

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.03.019

李金刚,何平如,陈菁,等.追肥减施下加气对番茄生长及土壤酶活性的影响[J].水土保持学报,2024,38(3):

LI Jingang, HE Pingru, CHEN Jing, et al. Effects of aeration on tomato growth and soil enzyme activity under the condition of topdressing fertilizer reduction[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3):

追肥减施下加气对番茄生长及土壤酶活性的影响

李金刚¹, 何平如¹, 陈菁¹, 孙浩², 周明强³, 刘闯¹, 丁思羽¹

(1.河海大学农业科学与工程学院, 南京 211100; 2.江苏省农村水利科技发展中心, 南京 210029;

3.新疆生产建设兵团河湖与水文水资源中心, 乌鲁木齐 830002)

摘要: [目的] 为探究化肥减施条件下加气对作物生长特性和根层土壤特征的影响。[方法] 通过开展连续 2 年野外田间试验, 以宁夏银北灌区大田栽培番茄为研究对象, 设置 4 组微纳米加气比例 (0%, 5%, 10%, 15%) 和 3 个追肥 (尿素—重过磷酸钙—硫酸钾) 水平 (180—400—480, 135—300—360, 90—200—240 kg/hm²)。[结果] 在相同追肥水平下, 植株的干物质和营养元素 (氮、磷、钾) 积累量随加气比例增加而增加, 提高加气比例有利于番茄开花坐果期根系磷素积累和果实膨大期钾素积累; 在相同追肥水平下提高加气比例 5%~15% 对应番茄产量增加 14.0%~44.2%; 在相同加气比例下相对传统施肥模式适当降低追肥水平 (-25%) 对应番茄产量增加 0.4%~9.1%; 提高加气比例和追肥水平有利于在番茄开花坐果期和果实膨大期显著提高土壤相关酶 (过氧化氢酶、碱性磷酸酶和脲酶) 活性, 相同追肥水平下提高加气比例 5%~15% 对应土壤相关酶活性提高 27.5%~122.9%。[结论] 在宁夏银北灌区地埋滴灌条件下, 为促进植株生长、稳定番茄产量和提高土壤酶活性, 适宜的“尿素—重过磷酸钙—硫酸钾”追施水平为 180—400—480 kg/hm² (相对传统追肥定额减施 25%), 适宜的微纳米加气比例为 10%。

关键词: 地埋滴灌; 加气灌溉; 微纳米气泡; 干旱半干旱区; 银北灌区

中图分类号: S287; S275

文献标识码: A

Effects of Aeration on Tomato Growth and Soil Enzyme Activity under the Condition of Topdressing Fertilizer Reduction

LI Jingang¹, HE Pingru¹, CHEN Jing¹, SUN Hao², ZHOU Mingqiang³, LIU Chuang¹, DING Siyu¹

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China; 2. Jiangsu Rural Water Conservancy Science and Technology Development Center, Nanjing, Jiangsu 210029, China; 3. River, Lake, Hydrology and Water Resources Center of Xinjiang Production and Construction Corps, Urumqi 830002, China)

Abstract: [Objective] The study aimed to explore the effects of aeration on crop growth characteristics and soil environmental characteristics in the root zone under reduced topdressing conditions. [Methods] The present paper took the field cultivated tomato in Yinbei irrigation area of Ningxia as the research object. Four groups of micro-nano gas aeration ratios (0%, 5%, 10%, and 15%) and three topdressing (urea-triple superphosphate-potassium sulfate) levels (180—400—480 kg/hm², 135—300—360 kg/hm², and 90—200—240 kg/hm²) were set up for the two-year field experiment conducted in 2019 and 2020. [Results] With the same topdressing level, the dry matter and nutritional elements (N, P, and K) accumulation in the plant increased with the increase of aeration ratio, and increasing the aeration ratio was beneficial to the accumulation of phosphorus in roots during flowering-fruit setting period and the potassium accumulation at fruit expansion stage. With the same topdressing level, the tomato yield increased by 14%~44.2% as the aeration ratio increased by 5%~15%. With the same aeration ratio, the tomato yield increased by 0.4%

收稿日期: 2023-10-29

修回日期: 2023-11-29

录用日期: 2023-12-30

资助项目: 国家自然科学基金青年项目 (52309046); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (B230201053); 河南省黄河流域水资源节约集约利用重点实验室开放研究基金资助项目 (HAKF202102)

第一作者: 李金刚 (1990—), 男, 助理研究员, 博士后, 主要从事灌排理论与节水灌溉系统研究。E-mail: lijingang68@163.com

通信作者: 陈菁 (1964—), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水土资源规划与管理方面研究。E-mail: 20210932@hhu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

~9.1% as the topdressing level was appropriately reduced (—25%) compared with the traditional fertilization. The increase of the aeration ratio and topdressing level was beneficial to increase the soil enzymes (catalase, alkaline phosphatase, and urease) activity significantly during the flowering-fruit setting period and fruit enlargement period of tomato. With the same topdressing level, increasing the aeration ratio by 5%~15% corresponded to an increase in soil enzyme activity by 27.5%~122.9%. **[Conclusion]** It was suggested that, to promote tomato plant growth, stabilize tomato yield and improve the soil enzymes activity in the Yinbei irrigation district, the suitable topdressing level of “urea-triple superphosphate-potassium” was 135—300—360 kg/hm² (25% lower than the traditional topdressing amount), and the suitable micro-nano aeration ratio was 10%.

Keywords: subsurface drip irrigation; aerated irrigation; micro nano bubbles; arid and semi-arid areas; Yinbei irrigation area

Received: 2023-10-29

Revised: 2023-11-29

Accepted: 2023-12-30

淡水资源短缺和耕地土壤退化严重制约着干旱缺水地区农业生产的持续发展,导致干旱半干旱区粮食安全正在面临严峻挑战。灌溉用水量约占全球淡水资源(河流、湖泊、含水层)的 70%左右,随着人口急剧增长和经济快速发展,灌溉水资源短缺问题将进一步加剧。此外,由于特殊的地理环境、独特的气候条件、集约化耕作等^[1],部分耕地土壤正逐渐退化(盐化、碱化、渍化、板结等)。不合理灌溉和过度施肥正在进一步加剧农田土壤生产力下降^[2]。为确保区域粮食安全、促进农作物生产持续健康发展,亟需推广应用高效节水灌溉技术、优化施肥制度,以合理调控根区土壤环境。

作为农业高效节水灌溉技术^[3],加气地埋滴灌是一种将空气与水混合并通过地下滴灌系统将其转移到作物根区以提高土壤含水量和含氧量的高效灌溉技术^[4]。相对于常规滴灌技术,加气地埋滴灌不仅满足作物对土壤水分的需求,还为作物根系和土壤微生物生长提供生理活动所需空气^[3,5],有助于提高土壤水分和养分利用效率^[6],改善作物根际土壤微环境^[7-8],提高土壤肥力^[7,9]。相关研究^[2,10]表明,加气地埋滴灌相对常规灌溉提高作物根层土壤氧气含量,有利于作物根系对土壤水分和养分的吸收,促进植株生长发育,提高作物产量。此外,大量研究^[11]表明,基于滴灌系统的水—肥—气耦合灌溉技术实现水、肥、气在时间和空间上的同步,有利于土壤速效养分释放^[6-7],有助于提高农田水肥利用效率^[6],从而促进作物增产。

番茄作为干旱半干旱区重要的经济作物,营养价值丰富,植株对土壤含氧量敏感^[2,12]。然而,由于集约耕作、过量施肥、不合理灌溉等,长期种植番茄的农田通常出现土壤板结、酸化、盐碱化等问题^[3],土壤含氧量降低和渗透性下降^[6],不仅抑制植株根系对土壤水分和养分的吸收,还对植物正常生理代谢功能产生不良影响,导致番茄出现不可逆损害^[13],从而不利于

番茄高产。大量研究^[14]表明,加气灌溉可提高番茄根层土壤含氧量,缓解缺氧胁迫和盐分胁迫对植株造成的损害,保障番茄植株正常生理活动^[5,8]。

目前,加气可促进植株根系对土壤养分的吸收利用已得到验证^[2-3],但主要集中在水气耦合上,肥气耦合研究较少,且大部分局限于温室试验,大田减量施肥模式下不同加气比例对应的作物生长生理特征和土壤环境因子响应规律尚未明晰,干旱半干旱农业区典型作物适宜的加气模式和追肥模式等有待进一步优选。研究不同追肥减施水平和不同加气比例对作物生长发育和土壤关键酶活性的影响,对进一步了解追肥耦合加气模式影响“土壤—作物”系统养分的作用机制、优化加气条件下作物种植的追肥模式,提高肥料利用效率和生产收益具有重要现实意义。为此,以宁夏银北灌区大田栽培番茄为对象,参考当地传统的施肥模式和地埋滴灌制度,设置 4 组加气比例和 3 个追肥减施水平,结合微纳米加气和地埋滴灌技术,研究番茄植株组织在开花坐果期和果实膨大期的干物质积累、营养元素(氮、磷、钾)积累对不同加气比例和追肥水平的响应特征;不同加气比例和追肥水平对番茄果实产量的影响;土壤相关酶(过氧化氢酶、碱性磷酸酶和脲酶)活性在番茄开花坐果期和果实膨大期对不同加气比例和追肥水平的响应特征;并基于番茄高产和肥料高效利用,提出适宜宁夏银北灌区番茄栽培的地埋滴灌加气比例和追肥水平,以期对宁夏银北灌区番茄栽培高产和水肥高效利用提供参考,助力黄河流域生态保护和高质量发展先行区建设。

1 材料与方法

1.1 试验田概况

试验于 2019 年和 2020 年在中国宁夏石嘴山市平罗县渠口乡交际村(38°51' N, 106°35' E, 海拔

1 096 m)进行。试验区属中温带干旱大陆性气候,降水稀少、蒸发强烈,光热资源充足,适宜于番茄栽培。根据土壤质地分类,供试土壤表层 40 cm 为砂壤土,地表以下 40—100 cm 土层为粉质黏土,部分土壤理化特性见表 1。试验区平均地下水埋深为 2.2 m,浅层地下水平均矿化度为 1.26 g/L;据前期试验观测资

料,地下水水质年内变化较小,化学需氧量(COD)和悬浮物含量分别为 38.1 和 6.7 mg/L,可溶性盐分含量和 pH 分别为 1.26 g/L 和 7.5,钙离子、镁离子、钾离子和钠离子含量分别为 155.5,96.0,136.5,215.4 mg/L,碳酸氢根离子、氯离子和硫酸根离子含量分别为 182.4,275.1,198.5 mg/L。

表 1 试验田土壤物理化学性征

Table 1 Physical and chemical properties of soil in experimental field

土层深度/cm	质地分类	容重/(g·cm ⁻³)	田间持水率/%	孔隙度/%	pH	全盐含量/(g·kg ⁻¹)	速效氮含量/(mg·kg ⁻¹)	速效磷含量/(mg·kg ⁻¹)	速效钾含量/(mg·kg ⁻¹)
0—40	砂壤土	1.39	19.72	40.27	8.54	1.47	51.10	8.20	254.50
40—100	粉质黏土	1.33	17.37	38.33	7.81	1.22	47.97	3.35	123.50

1.2 试验设计

试验以番茄为供试作物,品种为“粉大 1 号”。参照试验区传统番茄滴灌栽培的施肥种类(尿素—重过磷酸钙—硫酸钾)及施肥水平(底肥 45—100—120 kg/hm²,追肥 180—400—480 kg/hm²)。试验设置 4 组加气比例(空气体积与混合液体的体积之比)和 3 个追肥水平(追肥种类为“尿素—重过磷酸钙—硫酸钾”),加气比例分别为 0(A0),5%(A1),10%(A2),15%(A3),追肥水平分别为 180—400—480 kg/hm²(F1),135—300—360 kg/hm²(F2),90—200—240 kg/hm²(F3),共计 12 个试验处理。每个试验处理设置 3 组重复,共 36 个试验小区,各试验小区随机区组布置;每个试验小区面积为 22.5 m²(长 20 m×宽 5.5 m),包含 1 个水表、1 支负压计、5 条渗灌管。试验分别于 2019 年 4 月 25 日和 2020 年 4 月 20 日在地表以下 30 cm 处埋设山东长江节水灌溉科技有限公司生产的外镶内嵌式渗灌管,渗灌管滴头间距 30 cm,滴头流量 1.38 L/h,工作压力 0.01 MPa,2 条渗灌管间距为 130 cm。布设地下渗灌管的同时在地表以下 20 cm 处分别撒施尿素(N,46%)、重过磷酸钙(P₂O₅,50%)、硫酸钾(K₂O,46%)45,100,120 kg/hm²作为底肥。2019 年 4 月 28 日和 2020 年 4 月 25 日,各试验小区分别在渗灌管上方布置用于指导灌溉的负压计,负压计的陶土头埋设在渗灌管垂直上方 10 cm 处。2019 年 5 月 3 日和 2020 年 5 月 1 日移栽健康的番茄幼苗,番茄种植行距为 90 cm(图 1)、株距为 30 cm。2019 年 5 月 4 日和 2020 年 5 月 2 日,各试验处理均滴灌 1 次以保障移栽的幼苗成活所需水分,灌溉定额为 40 mm,灌溉水取自当地的浅层地下水(平均矿化度 1.26 g/L)。

自番茄幼苗移栽后每日观测 3 次(08:00、13:00、18:00)负压计读数,当负压计读数达到-20 kPa(此时地表以下 20 cm 深度处土壤含水率约为田间持水率的 80%)时,于当日 18:00 灌溉 1 次,单次灌水定额为 20 mm,番茄进入果实红熟期停止灌溉。

灌溉水在进入渗灌管之前先经过上海众净环保科技有限公司生产的微纳米气泡机(ZJC—NM—02),通过控制微纳米气泡机的工作压力(0,0.03,0.06,0.11 MPa)控制加气比例(0,5%,10%,15%),平均气泡直径为 74 nm,然后再通过地下渗灌管将水气混合液输送到各试验小区。各试验处理灌溉次数及灌溉定额见表 2,各试验处理番茄苗期灌溉定额均为 40 mm,番茄生育期内灌溉次数为 17~23。参照当地番茄滴灌追肥的时间和比例,追肥时间为番茄植株开第 1 穗花、第 2 穗果实膨大期、第 4 穗果实膨大期、第 6 穗花时,4 次追肥定额的比例为 1:1:1:1。每次追肥时,将肥料溶解后按肥水质量比 3:7 混合均匀,在单次灌溉时间进行至一半左右,肥水混合液随加气的灌溉水通过滴灌系统施肥。试验期间其他农艺措施与当地传统番茄种植模式保持一致。

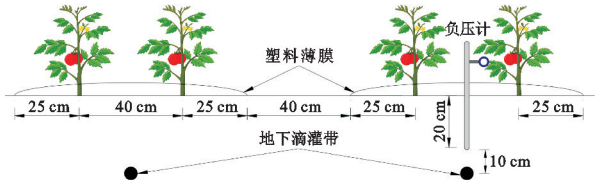


图 1 番茄种植示意

Fig. 1 Tomato planting diagram

1.3 样品采集与观测

2019 年 4 月 29 日和 2020 年 4 月 26 日,自地表向下 0—100 cm 每间隔 20 cm 取 1 层土壤,并利用环刀分层取原状土壤,用于测定土壤理化特征和土壤酶活性。土壤质量含水率和土壤容重采用重量法^[15]测定,土壤质地采用 Master—sizer 3000 型激光粒度分析仪测定,土壤 pH 和盐分含量采用电导法测定,土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化外加热法测定,土壤溶液碱解氮含量采用碱解扩散法测定,土壤溶液全氮采用凯氏定氮法测定,土壤有效磷含量采用钼锑抗比色法测定,土壤速效钾含量采用火焰光度计法测定,土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定,土壤磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定,土壤脲酶活性采用苯酚钠—次氯酸钠比色法测定。

表 2 不同试验处理灌水次数及灌溉定额

Table 2 The irrigation times and irrigation quota for treatments

试验处理	2019 年					2020 年				
	灌水次数				灌溉 定额/mm	灌水次数				灌溉 定额/mm
	苗期	花期	坐果期	果实膨大期		苗期	花期	坐果期	果实膨大期	
A0F1	2	4	7	7	400	2	4	8	7	420
A0F2	2	4	6	6	360	2	4	7	6	380
A0F3	2	4	5	6	340	2	4	6	6	360
A1F1	2	5	6	5	440	2	5	7	8	440
A1F2	2	5	7	6	420	2	5	6	7	400
A1F3	2	5	6	6	380	2	5	7	6	380
A2F1	2	5	8	8	460	2	5	8	9	480
A2F2	2	5	7	8	440	2	5	8	8	460
A2F3	2	5	6	7	400	2	5	7	7	420
A3F1	2	5	8	7	440	2	5	8	8	460
A3F2	2	5	7	7	420	2	5	7	7	420
A3F3	2	5	6	6	380	2	5	7	6	400

在番茄坐果期和果实膨大期,于每个试验小区随机选取 3 株番茄植株并连根取出,分割为根、茎、叶、果实四部分,在 105 ℃ 下杀青 0.5 h 后 75 ℃ 烘干至恒重,得到各组织的干物质重。烘干后的植株组织样本经碾磨过 0.5 mm 筛后加入 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 溶液消解,分别采用凯氏定氮法和钼蓝法检测组织的氮素和磷素含量,结合火焰光度计测定组织的钾素含量。

植株氮素积累量计算公式为:

$$U_N = \sum_{i=1}^4 U_{Ni} \quad (1)$$

$$U_{Ni} = \rho \times c_{Ni} \times T_{mi} \quad (2)$$

式中: U_N 为植株氮素积累量(kg/hm^2); U_{Ni} 为植株第 i 个组织氮素积累量(kg/hm^2); c_{Ni} 为单株番茄第 i 个组织氮素含量(%); T_{mi} 为单株番茄第 i 个组织干物质质量($\text{kg}/\text{株}$); ρ 为番茄种植密度($\text{株}/\text{hm}^2$); $i=1,2,3,4$ 分别代表植株的根、茎、叶、果实。植株的磷素和钾素积累量计算方法类似。

自番茄果实红熟开始,每间隔 7 天采收 1 次,分别于 2019 年 9 月 18 日和 2020 年 9 月 20 日收获完毕。在番茄采收期,记录各试验处理的完好红熟果实数量,并在各处理中随机选取 7 个测定单果质量,计算番茄单株产量和单位面积产量。

1.4 数据处理

采用 SPSS 24.0 软件分析试验数据的显著性差异($\alpha=0.05$);以加气水平(A)和追肥水平(F)为自变量,针对番茄植株生长特征和土壤相关酶活性数据开展双因素方差分析;采用 OriginPro 2021 和 R 4.3.1 等软件绘图。

2 结果与分析

2.1 追肥水平和加气比例对土壤过氧化氢酶、碱性磷酸酶和脲酶活性的影响

土壤酶活性是土壤生物活性和土壤肥力的重要指标,不同土壤环境状况下土壤酶活性通常存在差异。方差分析结果表明(表 3),在番茄开花坐果期和果实膨大期,加气比例和追肥水平对土壤酶活性影响极显著,而两因素交互对土壤酶活性影响不显著。在开花坐果期和果实膨大期,相同加气比例下,土壤过氧化氢酶、碱性磷酸酶和脲酶的活性均随着追肥水平下降而减小,而且 F1 追肥处理对应的土壤碱性磷酸酶和脲酶活性显著高于 F3 追肥处理;在不加气条件下,各追肥水平对应的土壤过氧化氢酶和脲酶活性差异不显著。在相同追肥水平下,土壤酶活性随加气比例升高而增加,而且 F1 追肥水平下,土壤脲酶活性随加气比例增加而显著增加;F2 追肥水平下,土壤碱性磷酸酶活性随加气比例提高而显著增加。结果表明,在番茄生育期内提高加气比例和追肥水平有利于提高土壤酶活性。A3F1 处理对应过氧化氢酶、碱性磷酸酶和脲酶的活性最高,而 A0F3 处理对应土壤酶活性最低,相同加气比例下,25%~50% 化肥减施对应土壤过氧化氢酶、碱性磷酸酶和脲酶活性降低 9.30%~29.55%,相同追肥水平下提高加气比例 5%~15% 对应土壤过氧化氢酶、碱性磷酸酶和脲酶活性提高 27.5%~122.9%。番茄果实膨大期 A2 或 A3 加气比例下,F1 和 F2 追肥水平对应的土壤碱性磷酸酶和脲酶活性无显著差异。此外,各试验处理在开花坐果期的土壤酶的活性高于果实膨大期相同种类的土壤酶活性。

表 3 土壤过氧化氢酶、碱性磷酸酶和脲酶活性
Table 3 Soil catalase, alkaline phosphatase and urease activity

试验 处理	2019 年开花坐果期			2019 年果实膨大期			2020 年开花坐果期			2020 年果实膨大期		
	过氧化氢酶/碱性磷酸酶/脲酶/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	过氧化氢酶/碱性磷酸酶/脲酶/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	过氧化氢酶/碱性磷酸酶/脲酶/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	过氧化氢酶/碱性磷酸酶/脲酶/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)
	h ⁻¹)	h ⁻¹)	h ⁻¹)	h ⁻¹)	h ⁻¹)	h ⁻¹)	h ⁻¹)	h ⁻¹)	h ⁻¹)	h ⁻¹)	h ⁻¹)	h ⁻¹)
A0F1	1.99±0.20ab	1.76±0.19b	0.88±0.06bc	1.88±0.2bc	1.69±0.07b	0.82±0.08bc	1.97±0.26ab	1.74±0.14b	0.87±0.04bc	1.88±0.17bc	1.74±0.05b	0.82±0.09bc
A0F2	1.77±0.29a	1.46±0.10a	0.73±0.09ab	1.66±0.19ab	1.42±0.15a	0.70±0.07ab	1.75±0.22a	1.49±0.09ab	0.73±0.10ab	1.69±0.16ab	1.44±0.14a	0.70±0.09ab
A0F3	1.55±0.22a	1.24±0.12a	0.63±0.10a	1.46±0.18a	1.22±0.13a	0.56±0.05a	1.54±0.19a	1.23±0.12a	0.63±0.10a	1.48±0.17a	1.25±0.12a	0.56±0.07a
A1F1	2.55±0.26cde	2.71±0.16d	1.15±0.01de	2.53±0.12de	2.35±0.14d	1.07±0.07d	2.52±0.29bcde	2.70±0.11d	1.15±0.10d	2.52±0.14de	2.35±0.15cd	1.09±0.06d
A1F2	2.33±0.16bcd	2.30±0.12c	0.98±0.08c	2.20±0.18cd	2.08±0.14c	0.90±0.08c	2.30±0.18bc	2.24±0.11c	0.98±0.09c	2.25±0.17cd	2.09±0.14bc	0.92±0.09c
A1F3	2.05±0.29abc	2.04±0.15bc	0.85±0.07bc	1.90±0.18bc	1.84±0.16bc	0.72±0.07ab	2.04±0.35ab	2.08±0.15c	0.85±0.09bc	1.93±0.16bc	1.83±0.23b	0.73±0.08ab
A2F1	3.01±0.19ef	3.01±0.18de	1.38±0.09fg	2.82±0.18ef	2.75±0.15ef	1.32±0.09ef	3.02±0.14ef	2.98±0.18de	1.37±0.09e	2.80±0.19ef	2.73±0.20ef	1.32±0.09ef
A2F2	2.64±0.23de	2.73±0.21d	1.24±0.05efg	2.55±0.18de	2.39±0.16d	1.20±0.08de	2.65±0.27cde	2.70±0.22d	1.23±0.04de	2.53±0.19de	2.42±0.16de	1.19±0.09de
A2F3	2.31±0.19bcd	2.25±0.16c	1.01±0.09cd	2.19±0.13cd	2.04±0.15c	0.93±0.10c	2.36±0.13bcd	2.31±0.14c	1.01±0.07c	2.14±0.16cd	2.03±0.14bc	0.95±0.11c
A3F1	3.26±0.24f	3.56±0.23f	1.57±0.07h	3.11±0.13f	2.98±0.16f	1.49±0.05g	3.29±0.27f	3.54±0.22f	1.56±0.06f	3.08±0.13f	3.00±0.23f	1.49±0.06f
A3F2	2.92±0.26ef	3.19±0.17e	1.41±0.07g	2.86±0.17ef	2.74±0.17ef	1.37±0.08fg	2.91±0.27def	3.15±0.18e	1.40±0.06e	2.87±0.20ef	2.79±0.18ef	1.36±0.09f
A3F3	2.63±0.20de	2.76±0.22d	1.22±0.08ef	2.54±0.18de	2.46±0.17de	1.16±0.07d	2.64±0.20cde	2.84±0.22de	1.24±0.07de	2.53±0.14de	2.50±0.19de	1.14±0.06d
加气	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
比例	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
追肥	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
水平	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
加气比												
例×追	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
肥水平												

注:表中数据均为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$);ns 代表无显著差异($p>0.05$);* 代表显著差异($p<0.05$);* * 代表极显著差异($p<0.01$)。下同。

2.2 追肥水平和加气比例对番茄植株组织干物质积累的影响

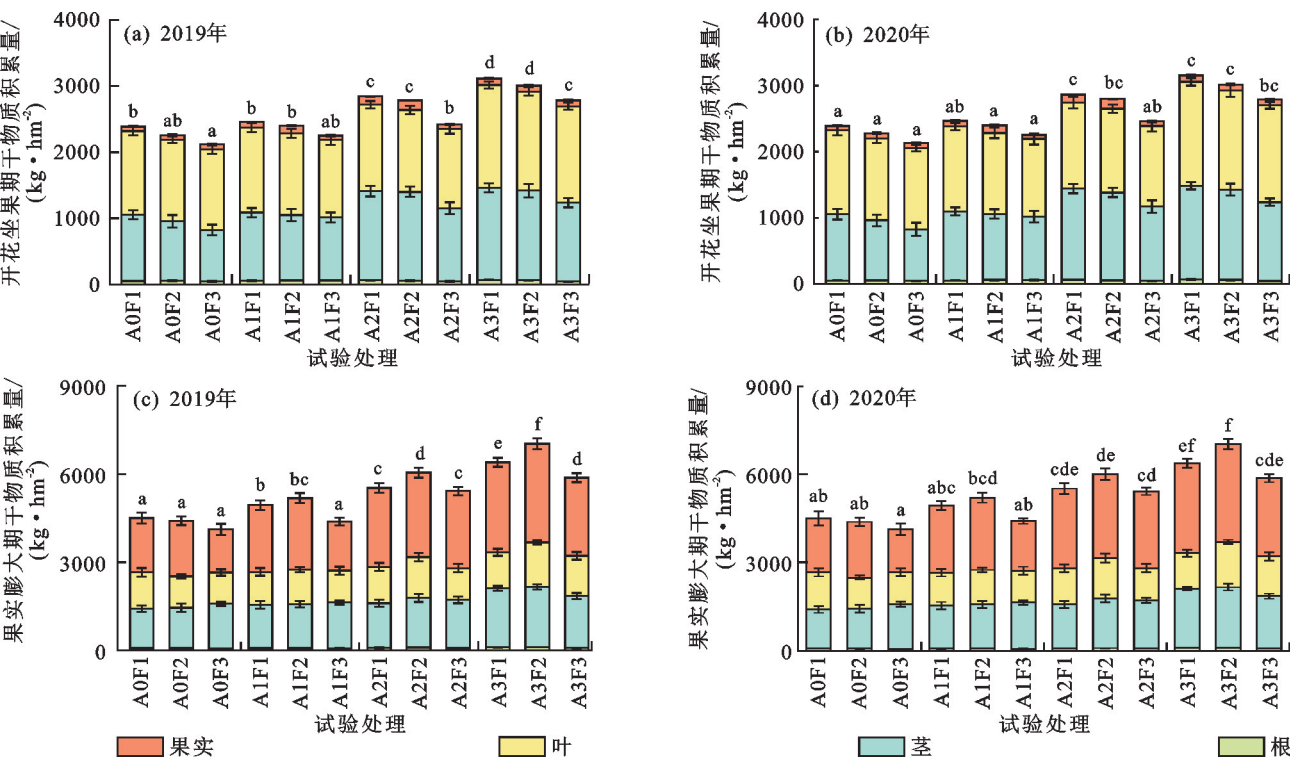
追肥水平和加气比例影响番茄植株组织干物质积累的显著性分析见表 4。追肥水平对开花坐果期植株组织的干物质积累量影响极显著($p<0.01$),对果实膨大期植株茎的干物质积累量影响不显著($p>0.05$);加气比例在番茄开花坐果期和果实膨大期对植株组织(根、茎、叶、果实)的干物质积累量具有极显著影响($p<0.01$);两因素交互在开花坐果期对番茄根和果实干物质积累量影响极显著($p<0.01$),在果实膨大期仅对茎的干物质积累量产生显著影响($p<0.05$)。

在番茄开花坐果期,A3F1 处理植株干物质积累量最高,而 A0F3 处理植株干物质积累量最低(图 2)。叶片相对其他部位干物质积累量最大(占干物质积累总量的 44.48%~57.50%),其次是茎的干物质积累量占植株干物质积累总量的比例(36.72%~48.27%),根系干物质积累量占比最低。在相同加气水平下,植株茎、叶及总干物质积累量均随着追肥水平的降低而减小,F1 与 F2 追肥处理对应植株干物质积累量无显著差异;此外,在 A2 和 A3 加气水平下,F3 追肥处理对应植株干物质质量显著低于 F1 和 F2 追肥处理。在相同追肥水平下,尽管 A1 加气处理相对 A0 不加气处理对植株干物质积累量影响不显著,但

随着加气比例在 5%~15% 范围内增加,植株干物质积累量呈显著增加趋势。

在番茄果实膨大期,A3F2 处理的植株干物质积累量最高;果实相对其他部位的干物质积累量最大(约占植株干物质积累总量的 35.61%~48.64%),其次为茎的干物质积累量,根系对应干物质积累量最小(约占植株干物质积累总量的 1.47%~1.89%)。不加气灌溉条件下,尽管植株干物质积累总量随追肥水平降低而减小,但各追肥水平对应的植株干物质积累总量无显著差异。相同加气灌溉条件下,植株根、茎、叶、果实的干物质积累量均随追肥水平的降低而先增加后减小;此外,在 A2 和 A3 加气处理下,F2 追肥处理对应的植株干物质积累量显著高于 F1 和 F3 追肥处理,根冠比随追肥水平降低而减小。相同追肥水平下,番茄植株茎、果实及总干物质积累量随着加气比例升高而增加。

番茄果实膨大期的植株根系、茎和果实干物质积累量均大于开花坐果期对应部位的干物质积累量,但果实膨大期叶片干物质积累量低于开花坐果期植株叶片干物质积累量(表 4)。相对于开花坐果期根、茎、叶、果实干物质积累量占植株总干物质积累量的比例,果实膨大期根、茎、叶对应占比均减小,而果实对应占比提高 32%~45%。



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著, ($p<0.05$)。下同。

图 2 开花坐果期和果实膨大期的植株组织干物质积累量

Fig. 2 Dry matter accumulation of plant tissue at flowering—fruit setting stage and fruit enlargement stage

表 4 植株组织干物质积累量显著性分析

Table 4 Significance analysis of dry matter accumulation in plant tissues

	开花坐果期					果实膨大期				
	根	茎	叶	果实	植株	根	茎	叶	果实	植株
加气比例	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
追肥水平	*	*	*	*	*	*	ns	*	*	*
加气比例×追肥水平	*	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns

2.3 追肥水平和加气比例对植株组织氮、磷、钾素积累的影响

番茄植株各组织的氮、磷、钾素积累量通常因加气和施肥水平不同而存在差异。方差分析(表 5)表明,追肥水平对根、茎、果实的氮、磷、钾素积累量具有极显著影响;加气比例对开花坐果期和果实膨大期植株组织的氮、磷、钾素积累量影响极显著;两因素交互对植株的磷素积累总量均具有极显著影响,对植株的氮素和钾素积累总量无显著影响。

在番茄开花坐果期,植株的氮、磷、钾素主要积累在茎和叶片,磷素积累量占比表现为叶>茎>果实>根,而钾素积累量占比表现为茎>叶>果实>根,茎的钾素积累量占比达 48%~59%(图 3,图 4)。相同追肥水平下,植株氮、磷、钾素积累总量随着加气比例升高而增加,尤其在 F1 和 F2 追肥水平下,植株的磷

素积累总量随着加气比例升高而显著增加;茎和叶氮素积累量、根和茎的磷素积累量、果实的钾素积累量均随加气比例提高而增加;此外,A2 和 A3 加气处理对应的植株氮素和磷素积累量显著高于不加气处理。相同加气比例下,F2 和 F3 追肥水平对应各试验处理的植株氮素积累总量无显著差异,植株氮、磷、钾素积累量随追肥水平下降而减小,叶的氮素积累量、根的磷素积累量、根和果实钾素积累量均随追肥水平下降而降低。

在番茄果实膨大期,氮素和磷素主要积累在果实和叶片,钾素主要积累在果实和茎,果实的氮素和磷素积累量占比分别达到 31.75%~42.44% 和 34.87%~50.98%,根的氮、磷、钾素积累量最小,根的氮素和磷素积累量占比分别为 0.81%~1.82% 和 1.66%~2.43%。相同追肥水平下,植株及茎的氮、磷、钾素积累量均随着加气比例增加而显著增加;叶的氮素积累量、根的磷素积累量、根和果实的钾素积累量随加气比例增加而增加;根的磷素分配比例随加气比例增加而降低。相同加气水平下,植株及茎的氮、磷、钾素积累量均随着追肥水平降低而减小,且不同追肥处理对应植株钾素积累总量差异显著,F1 追肥处理对应的植株磷素积累量显著高于 F2 和 F3 追肥处理;叶的氮素积累量、根的磷素积累量、根和果实的钾素积累量随追肥水平下降而降低,然而,茎的氮

素分配比例随追肥水平下降而增加,根的磷素分配比例随追肥水平下降先增加后降低。

2 个生育期相比,各试验处理番茄根和果实的氮、磷、钾素累积量及茎的氮、钾素累积量在开花坐果期均小于果实膨大期,而茎和叶的磷素累积量在开花坐果

期大于果实膨大期。在开花坐果期,番茄根的磷素分配比例随着加气比例增加而增加;在果实膨大期,番茄果实的钾素分配比例随着加气比例增加而增加,表明提高加气比例有利于开花坐果期植株吸收的磷素向根系分配、果实膨大期植株吸收的钾素向果实分配。

表 5 番茄植株氮、磷、钾素积累显著性分析

因素		开花坐果期					果实膨大期				
		根	茎	叶	果实	植株	根	茎	叶	果实	植株
加气比例	氮素	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	磷素	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	钾素	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
追肥水平	氮素	*	*	ns	*	*	*	*	*	*	*
	磷素	*	*	ns	*	*	*	*	*	*	*
	钾素	*	*	ns	*	*	*	*	ns	*	*
加气比例× 追肥水平	氮素	*	ns	ns	*	ns	*	ns	*	*	ns
	磷素	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	*	*	*
	钾素	ns	ns	*	*	ns	ns	ns	*	ns	ns

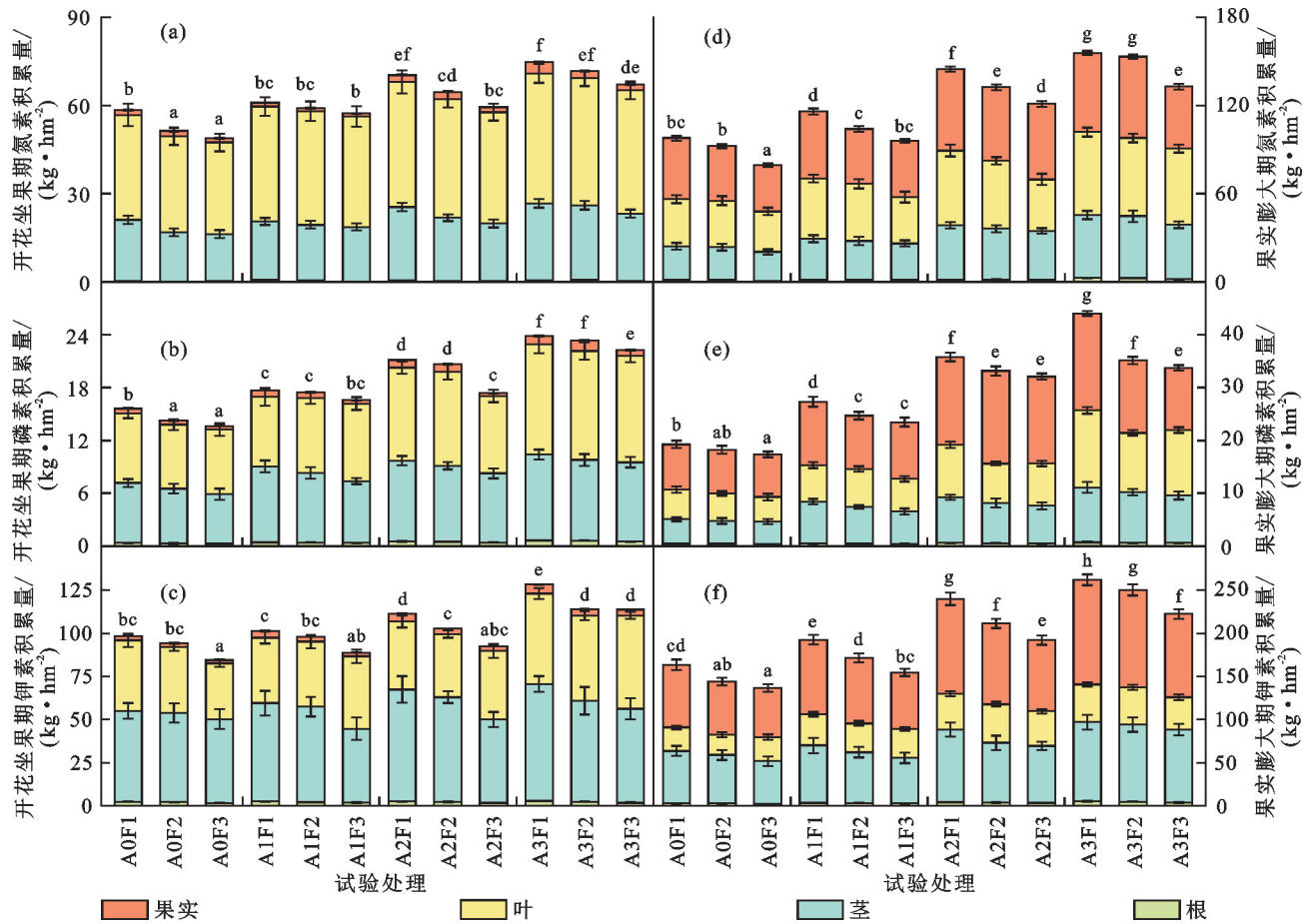


图 3 2019 年番茄植株组织氮、磷、钾素积累量

Fig. 3 Accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in tomato plant tissues in 2019

2.4 追肥水平和加气比例对番茄单果质量和产量的影响

不同加气比例和追肥水平对应的番茄果实单果质量和产量见图 5。A3F2 处理对应单果质量(104.15 g)和产量(6.88×10⁴ kg/hm²)显著高于其他试验处理;而 A0F3 处理对应单果质量和产量最低,分别为 78.16 g

和 4.52×10⁴ kg/hm²;番茄单果质量和产量同时受加气比例和追肥水平的影响。相同追肥水平下,番茄单果质量和产量随加气比例的升高而增加。A2 加气处理在 F1、F2、F3 追肥水平下相对不加气处理对应番茄产量分别提高 19.94%,25.87%,25.18%。不加气条件

下,番茄单果质量和产量随着追肥水平下降而减小;相同加气条件下,F2 加气处理的番茄单果质量和产量相对 F1 和 F3 处理的单果质量和产量更高,且加气比例越大,F2 处理与 F1 和 F3 处理在单果质量和产量方面的差异越明显。在相同追肥水平下,提高加气比例 5%~15%对应番茄单果质量增加 1.4%~23.8%,番茄产量增加 14.0%~44.2%;在相同加气比例下,相对常规

追肥水平降低 25%对应番茄产量增加 0.4%~9.1%,相对常规追肥水平降低 50%对应番茄产量下降 3.0%~5.4%。方差分析结果(表 6)表明,加气比例和追肥水平对番茄单果质量和果实产量具有极显著影响;两因素交互对番茄单果质量影响不显著;2019 年两因素交互对番茄产量影响显著,但 2020 年两因素交互对番茄产量影响不显著。

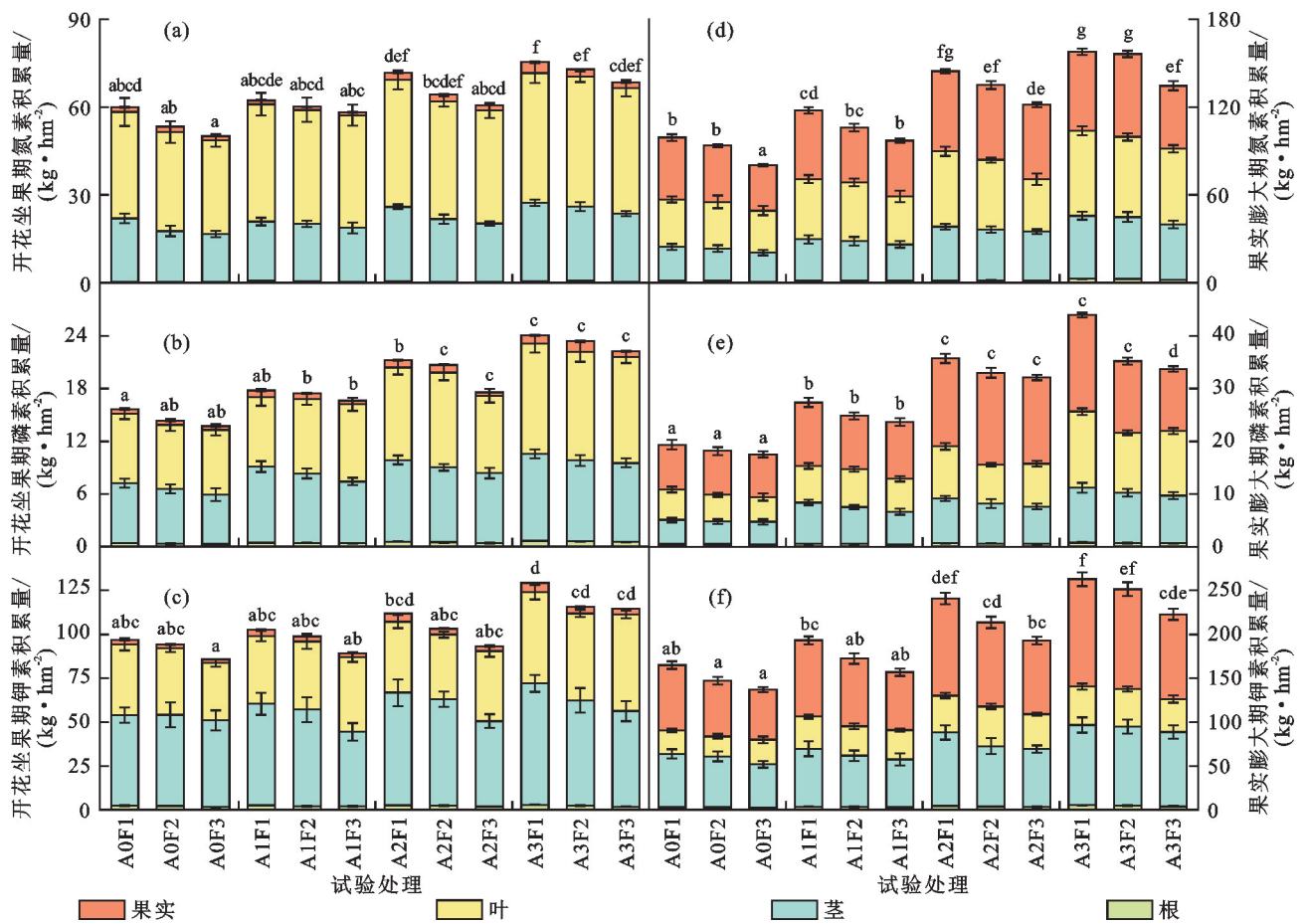


图 4 2020 年番茄植株组织氮、磷、钾素积累量

Fig. 4 Accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in tomato plant tissues in 2020

表 6 番茄单果质量及产量显著性分析

Table 6 Significant analysis of single fruit weight and tomato yield

因素	2019 年		2020 年	
	单果质量	番茄产量	单果质量	番茄产量
加气比例	*	*	*	*
追肥水平	*	*	*	*
加气比例×追肥水平	ns	*	ns	ns

2.5 相关性分析

番茄开花坐果期和果实膨大期的土壤酶活性与番茄植株干物质、氮、磷、钾素积累和产量的相关性见图 6。番茄开花坐果期和果实膨大期土壤酶活性与番茄植株干物质积累量、氮磷钾素积累量、单果产量、番茄产量均呈显著正相关,相关系数均不低于 0.78。

说明过氧化氢酶、碱性磷酸酶、脲酶能促进植物干物质积累和根系吸收土壤中的氮、磷、钾素,番茄植株干物质积累、氮、磷、钾素积累有利于增加番茄单果质量和提高果实产量。

3 讨论

土壤酶是土壤最活跃的有机成分之一,可作为生物催化剂^[6,16]。土壤酶活性是土壤养分(氮、磷和其他养分)转化能力的重要标志^[10],是维持土壤肥力的重要生物指标^[17]。大量研究^[4,10,13,18]发现,土壤酶活性受土壤氧气含量、养分含量、温度和湿度等因素的综合影响。土壤脲酶广泛存在于农业土壤中,由于其可促进尿素转化为氨和二氧化碳,通常认为土壤脲酶活性可反映土壤的供氮能力;土壤过氧化氢酶是土壤中的一种氧化还原酶,可加速过氧化氢的分解,减轻

过氧化氢对植物根系的毒害,其活性可反映土壤腐殖质化程度高低和有机物的转化速率;土壤磷酸酶可促进对应底物去磷酸化,其活性与土壤中有机磷的分解转化直接相关。本研究发现,加气比例和追肥水平对土壤过氧化氢酶、碱性磷酸酶和脲酶活性具有极显著影响,且土壤酶活性随追肥水平下降而减小、随着加气比例增加而增加。尤其,土壤脲酶和土壤碱性磷酸酶活性分别在 F1 或 F2 追肥水平下随加气比例增加而显著增加,与 LEI 等^[6]和 ZHAO 等^[18]研究结果一致。可能是由于加气灌溉能够改善灌溉后根区土壤缺氧环境,使得植物根系代谢分泌物的种类和数量增多,增强作物根层土壤微生物活性,促进根系微生物相关分泌物的释放,进而提高土壤酶活性;而降低追

肥水平减弱土壤中微生物活性和减缓植株代谢,降低作物根系和土壤微生物的分泌物水平,进而导致土壤相关酶活性降低。

此外,本试验发现,番茄开花坐果期的土壤过氧化氢酶、碱性磷酸酶和脲酶活性高于果实膨大期对应的土壤酶活性,可能是由于番茄生育前期的土壤因施入底肥导致营养物质充足,番茄第 1 穗花期追施化肥,使得根区土壤酶活性不断升高并在开花坐果期达到最高值,番茄生育后期土壤中营养物质因消耗和淋失逐渐减少,土壤酶活性随着生育期推移逐渐减小。该结果与臧明等^[19]研究结果一致,水、肥、气耦合滴灌条件下,番茄栽培土壤的酶活性随番茄生育期推进呈先升高后降低趋势。

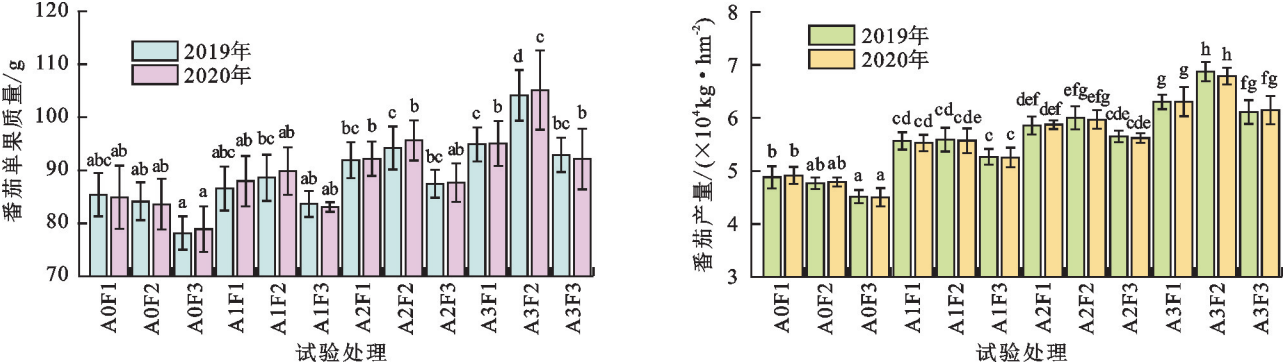
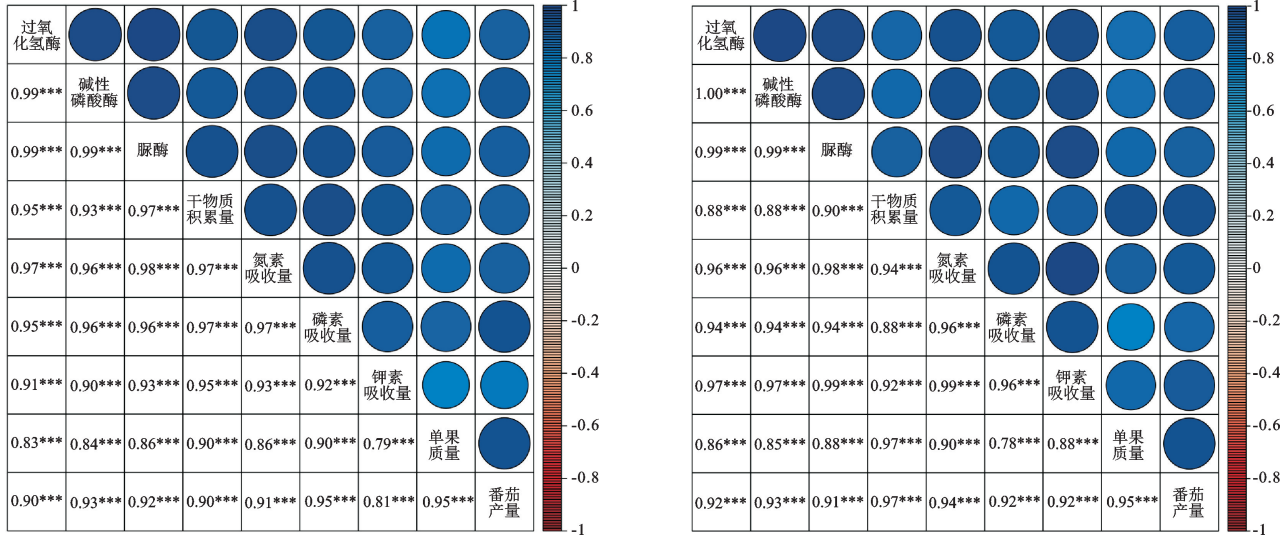


图 5 番茄单果质量及产量
Fig. 5 Single fruit weight and yield of tomato



注:上三角为两两散点图,红色线条表示最佳拟合;下三角为皮尔逊相关系数;符号 * * * 表示 $p < 0.001$ 。

图 6 土壤酶活性、植株干物质积累、氮磷钾素积累、番茄产量的相关性

Fig. 6 Correlation of soil enzyme activity, plant dry matter accumulation, nitrogen—phosphorus—potassium accumulation and tomato yield

加气灌溉可有效提高土壤中氧气含量,缓解作物根区土壤对植株的低氧胁迫,促进植株生长发育^[3,12]。在加气灌溉条件下,科学调整化肥施用量,不仅有助于降低农田面源污染风险,还能有效保障作物生长期的养分供应,提高化肥利用效率^[2,20-21]。本

试验中,番茄开花坐果期和果实膨大期,加气比例和追肥水平均对番茄植株干物质质量具有极显著影响,表明加气比例和追肥水平与番茄的干物质积累存在密切关系。相同追肥水平下,植株干物质积累量随着加气比例增加呈增加趋势。可能是由于地埋滴灌条件

下增加通气量,有效缓解地埋滴灌造成的土壤低氧胁迫,更有利于植株根系进行呼吸作用、吸收土壤水分和营养元素,从而促进植株的光合产物合成与干物质积累。本试验在相同加气比例下,随着追肥水平从F1降至F3,根系干物质积累量占比均在开花坐果期随追肥水平下降而减小,但在果实膨大期随追肥水平下降而先增加后降低,表明适当降低追肥水平反而有利于番茄植株根系的生长发育。此外,A3F2处理在番茄果实膨大期对应的植株干物质积累量最高,表明在高加气比例(A3)下,适当降低追肥水平反而有利于植株的干物质积累。加气灌溉有效改善作物根系的通气状况,进而对番茄植株生长发育产生积极作用。番茄果实膨大期的根系、茎和果实干物质积累量均大于开花坐果期对应部位的干物质积累量,但果实膨大期的叶片干物质积累量低于开花坐果期的植株叶片干物质积累量,说明开花坐果期至果实膨大期,叶片的干物质积累速率小于干物质消耗速率,植株积累的干物质主要分配在根、茎、果实。

作物各种生理代谢过程均需要氮、磷、钾等营养元素的直接参与,氮、磷、钾素是作物生命活动周期中不可缺少的重要营养元素。本试验表明,作物吸收营养元素与加气比例和追肥水平与密切相关。相同加气比例下,植株的氮、磷、钾素积累量均随着追肥水平降低而减小,表明降低追肥水平不利于植株氮、磷、钾素积累。加气地埋滴灌技术将水、肥、气混合后同步输送至作物根区土壤,有利于缓解作物根区的缺氧状况^[4],影响根部抗氧化酶活性和根系生长并促进作物根区土壤微生物进行有氧呼吸^[6],直接影响土壤细菌和真菌群落,提高土壤养分的有效性和作物根系对土壤养分的吸收利用效率^[2]。本研究发现,相同追肥水平下植株氮、磷、钾素积累量随着加气比例增加呈增加趋势,说明作物根区加气有利于促进植株的营养元素积累^[22]。本试验中在番茄果实膨大期,氮素和磷素主要积累在果实和叶片,钾素主要积累在果实和茎,与吴建繁等^[23]的研究结果一致,表明番茄植株茎和果实中的钾素含量高于氮素和磷素含量,也高于根和叶片中的钾素含量,叶中氮素含量高于根、茎和果实中的氮素含量。已有研究^[24]表明,氮素对番茄植株茎和叶的生长以及果实发育具有重要作用,且与产量高低关系密切,磷素对植株根系生长及开花结果具有至关重要影响^[24-25],钾素可促进果实发育,对果实膨大、果实着色均有重要作用。本研究中,提高加气比例有利于开花坐果期植株吸收的磷素向根系分配、果实膨大期植株吸收的钾素向果实分配,说明提高加气比例能促进番茄植株营养生长期根系的生长及生

殖生长期果实的发育,有利于促进植株生长和提高番茄产量。

4 结论

(1)提高加气比例和追肥水平有利于提高番茄开花坐果期和果实膨大期对应土壤相关酶的活性,相同追肥水平下,提高加气比例5%~15%对应土壤过氧化氢酶、碱性磷酸酶和脲酶活性提高27.5%~122.9%。

(2)相同追肥水平下,植株干物质和营养元素(氮、磷、钾)积累量随加气比例升高而增加,提高加气比例有利于番茄根系在开花坐果期的磷素积累及番茄在果实膨大期的钾素积累。

(3)在相同追肥水平下,提高加气比例5%~15%对应番茄单果质量增加1.4%~23.8%,番茄产量增加14.0%~44.2%;在相同加气比例下相对常规追肥水平降低25%对应番茄产量增加0.4%~9.1%,相对常规追肥水平降低50%对应番茄产量下降3.0%~5.4%。

(4)宁夏银北灌区地埋滴灌条件下,适宜番茄栽培的“尿素—重过磷酸钙—硫酸钾”追施水平为135—300—360 kg/hm²(相对传统追肥定额降低25%),微纳米加气适宜比例为10%。

参考文献:

- [1] 杨海军,仵峰,方海平,等.基于加气水滴灌的土壤环境调节机理研究[J].物理学报,2019,68(1):94-106.
YANG H J, WU F, FANG H P, et al. Mechanism of soil environmental regulation by aerated drip irrigation [J].Acta Physica Sinica,2019,68(1):94-106.
- [2] ZHU J J, XU N, SIDDIQUE K H M, et al. Aerated drip irrigation improves water and nitrogen uptake efficiencies of tomato roots with associated changes in the antioxidant system[J].Scientia Horticulturae,2022,306:e111471.
- [3] DU Y D, ZHANG Q, CUI B J, et al. Aerated irrigation improves tomato yield and nitrogen use efficiency while reducing nitrogen application rate[J].Agricultural Water Management,2020,235:e106152.
- [4] WANG Y, LEI H J, ZHANG Z H, et al. Effects of aerated subsurface drip irrigation on rhizosphere soil environment and pepper (*Capsicum annum* L.) growth in three soil types[J].Archives of Agronomy and Soil Science,2023,69(7):1027-1038.
- [5] OUYANG Z, TIAN J C, YAN X F, et al. Effects of different concentrations of dissolved oxygen or temperatures on the growth, photosynthesis, yield and quality of lettuce [J].Agricultural Water Management, 2020, 228:e105896.
- [6] LEI H J, YU J, ZANG M, et al. Effects of water-fer-

- tilizer-air-coupling drip irrigation on soil health status: Soil aeration, enzyme activities and microbial biomass [J]. *Agronomy*, 2022, 12(11): e2674.
- [7] 張倩, 牛文全, 杜姪丹, 等. 加氣灌溉對不同施氮水平的設施甜瓜土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影響[J]. *應用生態學報*, 2019, 30(4): 1319-1326.
- ZHANG Q, NIU W Q, DU Y D, et al. Effects of aerated irrigation on CO_2 and N_2O emission from protected melon soils under different nitrogen application levels [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1319-1326.
- [8] OUYANG Z, TIAN J C, YAN X F, et al. Effects of different concentrations of dissolved oxygen on the growth, photosynthesis, yield and quality of greenhouse tomatoes and changes in soil microorganisms[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 245: e106579.
- [9] NIU W Q, GUO C, SHAO H B, et al. Effects of different rhizosphere ventilation treatment on water and nutrients absorption of maize[J]. *International Journal of Irrigation and Water Management*, 2021, 8(7): 1-10.
- [10] BARAM S, WEINSTEIN M, EVANS J F, et al. Drip irrigation with nanobubble oxygenated treated wastewater improves soil aeration[J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 291: e110550.
- [11] 張倩, 曾健, 張振華, 等. 循環曝氣地下滴灌下溫室番茄生長特性與產量研究[J]. *農業機械學報*, 2022, 53(2): 365-377.
- ZHANG Q, ZENG J, ZHANG Z H, et al. Impacts of cycle aerated subsurface drip irrigation on growth characteristics and yield of greenhouse tomato[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(2): 365-377.
- [12] ZHANG Q, ZHANG P, DENG Y P, et al. Study on regulation mechanism of tomato root growth in greenhouse under cycle aerated subsurface drip irrigation[J]. *Agronomy*, 2022, 12(11): e2609.
- [13] ZHU Y, CAI H J, SONG L B, et al. Aerated irrigation of different irrigation levels and subsurface dripper depths affects fruit yield, quality and water use efficiency of greenhouse tomato[J]. *Sustainability*, 2020, 12(7): e2703.
- [14] 劉冉, 王學成, 宋嘉雯, 等. 加氣對微咸水灌溉棉花幼苗生長的影響[J]. *節水灌溉*, 2022, (8): 1-7.
- LIU R, WANG X C, SONG J W, et al. Effect of aeration on the growth of cotton seedlings under irrigation with brackish water[J]. *Water Saving Irrigation*, 2022 (8): 1-7.
- [15] LI J G, HE P R, CHEN J, et al. Tomato performance and changes in soil chemistry in response to salinity and Na/Ca ratio of irrigation water[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 285: 108363.
- [16] JIANG Y, WANG X M, CHEN Y Z, et al. Research on the effects of rare earth combined contamination on soil microbial diversity and enzyme activity[J]. *Ecological Chemistry and Engineering*, 2022, 29(2): 227-236.
- [17] 邱悅, 楊曉燕, 李天勝, 等. 減氮配施緩釋氮肥對棉田土壤酶活性和氮素吸收利用的影響[J]. *水土保持學報*, 2022, 36(3): 294-302.
- QIU Y, YANG X Y, LI T S, et al. Effects of nitrogen reduction combined with slow release nitrogen fertilizer on soil enzyme activity and nitrogen uptake in cotton field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(3): 294-302.
- [18] ZHAO H, LI L, FAN G H, et al. Effects of aerated brackish water irrigation on growth of *Lycium barbarum* seedlings[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 310: e111721.
- [19] 臧明, 雷宏軍, 潘紅衛, 等. 增氧地下滴灌改善土壤通氣性促進番茄生長[J]. *農業工程學報*, 2018, 34(23): 109-118.
- ZANG M, LEI H J, PAN H W, et al. Aerated subsurface drip irrigation improving soil aeration and tomato growth[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(23): 109-118.
- [20] 雷宏軍, 肖哲元, 肖誌, 等. 水、肥、氣耦合滴灌對溫室番茄生長和品質的影響[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(5): 168-175.
- LEI H J, XIAO Z Y, XIAO R, et al. Effect of water-fertilizer-gas coupled drip irrigation on greenhouse tomato growth and fruit quality[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(5): 168-175.
- [21] 肖誌, 孫克平, 雷宏軍, 等. 加氣灌溉溫室辣椒生長、生理-養分吸收-產量關係研究[J]. *華北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(5): 78-86.
- XIAO R, SUN K P, LEI H J, et al. Research on the relationship among growth, physiology, nutrient uptake and yield of peppers in aerated irrigated greenhouse[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2023, 44(5): 78-86.
- [22] 雷宏軍, 楊宏光, 馮凱, 等. 循環曝氣灌溉條件下小白菜生長及水分與養分利用[J]. *灌溉排水學報*, 2017, 36(11): 13-18.
- LEI H J, YANG H G, FENG K, et al. Impact of continuous aerating irrigation on growth, water use efficiency and nutrient uptake of pak choi growing in different soils[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(11): 13-18.
- [23] 吳建繁, 王運華, 賀建德, 等. 京郊保護地番茄氮磷鉀肥料效應及其吸收分配規律研究[J]. *植物營養與肥料學報*, 2000, 6(4): 409-416.

- WU J F, WANG Y H, HE J D, et al. Study on the effect, absorption and distribution of NPK on tomato in greenhouse of Beijing suburbs[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2000, 6(4): 409-416.
- [24] 褚屿, 骆洪义, 林举梅, 等. 番茄对氮磷钾及中微量元素的吸收规律研究[J]. 中国土壤与肥料, 2021(1): 247-255.
- CHU Y, LUO H Y, LIN J M, et al. Study on the absorption law of nitrogen, phosphorus, potassium and trace elements of tomatoes[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021(1): 247-255.
- [25] 郭孝宇, 路强, 张宇涵, 等. 喷施磷肥对樱桃番茄品质和营养元素含量的影响[J]. 山东农业科学, 2022, 54(5): 120-127.
- GUO X Y, LU Q, ZHANG Y H, et al. Effects of spraying phosphate fertilizer on quality and nutrient content of cherry tomato[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(5): 120-127.