.83%,灌水水平  $k_p$  为 1.0 时土壤氧气含量较  $k_p$  为 0.6 时下降了 3.34%,但是不同滴头埋深或不同灌水水平处理间土壤氧气含量仅部分测定点间存在显著性差异( $P < 0.05$ )。

处理 W1D20 灌水在 10:00—10:30 之间进行,处理 W1D2S 灌水在 10:30—11:00 之间进行,灌水期间(30 min 内)W1D20 和 W1D2S 处理土壤氧气含量分别急剧下降了 51.70% 和 67.10% (图 2)。处理 W1D20 土壤氧气含量最小值为 0.751 mL/L,出现在灌水 1 h 后(11:30);处理 W1D2S 土壤氧气

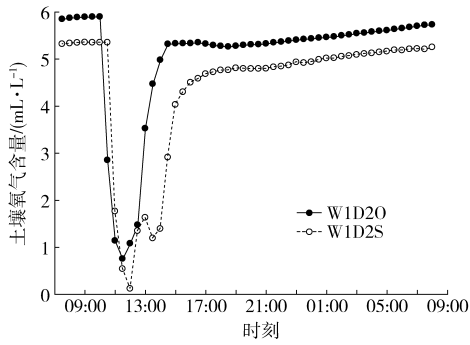


图 2 灌水前后及灌水期间温室番茄根区土壤氧气含量 24 h 内的变化

Fig. 2 Diurnal variation of soil oxygen concentration in root zone of greenhouse tomato before, during and after irrigation

含量最小值为 0.115 mL/L, 也出现在灌水 1 h 后 (12:00)。由此可知, 处理 W1D20 土壤氧气含量最小值明显高于 W1D2S。处理 W1D20 和 W1D2S 的土壤氧气含量分别在灌水 4 h (14:30) 和 5 h (16:00) 后回升至平稳值。处理 W1D20 和 W1D2S 在 10:00 (灌水前) 的土壤氧气含量分别为 5.897 mL/L 和 5.348 mL/L; 处理 W1D20 和 W1D2S 回升平稳后 (16:00) 土壤氧气含量分别为 5.332 mL/L 和 4.497 mL/L。由此可知, 灌水前处理 W1D20 的土壤氧气含量值较 W1D2S 增大了 9.30%, 而灌水后处理 W1D20 的土壤氧气含量较 W1D2S 增大了 15.67%。

在番茄生长前期 (前 4 次测定, 移植后 0~47 d, 苗期、开花期和结果期) 土壤体积含水率明显下降,

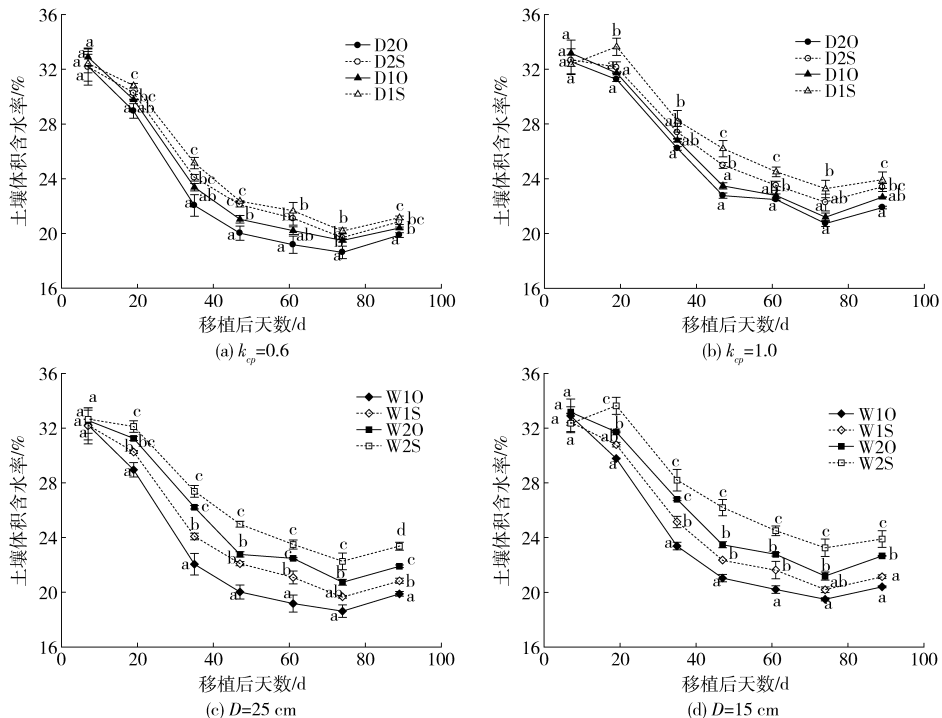


图 3 温室番茄根区土壤体积含水率的变化

Fig. 3 Variations of soil volumetric water content in root zone of greenhouse tomato

而后呈现稳定变化的趋势 (图 3, 图中土壤体积含水率为 0~40 cm 土层的平均值)。总体而言, 加气灌溉处理的土壤体积含水率明显低于不加气灌溉处理, 且相同灌水和滴头埋深条件下加气和不加气灌溉的土壤体积含水率部分测定点间存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。对相同灌水水平下的处理而言, 滴头埋深 15 cm 处理的土壤体积含水率均高于埋深 25 cm 的处理 (图 3a, 3b), 但只有个别测定点间存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。处理 W1D10、W1D1S、W1D20 和 W1D2S 的土壤体积含水率平均值分别为 23.88%、24.81%、22.99%、24.31%。因此,  $k_{cp}$  为 0.6 时, 滴头埋深 15 cm 处理的土壤体积含水率较埋深 25 cm 的处理增大了 2.87%, 且该灌水水平下, 加气灌溉土壤体积含水率较不加气灌溉下降了 4.57% (图 3a)。另一方面, 处理 W2D10、W2D1S、W2D20 和 W2D2S 的土壤体积含水率平均值分别为 25.97%、28.02%、25.41%、26.60%。由此可知,  $k_{cp}$  为 1.0 时, 滴头埋深 15 cm 的处理与埋深 25 cm 的处理相比, 土壤体积含水率增大了 3.66%; 同时, 该灌水水平下加气灌溉土壤体积含水率较不加气灌溉下降了 5.94% (图 3b)。

随着灌水水平的增大, 土壤体积含水率显著增大 ( $P < 0.05$ ) (图 3c、3d)。比较处理 W1D20、W1D2S、W2D20 和 W2D2S 可知, 滴头埋深 25 cm 条件下, 随灌水水平  $k_{cp}$  由 0.6 增大到 1.0, 土壤体积含水率增大了 9.07% ( $P < 0.05$ ), 且该埋深条件下, 加气灌溉较不加气灌溉土壤体积含水率下降了

4.93% (图 3c)。同理,比较 W1D10、W1D15、W2D10 和 W2D15 处理可知,埋深 15 cm 条件下,随着灌水水平的增大土壤体积含水率增大了 9.81% ( $P < 0.05$ ),且该埋深下加气灌溉土壤体积含水率较不加气灌溉下降了 5.64% (图 3d)。

表 1 土壤氧气含量与土壤体积含水率之间的相关系数

Tab.1 Correlation coefficients between soil oxygen concentration and soil volumetric water content

阶段	处理					
	O	S	W1	W2	D1	D2
前 4 次	-0.912 **	-0.670 **	-0.816 **	-0.653 **	-0.821 **	-0.732 **
后 3 次	-0.169	-0.181	-0.128	-0.215	-0.389 *	-0.434 **
全部	-0.285 **	-0.023	-0.226 *	-0.051	-0.205	-0.214

注: \*\*表示在  $P < 0.01$  水平极显著相关, \* 表示在  $P < 0.05$  水平显著相关,下同。

在番茄生长前期(前 4 次测定:苗期、开花期和结果期)土壤氧气含量和土壤体积含水率的变化趋势明显均与后期(后 3 次测定:成熟期)不同,因此按照番茄生育期(测定阶段)分段分析土壤氧气含量与土壤体积含水率的相关关系(表 1)。土壤氧气含量在前 4 次测定中呈现增长的趋势,而土壤体积含水率下降趋势明显,因此在前 4 次测定中,对所有处理而言,土壤氧气含量与土壤体积含水率均极显著负相关( $P < 0.01$ )。分别与不加气灌溉和  $k_{ep}$  为 1.0 灌水水平相比,加气灌溉下和  $k_{ep}$  为 0.6 灌水水平下土壤氧气含量与土壤体积含水率之间的相关系数相对更大。在后 3 次测定中,也就是番茄成熟期,除在 2 种滴头埋深处理下土壤氧气含量与含水率分别显著负相关( $P < 0.05$ )外,土壤氧气含量与土壤

由此可知,在番茄整个生长季内,加气灌溉下土壤体积含水率较不加气灌溉下降了 5.29%;滴头埋深 15 cm 的处理土壤体积含水率较埋深 25 cm 的处理增大了 3.28%;灌水水平由  $k_{ep}$  为 0.6 增大到 1.0 水平时,土壤体积含水率随之显著增大了 9.45% ( $P < 0.05$ )。

体积含水率的相关关系不显著。

## 2.2 加气灌溉对温室番茄作物生长和产量的影响

加气灌溉对温室番茄株高没有显著影响(表 2),但相比于不加气灌溉,茎粗和叶面积对加气灌溉存在极显著的积极响应( $P < 0.01$ )。加气灌溉下番茄植株茎粗和叶面积较不加气灌溉处理分别显著增大了 4.55% 和 16.21%。另一方面,随灌水水平的增大,番茄植株的株高、茎粗和叶面积也分别呈现极显著的积极响应( $P < 0.01$ )。灌水水平  $k_{ep}$  为 1.0 的处理较  $k_{ep}$  为 0.6 的处理,番茄植株株高、茎粗和叶面积分别显著增大了 5.05%、4.75% 和 14.05% ( $P < 0.01$ )。但是,滴头埋深 15 cm 和 25 cm 对番茄株高、茎粗和叶面积的影响没有显著性差异( $P < 0.05$ )。

表 2 不同灌水水平和滴头埋深条件下加气灌溉对温室番茄株高、茎粗和叶面积的影响

Tab.2 Impacts of oxygation under different irrigation rates and emitter depths conditions on plant height, stem diameter and leaf area of greenhouse tomato

处理	株高/cm			茎粗/mm			叶面积/m <sup>2</sup>		
	O	S	平均值	O	S	平均值	O	S	平均值
W1	110.13	108.15	109.14 <sup>a</sup>	12.28	11.9	12.09 <sup>a</sup>	1.29	1.06	1.17 <sup>a</sup>
W2	117.03	112.84	114.94 <sup>b</sup>	13.08	12.3	12.69 <sup>b</sup>	1.48	1.26	1.37 <sup>b</sup>
D1	113.64	111.69	112.67	12.63	12.1	12.37	1.40	1.18	1.29
D2	113.52	109.30	111.41	12.72	12.1	12.41	1.37	1.14	1.25
平均值	113.58	110.50		12.68 <sup>B</sup>	12.1 <sup>A</sup>		1.38 <sup>B</sup>	1.16 <sup>A</sup>	
F 值									
O	3.260			7.540 **			18.627 **		
W	14.083 **			8.356 **			12.341 **		
D	0.513			0.031			0.342		

注:同一列不同小写字母表示指标存在显著性差异( $P < 0.05$ ),同一行不同大写字母表示指标存在显著性差异( $P < 0.05$ ),下同。

加气、灌水水平和滴头埋深三因子均对番茄的开花期时长没有显著性影响(表 3)。但是,相比于不加气灌溉,加气灌溉下番茄的开花期时长存在延长的趋势。而且,相比于不加气灌溉,加气灌溉下番茄三穗花的开花日期均推后了 2 d 左右,其中,第 2

穗和第 3 穗花的开花日期与不加气灌溉存在显著性差异( $P < 0.01$ )(表 4)。另外,随着灌水水平的增大,番茄第 1 穗花的开花日期也存在明显的推后趋势( $P < 0.01$ )。滴头埋深 15 cm 和 25 cm 对番茄开花日期没有显著性影响,但是 15 cm 滴头埋深下番

表 3 不同灌水水平和滴头埋深条件下加气灌溉对温室番茄开花期时长的影响

Tab. 3 Effects of oxygation under different irrigation rates and emitter depths conditions on flowering duration of greenhouse tomato

处理	第 1 穗开花			第 2 穗开花			第 3 穗开花		
	O	S	平均值	O	S	平均值	O	S	平均值
W1	7.67	6.17	6.92	6.50	6	6.25	7.83	6.17	7.00
W2	6.33	6.00	6.17	6.00	6	6.00	7.67	7.50	7.59
D1	7.00	6.00	6.50	6.50	6	6.25	7.84	6.50	7.17
D2	7.00	6.17	6.58	6.00	6	6.00	7.67	7.17	7.42
平均值	7.00	6.08		6.25	6		7.75	6.84	
<i>F</i> 值									
O	3.836			1			3.973		
W	2.428			1			1.453		
D	0.027			1			0.253		

表 4 不同灌水水平和滴头埋深条件下加气灌溉对温室番茄开花日期(移植后天数)的影响

Tab. 4 Effects of oxygation under different irrigation rates and emitter depths conditions on flowering date of greenhouse tomato

处理	第 1 穗开花			第 2 穗开花			第 3 穗开花		
	O	S	平均值	O	S	平均值	O	S	平均值
W1	16.00	14.67	15.33 <sup>a</sup>	13.33	12.00	12.67	19.67	17.67	18.67
W2	18.83	16.83	17.83 <sup>b</sup>	13.50	11.67	12.58	19.67	17.84	18.75
D1	17.33	15.83	16.58	12.83	11.67	12.25	19.17	17.17	18.17
D2	17.50	15.67	16.58	14.00	12.00	13.00	20.17	18.34	19.25
平均值	17.42	15.75		13.42 <sup>B</sup>	11.83 <sup>A</sup>		19.67 <sup>B</sup>	17.75 <sup>A</sup>	
<i>F</i> 值									
O	4.022			9.569 <sup>**</sup>			19.462 <sup>**</sup>		
W	11.730 <sup>**</sup>			0.018			0.020		
D	0			1.605			3.881		

茄第 2 和第 3 穗花的开花日期有提前的趋势。

相比于不加气灌溉处理,加气灌溉对番茄植株的果实干质量有极显著的正影响效应( $P < 0.01$ ) (表 5),加气灌溉下果实干质量增大了 23.57%。虽然加气灌溉下番茄植株根、茎和叶的干质量与不加气灌溉处理间没有显著性差异,但仍有增大的趋势。加气灌溉下植株的根冠比减小,但与不加气灌

溉处理间没有显著性差异。除了对果实干质量没有显著性影响外,随着灌水水平  $k_{cp}$  由 0.6 增大到 1.0,番茄植株根、茎和叶的干质量分别产生了显著的积极响应( $P < 0.05$ )。灌水水平  $k_{cp}$  为 1.0 水平下,根、茎和叶的干质量较  $k_{cp}$  为 0.6 水平下分别显著增大了 24.03%、17.24% 和 22.78%。另外,滴头埋深的变化对番茄植株各组成部分的干质量并没有显著性影响。

表 5 不同灌水水平和滴头埋深条件下加气灌溉对温室番茄植株干物质各组成部分的影响

Tab. 5 Effects of oxygation under different irrigation rates and emitter depths conditions on dry matter partitioning of greenhouse tomato

处理	根干质量/g			叶干质量/g			茎干质量/g			果实干质量/g			根冠比/%		
	O	S	平均值	O	S	平均值	O	S	平均值	O	S	平均值	O	S	平均值
W1	2.481	2.318	2.400 <sup>a</sup>	27.615	23.986	25.801 <sup>a</sup>	28.217	23.674	25.946 <sup>a</sup>	77.652	56.238	66.945	0.0189	0.0225	0.0207
W2	3.314	3.003	3.159 <sup>b</sup>	33.141	29.210	31.176 <sup>b</sup>	36.014	31.189	33.602 <sup>b</sup>	85.588	68.524	77.056	0.0224	0.0243	0.0233
D1	3.023	2.727	2.875	30.546	26.977	28.762	32.729	28.070	30.400	81.920	63.172	72.546	0.0212	0.0235	0.0014
D2	2.772	2.594	2.683	30.210	26.219	28.215	31.502	26.793	29.148	81.320	61.590	71.455	0.0201	0.0232	0.0018
平均值	2.898	2.661		30.378	26.598		32.116	27.432		81.620 <sup>B</sup>	62.381 <sup>A</sup>		0.0206	0.0234	
<i>F</i> 值															
O	0.779			3.004			3.151			11.745 <sup>**</sup>			1.484		
W	9.858 <sup>**</sup>			6.609 <sup>*</sup>			9.774 <sup>**</sup>			2.651			1.416		
D	0.508			0.058			0.209			0.029			0.091		

番茄单株产量、单果质量和水分利用效率对加气灌溉存在极显著的积极响应( $P < 0.01$ ) (表6)。在相同灌水水平和滴头埋深条件下,加气灌溉单株产量和单果质量与不加气灌溉处理间基本均存在显著性差异(图4)。与不加气灌溉相比,加气灌溉下番茄单株产量、单果质量和水分利用效率分别增大了29.04%、23.93%和28.11%,但是加气灌溉对单株果数没有显著性影响(表6)。随着灌水水平 $k_{ep}$ 由0.6增大到1.0,单株产量、单株果数和单果质量分别显著增大了25.28%、11.35%和12.53% ( $P < 0.01$ ),但是水分利用效率显著减小了19.70% ( $P < 0.01$ )。加气和灌水水平两因子对番茄单株产量和单果质量有显著的交叉影响效应(表6)。处理W2D10的单株产量和单果质量最高,且与W2D20处理除外的其他处理均形成显著性差异( $P < 0.05$ ) (图4)。滴头埋深对番茄单株产量、单株果数、单果

质量和水分利用效率没有显著性影响,但随着滴头埋深由15 cm增大到25 cm,单株产量、单株果数和单果质量均有减小的趋势。

表7表明,全部处理的番茄产量与植株的株高、茎粗和叶面积均呈现极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),加气灌溉下相关系数为0.4左右,而不加气灌溉下相关系数为0.2左右。由此可知,相比于不加气灌溉,加气灌溉下番茄产量对植株各生长指标更敏感。比较 $k_{ep}$ 为0.6和1.0灌水水平,1.0灌水水平下番茄产量对植株各生长指标更敏感。15 cm和25 cm滴头埋深条件下,番茄产量与植株各生长指标的相关系数差异不大。

表8表明,加气灌溉对番茄果实的番茄红素、维生素C、可溶性糖含量和糖酸比有极显著的正影响效应( $P < 0.01$ ),与不加气灌溉处理相比,加气灌溉下各指标分别增大了37.73%、31.43%、32.30%和

表6 不同灌水水平和滴头埋深条件下加气灌溉对温室番茄单株产量、单果质量、单株果数和水分利用效率的影响  
Tab.6 Effects of oxygation under different irrigation rates and emitter depths conditions on fruit yield, number and weight and water use efficiency of greenhouse tomato

处理	单株产量/g			单株果数/个			单果质量/g			水分利用效率/( $g \cdot L^{-1}$ )		
	O	S	平均值	O	S	平均值	O	S	平均值	O	S	平均值
W1	1 099.905	827.604	963.755 <sup>a</sup>	11.58	11.08	11.33 <sup>a</sup>	100.596	82.413	91.505 <sup>a</sup>	54.019	40.645	47.332 <sup>b</sup>
W2	1 536.503	1 043.132	1 289.817 <sup>b</sup>	12.92	12.64	12.78 <sup>b</sup>	122.173	87.042	104.608 <sup>b</sup>	45.276	30.738	38.007 <sup>a</sup>
D1	1 340.786	960.456	1 150.621	12.32	12.06	12.19	113.996	87.056	100.526	50.346	36.665	43.505
D2	1 336.614	910.280	1 123.447	12.24	11.66	11.95	111.439	82.399	96.919	48.949	34.719	41.834
平均值	1 318.204 <sup>B</sup>	935.368 <sup>A</sup>		12.25	11.86		111.384 <sup>B</sup>	84.728 <sup>A</sup>		49.648 <sup>B</sup>	35.692 <sup>A</sup>	
<i>F</i> 值												
O	88.183 **			0.661			37.167 **			87.858 **		
W	56.997 **			9.542 **			7.861 **			31.488 **		
D	0.283			0.247			0.556			0.877		
O × W	11.304 **			0.054			3.925 *			0.189		
O × D	0.006			0.075			0.004			0.034		
W × D	0.389			0.323			0			0.041		
O × W × D	0.296			0.011			0.260			0.291		

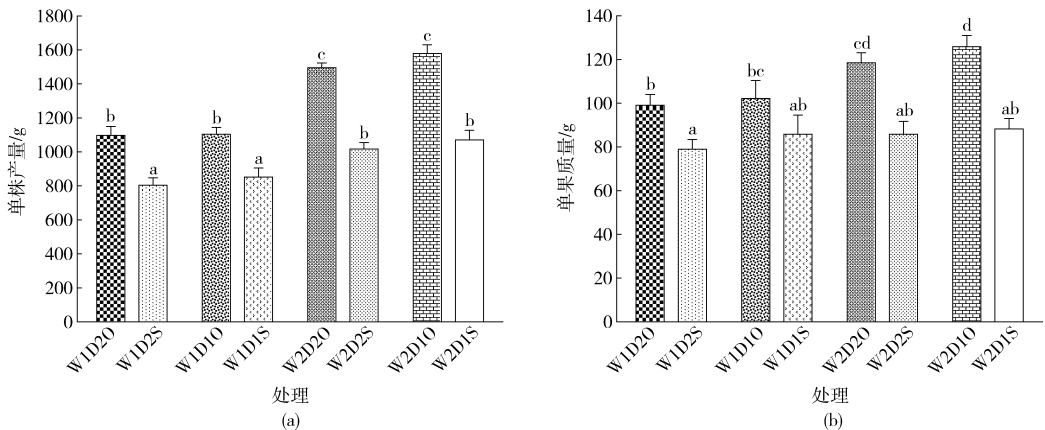


图4 不同灌水水平和滴头埋深条件下加气灌溉对温室番茄单株产量和单果质量的影响

Fig.4 Effects of oxygation under different irrigation rates and emitter depths conditions on fruit yield and weight of greenhouse tomato



表 7 各试验处理条件下温室番茄单株产量与植株的株高、茎粗、叶面积的相关系数

Tab.7 Correlation coefficients among fruit yield, plant height, stem diameter and leaf area with oxygation and subsurface drip irrigation treatments under different irrigation rates and emitter depths conditions

处理	因子	产量	株高	茎粗	叶面积
O	产量	1	0.379 **	0.427 **	0.413 **
	株高		1	0.302 **	0.510 **
	茎粗			1	0.452 **
	叶面积				1
S	产量	1	0.232 *	0.235 *	0.193
	株高		1	-0.001	0.054
	茎粗			1	0.522 **
	叶面积				1
W1	产量	1	0.070	0.301 **	0.287 **
	株高		1	0.030	0.135
	茎粗			1	0.569 **
	叶面积				1
W2	产量	1	0.393 **	0.374 **	0.477 **
	株高		1	0.084	0.297 **
	茎粗			1	0.454 **
	叶面积				1
D1	产量	1	0.470 **	0.487 **	0.504 **
	株高		1	0.106	0.217 *
	茎粗			1	0.623 **
	叶面积				1
D2	产量	1	0.333 **	0.465 **	0.528 **
	株高		1	0.343 **	0.529 **
	茎粗			1	0.567 **
	叶面积				1
全部	产量	1	0.399 **	0.468 **	0.518 **
	株高		1	0.239 **	0.381 **
	茎粗			1	0.585 **
	叶面积				1

表 8 不同灌水水平和滴头埋深条件下加气灌溉对温室番茄果实品质的影响

Tab.8 Effects of oxygation under different irrigation rates and emitter depths conditions on fruit quality of greenhouse tomato

处理	番茄红素含量/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )			维生素 C 含量/( $\text{mg}\cdot(100\text{g})^{-1}$ )			可溶性糖质量分数/%			有机酸质量分数/%			糖酸比/%		
	O	S	平均值	O	S	平均值	O	S	平均值	O	S	平均值	O	S	平均值
W1	45.799	27.477	36.638 <sup>b</sup>	4.064	3.023	3.543	4.569	3.403	3.986 <sup>b</sup>	0.815	0.997	0.906 <sup>b</sup>	5.851	3.556	4.704
W2	36.27	23.629	29.949 <sup>a</sup>	3.721	2.314	3.018	4.138	2.492	3.315 <sup>a</sup>	0.709	0.852	0.781 <sup>a</sup>	6.402	3.104	4.753
D1	41.616	27.633	34.624	4.034	2.808	3.421	4.594	3.122	3.858	0.731	0.905	0.818	6.779	3.520	5.149
D2	40.453	23.473	31.963	3.750	2.529	3.140	4.113	2.773	3.443	0.794	0.945	0.869	5.474	3.140	4.307
平均值	41.034 <sup>B</sup>	25.553 <sup>A</sup>		3.892 <sup>B</sup>	2.669 <sup>A</sup>		4.354 <sup>B</sup>	2.948 <sup>A</sup>		0.762 <sup>A</sup>	0.925 <sup>B</sup>		6.126 <sup>B</sup>	3.330 <sup>A</sup>	
F 值															
O	76.887 **			24.065 **			28.476 **			15.105 **			45.548 **		
W	8.619 **			3.678			5.263 *			8.510 **			0.009		
D	1.267			1.028			1.947			1.345			2.865		

5.71% , $k_{cp}$ 为 0.6 和 1.0 加气灌溉下土壤氧气含量分别较不加气灌溉增大了 5.52% 和 7.35% ( $P < 0.05$ ) (图 1)。BHATTARAI 等<sup>[9]</sup>针对温室番茄的

45.64%。同时,加气灌溉下果实中的有机酸含量显著降低,比不加气灌溉降低了 17.56% ( $P < 0.01$ )。灌水水平  $k_{cp}$ 为 0.6 对果实番茄红素、可溶性糖和有机酸含量产生显著 ( $P < 0.05$ ) 甚至极显著 ( $P < 0.01$ ) 正影响效应。与  $k_{cp}$ 为 0.6 灌水水平相比, $k_{cp}$ 为 1.0 灌水水平下番茄红素、可溶性糖和有机酸含量分别下降了 18.26%、16.84% 和 13.87%。另一方面,比较  $F$  值可知,与灌水水平相比,加气灌溉对番茄红素、维生素 C、可溶性糖含量和糖酸比的影响效应更明显。滴头 15 cm 和 25 cm 埋深下,果实各品质指标没有显著性差异。

### 3 讨论

#### 3.1 加气灌溉对温室番茄根区土壤通气性的影响

加气灌溉通过滴头向土壤中输送的是水气混合物和微型气泡<sup>[5]</sup>,因此可有效改善地下滴灌灌水后湿润区土壤孔隙中的空气完全被水分代替的状况。因此加气灌溉后土壤氧气含量高于不加气地下滴灌,尤其是在滴头埋深较深的土壤中,滴头附近土壤与大气的交换作用减弱,因此土壤氧气含量和土壤水分的有效调控很大程度上依赖于加气灌溉下空气的输送。FRIEDMAN 等<sup>[27]</sup>也指出随着土层深度的增大,土壤氧气含量大约呈直线下降的趋势。因此,本试验中,滴头埋深 15 cm 处理的土壤氧气含量高于埋深 25 cm 的处理(图 1)。另一方面,在灌水量较大时,地下滴灌土壤的缺氧状况更加明显,因此土壤氧气和水分的调控也更加依赖于外来空气的注入。本试验中加气灌溉下土壤氧气含量增大了 6.42%,且滴头埋深 25 cm 和 15 cm 加气灌溉下土壤氧气含量分别较不加气灌溉增大了 7.15% 和

研究表明,加气灌溉下土壤氧气含量显著增大了 12.14%。CHEN 等<sup>[17]</sup>针对不同作物和土壤类型加气灌溉的研究表明,加气灌溉下土壤氧气含量显著

增大了 2.4% ~ 32.6%, 且红壤中滴头埋深 30 cm 和 10 cm 时加气灌溉较不加气地下滴灌土壤氧气含量分别增大了 32.6% 和 8.6%。本试验中, 滴头埋深 25 cm 时加气灌溉较不加气灌溉土壤氧气含量的增大也较埋深 15 cm 时更加明显。BEN-NOAH 等<sup>[6]</sup>的研究表明利用地下滴灌管道向重黏土中注入空气使得土壤水分向下移动, 进而导致滴头下方土壤含水率下降。BHATTARAI 等<sup>[7]</sup>指出与加气灌溉相比, 不加气地下滴灌处理在根系活动区域有更大的区域处于饱和状态。PENDERGAST 等<sup>[8]</sup>研究也表明在相同灌水量和降水量下, 相比于加气灌溉, 不加气地下滴灌下 0 ~ 100 cm 土层土壤更加湿润, 且浅层土壤更易接近饱和状态。本试验中, 加气灌溉下 0 ~ 40 cm 土层的土壤含水率下降了 5.29% (图 3)。因此, 加气灌溉可有效缓解地下滴灌下滴头附近土壤含水率过高的状况。本试验中, 处理 W1D2O 和 W1D2S 土壤氧气含量灌水期间分别急剧下降了 51.70% 和 67.10%, 且灌水 1 h 后分别下降至最低点 0.751 mL/L 和 0.115 mL/L (图 2)。PENDERGAST 等<sup>[8]</sup>和 BHATTARAI 等<sup>[7,9]</sup>对灌水期间及灌水前后土壤水气变化的研究也均表明加气灌溉可有效缓解灌水造成的土壤氧气含量的急剧下降。因此, 加气灌溉通过有效调控土壤水气配合, 改善了土壤通气性(增大土壤氧气含量, 降低土壤含水率), 缓解了地下滴灌灌水时土壤湿润区的土壤缺氧状况。

本试验中, 番茄生长前期(前 4 次测定: 苗期、开花期和结果期), 土壤氧气含量的变化主要受土壤含水率的影响。受移植时浇透底水的影响, 番茄生长前期土壤含水率较大, 且随着番茄生长而下降(图 3), 因此土壤氧气含量随着土壤含水率的下降而增大(图 1)。番茄生长前期土壤氧气含量与土壤体积含水率极显著负相关(表 1)也表明, 此阶段土壤氧气含量主要受土壤含水率的影响。在番茄生长前期, 随番茄的生长耗水量增大, 因此依靠地下滴灌相对较少的灌水量不再能够保持移植时由浇透底水而造成的较高的土壤含水率, 也因此番茄生长前期, 随番茄的生长土壤含水率下降明显。番茄移植时浇透底水也只是为了保证番茄幼苗的成活, 但也因而造成土壤含水量相对较高。番茄成熟期(后 3 次测定)土壤含水率维持稳定, 此时土壤氧气含量的变化主要受外界温度(土壤温度)和作物生长变化的影响。在番茄成熟前期, 作物的生命活动较为旺盛, 因此作物根系呼吸对氧气的需求量较大。另一方面, 番茄成熟期外界温度在逐渐上升, 进而土壤温度也随之升高。BEN-NOAH 等<sup>[6,12]</sup>指出, 大部分情况

下, 温度升高导致氧气含量下降。因为随温度升高而增大的土壤扩散速率, 与随温度升高而增大的作物根系呼吸和土壤微生物呼吸相比, 可忽略不计, 因此土壤氧气的消耗随温度的升高而增大, 进而导致土壤氧气含量的降低。BHATTARAI 等<sup>[5]</sup>也指出随着土壤温度的升高, 氧气溶解度下降, 又由于氧气消耗量的增大, 在外界和土壤温度较高时, 作物更容易受土壤缺氧的危害。本试验中, 番茄成熟期土壤氧气含量的下降很大程度上受外界温度(土壤温度)升高的影响。

### 3.2 加气灌溉对温室番茄作物生长、产量和果实品质的影响

相关研究表明, 根系缺氧易造成脱落酸、乙醇等植物激素的增加<sup>[28-30]</sup>, 导致叶片气孔关闭<sup>[31]</sup>, 净光合速率下降<sup>[32]</sup>, 影响 ATP 的产生<sup>[33]</sup>, 进而影响作物生长。本试验中, 加气灌溉下番茄植株茎粗和叶面积分别显著增大了 4.55% 和 16.21% (表 2), 开花期时长存在延长的趋势, 且第 2 和第 3 穗花的开花日期均延后了 2 d 左右(表 3、4)。LI 等<sup>[34]</sup>研究表明, 番茄株高和茎粗相对向土壤中注入空气产生了积极的响应。HORCHANI 等<sup>[35]</sup>对番茄根系进行缺氧处理, 番茄的开花期、结果期和果实膨大期均提前, 且花和果实的数目均减少。BEN-NOAH 等<sup>[12]</sup>向灌溉水中加入 0.06% (体积分数)  $H_2O_2$  使得辣椒的开花期延后 30 d, 开花峰期延后 14 d。BHATTARAI 等<sup>[9]</sup>研究表明加气灌溉下番茄的单株叶面积显著增大了 12.7%, 第 1 穗花的开花期延后了 2 d 左右。BHATTARAI 等<sup>[36]</sup>研究也表明加气灌溉下棉花植株的茎粗显著增大了 6.86%。这些结果均表明地下滴灌因根系缺氧对不同作物各生长指标造成了不同程度的不利影响, 加气灌溉有效改善了作物根系的通气状况, 进而对番茄生长发育产生积极的影响作用。

本试验中, 与地下滴灌相比, 加气灌溉下果实干质量显著增大了 23.57% (表 5), 单株产量、单果质量和水分利用效率分别显著增大了 29.04%、23.93% 和 28.11% ( $P < 0.05$ ) (表 6)。不同土壤质地<sup>[17,36]</sup>、作物类型<sup>[7,17,20]</sup>、灌水水平<sup>[9]</sup>和滴头埋深<sup>[7,17]</sup>条件下的加气灌溉的研究均表明了加气灌溉对作物产量的积极影响趋势。加气灌溉在改善土壤-作物根系微环境的基础上, 促进了作物生长进而提高了作物产量。BHATTARAI 等<sup>[9]</sup>研究表明加气灌溉下温室番茄产量的增长主要归因于单果质量和果实干质量的增加, 而并不是果实数目的增大, 与本研究结果一致。本试验中, 灌水水平的增大对番茄产量和根、茎和叶的干质量均产生显著的积极影响(表 5、6)。而加气灌溉与不加气地下滴灌相比, 对根、茎和叶的干

质量没有显著性影响(表 5)。由此可知,加气灌溉促进番茄产量增长的同时,并没有造成番茄植株地上部的徒长;而随灌水水平的增大,虽然番茄产量增大,但也造成了植株地上部的徒长。这从加气灌溉下水分利用效率显著增大,而随灌水水平的增大水分利用效率显著降低(表 6)也可看出。另一方面,加气灌溉下单果质量和果干质量均显著增大,而随灌水水平的提高,单果质量显著增大,果干质量却没有显著性变化(表 5、6)。由此也可知,加气灌溉下果实质量的增大伴随着果实中其他固形物质含量的增大,但随灌水水平的增大而增大的果实质量主要是由果实水分含量的增大造成的。番茄果实中番茄红素、维生素 C、可溶性糖的含量对加气灌溉产生极显著的积极响应,而对灌水水平的降低产生积极响应(表 8),也可说明加气灌溉在提高番茄产量的基础上,也显著改善了番茄果实品质和风味,而随灌水水平的增大,虽然果实产量有所提高,但也一定程度上降低了果实品质,破坏了果实风味。因个人口味不同,暂且不确定加气灌溉下可溶性糖含量增大、有机酸含量减少,进而导致糖酸比的增大是否使果实的品质得到改善。但加气灌溉下番茄红素和维生素 C 含量的显著增大,却是番茄果实品质提高的表现。有研究表明,番茄红素和维生素 C 是人类饮食中抗氧化剂的重要来源之一,也与减少人类某些疾病的发生息息相关<sup>[37-39]</sup>。LI 等<sup>[34]</sup>研究也表明,通过地下滴灌向土壤中注入空气,使得番茄红素、维生素 C、糖酸比分别显著增大了 2%、41% 和 43%。因此,加气灌溉在积极影响作物生长和产量的基础上,还显著提高了果实品质,改善了果实风味,有利于提高果实的商业价值。

BHATTARAI 等<sup>[9]</sup>的研究表明相比于相对较低的灌水水平,当土壤含水率维持在田间持水量水平时,加气灌溉对果实产量的影响作用更显著。WOLF<sup>[40]</sup>指出当土壤中空气、水分和养分达到最优平衡状态时,作物生产力可达到最大。BEN-NOAH 等<sup>[6]</sup>对比研究了地上滴灌、地下滴灌和分别依此向土壤中注入空气,结果表明当重黏土中土壤含水率

较高时,只有向土壤中注入空气可保证作物不受土壤缺氧的危害,进而提高产量。本试验中,在  $k_{cp}$  为 1.0 时加气灌溉(处理 W2D10 和 W2D20)下作物产量较高(图 4),灌水水平的提高和加气灌溉对番茄单株产量和单果质量存在显著的积极交叉影响(表 6)。相比于不加气灌溉和  $k_{cp}$  为 0.6 的灌水水平,加气灌溉下和  $k_{cp}$  为 1.0 时,番茄产量分别对植株的株高、茎粗和叶面积更加敏感(表 7)。由此可知,本试验中  $k_{cp}$  为 1.0 水平下进行加气灌溉对植株生长、番茄产量的积极影响效应更明显。虽然随灌水水平的提高,果实品质有所降低,但是相比于灌水水平,加气灌溉对番茄果实品质的积极影响效应更明显(表 8)。本试验中,滴头埋深的变化对番茄根区土壤环境、植株生长、果实产量和品质没有产生显著的影响,一是由于 2 种滴头埋深深度差异较小,因此对作物的影响差异不显著,另外 15 cm 和 25 cm 的埋深都处于番茄根系的集中生长区域<sup>[16,34]</sup>,因此在这 2 个深度加气或不加气的差异均不显著。综合分析番茄植株生长发育、番茄产量和果实品质, $k_{cp}$  为 1.0 灌水水平下进行加气灌溉,即 W2D10、W2D20 处理是本试验条件下对温室番茄较优的加气灌溉模式。

## 4 结论

(1) 加气灌溉较不加气地下滴灌处理土壤氧气含量显著增大了 6.42% ( $P < 0.05$ ),土壤体积含水率下降了 5.29%。加气灌溉有效改善了土壤通气性,缓解了地下滴灌下的土壤缺氧状况。

(2) 与不加气地下滴灌相比,加气灌溉下番茄单株产量和水分利用效率分别显著增大了 29.04% 和 28.11%,且加气灌溉下番茄产量的提高伴随着植株茎粗和叶面积的显著增大、开花期的延后、单果质量和果干质量的显著增大以及果实中番茄红素、维生素 C 和可溶性糖含量的显著增加。

(3) 综合考虑对番茄植株生长发育、果实产量和品质的影响, $k_{cp}$  为 1.0 灌水水平下进行加气灌溉是本试验条件下相对较优的加气灌溉模式。

## 参 考 文 献

- BRADFORD K J, YANG S. Physiological responses of plants to water logging[J]. Hort Science, 1981, 16(1): 25-30.
- 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.
- 黄兴法, 李光永. 地下滴灌技术的研究现状与发展[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 176-181.  
HANG Xingfa, LI Guangyong. Present situation and development of subsurface drip irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 176-181. (in Chinese)
- QASSIM A. Subsurface irrigation: a situation analysis [C] // International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage, 2003.
- BHATTARAI S P, SU N, MIDMORE D J. Oxygenation unlocks yield potentials of crops in oxygen-limited soil environments [J].

- Advances in Agronomy, 2005, 88: 313 – 377.
- 6 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.
- 7 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(5): 439.
- 8 PENDERGAST L, BHATTARAI S P, MIDMORE D J. Benefits of oxygation of subsurface drip-irrigation water for cotton in a vertosol[J]. *Crop and Pasture Science*, 2014, 64(12): 1171 – 1181.
- 9 BHATTARAI S P, PENDERGAST L, MIDMORE D J. Root aeration improves yield and water use efficiency of tomato in heavy clay and saline soils[J]. *Scientia Horticulturae*, 2006, 108(3): 278 – 288.
- 10 MAROUELLI W A, SILVA W L C. Drip line placement depth for processing tomatoes crop[J]. *Horticultura Brasileira*, 2002, 20(2): 206 – 210.
- 11 MACHADO R M A, DO ROSARIO M, OLIVEIRA G, et al. Tomato root distribution, yield and fruit quality under subsurface drip irrigation[M] // ABE J. *Roots: The Dynamic Interface between Plants and the Earth*. Springer Netherlands, 2003: 333 – 341.
- 12 BEN-NOAH I, FRIEDMAN S P. Oxygation of clayey soils by adding hydrogen peroxide to the irrigation solution: lysimetric experiments[J]. *Rhizosphere*, 2016, 2: 51 – 61.
- 13 KLÄRING H P, ZUDE M. Sensing of tomato plant response to hypoxia in the root environment[J]. *Scientia Horticulturae*, 2009, 122(1): 17 – 25.
- 14 OR D, SMETS B F, WRAITH J M, et al. Physical constraints affecting bacterial habitats and activity in unsaturated porous media—a review[J]. *Advances in Water Resources*, 2007, 30(6): 1505 – 1527.
- 15 BHATTARAI S P, MIDMORE D J, SU N. Sustainable irrigation to balance supply of soil water, oxygen, nutrients and agrochemicals[M] // LICHTFOUSE E. *Biodiversity, Biofuels, Agroforestry and Conservation Agriculture*. Springer Netherlands, 2010: 253 – 286.
- 16 LI Y, NIU W, WANG J, et al. Effects of artificial soil aeration volume and frequency on soil enzyme activity and microbial abundance when cultivating greenhouse tomato[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, 80(5): 1208 – 1221.
- 17 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.
- 18 BHATTARAI S P, DHUNGEL J, MIDMORE D J. Oxygation improves yield and quality and minimizes internal fruit crack of cucurbits on a heavy clay soil in the semi-arid tropics[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2010, 2(3): 17 – 25.
- 19 DHUNGEL J K, MIDMORE D J, WALSH K B, et al. Oxygation enhanced pineapple yield and quality [C] // ISHS Acta Horticulturae 889: VI International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops, 2011: 551 – 555.
- 20 赵伟霞, 蔡焕杰, 单志杰, 等. 无压灌溉日光温室番茄高产指标[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(3): 16 – 21.
- ZHAO Weixia, CAI Huanjie, SHAN Zhijie, et al. High yield indicators of greenhouse tomato under non-pressure irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(3): 16 – 21. (in Chinese)
- 21 朱艳, 蔡焕杰, 侯会静, 等. 加气灌溉对番茄根区土壤环境和产量的影响[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2016, 44(5): 157 – 162.
- ZHU Yan, CAI Huanjie, HOU Huijing, et al. Effects of aerated irrigation on root-zone environment and yield of tomato[J]. *Journal of Northwest A&F University: Nature Science Edition*, 2016, 44(5): 157 – 162. (in Chinese)
- 22 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.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20161227&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161227&flag=1&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)
- 23 高俊凤. *植物生理学实验指导*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- 24 刘明池, 张慎好, 刘向莉. 亏缺灌溉时期对番茄果实品质和产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(增刊2): 92 – 95.
- LIU Mingchi, ZHANG Shenhao, LIU Xiangli. Effects of different deficit irrigation periods on yield and fruit quality of tomato[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(Supp.2): 92 – 95. (in Chinese)
- 25 李毅琳, 胡敏予, 瞿树林, 等. 番茄红素简便测定方法的应用与分析[J]. *食品科学*, 2007, 28(3): 268 – 270.
- LI Yilin, HU Minyu, QU Shulin, et al. Application and analysis on method of lycopene assay [J]. *Food Science*, 2007, 28(3): 268 – 270. (in Chinese)
- 26 胡晓波, 温辉梁, 许全, 等. 番茄红素含量测定[J]. *食品科学*, 2005, 26(9): 566 – 569.
- HU Xiaobo, WEN Huiliang, XU Quan, et al. Determination of lycopene's concent[J]. *Food Science*, 2005, 26(9): 566 – 569. (in Chinese)
- 27 FRIEDMAN S P, NAFTALIEV B. A survey of the aeration status of drip-irrigated orchards[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 115: 132 – 147.
- 28 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.
- 29 KATO-NOGUCHI H. Induction of alcohol dehydrogenase by plant hormones in alfalfa seedlings[J]. *Plant Growth Regulation*, 2000, 30(1): 1 – 3.
- 30 SAHER S, FERNÁNDEZ-GARCÍA N, PIQUERAS A, et al. Reducing properties, energy efficiency and carbohydrate metabolism

- in hyperhydric and normal carnation shoots cultured in vitro: a hypoxia stress? [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2005, 43(6): 573 – 582.
- 31 COMSTOCK J P. Hydraulic and chemical signaling in the control of stomatal conductance and transpiration [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(367): 195 – 200.
- 32 CHATER C, PENG K, MOVAHEDI M, et al. Elevated CO<sub>2</sub>-induced responses in stomata require ABA and ABA signaling [J]. *Current Biology*, 2015, 25(20): 2709 – 2716.
- 33 FUKAO T, BAILEY-SERRES J. Plant responses to hypoxia—is survival a balancing act? [J]. *Trends in Plant Science*, 2004, 9(9): 449 – 456.
- 34 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; No39307.
- 35 HORCHANI F, ALOUI A, BROUQUISSE R, et al. Physiological responses of tomato plants (*Solanum lycopersicum*) as affected by root hypoxia [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2008, 194(4): 297 – 303.
- 36 BHATTARAI S P, MIDMORE D J. Oxygation enhances growth, gas exchange and salt tolerance of vegetable soybean and cotton in a saline vertisol [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2009, 51(7): 675 – 688.
- 37 CHEN J, KANG S, DU T, et al. Quantitative response of greenhouse tomato yield and quality to water deficit at different growth stages [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 129: 152 – 162.
- 38 TOOR R K, SAVAGE G P, HEEB A. Influence of different types of fertilisers on the major antioxidant components of tomatoes [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2006, 19(1): 20 – 27.
- 39 TAN H L, THOMAS-AHNER J M, GRAINGER E M, et al. Tomato-based food products for prostate cancer prevention: what have we learned? [J]. *Cancer and Metastasis Reviews*, 2010, 29(3): 553 – 568.
- 40 WOLF B. *The fertile triangle: the interrelationship of air, water, and nutrients in maximizing soil productivity* [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 1999.

(上接第 146 页)

- 10 KUO B C, HUANG C S, HUNG C C, et al. Spatial information based support vector machine for hyperspectral image classification [C] // IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium (IGARSS 2010), 2010: 832 – 835.
- 11 BRUZZONE L, PERSELLO C. A novel context-sensitive semisupervised SVM classifier robust to mislabeled training samples [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2009, 47(7): 2142 – 2154.
- 12 CHEN C, LI W, TRAMEL E W, et al. Spectral-spatial preprocessing using multihypothesis prediction for noise-robust hyperspectral image classification [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2014, 7(4): 1047 – 1059.
- 13 BAU T C, SARKAR S, Healey G. Hyperspectral region classification using a three-dimensional gabor filterbank [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2010, 48(9): 3457 – 3464.
- 14 SHEN L, JIA S. Three-dimensional gabor wavelets for pixel-based hyperspectral imagery classification [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2011, 49(12): 5039 – 5046.
- 15 WANG L, HAO S, WANG Y, et al. Spatial-spectral information-based semisupervised classification algorithm for hyperspectral imagery [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2014, 7(8): 3577 – 3585.
- 16 WANG L, HAO S, WANG Q, et al. Semi-supervised classification for hyperspectral imagery based on spatial-spectral label propagation [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2014, 97: 123 – 137.
- 17 SAHADEVAN A S. Hyperspectral image preprocessing with bilateral filter for improving the classification accuracy of support vector machines [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2016, 10(2): 025004.
- 18 WANG Y, SONG H, ZHANG Y. Spectral-spatial classification of hyperspectral images using joint bilateral filter and graph cut based model [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(9): 1 – 29.
- 19 石磊, 彭晓群. 结合像元空间邻域信息的高光谱影像分类 [J]. *测绘科学*, 2015, 40(8): 113 – 116.
- SHI Lei, PENG Xiaoqun. The classification algorithm of spectral angel matching combined with pixel spatial neighborhood information [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2015, 40(8): 113 – 116. (in Chinese)
- 20 王彩玲, 王洪伟, 胡炳樑, 等. 基于邻域分割的空谱联合稀疏表示高光谱图像分类技术研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(9): 2919 – 2924.
- WANG Cailing, WANG Hongwei, HU Bingliang, et al. A novel spatial spectral sparse representation for hyperspectral image classification based on neighborhood segmentation [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(9): 2919 – 2924. (in Chinese)
- 21 CAI S, DU Q, MOORHEAD R, et al. Noise-adjusted principal component analysis for hyperspectral remotely sensed imagery visualization [C] // 16th IEEE Visualization Conference (Vis2005), 2005: 119 – 120.
- 22 TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images [C] // 6th International Conference on Computer Vision, 1998: 839 – 846.
- 23 MELGANI F, BRUZZONE L. Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(8): 1778 – 1790.