

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.02.036

CSTR:32310.14.stbcbx.2025.02.036

钟韵,黄志坤,朱士江,等.调亏灌溉对鄂西柑橘果实膨大期和转色增糖期叶片养分、酶活性及根区土壤养分的影响[J].水土保持学报,2025,39(2)

ZHONG Yun, HUANG Zhikun, ZHU Shijiang, et al. Effects of regulated deficit irrigation on leaf nutrients, enzyme activities, and root zone soil nutrients during fruit expansion and coloration-sugar accumulation stages of citrus in western Hubei Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2)

调亏灌溉对鄂西柑橘果实膨大期和转色增糖期叶片养分、酶活性及根区土壤养分的影响

钟韵,黄志坤,朱士江,郝琨,朱子荣,张威,陈洪德

(三峡大学水电工程施工与管理湖北省重点实验室,湖北宜昌 443002)

摘要: [目的] 探究调亏灌溉对鄂西柑橘果实膨大期(Ⅲ)和转色增糖期(Ⅳ)叶片养分(氮、磷、钾)、酶活性(SOD、POD、CAT)及根区土壤养分(硝态氮、有效磷、速效钾)的影响。[方法] 选择鄂西 6 a 生“爱媛 28”为研究对象,以充分灌水为对照(CK:Ⅲ期和Ⅳ期的日灌水量分别为 4.0、2.5 L),在Ⅲ期Ⅳ期各设置 4 个亏水处理,即轻度亏水(LD:70% CK)、中度亏水(MD1:55% CK)、偏重度亏水(MD2:40% CK)和重度亏水(SD:30% CK),探究柑橘叶片养分、酶活性及根区土壤养分在不同生育期受水分胁迫的响应规律。[结果] 1)Ⅳ-MD1 处理显著促进叶片氮、磷、钾质量分数的提升,其质量分数分别较对照增加 5.27%、2.13% 和 12.42%,且该处理叶片养分的增长速率与积累量均达到最大。2)Ⅲ-MD1 处理有效增强柑橘树的抗氧化防御能力,其中超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性均显著增强,分别提升 63.3% 和 104.5%。3)Ⅲ-MD1 处理显著提高上、中层土壤硝态氮和有效磷质量分数,其质量分数分别提升 74.54%、17.61% 和 73.53%、43.58%;Ⅳ-MD1 处理显著优化土壤养分的纵向分布,减少养分淋溶损失,其上、中层速效钾质量分数分别上升 59.23% 和 51.67%。4)典型性相关分析揭示土壤与叶片营养元素之间的相互关系,其中叶片磷素和钾素均与土壤速效钾呈正相关,而与土壤硝态氮、有效磷及叶片氮素呈负相关。[结论] Ⅳ-MD1 处理有利于土壤和叶片养分积累及保护酶更好发挥作用,是鄂西柑橘种植较适宜的滴灌节水管理模式,研究结果可为优化柑橘灌溉制度和提高柑橘品质提供理论依据。

关键词: 柑橘;调亏灌溉;叶片养分;叶片保护酶活性;土壤养分

中图分类号:S274.1;S666.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2025)02-0001-12

Effects of Regulated Deficit Irrigation on Leaf Nutrients, Enzyme Activities, and Root Zone Soil Nutrients During Fruit Expansion and Coloration-Sugar Accumulation Stages of Citrus in Western Hubei Province

ZHONG Yun, HUANG Zhikun, ZHU Shijiang, HAO Kun, ZHU Zirong, ZHANG Wei, CHEN Hongde

(Hubei Key Laboratory of Hydropower Engineering Construction and Management, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: [Objective] This study investigated the effects of regulated deficit irrigation on leaf nutrient levels (nitrogen, phosphorus, and potassium), enzyme activities (superoxide dismutase, peroxidase, and catalase), and root-zone soil nutrients (nitrate-nitrogen, available phosphorus, and available potassium) during the fruit expansion (Ⅲ) and coloration-sugar accumulation stages (Ⅳ) of citrus in western Hubei Province. [Methods] Six-year-old “Ehime 28” citrus trees in the western Hubei region were selected as the research subjects. Full irrigation served as the control (CK: daily irrigation volumes of 4.0 L and 2.5 L during the fruit expansion stage (Stage Ⅲ) and coloration-sugar accumulation stage (Stage Ⅳ), respectively). Four deficit irrigation treatments were applied during both Stage Ⅲ and Stage Ⅳ, including mild deficit (LD: 70% of CK), moderate deficit 1 (MD1: 55% of

收稿日期:2024-09-27

修回日期:2024-11-24

录用日期:2024-11-29

网络首发日期(www.cnki.net):2024-00-00

资助项目:湖北省自然科学基金项目(2024AFB320);国家自然科学基金项目(52069016);宜昌市自然科学基金项目(A23-2-012)

第一作者:钟韵(1992—),男,博士,讲师,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:zhongyunjx92@163.com

通信作者:郝琨(1992—),男,博士,讲师,主要从事农业水资源高效利用研究。E-mail:haokgz@126.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

CK), moderate deficit 2 (MD2: 40% of CK), and severe deficit (SD: 30% of CK). The aim was to explore the response patterns of soil nutrients, citrus leaf nutrients, antioxidant enzyme activities, and root-zone soil nutrients to water stress under drip irrigation across different growth stages. [Results] 1) The IV -MD1 treatment significantly promoted the increase in leaf nitrogen, phosphorus, and potassium contents, with their respective mass fractions increasing by 5.27%, 2.13%, and 12.42% compared to the control group. Moreover, this treatment achieved the highest rates of nutrient accumulation and growth in the leaves. 2) The III -MD1 treatment effectively enhanced the antioxidant defense capacity of citrus trees, with the activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) increasing by 63.3% and 104.5%, respectively. 3) The III -MD1 treatment markedly enhanced nitrate nitrogen and available phosphorus contents in the upper and middle soil layers, with respective increases of 74.54% and 17.61% in the upper layer, and 73.53% and 43.58% in the middle layer. Additionally, the IV-MD1 treatment significantly improved the vertical distribution of soil nutrients, effectively reducing nutrient leaching losses. This treatment also increased the available potassium content in the upper and middle soil layers by 59.23% and 51.67%, respectively. 4) Canonical correlation analysis revealed significant relationships between soil and leaf nutrient elements. Leaf phosphorus and potassium contents were positively correlated with available potassium in the soil, while they were negatively correlated with soil nitrate-nitrogen, available phosphorus, and leaf nitrogen. [Conclusion] The IV -MD1 treatment effectively promotes the accumulation of soil and leaf nutrients and enhances the activity of protective enzymes, making it a suitable water-saving management strategy for drip irrigation for citrus cultivation in western Hubei. The findings provide a theoretical basis for optimizing citrus irrigation practices and improving fruit quality.

Keywords: citrus; regulated deficit irrigation; leaf nutrients; leaf protective enzyme activities; soil nutrients

Received: 2024-09-27

Revised: 2024-11-24

Accepted: 2024-11-29

Online(www.cnki.net): 2024-00-00

随着全球气候变化的加剧,水资源短缺已成为制约农业可持续发展的重要因素之一。调亏灌溉作为当前农业重要的一种节水灌溉技术,有效减少水资源的消耗,但其对土壤养分状况、作物叶片养分含量及酶活性等产生复杂的影响。调亏灌溉由于减少灌水量,改变土壤中的水分状况,进而影响养分的溶解、迁移和吸收过程,导致土壤养分含量发生变化。一方面,土壤含水量的适度降低有助于抑制养分的过度淋失,提高肥料的利用效率^[1];另一方面,水分调控着土壤氮(N)和磷(P)等关键养分的有效性。有研究^[2]表明,土壤含水量过高抑制根、茎、叶对N、P等养分的吸收,而适当的调亏灌溉可起到促进吸收的作用。

土壤养分的变化影响作物叶片的养分状况,郭全恩等^[3]研究发现,苹果叶片营养元素N、P、K和土壤不同土层对应养分之间存在着良好的相关性;邱权等^[4]对白刺研究发现,其表层土壤养分含量对白刺叶片养分含量有显著影响。叶片养分含量和酶活性的变化直接关系到作物的生长发育和产量品质^[5]。在干旱等逆境条件下,植物体内活性氧平衡失调,导致活性氧积累,进而引发脂膜过氧化,损害细胞结构^[6];为应对逆境胁迫,植物进化出超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)等

抗氧化酶系统来清除过剩的活性氧,保护细胞免受氧化损伤^[7]。目前,有关水分胁迫对植物抗氧化酶系统影响的研究较多,但研究结果仍存在分歧,刘倩等^[8]研究表明,轻度水分亏缺可显著增强梨枣树叶片保护酶系统(SOD、POD、CAT)活性;周慧敏等^[9]研究发现,干旱胁迫可显著降低杨树叶片SOD和CAT活性;而何凤等^[10]研究发现,杜仲苗叶片CAT随灌水量减少呈先升后降趋势;杨方云等^[11]与陈丽培等^[12]分别对甜橙和皂荚叶片研究发现,水分胁迫条件下,显著提高SOD、POD活性,而CAT活性显著降低。上述研究表明水分胁迫对植物抗氧化酶系统有复杂的调控作用,但针对鄂西地区柑橘相关研究较为匮乏,且大部分研究均只针对全生育期进行分析,尚缺乏对不同生育阶段,特别是柑橘关键生育期水分调控对抗氧化酶系统的影响亟需深入分析。

已有研究^[13-15]表明,果实品质与土壤及叶片养分密切相关,土壤养分和叶片营养对植物生长和产量具有重要影响^[16-17]。然而,关于调亏灌溉对土壤和叶片养分积累及酶活性调控作用的研究尚不完善。因此,本文通过田间试验,研究在柑橘果实膨大期和转色增糖期调亏灌溉对柑橘园土壤养分、柑橘叶片养分含量及酶活性的影响,旨在筛选出更有利于土壤

和叶片养分积累及保护酶更好发挥作用的调亏时期和程度,对于优化柑橘灌溉制度和提高柑橘品质具有重要意义,以期为鄂西地区制定科学合理的柑橘节水灌溉策略提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2022年3—12月枝江宜昌农科所设施柑橘试验基地(111°48'E, 30°36'N)进行,海拔46 m。试验区为砂壤土,土壤呈酸性,pH 4.8~6.2,土壤体积质量为1.38 g/cm³,田间持水量为20%(质量含水率)。试验在塑料大棚内开展,大棚前后门及侧边棚膜多处于开放状态,保持大棚内空气流通,夏季开启遮阳网,降低棚内温度。

1.2 试验设计

选取基地内树龄为6年的“爱媛28”柑橘品种作为试验对象,以枳为砧木,株行距为4 m×3 m,计划湿润层为60 cm。整个生育期共分为5个生长阶段:Ⅰ(萌芽开花期,3月中旬至4月下旬),Ⅱ(幼果期,5月上旬至5月下旬),Ⅲ(果实膨大期,6月上旬至9月中旬),Ⅳ(转色增糖期,9月下旬至11月),Ⅴ(休眠期,12月至翌年3月上旬)。前期研究工作确定每棵柑橘树在Ⅲ期和Ⅳ期的需水量分别为4.0、2.5 L/d,试验在Ⅲ期和Ⅳ期分别设置轻度亏水、中度亏水、偏重度亏水和重度亏水处理,单次灌水量分别为对照(CK)的70%(LD)、55%(MD1)、40%(MD2)和30%(SD)5个灌水水平,以柑橘常规需水量灌溉作为对照进行设置,试验方案见表1。选取生长状况相近的27棵柑橘树进行试验,随机选相邻3棵树作为1个处理,共9个处理组,为减少处理间的相互干扰,各处理组之间设有隔离行(每个处理间空出2列)。试验采取滴灌的方式进行控水灌溉,滴灌采用国产PET灌水桶,滴箭管为4爪直箭,配有稳流器,每棵树均配1套灌水设备,流量为0.1 L/h。试验中所有处理均采用标准农艺措施,如修剪、环剥、喷洒杀虫剂和杂草控制等。

根据当地施肥方法,柑橘全生育期共施肥2次,分别在Ⅰ期(基肥)和Ⅲ期(追肥)。所有处理施肥量和施肥方法均相同,其中有机肥(牛粪)全生育期用量为8.0 kg/株,2次施入比例为3:2,在果树滴水线以下开环沟施肥;磷肥(P₂O₅)和钾肥(K₂O)全生育期用量分别为0.1、0.2 kg/株,2次施入比例均为3:2;氮肥(含N量为46%的尿素)全生育期用量为0.25 kg/株,2次施入比例为2:1。

1.3 测定项目与方法

Ⅲ期控水前15 d采集第1次样本(Q1);控水期

间每隔15 d采集1次样本,共2次(Q2和Q3);控水结束后隔15 d采集1次样本(Q4)。Ⅳ期采样时间节点与Ⅲ期一致,分别采集样本Q4、Q5、Q6和Q7。

表1 柑橘灌溉试验方案

Table 1 Irrigation pilot program of citrus

| 亏水生育期 | 亏水程度 | 处理 | 果实膨大期/ (L·d ⁻¹ ·棵 ⁻¹) | 转色增糖期/ (L·d ⁻¹ ·棵 ⁻¹) |
|---------------|------|-------|---|---|
| 果实膨大期 (Ⅲ期) | 轻度 | Ⅲ-LD | 2.8 | 2.50 |
| | 中度 | Ⅲ-MD1 | 2.2 | 2.50 |
| | 偏重度 | Ⅲ-MD2 | 1.6 | 2.50 |
| 转色增糖期 (Ⅳ期) | 重度 | Ⅲ-SD | 1.2 | 2.50 |
| | 轻度 | Ⅳ-LD | 4.0 | 1.75 |
| | 中度 | Ⅳ-MD1 | 4.0 | 1.375 |
| | 偏重度 | Ⅳ-MD2 | 4.0 | 1.00 |
| | 重度 | Ⅳ-SD | 4.0 | 0.75 |
| | CK | | 4.0 | 2.50 |

1) 柑橘叶片养分及抗氧化酶活性

每次采样时,从东、南、西、北4个方向各取10片中等大小的柑橘叶片,大小为中叶(避免采集新叶与老叶),用干布擦净并裁剪成2 cm×2 cm的方块,用破壁机搅碎并离心,吸取0.1 mL上清液于10 mL量筒中,加水至10 mL(得到100倍稀释汁液),倒入锥形瓶中与一平勺作物脱色剂混匀,振荡5 min后过滤,作为待测液备用。用HM-TYD高精度全项目养分检测仪进行叶片氮、磷、钾素的测定。称取0.1 g新鲜的叶片,加入提取液,冰浴研磨成匀浆,采用超氧化歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性检测试剂盒测定样品中抗氧化酶活性。

2) 土壤养分

在Ⅲ期和Ⅳ期控水前、控水中(取2次)及控水结束时分别取试验树滴落线内上(20 cm)、中(40 cm)、下(60 cm)层土样,取3次重复,分别检测各层土壤中硝态氮、有效磷和速效钾质量分数。土壤中养分质量分数用HM-TYD高精度全项目养分检测仪进行检测。

1.4 数据处理

用Excel 2019进行数据处理和制图,采用IBM SPSS Statistics 27软件进行双变量相关性分析和典型性相关分析及主成分分析。

2 结果与分析

2.1 不同生育期调亏灌溉对叶片养分的影响

由图1a和图1b可知,Ⅲ期Q4时期CK、LD、MD1、MD2、SD处理的叶片氮素含量较Q1时期分别提升10.48%、13.90%、10.27%、7.78%、6.88%,在恢复灌水之后,叶片氮素质量分数呈上升趋势,且积累效果明显高于CK处理;Ⅳ期Q7时期CK、LD、MD1、

MD2、SD处理的叶片氮素质量分数较Q4时期分别提升4.84%、5.27%、8.05%、3.25%、4.38%，表明Ⅲ-LD和Ⅳ-MD1处理有利于叶片氮素的积累。从图1c和图1d可知，叶片磷素质量分数除Ⅲ-MD1处理出现小幅度上下波动之外，Ⅲ期其他各处理均保持下降趋势，其中Ⅲ-SD处理下降幅度最大；第4次取样(Q4)除Ⅲ-MD1处理磷素上升1.24%外，CK、LD、MD2、SD分别下降5.33%、4.50%、3.46%、5.96%。Ⅳ期中各处理磷素质量分数在Q7时整体相较于Q4均有提升，CK、LD、MD1、MD2、SD处理分别提升0.27%、0.80%、2.13%、

1.04%、0.80%。因此，Ⅲ-MD1和Ⅳ-MD1处理有利于叶片磷素的积累。从图1e和图1f可知，Ⅲ期各个处理的钾素质量分数均有小幅度波动；控水后，LD、MD2处理在Q4时的叶片钾素质量分数较Q1有小幅度提升，分别提升4.76%、2.30%，LD、MD1、SD处理分别下降3.82%、8.45%、3.97%。Ⅳ期LD和MD1处理叶片钾素质量分数分别提升2.64%和12.42%，但CK、MD2和SD分别下降5.95%、2.84%和5.66%。所以Ⅲ-LD和Ⅳ-MD1处理利于叶片钾素积累。综上，Ⅳ期中度控水处理可同时使叶片氮磷钾的积累量最大。

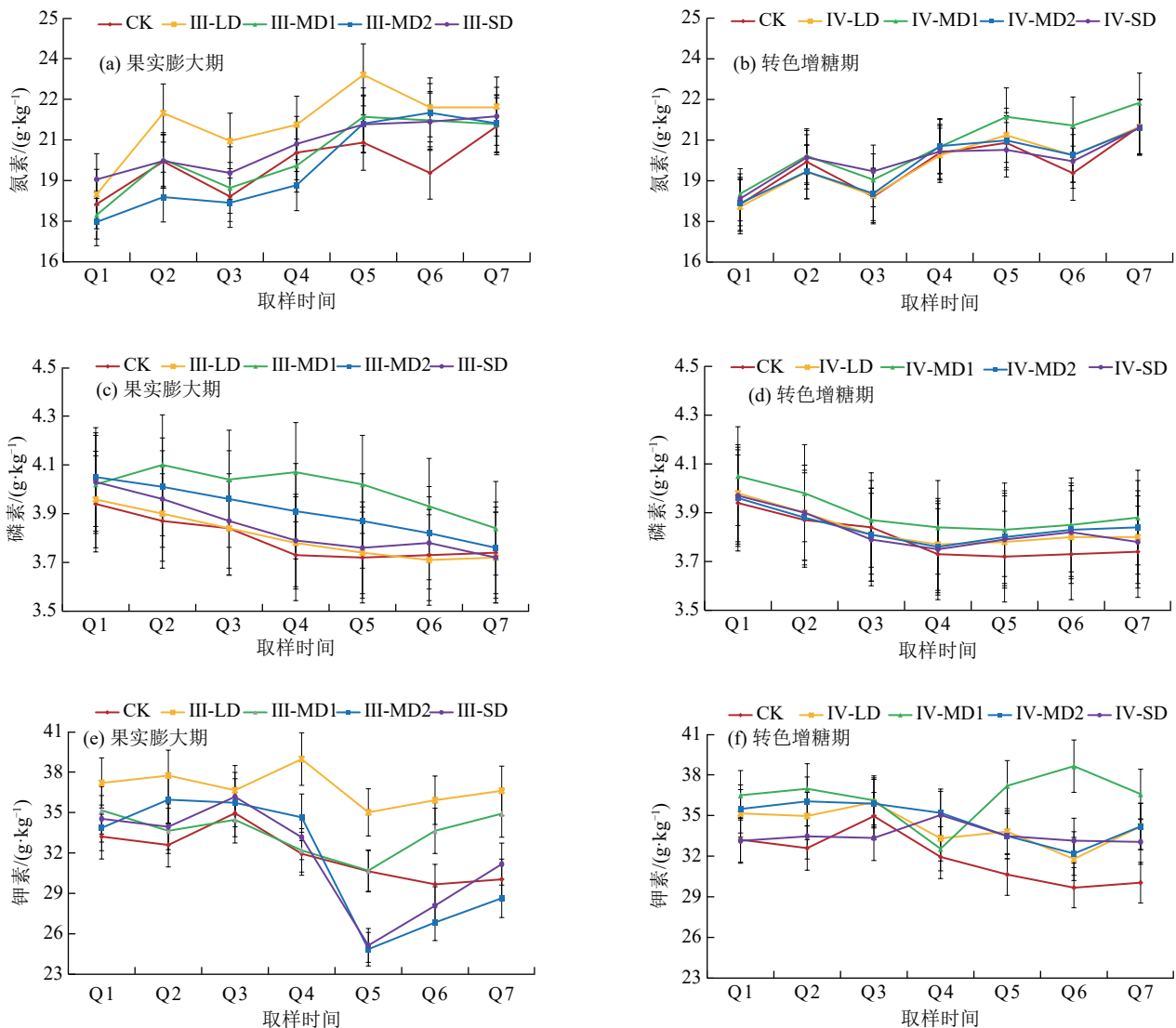


图1 不同生育期调亏灌溉对叶片氮磷钾素质量分数的影响

Fig. 1 Effects of deficit irrigation at different growth stages on the mass fractions of nitrogen, phosphorus and potassium in leaves

2.2 不同生育期调亏灌溉对柑橘叶片酶活性的影响

由图2a和图2b可知，Ⅲ期Q4时期叶片SOD活性较Q1时期提升8.0%~63.3%，且SD处理在恢复灌水后，SOD活性再次上升；Ⅳ期LD处理叶片SOD活性提升2.5%，其他处理下降10.0%~54.0%。因此，Ⅲ-MD1、Ⅳ-LD处理下叶片SOD活性显著增

长，用于抵抗干旱胁迫带来的负面影响，该调亏处理为叶片SOD最适水分胁迫条件。由图2c和图2d可知，Ⅲ期不同处理POD活性同SOD活性变化规律相似，MD1处理最大幅提高POD活性；在Ⅳ期控水结束后，CK、LD、MD1处理的POD活性分别提升21.6%、38.8%、12.1%，其余处理均有下降。因此，

POD 活性在 III -MD1、IV-LD 的控水胁迫下反应最大,出现大幅增长,为 III、IV 期的 POD 最适水分胁迫条件。由图 2e 和图 2f 可知, III、IV 期控水处理下,

CAT 活性随灌水量减少而减弱,而 CK 的 CAT 活性始终较高。综上, III 期中度控水处理可同时使叶片 SOD、POD 的活性最大。

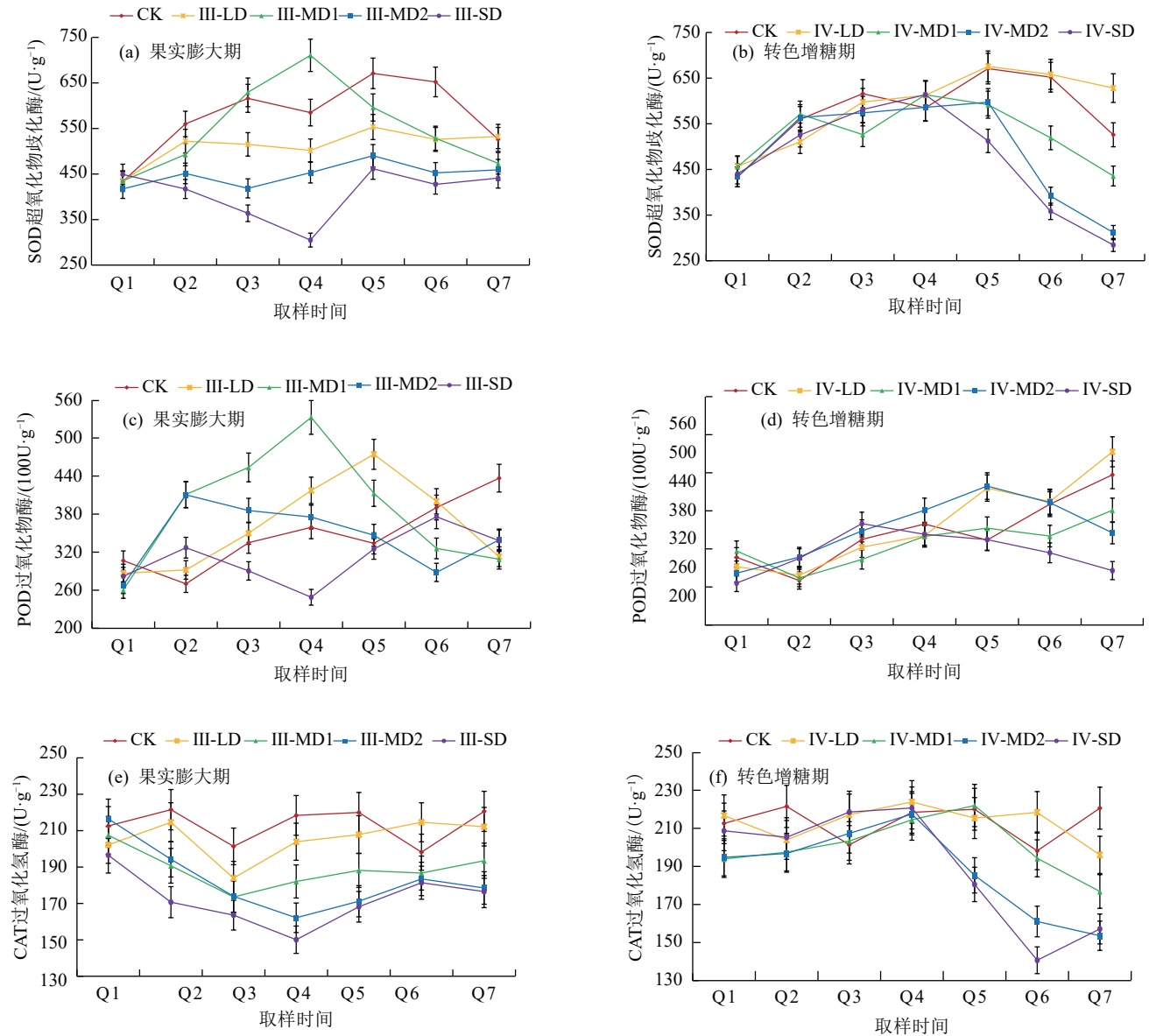


图 2 不同生育期调亏灌溉对叶片保护酶活性的影响

Fig. 2 Effects of regulated deficit irrigation on leaf protective enzyme activities at different growth stages

2.3 调亏灌溉对土壤硝态氮、有效磷和速效钾的影响

由图 3a 和图 3b 可知, III 期控水后,各处理不同深度(除 III -MD2 处理下层土壤)的土壤硝态氮质量分数均有提升,其中各亏水处理上、中、下层土壤硝态氮质量分数较 CK 分别上升 51.81%~102.08%、45.48%~68.22%、17.56%~57.14%,各处理的上层土壤硝态氮质量分数上升速度随水分胁迫程度的增加而增加,下层土壤硝态氮质量分数变化相反。IV 期控水后,各处理的上层土壤硝态氮质量分数在 4 个取样时期均呈上升趋势,5 个处理分别上升 47.35%、

53.97%、47.78%、33.86%、50.27%;中层土壤中各处理的土壤硝态氮质量分数均上升(除 IV -SD 处理有小幅下降),升幅在 19.60%~36.07%,均小于对应上层土壤硝态氮质量分数变化幅度;各处理的下层土壤硝态氮质量分数整体呈下降趋势,4 个控水处理分别下降 5.48%、12.89%、23.73%、24.97%。由此可知,在 III、IV 期进行控水时,随着灌水量的减少,土壤硝态氮受水分下渗淋溶效应显著减弱,CK 淋溶现象最显著;相较于 CK 处理,从 III -LD 处理开始,土壤上层和中层的土壤硝态氮累积现象更加明显,而下层土壤硝态氮增幅逐渐减小,IV 期的淋失现象较 III 期有

所减弱,表明随着控水措施的持续和深入,土壤对土

壤硝态氮的保持能力有所增强。

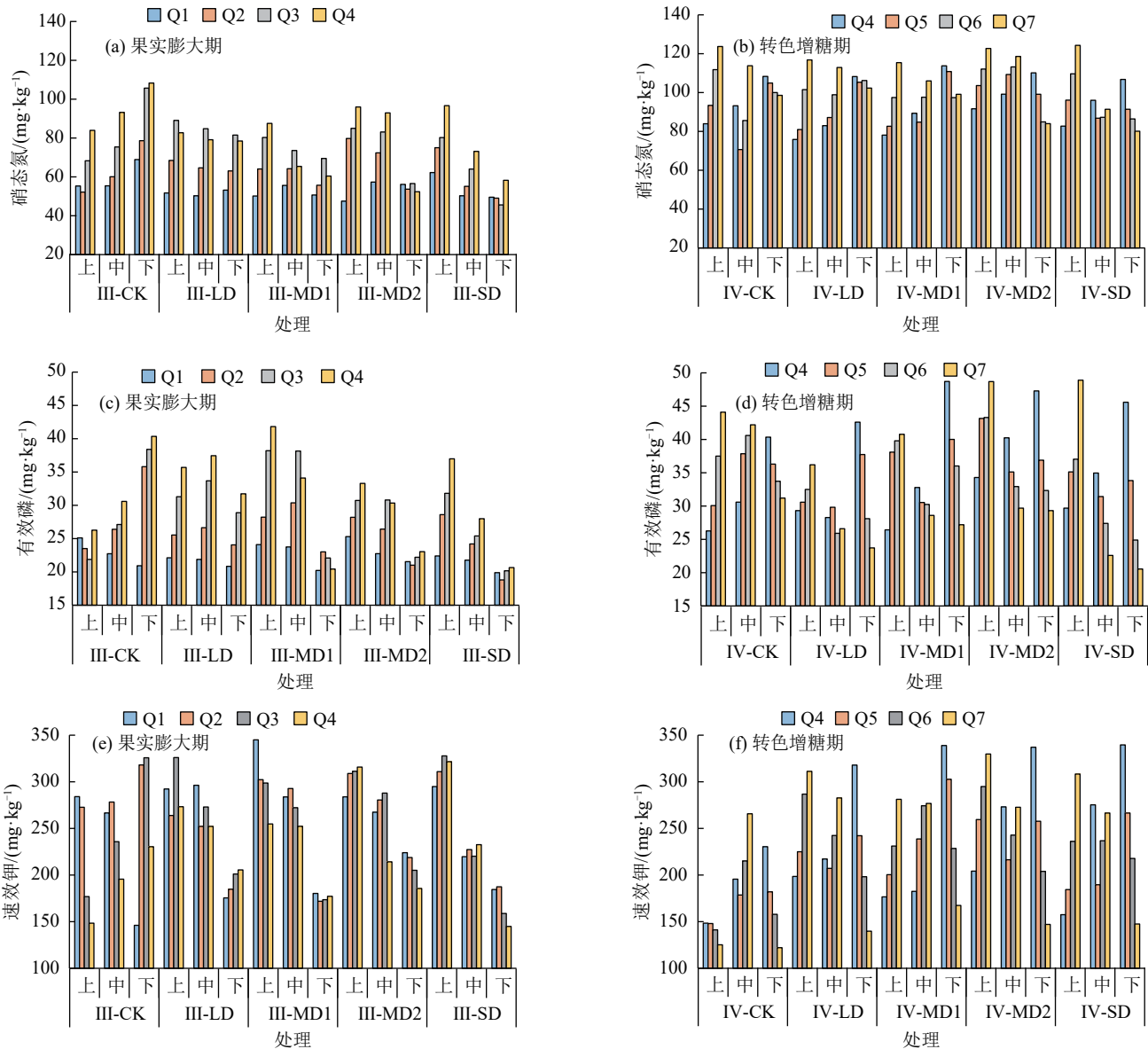


图3 不同生育期调亏灌溉对土壤硝态氮、有效磷、速效钾质量分数的影响

Fig. 3 Effects of deficit irrigation at different growth stages on the mass fractions of soil nitrate-nitrogen, available phosphorus and available potassium

由图3c和图3d可知,Ⅲ期控水后,各处理的土壤有效磷变化规律与土壤硝态氮类似,不同处理及不同土层深度土壤有效磷质量分数均有提升,其中各控水处理上、中、下层土壤有效磷质量分数分别上升4.62%~73.53%、28.57%~71.16%和1.04%~92.76%,而各控水处理下层土壤有效磷质量分数的变幅极小,仅上升1.04%~6.96%。Ⅳ期控水后,各处理上层土壤有效磷质量分数分别上升23.47%~67.87%,中层土壤有效磷质量分数均大幅下降,下层土壤有效磷质量分数降幅为22.68%~54.92%。由此可知,Ⅲ、Ⅳ期进行控水后,土壤有效磷也存在淋失现象,但淋失强度弱于土壤硝态氮。

由图3e和图3f可知,Ⅲ期控水后,各处理上层土壤速效钾随水分胁迫程度增加呈先下降后上升的趋势,中层土壤速效钾仅有SD处理在控水后有小幅提升,下层变化与上层相反。Ⅳ期控水后,各控水处理上层土壤速效钾质量分数上升56.78%~95.75%,中层土壤有效磷质量分数Ⅳ-MD2、SD分别下降0.15%和3.20%,其他处理均有提升,但整体上升幅低于上层,下层土壤速效钾质量分数下降幅度随水分胁迫程度增加而增大,表明土壤速效钾有较显著的养分淋失和上移现象。综上,Ⅲ期中度控水处理更有利于土壤硝态氮和有效磷停留在上、中层,Ⅳ期中度控水处理更有利于土壤速效钾停留在上、中层。

2.4 综合效应分析

采用主成分分析对柑橘土壤养分、叶片养分及酶活性指标进行降维,通过成分得分系数矩阵和提取的主成分特征值,计算特征向量,并结合各指标标准化向量和特征向量,确定主成分表达式并计算综合得分。由表 2 可知,第 1 主成分的特征值为 3.560,解释总变异的 39.559%,大小主要由叶片氮素、SOD、POD、CAT、土壤硝态氮、土壤有效磷决定(表 3 中 A1);第 2 主成分的特征值为 2.305,解释总变异的 25.591%,大小主要由除叶片氮素、钾素、土壤速效钾以外其他指标决定的(表 3 中 A2);第 3 主成分的特征值为 1.337,解释总变异的 14.855%,大小主要由除叶片 SOD、CAT 以外其他指标决定的(见表 3 中 A3);第 4 主成分的特征值为 1.116,解释总变异的 12.397%大小主要由除叶片氮素、钾素、SOD 和 CAT 以外其他指标决定的(表 3 中 A4)。其他成分特征值均 <1,说明该主成分解释力还不如直接引入原

变量大,只需提取第 1、2、3、4 主成分即可。4 个主成分可解释总变异量的 92.402%。综合评分结果(表 4)表明,IV-MD1 处理的综合效应最优,其次是 IV-LD 处理,III-SD 处理的综合效应最差。

表 2 主成分分析中的解释总方差

Table 2 Explained total variance in principal component analysis

| 成分 | 初始特征值 | | | 提取载荷平方和 | | |
|----|-------|--------|---------|---------|--------|--------|
| | 总计 | 方差百分比 | 累积/% | 总计 | 方差百分比 | 累积/% |
| 1 | 3.560 | 39.559 | 39.559 | 3.560 | 39.559 | 39.559 |
| 2 | 2.303 | 25.591 | 65.150 | 2.303 | 25.591 | 65.150 |
| 3 | 1.337 | 14.855 | 80.006 | 1.337 | 14.855 | 80.006 |
| 4 | 1.116 | 12.397 | 92.403 | 1.116 | 12.397 | 92.403 |
| 5 | 0.446 | 4.953 | 97.356 | | | |
| 6 | 0.176 | 1.960 | 99.315 | | | |
| 7 | 0.049 | 0.547 | 99.862 | | | |
| 8 | 0.012 | 0.138 | 100.000 | | | |
| 9 | <0.01 | <0.01 | 100.000 | | | |

表 3 各处理指标标准化向量及成分矩阵和特征向量

Table 3 Standardized vectors, component matrix, and eigenvecto of the indicators for each treatment

| 处理 | 氮素 | 磷素 | 钾素 | 硝态氮 | 有效磷 | 速效钾 | SOD | POD | CAT | |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CK | -0.81 | -0.35 | -0.93 | -0.40 | -0.49 | -0.60 | 0.57 | -0.63 | 1.32 | |
| III-LD | 0.60 | -0.09 | 2.05 | -0.70 | -0.48 | 0.58 | -0.12 | -0.32 | 0.56 | |
| III-MD1 | -0.94 | 1.95 | -0.47 | -1.06 | -0.38 | 0.67 | 0.80 | 0.97 | -0.23 | |
| III-MD2 | -1.73 | 1.14 | 0.31 | -0.77 | -0.96 | 1.66 | -0.85 | 0.07 | -0.34 | |
| III-SD | -0.24 | 0.38 | -0.08 | -1.15 | -1.30 | -1.08 | -1.49 | -1.13 | -1.36 | |
| IV-LD | 1.42 | -0.30 | 1.11 | 0.96 | 1.11 | -0.40 | 0.47 | 0.42 | 0.60 | |
| IV-MD1 | 0.62 | -0.97 | -0.86 | 0.99 | 0.15 | -0.70 | 1.77 | 1.94 | 1.32 | |
| IV-MD2 | 0.65 | -0.76 | -0.54 | 1.34 | 1.79 | 1.01 | -0.39 | -0.17 | -0.80 | |
| IV-SD | 0.44 | -1.00 | -0.59 | 0.79 | 0.56 | -1.13 | -0.76 | -1.15 | -1.08 | |
| 成分矩阵 | A1 | 0.23 | -0.22 | -0.04 | 0.26 | 0.22 | -0.10 | 0.16 | 0.10 | 0.12 |
| | A2 | -0.14 | 0.18 | -0.02 | -0.09 | -0.10 | 0.15 | 0.34 | 0.36 | 0.31 |
| | A3 | 0.21 | 0.12 | 0.60 | 0.07 | 0.23 | 0.51 | -0.11 | 0.07 | -0.05 |
| | A4 | -0.26 | 0.15 | -0.52 | 0.26 | 0.36 | 0.42 | -0.05 | 0.15 | -0.37 |
| 特征向量 | Q1 | 0.43 | -0.42 | -0.07 | 0.48 | 0.42 | -0.19 | 0.30 | 0.20 | 0.23 |
| | Q2 | -0.21 | 0.27 | -0.03 | -0.13 | -0.15 | 0.22 | 0.52 | 0.55 | 0.47 |
| | Q3 | 0.24 | 0.14 | 0.69 | 0.08 | 0.27 | 0.59 | -0.12 | 0.08 | -0.05 |
| | Q4 | -0.28 | 0.15 | -0.55 | 0.28 | 0.38 | 0.44 | -0.05 | 0.16 | -0.39 |

注:A1、A2、A3、A4 分别为第 1、第 2、第 3、第 4 成分矩阵,Q1、Q2、Q3、Q4 分别为第 1、第 2、第 3、第 4 特征向量。

2.5 叶片养分与土壤养分的响应关系

由 Pearson 相关分析(表 5)可知,叶片氮素与磷素呈显著负相关($p < 0.05$),与土壤硝态氮、有效磷呈显著正相关,叶片磷素与土壤硝态氮呈显著负相关,土壤硝态氮与有效磷呈极显著正相关($p < 0.01$)。

为进一步探究叶片与土壤养分之间的相关性,

通过对试验期间各处理 7 次取样检测中各层土层深度处的土壤硝态氮、土壤有效磷、土壤速效钾质量分数及叶片氮、磷、钾质量分数进行典型性相关分析,建立叶片养分质量分数 $L=(l_1: \text{氮素}; l_2: \text{磷素}; l_3: \text{钾素})$ 与土壤养分质量分数 $Y=(y_1: \text{硝态氮}; y_2: \text{有效磷}; y_3: \text{速效钾})$ 之间的相关关系,其显著性检验结果见表 6。

表 4 主成分综合得分

Table 4 Principal component composite score

| 处理 | 主成分得分 | | | | 综合得分 | 排名 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| | Y1 | Y2 | Y3 | Y4 | | |
| CK | -0.04 | 0.45 | -1.38 | -0.50 | -0.18 | 6 |
| Ⅲ-LD | -0.25 | 0.07 | 1.43 | -1.60 | -0.07 | 5 |
| Ⅲ-MD1 | -0.86 | 1.27 | -0.07 | 0.83 | 0.08 | 4 |
| Ⅲ-MD2 | -1.41 | 0.47 | 0.64 | 0.77 | -0.27 | 7 |
| Ⅲ-SD | -1.13 | -1.17 | -0.84 | -0.67 | -1.03 | 9 |
| Ⅳ-LD | 1.07 | -0.02 | 1.00 | -0.68 | 0.52 | 2 |
| Ⅳ-MD1 | 1.40 | 1.27 | -0.87 | -0.10 | 0.79 | 1 |
| Ⅳ-MD2 | 0.81 | -0.80 | 0.81 | 1.71 | 0.49 | 3 |
| Ⅳ-SD | 0.42 | -1.53 | -0.72 | 0.25 | -0.32 | 8 |

注: Y1、Y2、Y3、Y4 分别为第 1、第 2、第 3、第 4 主成分得分。

表 5 土壤与叶片养分指标相关系数

Table 5 Correlation coefficients between soil and leaf nutrient indices

| 养分指标 | 氮素 | 磷素 | 钾素 | 硝态氮 | 有效磷 | 速效钾 |
|------|---------|---------|--------|---------|--------|-----|
| 氮素 | 1 | | | | | |
| 磷素 | -0.704* | 1 | | | | |
| 钾素 | -0.294 | 0.134 | 1 | | | |
| 硝态氮 | 0.713* | -0.779* | -0.211 | 1 | | |
| 有效磷 | 0.691* | -0.566 | -0.092 | 0.904** | 1 | |
| 速效钾 | -0.405 | 0.513 | 0.290 | -0.188 | -0.026 | 1 |

注: *表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$ 。

表 6 叶片与土壤养分含量典型性相关分析显著性检验

Table 6 Significance test of typical correlation analysis between leaf and soil nutrient contents

| 编号 | 相关系数 | Wilk's | F | 分子自由度 | 分母自由度 | p |
|----|-------|--------|--------|-------|-------|-------|
| 1 | 0.878 | 0.177 | 17.945 | 9 | 156 | 0.001 |
| 2 | 0.125 | 0.775 | 4.420 | 4 | 130 | 0.259 |
| 3 | 0.075 | 0.994 | 0.373 | 1 | 66 | 0.543 |

有研究^[18]表明, 维度系数 > 0.3 , 相关关系表现显著。由表 2 可知, 2 组相关系数矩阵中只有第 1 组 L_1 和 Y_1 相关系数为正向 0.878, $p = 0.001$, 达到极显著水平 ($p < 0.01$), 表明只有第 1 组典型变量显著性差异具有统计学意义, 能够充分地解释土壤养分 L_1 和叶片养分 Y_1 2 组变量间变化的强弱关系。根据典型性相关分析结果, 叶片养分 L_1 与土壤养分 Y_1 2 组指标标准化后的数据拟合相关公式为:

$$L_1 = -0.413l_1 + 0.522l_2 + 0.372l_3 \quad (1)$$

$$Y_1 = -0.635y_1 - 0.176y_2 + 0.374y_3 \quad (2)$$

$$L_1 = 0.878Y_1 \quad (3)$$

基于典型性相关分析结果进行典型结构分析(图 4)可知, 土壤与叶片养分之间相关性为 87.80%,

叶片氮素、磷素和钾素的典型载荷分别为 -0.801、0.852 和 0.603; 土壤硝态氮、有效磷和速效钾的典型载荷分别为 -0.942、-0.768 和 0.715。叶片养分中磷素、氮素为主要影响指标, 且磷素与钾素之间呈正相关, 二者均与氮素呈负相关; 土壤养分中硝态氮为主要影响指标, 且硝态氮与有效磷之间呈正相关, 二者均与速效钾呈负相关; 土壤硝态氮和有效磷与叶片氮素呈正相关, 与磷素、钾素呈负相关; 土壤速效钾与叶片氮素呈负相关, 与磷素、钾素呈正相关。叶片氮素、磷素、钾素及土壤硝态氮、有效磷、速效钾中 2 个变量相关性的绝对值从大到小分别为 y_1 、 l_2 、 l_1 、 y_2 、 y_3 、 l_3 , 相关性均较大, 表明土壤中特定养分的含量不仅直接决定植株对该养分的吸收效率, 还显著影响植物对其他养分的吸收, 这种土壤养分的平衡状态对植物的整体营养吸收能力和生长发育具有至关重要的调节作用。

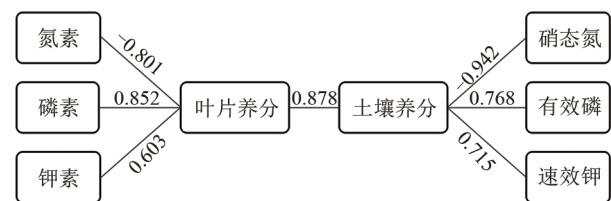


图 4 叶片养分与土壤养分典型相关系数结构

Fig. 4 Structure of correlation coefficients between leaf nutrient and soil nutrient

3 讨论

3.1 调亏灌溉对土壤养分的影响

土壤水分环境影响果树的生长发育^[19], 本研究发现, 水分对土壤养分的影响与土层深度有关, 上层土壤养分变化最大, 而中、下层土壤养分变化较小, 与土壤体积质量和空隙度有着密切关系^[20], 上层土壤因体积质量较小、空隙度较大, 水分渗透和养分迁移更为显著, 而中、下层土壤体积质量较大、空隙度较小, 限制水分和养分的垂直迁移。土壤硝态氮随灌水量增加而显著增加, 原因是灌水改善土壤微环境, 更有利于微生物的繁殖和活动, 加速有机氮的矿化和氮肥的硝化过程, 从而产生更多的硝态氮, 灌水遵循“氮随水动”的规律向深层土壤迁移, 其迁移量和灌水量成正比, 导致上层土壤硝态氮质量分数降低, 受灌水量的影响较为明显, 与何振嘉等^[21]的研究结果一致。Ⅳ期控水中下层土壤养分普遍降低, 一方面是因为Ⅳ期灌水量较小, 养分流失较少; 另一方面, 灌溉水分不足使土壤表层迅速蒸发, 造成土壤下层水分向上运动, 从而带动养分上移^[22], 所以适度的水分胁迫可使养分集中在根系周围, 更有利于作物的吸收与利用。

3.2 调亏灌溉对柑橘叶片养分的影响

叶片的发育速度对作物的果实产量起着重要的作用,本研究发现,在Ⅲ、Ⅳ期轻、中度的水分亏缺更有利用柑橘叶片养分的积累和水分的高效利用,与王虎兵^[23]对番茄植株的研究相似,即适当降低灌水量,有助于土壤中的养分向植物根系扩散和转移,从而增强植物根系对养分的吸收和向地上部的运输,增加植株体内养分的积累。其原因一方面是“稀释效应”^[17],即充分灌溉通过增加叶片的水分体积分数,而稀释叶片氮磷钾的浓度;另一方面,蒸腾速率对养分从土壤到植株顶部运输具有重要意义,水分胁迫导致蒸腾速率下降,影响流动养分的吸收,营养物质的吸收随水分胁迫程度的减少而增加^[24]。然而PANIGRAHI等^[25]研究发现,充分灌水条件下柑橘植株叶片养分浓度更高,但适当的水分胁迫可达到稳产提质的效果,同时提高水分利用效率的目的。

3.3 调亏灌溉对柑橘叶片酶活性的影响

细胞膜的稳定性是植物细胞维持正常生理功能的基础。正常条件下活性氧(ROS)与清除系统维持动态平衡。而干旱胁迫下细胞保护酶系统和抗氧化系统会受到损害,导致活性氧积累。诱发植物激活保护酶系统,包括SOD、CAT和POD,以清除活性氧。SOD将超氧阴离子(O_2^-)转化为过氧化氢(H_2O_2),随后在CAT和POD等酶的协同作用下消除 H_2O_2 ,从而保护细胞膜的稳定性^[26],这些抗氧化酶类能清除自由基降低膜脂过氧化水平,减轻膜伤害程度维持系统的平衡^[27],但在水分胁迫期间这3种酶的变化因水分胁迫程度、植物品种和生长条件不同而有所差异。有研究^[28]表明,越橘叶片在干旱胁迫中POD、CAT的活性显著上升,而随着胁迫程度降低,CAT活性先降低后升高,SOD活性先升高后降低;柑橘W.默科特叶片在轻度和中度胁迫下,SOD和POD活性随着水分胁迫的加剧而上升;而CAT活性则呈现先下降后上升的趋势,而重度胁迫下,SOD、POD和CAT的活性均下降^[29]。本研究显示,Ⅲ期中度控水处理可同时使叶片SOD、POD的活性最大,是由于在果实膨大期需水量较大,叶片干旱胁迫程度加剧,2种保护酶活性增强,与马文涛等^[30]对贵州野生柑橘的研究结果相一致。本研究发现,CAT活性在Ⅲ、Ⅳ期控水处理的活性随着灌水量的减少而减弱,CK的CAT活性最大,一方面可能因该地区夏季高温的影响而失活,导致CAT活性减弱^[31];另一方面,可能由于叶片POD活性过高对其功能的代偿作用^[32]导致。

3.4 叶片养分与土壤养分的响应关系

本研究表明,叶片养分与土壤养分之间存在紧密的相关性,二者之间的相互作用对于植物的生长和发育至关重要。土壤养分不仅可直接影响柑橘叶片养分中相同元素的变化,同时不同养分元素间也产生交互作用^[33]。叶片营养元素与相应土壤营养元素之间并不是简单的对应关系,具有一定的复杂性,仅施加某一种元素并不能有效提高叶片对应元素的质量分数,可能与土壤类型、植物种类及生长条件等因素的差异有关,刘东海等^[34]和张朝坤等^[35]对柑橘、番石榴的研究也得到类似结论。本研究发现,柑橘叶片磷素与土壤速效钾呈正相关,与土壤有效磷呈负相关,可能由于植物内部存在复杂的源-库平衡机制。当土壤速效钾水平较高时,钾的充足供应可能刺激叶片内蛋白质和酶的合成,提高磷代谢效率,从而增强叶片磷素积累,与孙寅虎等^[36]对云南菠萝蜜主要种植园的研究结果一致;叶片氮素与土壤有效磷呈显著负相关,与尹杰^[37]对贵州柑橘园土壤养分与叶片养分关系的分析结果一致,但与其关于叶片磷素与土壤速效钾的研究结论相悖,可能因施肥比例差异,改变土壤中养分的有效性及其对叶片吸收的影响;叶片钾素与土壤速效钾呈正相关,与曹胜等^[38]对温州蜜桔的研究结论一致,而与郭宏等^[39]在黄土高原苹果园中研究结论相反,造成这种差异的可能原因是柑橘与苹果在养分需求、土壤条件及管理模式上的差异。因此,可通过适当的控水处理来改变土壤养分分布,进而影响叶片养分的积累。

4 结论

1)转色增糖期中度亏水(Ⅳ-MD1)处理的叶片氮、磷、钾素质量分数分别提升5.27%、2.13%和12.42%,该处理的叶片氮素、磷素、钾素的生长速率及积累量均最大。

2)随着灌水量的减少,超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性均呈先增后减的变化趋势,果实膨大期中度亏水处理(Ⅲ-MD1)可使叶片SOD和POD的活性最大,而过氧化氢(CAT)活性在随灌水量的减少而减小。

3)上、中层土壤硝态氮和有效磷在Ⅲ-MD1控水处理下的积累量最大,上、中层速效钾在Ⅳ-MD1控水处理下的积累量最大,柑橘叶片磷素和钾素均与土壤速效钾呈显著正相关,与土壤硝态氮和有效磷及叶片氮素呈显著负相关。

4)转色增糖期中度亏水(Ⅳ-MD1)处理是最有利于土壤和叶片养分积累及保护酶更好发挥作用的

调亏时期,是鄂西地区柑橘种植较适宜的滴灌节水管理模式。

参考文献:

- [1] 李一春,余海龙,王攀,等.降水量对荒漠草原植物群落多样性和C:N:P生态化学计量特征的影响[J].中国草地学报,2020,42(1):117-126.
LI Y C, YU H L, WANG P, et al. Effects of precipitation on plant community diversity and C:N:P ecological stoichiometry in a desert steppe of Ningxia, northwestern China[J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(1): 117-126.
- [2] 王剑南,崔嵘,池成林,等.增温对蒙古栎林土壤呼吸及组分的影响[J].生态学报,2024,44(22):10367-10376.
WANG J N, CUI R, CHI C L, et al. The effect of experimental warming on soil respiration and its components of *Quercus mongolica* forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22): 10367-10376.
- [3] 郭全恩,郭天文,王益权,等.甘肃省干旱地区苹果叶片营养和土壤养分相关性研究[J].土壤通报,2009,40(1):114-117.
GUO Q E, GUO T W, WANG Y Q, et al. Correlation analysis on apple leaves nutrition and soil nutrient in arid area in Gansu Province [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(1): 114-117.
- [4] 邱权,李吉跃,王军辉,等.柴达木盆地不同居群白刺叶片营养与土壤养分的回归分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(11):121-128.
QIU Q, LI J Y, WANG J H, et al. Regression analysis on leaf and soil nutrients of different *Nitraria tangutorum* populations in Tsaidam Basin [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2014, 42(11): 121-128.
- [5] 赵佐平,同延安.不同施肥处理对富士苹果产量、品质及耐贮性的影响[J].中国农业大学学报,2016,21(4):26-34.
ZHAO Z P, TONG Y A. Effect of different fertilization on apple yield, fruit quality and storage duration of Fuji apple [J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(4): 26-34.
- [6] NADARAJAH K K. ROS homeostasis in abiotic stress tolerance in plants [J]. It J Mol Sei, 2020, 21(15): e5208.
- [7] 王福祥,肖开转,姜身飞,等.干旱胁迫下植物体内活性氧的作用机制[J].科学通报,2019,64(17):1765-1779.
WANG F X, XIAO H X, JIANG S F, et al. Mechanisms of reactive oxygen species in plants under drought stress [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(17): 1765-1779.
- [8] 刘倩,张国壮,李海超,等.土壤水分有效性对梨枣叶片光合参数和抗旱性的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(1):1-6.
LIU Q, ZHANG G Z, LI H C, et al. Effects of soil water availability on leaf photosynthetic and drought-tolerant parameters of pear-jujube tree [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(1): 1-6.
- [9] 周慧敏,李品,高峰,等.臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响[J].环境科学,2018,39(9):4359-4365.
ZHOU H M, LI P, GAO F, et al. Interactive effects of ozone and drought on antioxidant enzyme activities of poplar leaves [J]. Environmental Science, 2018, 39(9): 4359-4365.
- [10] 何凤,刘攀峰,王璐,等.干旱胁迫及复水对杜仲苗生理特性的影响[J].植物生理学报,2021,57(3):661-671.
HE F, LIU P F, WANG L, et al. Effect of drought stress and rewatering on physiological characteristics of *Eucommia ulmoides* seedling [J]. Plant Physiology Journal, 2021, 57(3): 661-671.
- [11] 杨方云,魏朝富,刘英.干旱胁迫下甜橙叶片保护酶体系的变化研究[J].植物营养与肥料学报,2006,12(1):119-124.
YANG F Y, WEI C F, LIU Y. Protective enzyme systems in orange leaves under drought stress [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(1): 119-124.
- [12] 陈丽培,刘瑞霞,杨玉珍,等.干旱胁迫对刺槐、皂荚叶片渗透调节物质含量及保护酶活性的影响[J].河南农业科学,2017,46(10):122-127.
CHEN L P, LIU R X, YANG Y Z, et al. Effects of drought stress on osmotic adjustment substances content and activity of protect enzymes in the leaves of *Robinia pseudoacacia* and *Gleditsia sinensis* [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2017, 46(10): 122-127.
- [13] 汪精云,费良军,李中杰,等.轻度调亏涌泉根灌提高山地苹果产量、品质及水分利用效率[J].排灌机械工程学报,2024,42(8):835-842.
WANG J Y, FEI L J, LI Z J, et al. Light regulated deficit surge-root irrigation improvement of yield, quality and water use efficiency of mountain apple [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42(8): 835-842.
- [14] 彭程,邓林萍,谭禾俊,等.黄金柰李果实品质与土壤和叶片养分的关系[J].中南林业科技大学学报,2022,42(11):27-35.
PENG C, DENG L P, TAN H J, et al. Relationship between fruit quality and nutrients in soil and leaves of *Prunus salicina* var. *cordata* [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2022, 42(11): 27-35.
- [15] 张丽芳,胡海林.土壤酸碱性对植物生长影响的研究进展[J].贵州农业科学,2020,48(8):40-43.
ZHANG L F, HU H L. Research progress on effect of

- soil pH on plant growth [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2020, 48(8):40-43.
- [16] 代希君, 彭杰, 彭云发, 等. 土壤养分对骏枣品质的影响及其光谱预测研究[J]. 塔里木大学学报, 2015, 27(1): 92-96.
DAI X J, PENG J, PENG Y F, et al. The influence of soil nutrients on Junzao quality and spectral prediction research [J]. Journal of Tarim University, 2015, 27(1): 92-96.
- [17] 徐文, 冯雅婷, 朱士江, 等. 水分调控及生物炭对柑橘土壤和叶片养分的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(9):966-972.
XU W, FENG Y T, ZHU S J, et al. Effects of water regulation and biochar on soil and leaf nutrients of citrus [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(9):966-972.
- [18] 唐守正. 多元统计分析方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1986.
TANG S Z. Multivariate statistical analysis method [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1986.
- [19] 孙琛梅, 程冬冬, 杨越超, 等. 土壤肥力质量与苹果生长、产量及品质关系的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2022(2):207-215.
SUN C M, CHENG D D, YANG Y C, et al. Research progress of the relationship between soil fertility quality and the growth, yield and quality of apple [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(2):207-215.
- [20] 杨家军, 余英, 张艳丽, 等. 川南纸浆竹林土壤养分特征及其影响因子[J]. 世界竹藤通讯, 2024, 22(4):15-23.
YANG J J, YU Y, ZHANG Y L, et al. Characteristics of soil nutrients in pulp-producing bamboo forest in South Sichuan and their impact factors [J]. World Bamboo and Rattan, 2024, 22(4):15-23.
- [21] 何振嘉, 范王涛, 杜宜春, 等. 涌泉根灌节水灌溉技术特点、应用及展望[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 287-298.
HE Z J, FAN W T, DU Y C, et al. Characteristics, application and prospects of bubbled-root irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(8):287-298.
- [22] 李天琦, 林志玲, 卢轩, 等. 灌溉量对科尔沁沙地紫花苜蓿土壤速效养分分布及淋失的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(7):1454-1461.
LI T Q, LIN Z L, LU X, et al. Effects of irrigation amount on soil available nutrient distribution and leaching loss of alfalfa in Horqin sandy land [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(7):1454-1461.
- [23] 王虎兵, 曹红霞, 郝舒雪, 等. 温室番茄植株养分和光合对水肥耦合的响应及其与产量关系[J]. 中国农业科学, 2019, 52(10):1761-1771.
WANG H B, CAO H X, HAO S X, et al. Responses of plant nutrient and photosynthesis in greenhouse tomato to water-fertilizer coupling and their relationship with yield [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(10):1761-1771.
- [24] MUSHTAQ R, SHARMA M K, MIR J, et al. Physiological activity, nutritional composition, and gene expression in apple (*Malus domestica* borkh) influenced by different ETc levels of irrigation at distinct development stages [J]. Water, 2021, 13(22):e3208.
- [25] PANIGRAHI P, SHARMA R K, HASAN M, et al. Deficit irrigation scheduling and yield prediction of 'Kinnow' mandarin (*Citrus reticulata* Blanco) in a semi-arid region [J]. Agricultural Water Management, 2014, 140:48-60.
- [26] 梅映学, 魏玮, 张诗婉, 等. 干旱锻炼对盐胁迫下水稻幼苗根系抗氧化酶活性的影响[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(8):1304-1308.
MEI Y X, WEI W, ZHANG S W, et al. Effect of PEG pretreatment on antioxidant enzymes activity under salt stress in root of rice seedling [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2016, 28(8):1304-1308.
- [27] KHAN M I R, ASHFAQUE F, CHHILLAR H, et al. The intricacy of silicon, plant growth regulators and other signaling molecules for abiotic stress tolerance: An entrancing crosstalk between stress alleviators [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 162:36-47.
- [28] 栾金歌. 水肥耦合效应对越橘苗期生长及生理特性的影响[D]. 吉林: 北华大学, 2022.
LUAN J G. Effects of water and fertilizer coupling on growth and physiological characteristics of *Vaccinium corymbosum* seedling [D]. Jilin: Beihua University, 2022.
- [29] 邓胜兴, 曾明, 熊伟, 等. 干旱胁迫对柑橘叶片保护酶系统的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2009, 31(2):61-64.
DENG S X, ZENG M, XIONG W, et al. Effects of drought stress on the antioxidative enzyme system in citrus leaves [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2009, 31(2):61-64.
- [30] 马文涛, 樊卫国. 贵州野生柑橘的抗旱性及其活性氧代谢对干旱胁迫的响应[J]. 果树学报, 2014, 31(3): 394-400.
MA W T, FAN W G. Drought resistance and response of active oxygen metabolism of wild citrus seedlings of Guizhou under drought stress [J]. Journal of Fruit Science, 2014, 31(3):394-400.
- [31] 江珊, 吴龙英, 赵宝生, 等. 植物耐受高温胁迫的分子机制研究进展[J]. 中国农学通报, 2024, 40(9):132-138.
JIANG S, WU L Y, ZHAO B S, et al. Molecular mechanism of heat stress tolerance in plants: A review [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(9):132-138.

- [32] 漆栋良, 朱建强. 旱涝急转对玉米叶片衰老特性和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(5): 141-147.
QI D L, ZHU J Q. Effects of drought-flood abrupt alternation on the characteristics of leaf senescence and grain yield of maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(5): 141-147.
- [33] 杨生权. 土壤和叶片养分状况对柑橘产量和品质的影响: 以重庆忠县柑橘园为例[D]. 重庆: 西南大学, 2008.
YANG S Q. Studies on the influence of soil and leaf nutrient on citrus fruit's output and quality: Taking citrus orchards in Zhongxian County of Chongqing as an example[D]. Chongqing: Southwest University, 2008.
- [34] 刘东海, 乔艳, 谢和平, 等. 夷陵区柑橘园土壤和叶片养分状况研究[J]. 中国土壤与肥料, 2020(5): 237-242.
LIU D H, QIAO Y, XIE H P, et al. Study on nutrient status of citrus orchard soils and leaves in Yiling[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(5): 237-242.
- [35] 张朝坤, 洪雅芳, 肖靖, 等. 番石榴生殖生长期土壤和叶片氮磷钾含量变化特征[J]. 南方农业学报, 2022, 53(5): 1245-1252.
ZHANG C K, HONG Y F, XIAO J, et al. Variation characteristics of the contents of nitrogen, phosphorus and potassium in the soil and leaves of *Psidium guajava* L. during the reproductive growth period[J]. Journal of Southern Agriculture, 2022, 53(5): 1245-1252.
- [36] 孙寅虎, 张光勇, 杜浩, 等. 云南省菠萝蜜主要种植园土壤与叶片养分现状分析[J]. 中国土壤与肥料, 2023(7): 174-181.
SUN Y H, ZHANG G Y, DU H, et al. Analysis of soil and leaf nutrients in jackfruit plantations in Yunnan province[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(7): 174-181.
- [37] 尹杰. 贵州柑橘园土壤与树体养分状况及其评价[D]. 贵阳: 贵州大学, 2007.
YIN J. Nutrient status and evaluation of soil and trees in Guizhou citrus orchard[J]. Guiyang: Guizhou University, 2007.
- [38] 曹胜, 欧阳梦云, 周卫军, 等. 湖南省柑橘园土壤营养状况及其对叶片养分的影响[J]. 土壤, 2019, 51(4): 665-671.
CAO S, OUYANG M Y, ZHOU W J, et al. Soil nutrient status of citrus orchard and its effects on nutrients in citrus leaf in Hunan Province[J]. Soils, 2019, 51(4): 665-671.
- [39] 郭宏, 杜毅飞, 王海涛, 等. 黄土高原苹果园土壤和叶片养分状况分析: 以陕西省黄陵县为例[J]. 土壤, 2015, 47(4): 682-689.
GUO H, DU Y F, WANG H T, et al. Analysis of soil and leaf nutrients in apple orchards in the Loess Plateau: A case study of Huangling County, Shaanxi Province[J]. Soils, 2015, 47(4): 682-689.