

根域靶向灌溉对南太湖特早葡萄根系解剖结构及土壤水肥运移的调控效应

刘虹君¹, 薛晓斌², 周 鱼¹, 宁 琳¹, 刘 杰¹, 李栋梅^{1*}, 王振平^{1,2*}

(¹宁夏大学葡萄酒与园艺学院, 银川 750021; ²宁夏大学生命科学学院, 银川 750021)

摘要:【目的】探究根域靶向灌溉(root-zone targeting irrigation, RTI)对葡萄根系构型及土壤水肥运移的影响。【方法】以2年生南太湖特早葡萄树为试验材料, 设置4个处理: 常规滴灌(drip irrigation, DI)、100% RTI、75% RTI和50% RTI, 分析其对根系活力、解剖结构及不同土层(0~60 cm)水分迁移和土壤碱解氮、有效磷、速效钾、有机质含量的影响。【结果】(1)水分运动规律结果显示, RTI处理通过将水分直接输送到葡萄根系分布区域, 使深层土壤的水分分布优于DI处理。(2)在144 DAP, 100% RTI处理的根系活力显著高于DI处理, 是DI处理的1.23倍;(3)在144 DAP, 75% RTI和50% RTI处理的导管密度分别比DI处理高25%和100%, 而导管平均直径则呈相反趋势, 分别比DI处理低19%和97%;(4)DI处理导致0~20 cm表层土壤养分显著富集, 其碱解氮、有效磷、速效钾及有机质含量为RTI处理的1.54~3.10倍, 但深层(30~60 cm)土壤养分整体低于RTI处理。RTI处理通过定向水分输送驱动养分向根系密集分布区迁移, 其中100% RTI处理下20~60 cm土层碱解氮、有效磷、速效钾及有机质含量较DI处理高1.19~1.34倍, 75% RTI处理下20~60 cm土层养分含量与DI处理结果较为接近。【结论】RTI处理通过优化根系导管结构与深层土壤养分分布, “表层减耗、深层增储”的模式可减少水分蒸发与径流导致的养分损失, 增强植株抗旱能力并提高水分利用效率, 为干旱区葡萄精准灌溉技术提供了理论依据。

关键词: 南太湖特早葡萄; 根域靶向灌溉; 根系; 土壤水肥

中图分类号: S663.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2026)02-0294-15

Regulatory effects of root-zone targeting irrigation on root anatomy and soil water and fertilizer transport in Nantaihutezao grapes

LIU Hongjun¹, XUE Xiaobin², ZHOU Yu¹, NING Lin¹, LIU Jie¹, LI Dongmei^{1*}, WANG Zhenping^{1,2*}

(¹College of Wine and Horticulture, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; ²College of Life Sciences, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: 【Objective】 Grape, as an important cash crop widely cultivated in the world, is not only the core raw material for winemaking and the fresh food industry, but also one of the key pillars of China's agricultural industrial structure upgrading and rural revitalization strategy. Northwest China has become a core production area for high-quality grapes by virtue of its unique climatic conditions, with abundant light, significant temperature differences between day and night, and dry air. However, the frequent occurrence of extreme drought events in the region and the extremely serious problem of water shortage have exacerbated the contradiction between water supply and demand in grape growing. In order to efficiently utilize water resources, many different irrigation methods have emerged, and the main irrigation methods currently used for crops are diffuse, furrow, sprinkler, drip and seepage irrigation. Different irrigation methods have a great impact on viticulture. For this reason, it is important to study the effects of different irrigation methods on grapevines under different irrigation levels to provide theoretical support

收稿日期: 2025-06-27 接受日期: 2025-07-25

基金项目: 宁夏重点研发(引才专项)(2023BSB03032); 国家自然科学基金项目(U20A2042); 国家葡萄产业技术体系(CARS-29-zp-3)

作者简介: 刘虹君, 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为水分生理与节水栽培。E-mail: 18723583968@163.com

*通信作者 Author for correspondence. E-mail: ldm2022068@nxu.edu.cn; E-mail: dr.wangzhp@163.com

for viticulture and water-saving irrigation models in the arid regions of Northwest China. **【Methods】** Two-year old Nantaihutezao grapes were used as experimental materials, four treatments were set up, namely, conventional drip irrigation (DI) (30 min, 3.6 L), 100% RTI (30 min, 3.6 L), 75% RTI (22.5 min, 2.7 L), and 50% RTI (15 min, 1.8 L), to study the water movement pattern, root vigor, root anatomy, and soil alkaline nitrogen, effective phosphorus, quick phosphorus, and soil water content of the soil in different soil layers (0–60 cm) of the different irrigation treatments. The effects of different irrigation treatments on water movement, root vigor, root anatomical structure and soil content of different soil layers (0–60 cm) were investigated. **【Results】** (1) The results of water movement pattern showed that under DI treatment, water was mainly concentrated in the soil surface layer (0–20 cm), while the RTI treatment led to better distribution of soil moisture content in the deeper layer than DI by directly transporting water to the distribution area of grapevine root system (near the soil layer of 20 cm), and then rapidly infiltrating downward with the water. (2) The results of root vigor showed that the root vigor under different irrigation treatments was significantly different. There was a significant difference, in which the root vigor under 100% RTI was significantly higher than that of DI, which was 1.23 times higher than that of DI; the root vigor under 75% RTI was much similar to the results of DI. (3) The results on root anatomical structure showed that the root xylem conduit density and conduit diameter produced significant changes under different irrigation treatments, in which the conduit density under 75% RTI and 50% RTI was 25% and 100% higher than that of DI, respectively, while the average conduit diameter showed the opposite trend, with the mean conduit diameters under 75% RTI and 50% RTI being 19% and 97% lower than that of DI, respectively; (4) The results on soil nutrients showed that there were significant differences in the vertical distribution of soil nutrients under different irrigation treatments. The DI treatment resulted in significant enrichment of nutrients in the 0–20 cm surface layer of the soil, where alkaline dissolved nitrogen, effective phosphorus, quick potassium, and organic matter contents were 1.54–3.10 times higher than those of the RTI treatment, but the deeper layers (30–60 cm) had lower nutrient contents than those of the RTI treatment as a whole. The RTI drove nutrients through directional water transport, and the RTI drove the nutrients to the intensive root distribution area (20–40 cm) through directional water transport, in which the contents of alkaline dissolved nitrogen, effective phosphorus, quick-acting potassium and organic matter in the 20–60 cm soil layer under the 100% RTI treatment were 1.19–1.34 times higher than those in the DI treatment, and the contents of alkaline dissolved nitrogen, effective phosphorus and organic matter in the 20–60 cm soil layer under the 75% RTI treatment were much similar to those in the DI treatment. **【Conclusion】** The RTI improved the plant water and fertilizer utilization by changing the water movement pattern, affecting root vigor, optimizing root conduit structure and improving the vertical distribution of nutrients in the deep soil layer, and the mode of “reducing depletion in the surface layer and increasing storage in the deep layer” of RTI reduced the loss of nutrients caused by evaporation and runoff, and strengthened the drought-resistant ability of the plant and improved water utilization efficiency. The RTI model of “surface reduction and deep storage” could reduce the nutrient loss caused by evaporation and runoff, enhance the drought resistance of plants and improve the water utilization efficiency, which would provide a theoretical basis for the precision irrigation technology of grapevine in arid areas.

Key words: Nantaihutezao grape; Root-zone targeting irrigation; Root system; Soil water and fertilizer

葡萄 (*Vitis vinifera* L.) 作为全球广泛栽培的重要经济作物, 不仅是酿酒与鲜食产业的核心原料, 也

是中国农业产业结构升级和乡村振兴战略的关键支柱之一^[1]。中国西北地区凭借光照充足、昼夜温差

大、气候干燥等独特的气候条件,成为优质葡萄的核心产区。其中,宁夏回族自治区作为中国重要的酿酒葡萄生产基地,种植面积逐年扩大,其“贺兰山东麓”产区更是被国际葡萄酒界誉为最具潜力的优质产区之一^[2]。然而,该地区处于温带大陆性气候带,年降水量不足200 mm,蒸发量却超过2000 mm,水资源短缺问题极为严峻^[3]。在全球气候变化背景下,极端干旱事件频发,进一步加剧了葡萄种植的水分供需矛盾。如何通过技术创新实现水资源的高效利用,同时维持土壤养分平衡,已成为西北干旱区葡萄产业可持续发展的核心挑战^[4-5]。

为了高效利用水资源,涌现出许多不同的灌溉方式。目前,作物上的灌溉方式主要有漫灌、沟灌、喷灌、滴灌和渗灌等,不同灌溉方式对作物根系及土壤养分分布具有显著影响。连续灌溉比间歇灌溉产生的根系分布更匀称,能维持更稳定的土壤水热环境,促进了0~60 cm土层的根系生长,这对提高产量意义重大^[6]。滴灌处理导致枣树根系向表层土壤聚集且总生物量减少,利于吸收表层土壤水分^[7]。在土壤水分运动模拟中,表面滴灌促进移栽棉花浅层根系发育,而畦灌则利于深层根系扩展^[8]。0~60 cm土层,滴灌的根系吸水率和根长密度较高;60 cm以下的土层,漫灌的根系吸水率和根长密度较高^[9]。在酿酒葡萄上的研究表明,适度调亏灌溉可提高根系活力,而过度亏缺则会导致根系功能受损^[10]。玉米苗期水分胁迫虽抑制主根伸长,但诱导根毛密度增加及根尖多糖物质积累,从而增强了根系的水分吸收能力^[11]。浅埋滴灌条件下,玉米根系呈现表层化分布,适当增加灌溉定额可提高根系数量与抗氧化酶活性^[12]。对冬种马铃薯的研究发现,膜下滴灌使0~20 cm土层碱解氮含量较漫灌处理提高34.2%,有效磷含量增加28.7%,这种表层土壤养分的富集效应直接促进了马铃薯块茎产量的显著提升^[13]。传统的地面灌溉和土壤施肥相比,在地下滴灌条件下施用肥料可使系统生产率提高5.4%,灌溉水生产率提高120%,净收益提高13%^[14]。干旱区耕地研究揭示,滴灌处理使耕层铵态氮含量较漫灌提高27.3%,表层土壤速效磷浓度可达根层的1.8倍,这种养分分布模式与水分运动密切相关^[15]。灌溉施肥试验表明,高频灌水配合调理剂的使用,可使0~20 cm土层有机质含量提升18.6%,同时减少23.4%的硝态氮淋失,水肥协同管理策略通过改善土壤持水性实现

养分的高效利用^[16]。地下灌溉系统的研究表明,其氮素利用率较传统喷灌提高23.4%,而淋溶液总氮浓度降低41.7%,这种差异主要源于地下灌溉减少的水分垂直渗漏^[17]。在水肥一体化研究中,地下滴灌施肥条件下,铵态氮和硝态氮可迁移至100 cm以下土层,这种深层渗漏特性需结合作物需肥规律进行精准调控^[18]。

现有的灌溉方式有明显的优缺点,漫灌、沟灌和喷灌设备简单投入成本较低,但水分利用率太低,容易导致土壤盐碱化和养分流失;滴灌提高了水分利用率,但存在杂草滋生和病虫害等问题;渗灌通过减少蒸发量来提高水分利用率,然而渗灌设备成本高、易堵塞及埋管不当易对根系造成机械性伤害。针对以上问题,笔者课题组提出一种新型精准灌溉技术——根域靶向灌溉(*root-zone targeting irrigation, RTI*)。该技术通过定向调控将水分输送至根系主要分布区。RTI具有多重优势:减少表层土壤水分含量,避免杂草滋生,改善果际的微气候,提高水分利用效率;引导根系深层生长,促进深层根系的发育,增强植株抗逆性;通过水分定向运动,带动养分向深层土壤迁移,可减少土壤养分表层富集,优化土壤养分的空间分布。笔者以南太湖特早葡萄为材料,通过对比常规滴灌与不同梯度RTI处理,解析不同灌溉处理下水分运动规律及其对根系活力、解剖结构和土壤养分垂直分布的影响,筛选适合西北干旱区的优化灌溉方案,也为其他旱区作物的精准灌溉技术设计提供参考,助力农业水资源的可持续利用。

1 材料和方法

1.1 试验材料及处理

本试验在国家葡萄产业技术体系水分生理与节水栽培岗位(CARS-29-zp-3)基地(东经106°01'44",北纬38°14'17",海拔1143 m)开展。以2年生的南太湖特早葡萄树为试材,定植于长宽高为30 cm×30 cm×60 cm的亚克力容器,并放置于四条长13 m、深60 cm的沟壑中。该容器内土壤类型为风沙土,每条沟壑各放置21个亚克力容器,每个容器间隔30 cm。安装常规滴灌(*drip irrigation, DI*)和RTI两个灌溉系统(图1),两种灌溉方式的流速均为0.12 L·min⁻¹。试验设置4个处理,分别为DI(30 min, 3.6 L)、100% RTI(30 min, 3.6 L)、75% RTI(22.5 min, 2.7 L)和

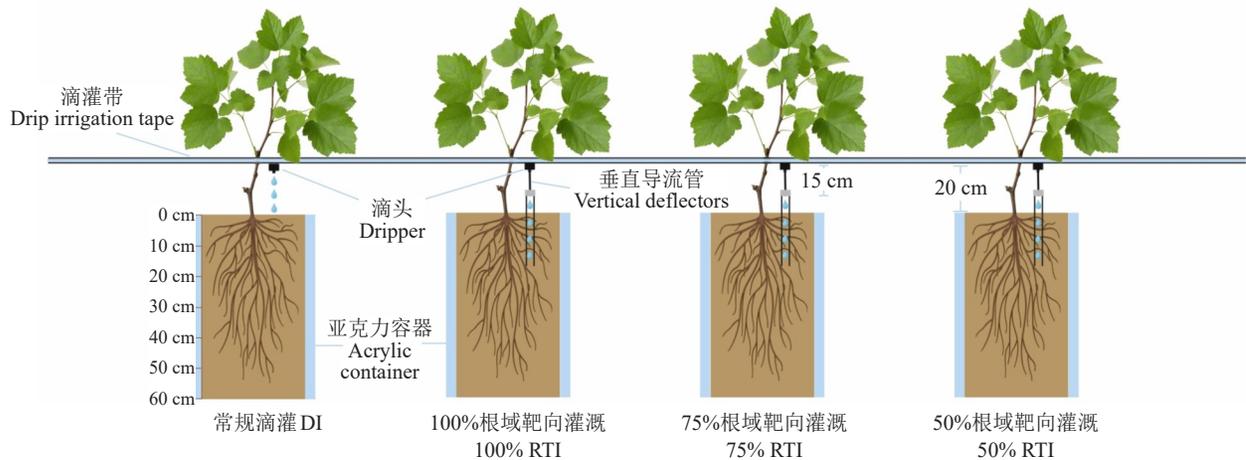


图1 灌溉方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of irrigation methods

50% RTI(15 min, 1.8 L),以DI处理为对照。试验全程使用两种灌溉方式进行灌溉,当DI处理的0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm三个土层含水量分别低于4%、8%、9%时进行灌溉,整个试验过程的灌水制度见表1。定植后,每隔30 d浇灌一次相同浓度的Hoagland营养液,每个处理的营养液施用量与灌水量的比例一致。

表1 灌溉制度

Table 1 Irrigation systems

处理 Treatment	灌溉时间 Irrigation time/min	灌水量 Irrigation amount/ (L·time ⁻¹)	灌水总量 Total amount of irrigation/ (L·plant ⁻¹)
滴灌DI	30.0	3.6	43.2
100%根域靶向灌溉 100% RTI	30.0	3.6	43.2
75%根域靶向灌溉 75% RTI	22.5	2.7	32.4
50%根域靶向灌溉 50% RTI	15.0	1.8	21.6

试验材料于2024年5月7日定植,每株葡萄树保留3~4个新梢,以竹竿为支撑物,副梢留1~2枚叶摘心,且于定植后69、84、99、114、129、144 d采集DI和RTI处理的植株根系和土壤样品,每个处理3次重复,分别在3个容器内取样。根系样品选取生长均一、无病虫害的植株,精细挖掘后用清水冲洗表面附着物,吸水纸吸干表面水分后分装,用于根系活力测定和根系解剖结构拍摄。使用取土器采集不同土层(0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm、50~60 cm)的土壤样品,经自然风干后,过

2 mm筛以备用。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 土壤含水量 采用烘干法测定土壤含水量^[19]。将新鲜土壤样品装入铝盒中,放入105 °C的烘箱中烘干至恒质量,然后根据公式计算土壤含水量:水分含量/%=($m_1 - m_2$)/($m_1 - m_0$)×100,其中 m_0 为铝盒质量, m_1 为铝盒与湿土总质量, m_2 为铝盒与干土总质量。

1.2.2 根系活力 根系活力使用北京索莱宝科技有限公司植物根系活力检测试剂盒测定。从每个处理植株中选取须根,依次用自来水和蒸馏水冲洗干净后,用滤纸吸干根系表面多余水分,将其剪切成3 mm长的根段,称取0.1 g放入10 mL离心管中备用。操作步骤参照试剂盒测定方法。

1.2.3 根系解剖结构 选取生长状态一致、无病虫害的植株根系样品,清洗干净后经过固定、脱水、切片、染色等处理^[20-22],利用光学显微镜Olympus BX43进行详细观察。利用图像分析软件CellSens Entry对根系木质部导管数量及直径进行精确测量,以分析根系解剖结构的变化。

1.2.4 土壤养分测定 采用重铬酸钾容量法-外加热法测定土壤有机质含量^[23];采用碱解扩散法测定碱解氮含量^[23];采用火焰光度法测定速效钾含量^[23];采用钼锑抗比色法测定有效磷含量^[24]。

1.2.5 评价方法 采用客观熵权法确定各指标的权重。利用权重分析法对各处理的多项指标进行综合评价。其中综合得分越高,表明其综合质量越好。

1.2.6 数据分析 试验数据采用Excel软件进行整

理,采用 SPSS 软件进行差异显著性分析,利用 GraphPad Prism 或其他可视化软件作图。

2 结果与分析

2.1 土壤水分时空变化规律

图2展示了DI、100% RTI、75% RTI和50% RTI不同灌溉处理下7月、8月的水分运动情况。结果表明,DI处理下水分主要集中在土壤表层(0~20 cm),随着天数增加表层水分含量明显减少。而RTI处理显著改变了这一模式,其通过将水分直接输送到葡萄根系分布区域(20 cm土层附近),水分迅速向下渗透,使得深层土壤水分含量高于DI处理。100% RTI、75% RTI和50% RTI处理下的水分分布存在明显差异,100% RTI处理下的水分先运动至深层土壤,且表层的水分含量高于75% RTI和50% RTI处理,50% RTI处理下的深层土壤水分分布没有100% RTI和75% RTI处理密集。7月和8月土壤水分运动规律整体一致,然而在8月,DI处理下表层土壤以及

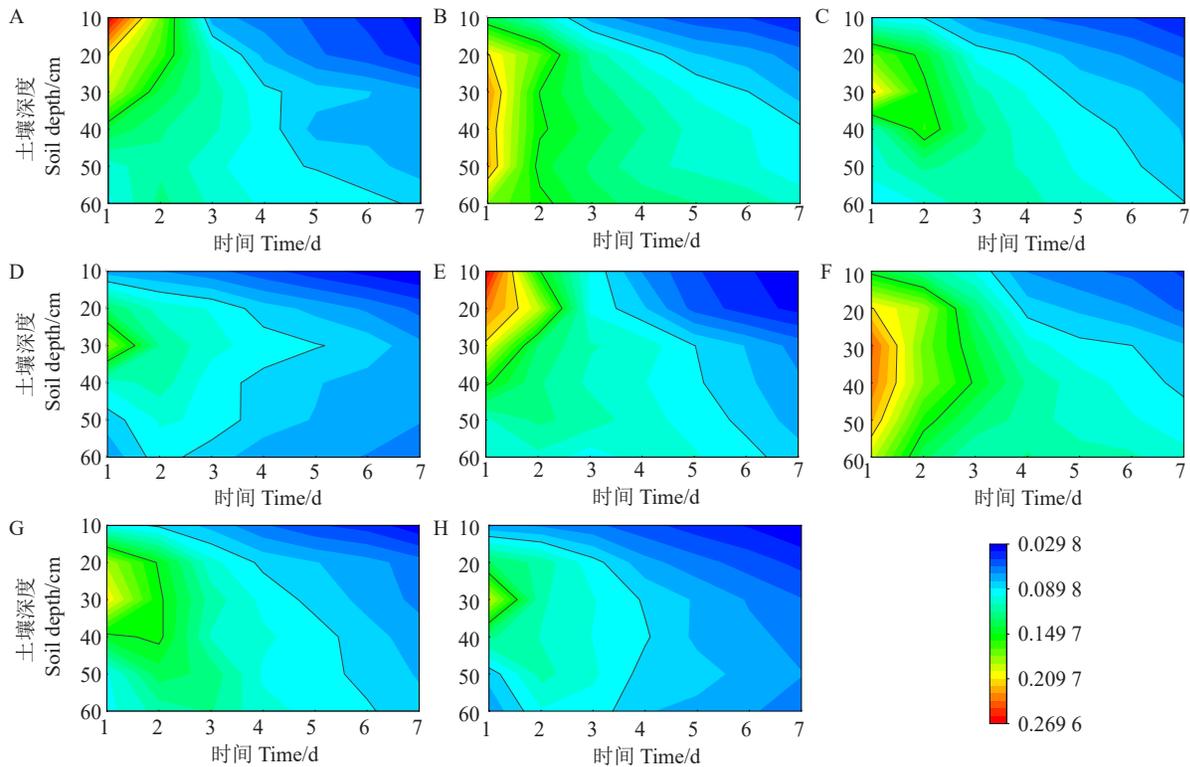
100% RTI、75% RTI和50% RTI处理下深层土壤的水分含量降低速率分别加快了24.39%、22.44%、22.74%和19.67%。

2.2 不同灌溉方式下的根系活力变化

如图3所示,在整个试验周期内,各处理组的根系活力均呈现下降趋势。整个试验周期内,100% RTI处理的根系活力显著高于DI处理,为DI处理的1.04~1.23倍;50% RTI处理的根系活力在整个试验周期内显著低于DI处理,为DI处理的52%~87%。然而,75% RTI处理下的根系活力与DI处理较为相似。在定植后144 d,100% RTI的根系活力为DI的1.23倍。随着灌水量的减少,根系活力呈降低趋势。

2.3 不同灌溉方式下的根系木质部导管变化

由图4和图5可知,与DI处理相比,RTI处理下的根系木质部导管密度和平均直径存在显著变化。在整个试验过程中,除50% RTI处理外,其他各处理的根系木质部导管密度均呈先上升后下降的趋势。在定植后144 d,与DI处理相比,50% RTI处理的根

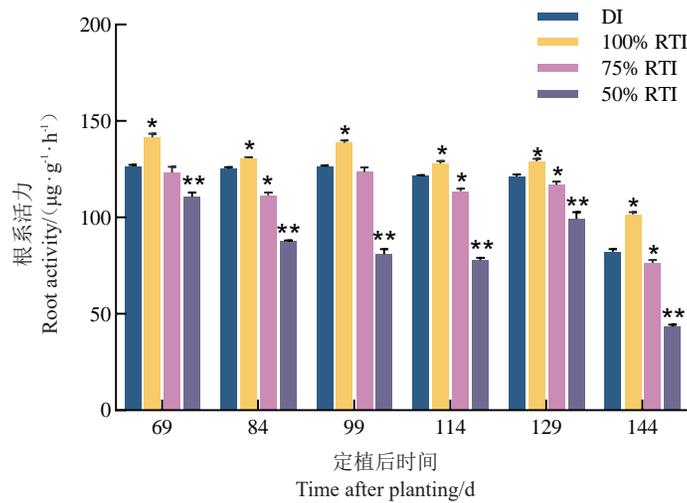


图例为土壤含水量范围,0.029 8~0.269 6 代表土壤含水量为 2.98%~26.96%。A~D. 7 月 DI、100% RTI、75% RTI 和 50% RTI 处理下的水分运动规律;E~H. 8 月 DI、100% RTI、75% RTI 和 50% RTI 处理下的水分运动规律。

The legend shows the soil moisture content range, 0.029 8~0.269 6 represents the soil moisture content of 2.98%~26.96%. A-D. Water movement patterns of DI, 100% RTI, 75% RTI, and 50% RTI treatments under July; E-H. Water movement patterns of DI, 100% RTI, 75% RTI, and 50% RTI treatments under August.

图2 土壤水分时空变化规律

Fig. 2 Spatio-temporal patterns of soil moisture



*表示与 DI 处理存在显著差异($P<0.05$),**表示与 DI 处理存在极显著差异($P<0.01$)。下同。

* indicates significant difference from DI treatment ($P<0.05$), ** indicates highly significant difference from DI treatment ($P<0.01$). The same below.

图3 不同灌溉方式的根系活力

Fig. 3 Root activity with different irrigation methods

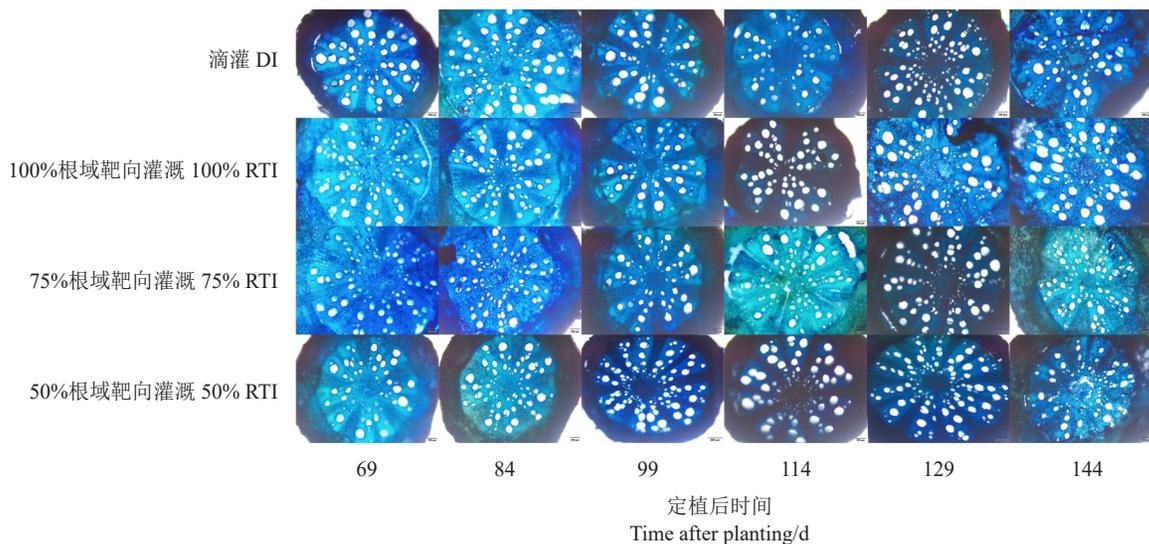


图4 不同灌溉方式下根系解剖结构差异

Fig. 4 Differences of Root anatomy under different irrigation methods

系木质部导管密度迅速增加,75% RTI 和 50% RTI 处理的木质部导管密度分别增加 25%和 100%。对于木质部导管直径而言,在定植后 69、84 d,DI 和 100% RTI 处理的根系木质部导管平均直径呈上升趋势,后期呈相对平稳状态。在整个试验阶段,50% RTI 处理的根系木质部导管平均直径呈下降趋势,75% RTI 和 50% RTI 处理的根系木质部导管平均直径比 DI 处理显著降低 12%~97%,在定植后 144 d,与 DI 相比,75% RTI 和 50% RTI 处理的木质部导管直径分别降低了 19%和 97%。因此,灌水量的差异显著影响根系导管密度和平均直径。

2.4 不同灌溉方式下土壤碱解氮含量的变化

如图 6 所示,在 0~10 cm 土层,DI 处理的土壤碱解氮含量显著高于其他处理,在定植后 144 d,DI 处理为 100% RTI、75% RTI 和 50% RTI 处理的 1.51、2.34 和 2.67 倍;在 10~20 cm 土层,土壤碱解氮含量以 DI 处理最高,在定植后 144 d,DI 处理的土壤碱解氮含量分别为 100% RTI、75% RTI 和 50% RTI 处理的 1.34、1.38 和 1.66 倍;在 20~30 cm 土层,各处理土壤碱解氮含量呈波动上升趋势,在定植后 144 d,75% RTI 和 50% RTI 处理的土壤碱解氮含量分别为 DI 处理的 87%和 67%;在 30~40、40~50、50~60 cm 土

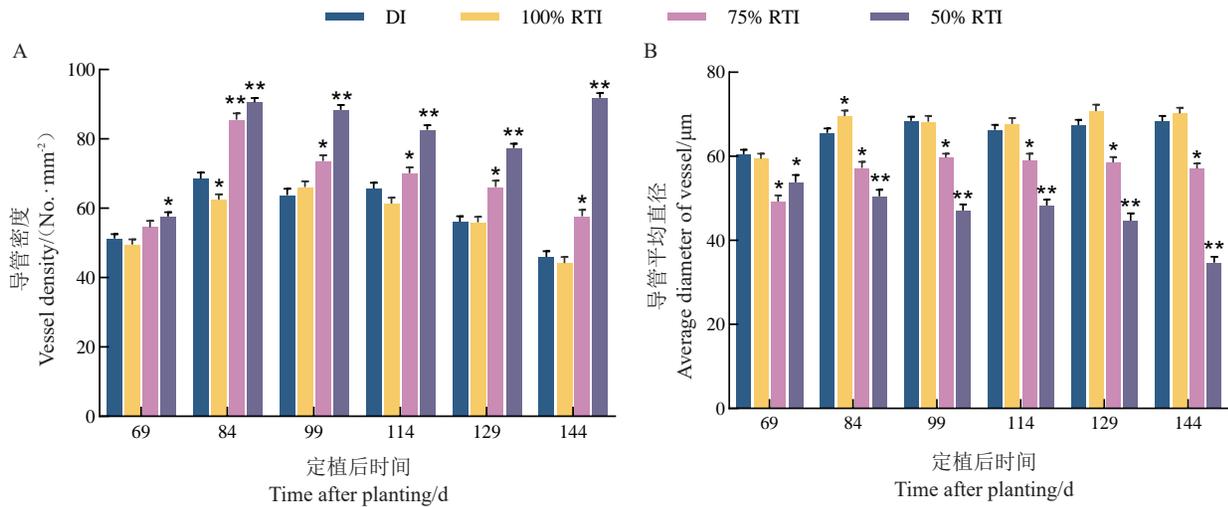


图 5 不同灌溉方式对根系导管密度和平均直径的影响

Fig. 5 Effects of different irrigation methods on the density and mean diameter of root vessel

层,100% RTI处理的土壤碱解氮含量显著高于DI处理,在定植后144 d,分别为DI处理的1.19、1.25和1.27倍;50% RTI处理下的土壤碱解氮含量显著低于DI处理,在定植后144 d,分别为DI处理的74%、84%和87%。因此,20 cm以下土层中RTI处理的碱解氮含量较DI处理更高。

2.5 不同灌溉方式下土壤有效磷含量的变化

如图7所示,在0~10 cm土层,DI处理的土壤有效磷含量显著高于其他处理,在定植后144 d,DI处理的土壤有效磷含量分别为100% RTI、75% RTI和50% RTI处理的2.3、2.12和3.08倍;在10~20 cm土层,DI处理的土壤有效磷含量最高,在定植后144 d,分别为100% RTI、75% RTI和50% RTI处理的1.26、1.26和1.64倍;在20~30 cm土层,100% RTI、75% RTI和50% RTI处理的土壤有效磷含量显著高于DI处理,在定植后144 d,分别为DI处理的1.84、1.51和1.29倍;在30~40 cm土层,100% RTI和75% RTI处理的土壤有效磷含量显著高于DI处理,在定植后144 d,分别为DI处理的1.22和1.18倍;在40~50 cm土层,100% RTI和50% RTI处理的土壤有效磷含量和DI处理存在显著差异,在定植后144 d,分别为DI处理的1.17倍和92%;在50~60 cm土层,50% RTI处理的土壤有效磷含量显著低于DI处理,为DI处理的81%。因此,20 cm以下土层100% RTI与75% RTI处理的有效磷含量优势突出。

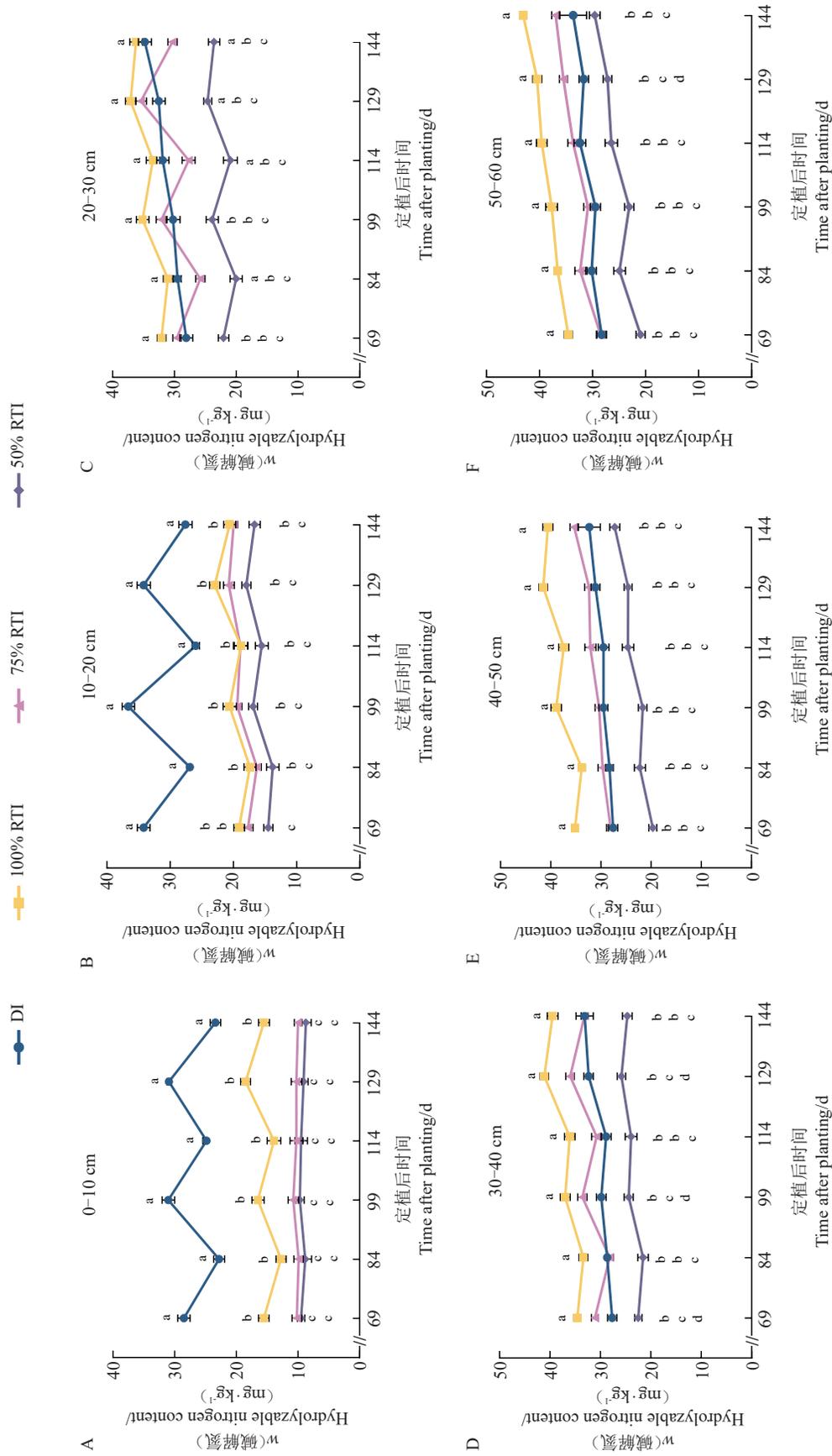
2.6 不同灌溉方式下土壤速效钾含量的变化

如图8所示,在0~10 cm土层,DI处理的土壤速

效钾含量显著高于其他处理,在定植后144 d,分别为100% RTI、75% RTI和50% RTI处理的1.32、1.46和1.50倍;在10~20 cm土层,DI处理的土壤速效钾含量显著高于其他处理,在定植后144 d,分别为100% RTI、75% RTI和50% RTI处理的1.30、1.22和1.54倍;在20~30 cm土层,100% RTI、75% RTI和DI处理的土壤速效钾含量接近,50% RTI处理的土壤速效钾含量显著低于DI处理,在定植后144 d,为DI处理的75%;在30~40 cm土层,50% RTI处理的土壤速效钾含量显著低于DI处理,在定植后144 d,为DI处理的63%,其他处理无显著差异;在40~50 cm土层,50% RTI处理的土壤速效钾含量显著低于DI处理,在定植后144 d,为DI处理的81%;在50~60 cm土层,100% RTI与50% RTI处理的土壤速效钾含量存在显著差异,在定植后144 d,分别为DI处理的1.15倍和78%。因此,RTI处理下土壤速效钾含量在深层土层明显增加。

2.7 不同灌溉方式下土壤有机质含量的变化

如图9所示,在0~10 cm土层,DI的土壤有机质含量显著高于其他处理,在定植后144 d,为100% RTI、75% RTI和50% RTI的1.78、2.31和2.01倍;在10~20 cm土层,DI的土壤有机质含量显著高于其他处理,在定植后144 d,为100% RTI、75% RTI和50% RTI的1.27、1.44和1.53倍;在20~30 cm土层,100% RTI的土壤有机质含量显著高于DI,在定植后144 d,为DI的1.23倍;在30~40 cm土层,100% RTI和75% RTI的土壤有机质含量显著高于DI,在定植



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。
 Different small letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

图6 不同土层土壤碱解氮含量
 Fig. 6 Soil alkaline dissolved nitrogen content in different soil horizons

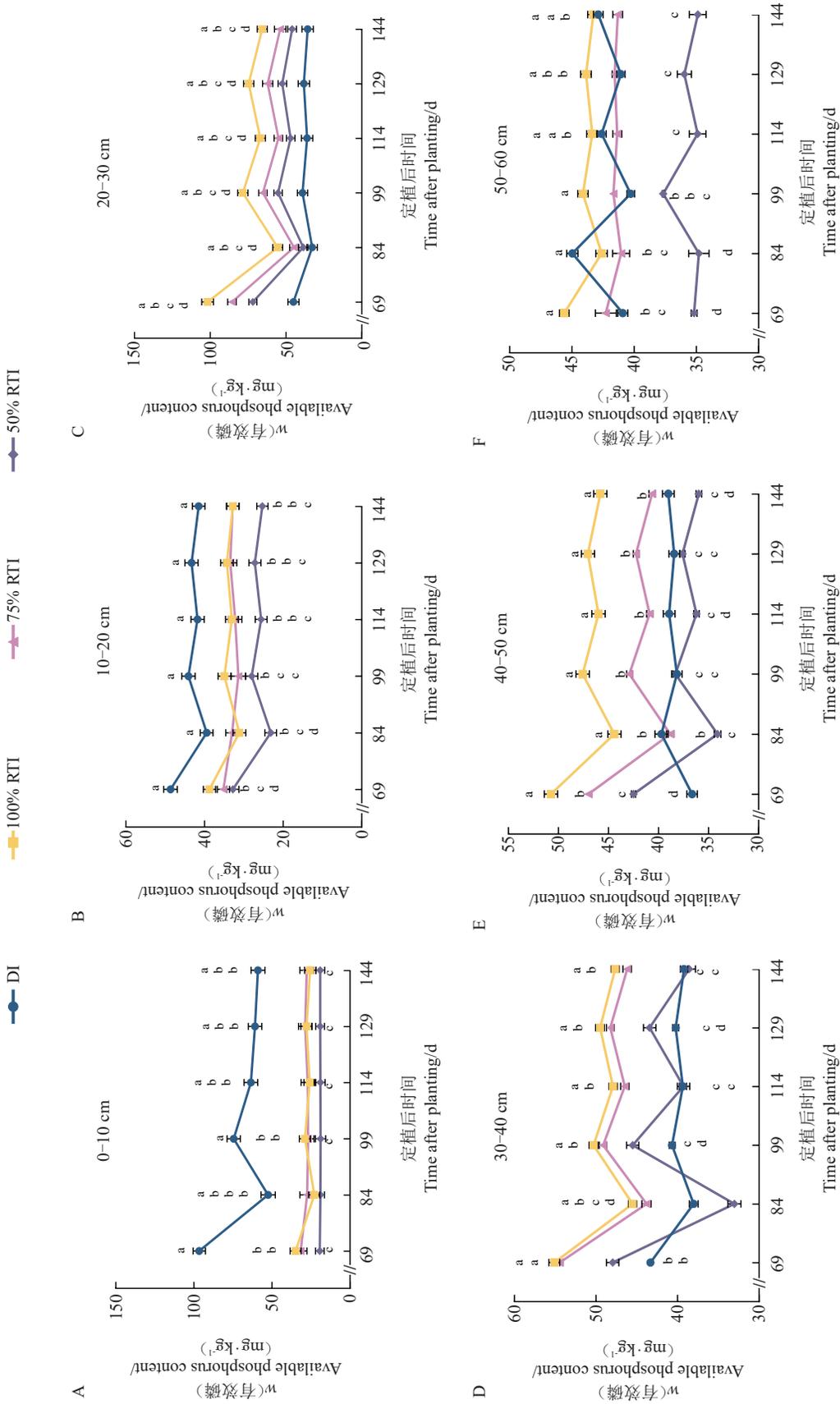


图 7 不同土层土壤有效磷含量
Fig. 7 Available phosphorus content of soil in different soil layers

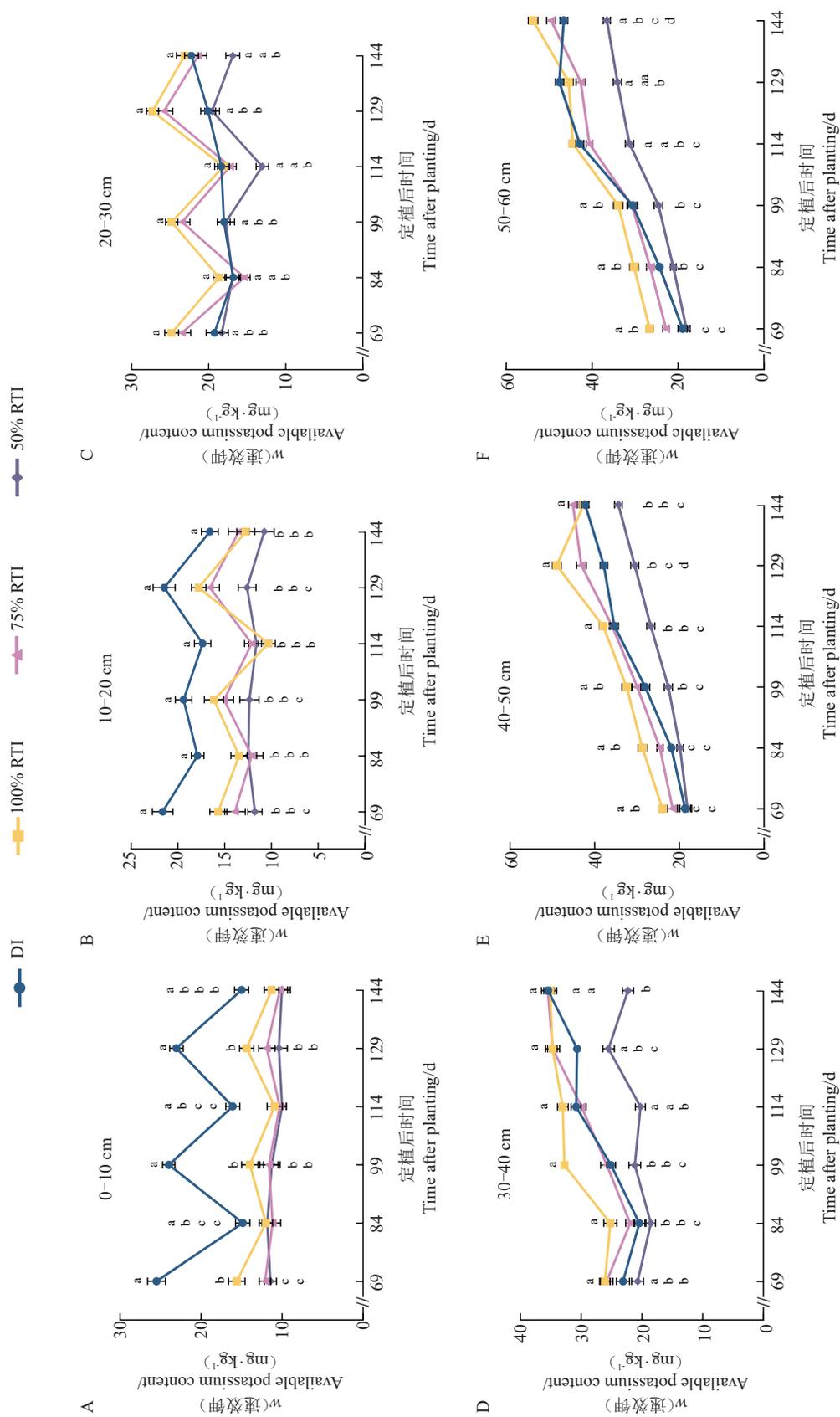


图8 不同土层土壤速效钾含量
Fig. 8 Soil available potassium content in different soil layers

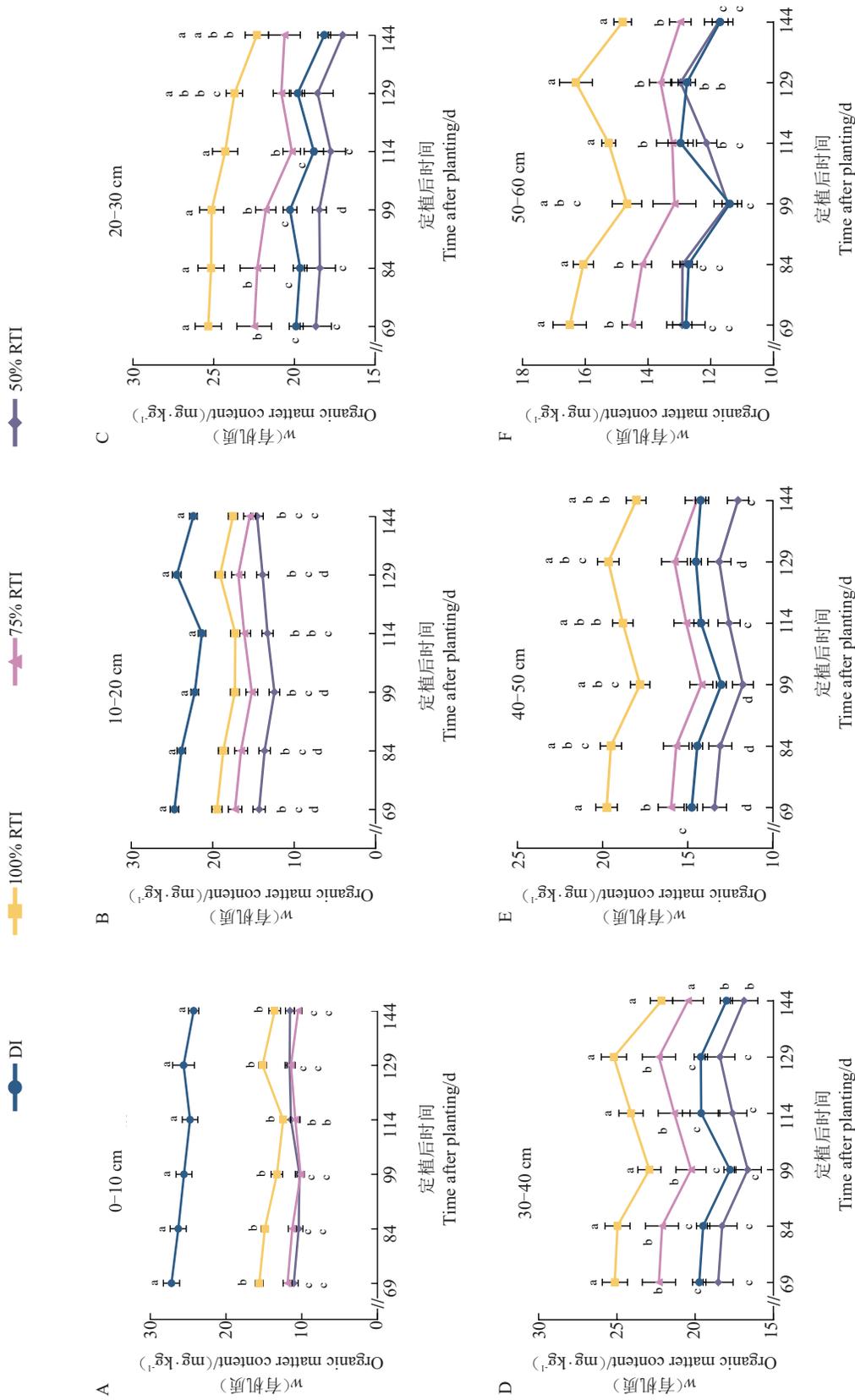


图 9 不同土层土壤有机质含量
Fig. 9 Soil organic matter content in different soil layers

后 144 d, 为 DI 的 1.23 和 1.13 倍; 在 40~50 cm 土层, 100% RTI 和 50% RTI 的土壤有机质含量与 DI 有显著差异, 在定植后 144 d, 为 DI 的 1.26 倍和 84%; 在 50~60 cm 土层, 100% RTI 和 75% RTI 的土壤有机质含量与 DI 有显著差异, 为 DI 的 1.26 和 1.11 倍。因此, 20 cm 以下土层 100% RTI 与 75% RTI 处理含量更高。

2.8 多指标权重分析

不同灌溉处理对南太湖特早葡萄根系和土壤各项指标的影响不同, 各项指标对不同灌溉处理的贡献也不相同。为选择出最有利于干旱地区葡萄的灌溉方式, 采用客观熵权法对根系活力、根系导管密度、根系导管平均直径以及 20~60 cm 的土壤养分指标进行综合评价。运用客观熵权法对 7 个相关指标进行赋权。先将原始数据矩阵进行消除量纲的归一

化处理, 计算各指标熵权值, 得到各项指标的权重。由表 2 可知, 根系导管密度指标权重占比最大, 为 0.242 5; 土壤有效磷含量指标权重次之, 为 0.211 1。

根据各指标的熵权值计算 DI、100% RTI、75% RTI 和 50% RTI 处理的综合得分, 对各处理进行综合评价, 筛选出最优的灌溉处理。各指标均为正向指标, 对不同指标的原始数据进行统一标准化处理, 消除量纲影响。基于标准化结果和熵权值得到各处理的综合得分。由表 3 可知, DI、100% RTI、75% RTI 和 50% RTI 处理的综合得分为 34.43、75.74、53.62 和 24.26。其中, 100% RTI 和 75% RTI 处理的综合得分均比 DI 处理高, 表明 100% RTI 和 75% RTI 处理优于 DI 处理。由此可见, 在干旱地区根域靶向灌溉较常规滴灌更利于葡萄根系生长和土壤水肥分布, 节

表 2 基于客观熵权法确定的指标权重

Table 2 The index weights determined based on the objective entropy weight method

指标 Index	根系活力 Root activity	根系导管密度 Root vessel density	根系导管平均直径 Average diameter of the root vessel	土壤碱解氮含量 Soil hydrolyzable nitrogen content	土壤有效磷含量 Soil available phosphorus content	土壤速效钾含量 Soil available potassium content	土壤有机质含量 Soil organic matter content
权重 Weights	0.102 9	0.242 5	0.099 3	0.107 5	0.211 1	0.094 2	0.142 1

表 3 多指标权重分析综合得分

Table 3 Multi-index weight analysis of the comprehensive score

处理 Treatment	根系活力 Root activity	根系导管密度 Root vessel density	根系导管平均直径 Average diameter of the root vessel	土壤碱解氮含量 Soil hydrolyzable nitrogen content	土壤有效磷含量 Soil available phosphorus content	土壤速效钾含量 Soil available potassium content	土壤有机质含量 Soil organic matter content	综合得分 Comprehensive score
滴灌 DI	6.86	0.88	9.41	5.72	0.64	7.73	3.19	34.43
100%根域靶向灌溉 100% RTI	10.30	0.00	9.93	10.76	21.11	9.43	14.22	75.74
75%根域靶向灌溉 75% RTI	5.84	6.87	6.28	6.08	11.94	8.79	7.83	53.62
50%根域靶向灌溉 50% RTI	0.00	24.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.26

水效率能够达到 25%。

3 讨论

不同灌溉方式下土壤中水分的分布特征存在显著差异, 前人研究发现, 滴灌的湿润带通过重力和毛细作用从表层开始扩散, 此种运动规律会导致大量水分无效蒸发^[25-26]。这与本研究中滴灌的水分运动规律一致。笔者发现, 根域靶向灌溉的水分分布主要在根系分布区, 与滴灌水分分布在表层土壤不同, 且湿润带随灌水量增加而增大, 这种深层分布的水

分运动规律与多孔陶瓷喷头在地下灌溉的水分运动规律相同^[27]。在根系特性方面, 水分含量的差异显著影响根系生长发育^[28]。100% RTI 处理下根系活力较 DI 处理提高 23%, 而 50% RTI 处理下较 DI 处理降低 48%, 这与不同胁迫阶段对棉花根系活性的影响结果一致, 当根系遭受逆境胁迫时, 根系活力下降, 然而复水后活力又可迅速恢复。此外, 轻度胁迫会刺激根系向深层土壤延伸, 增强水分吸收能力^[29]。在水分亏缺条件下, 玉米根系导管直径减小、表皮细胞与根冠细胞内多糖含量增加、根毛总表面

积扩大,这些指标协同调控根系对水分的吸收能力,进而增强玉米植株的抗旱性^[11]。在不同水分条件下小麦根系变化的研究中发现,低水分条件下的旱小麦具有较小的根直径和木质部导管直径、较厚的皮层厚度及较高的根活性^[30]。木质部导管的变化与本研究结果一致,但低水分条件下根系活力的结果则相反,这可能是葡萄科和禾本科作物间的差异引起的。葡萄根系在75% RTI和50% RTI处理下导管结构发生变化,与DI处理相比,导管密度分别增加25%和100%,导管平均直径分别降低19%和97%。密度增加、直径减小的变化与木本植物的抗旱策略高度相关,高密度细导管可减少栓塞风险,提高水分运输效率^[31]。对比禾本科作物,如玉米、小麦,葡萄作为藤本植物则表现出更强的结构塑性,干旱条件下小麦植株导管密度仅增加20%,而直径减少15%^[30],其可能与木质素沉积、细胞壁加厚相关。不同灌溉处理下根系功能还体现在空间分布上,对枣树的研究发现,滴灌导致一级、二级根系在表层聚集^[7],与移栽棉花的边界灌溉促进深层根系发育的机制相似^[8],反映了水分驱动的向水性生长,在本研究结果中DI处理下表层水分富集,RTI处理的深层水分分布更为丰富。

土壤养分的垂直分布差异是RTI与DI处理最显著的区别之一。DI处理导致0~20 cm土层碱解氮、有效磷、速效钾和有机质含量显著高于RTI处理(1.54~3.10倍),形成典型的“表层富集”效应,这与樊吴静等^[13]在马铃薯膜下滴灌中的观测结果一致,滴灌水分在表层蒸发进而导致养分滞留。RTI处理通过定向水分输送,驱动养分向20~40 cm土层迁移。其中100% RTI处理下,30~60 cm土层的碱解氮、有效磷和有机质含量较DI处理提高19%~34%,与井式灌溉在苹果园中的深层养分增储效应形成互证^[31]。这种差异的核心机制在于水分运移路径的改变:DI处理的水分主要在表层蒸发,导致溶解态养分随毛细管上升重新富集;而RTI处理的深层渗透促使养分随水流下渗,尤其在砂质土壤中,水分下渗速率快,减少了表层截留,这与侯晓华等^[32]研究的不同灌溉方式对枣树根区土壤速效养分分布影响的结果一致。值得关注的是,50% RTI处理下深层养分含量低于DI处理,这与Xie等^[33]在玉米田中的结论相悖,其原因可能为灌水量不足导致水分未能向深层次运动,致使养分滞留在20~40 cm土层。对比不

同作物,葡萄根系分泌物可能增强表层钾的固定^[34],导致DI处理下速效钾富集程度高于枣园,这体现了物种间的差异性。此外,RTI处理下20~30 cm土层有效磷含量显著增加,可能与该区域根系密度高、微生物活动旺盛相关,根系分泌物促进难溶性磷的矿化^[35]。

RTI处理在节水与养分高效利用方面展现出优势。与DI处理相比,100% RTI处理通过减少表层水分蒸发,将水分直接输送至根系活跃区,水分利用效率提升20%左右,这与Zhang等^[8]研究的地下滴灌在棉花中的节水效应相当。与曹雪松等^[36]研究的微纳米气泡水灌溉依赖气泡提升土壤透气性减少氮素损失的机制不同,RTI处理依赖物理性水分定向输送,更适用于自动化程度较低的产区。RTI处理在不同土壤质地中的适配性差异显著,在砂质土壤中,RTI处理使得深层养分迁移效率更高,而在黏壤土中可能因渗透速率慢导致养分在表层滞留,需调整灌水量和频率。对比地下滴灌^[35]和井式灌溉^[37],RTI处理的优势在于“靶向性”,直接针对根系分布区供水,而非均匀灌溉,这在干旱区葡萄种植中尤为重要,可避免水分无效蒸发。此外,笔者未涉及长期RTI处理对土壤微生物群落的影响,而已有研究表明,滴灌方式的改变会影响根际真菌丰度和养分循环,未来需结合微生物组学及分子生物学进行深层解析。

4 结 论

通过对比DI与RTI处理对南太湖特早葡萄根系和土壤的影响,揭示了RTI处理在节水增效与根系优化中的显著优势。RTI处理下深层水分分布更加丰富,100% RTI处理显著提高根系活力;75% RTI和50% RTI处理诱导根系导管密度增加,导管直径减小,增强抗旱能力。RTI处理通过定向灌溉驱动养分向根系密集区迁移,显著提高深层土壤的养分含量。RTI处理的“表层减耗、深层增储”模式可减少水分蒸发与径流导致的养分损失,增强植株抗旱能力并提高水分利用效率,为优化干旱区葡萄精准灌溉技术提供理论依据。

参考文献 References:

- [1] YANG B H, HE S, LIU Y, LIU B C, JU Y L, KANG D Z, SUN X Y, FANG Y L. Transcriptomics integrated with metabolomics reveals the effect of regulated deficit irrigation on anthocyanin biosynthesis in Cabernet Sauvignon grape berries[J]. Food Chemistry, 2020, 314: 126170.

- [2] 王宁,张艳霞,李栋梅,王振平.宁夏不同产区霞多丽葡萄内源激素及果实品质差异研究[J].果树学报,2023,40(7):1374-1385.
WANG Ning, ZHANG Yanxia, LI Dongmei, WANG Zhenping. Effect of different terroir conditions on endogenous hormones and berry quality of Chardonnay at the East Helan Mountains[J]. Journal of Fruit Science, 2023, 40(7): 1374-1385.
- [3] LI T S, YAMANE H, TAO R. Preharvest long-term exposure to UV-B radiation promotes fruit ripening and modifies stage-specific anthocyanin metabolism in highbush blueberry[J]. Horticulture Research, 2021, 8: 67.
- [4] 何靖.节水灌溉技术研究进展[J].绿色科技,2020,22(11):87-89.
HE Jing. Research progress on water-saving irrigation technology[J]. Journal of Green Science and Technology, 2020, 22(11): 87-89.
- [5] 胡宏远,李双岑,马丹阳,王振平.水分胁迫对赤霞珠葡萄果实品质的影响研究[J].节水灌溉,2016(12):36-41.
HU Hongyuan, LI Shuangcen, MA Danyang, WANG Zhenping. Effects of water stress on qualities of cabernet sauvignon[J]. Water Saving Irrigation, 2016(12): 36-41.
- [6] YANG F H, WU P T, ZHANG L, WEI Y Q, TONG X Y, WANG Z G. Effects of subsurface irrigation types on root distribution, leaf photosynthetic characteristics, and yield of greenhouse tomato[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 328: 112883.
- [7] 李发永,姚宝林,孙三民,柳维扬.不同灌溉方式对枣树根系生长及抗寒性能的影响[J].北方园艺,2018(20):13-25.
LI Fayong, YAO Baolin, SUN Sanmin, LIU Weiyang. Root growth and cold resistance of jujube tree under different irrigation treatments[J]. Northern Horticulture, 2018(20): 13-25.
- [8] ZHANG H, LIU H, SUN C T, GAO Y, GONG X W, SUN J S, WANG W N. Root development of transplanted cotton and simulation of soil water movement under different irrigation methods[J]. Water, 2017, 9(7): 503.
- [9] JHA S K, GAO Y, LIU H, HUANG Z D, WANG G S, LIANG Y P, DUAN A W. Root development and water uptake in winter wheat under different irrigation methods and scheduling for North China[J]. Agricultural Water Management, 2017, 182: 139-150.
- [10] 马婷慧,李磊,路洁,周丽娜,王锐.调亏灌溉对酿酒葡萄根活力及浆果品质的影响[J].安徽农学通报,2018,24(22):40-41.
MA Tinghui, LI Lei, LU Jie, ZHOU Lina, WANG Rui. Effects of deficit adjustment irrigation on root vigor and berry quality of wine grape[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2018, 24(22): 40-41.
- [11] 马旭凤,于涛,汪李宏,石喜,郑灵祥,王密侠,姚雅琴,蔡焕杰.苗期水分亏缺对玉米根系发育及解剖结构的影响[J].应用生态学报,2010,21(7):1731-1736.
MA Xufeng, YU Tao, WANG Lihong, SHI Xi, ZHENG Lingxiang, WANG Mixia, YAO Yaqin, CAI Huanjie. Effects of water deficit at seedling stage on maize root development and anatomical structure[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(7): 1731-1736.
- [12] 郭子赫,杨恒山,赵培军,张玉芹,刘晶,包额尔敦,张瑞富,李媛媛,李丹丹,秦江.浅埋滴灌条件下灌溉定额对玉米根系形态特征和生理特性的影响[J].中国农学通报,2022,38(18):12-19.
GUO Zihe, YANG Hengshan, ZHAO Peijun, ZHANG Yuqin, LIU Jing, BAO Eerdun, ZHANG Ruifu, LI Yuanyuan, LI Dandan, QIN Jiang. Effects of irrigation quota on morphological and physiological characteristics of maize root under shallow-buried drip irrigation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(18): 12-19.
- [13] 樊吴静,杨鑫,李丽淑,李兰青,唐海,唐秀桦,何虎翼,唐洲萍.不同灌溉方式对冬种马铃薯土壤理化性状、水分利用效率及块茎产量的影响[J].西南农业学报,2023,36(11):2374-2381.
FAN Wujing, YANG Xin, LI Lishu, LI Lanqing, TANG Hai, TANG Xiuhua, HE Huiyi, TANG Zhouping. Effects of different irrigation methods on soil physical and chemical properties, water use efficiency and tuber yield of winter potato[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2023, 36(11): 2374-2381.
- [14] DHAYAL D, LAL K, KHANNA M, SUDHISHRI S, BRAR A S, SINDHU V K, SINGH M, BHATTACHARYYA R, RAJATH E, ROSIN K G, CHAKRABORTY D. Performance of surface and subsurface drip fertigated wheat-moongbean-maize cropping system under different irrigation schedules and nutrient doses[J]. Agricultural Water Management, 2023, 284: 108338.
- [15] 元沛沛,冉圣宏,张凯,唐婷.不同灌溉方式对干旱区耕地土壤养分及其分布的影响[J].灌溉排水学报,2013,32(2):33-36.
QI Peipei, RAN Shenghong, ZHANG Kai, TANG Ting. Effect of different irrigation modes on farmland soil nutrient in arid area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(2): 33-36.
- [16] 杨金翰,田小明,胡晨阳,索文康,董萌萌,郭唯,郝喜英.不同灌溉施肥组合下添加调理剂对土壤水分养分的影响[J].华北农学报,2024,39(增刊1):175-186.
YANG Jinhan, TIAN Xiaoming, HU Chenyang, SUO Wenkang, DONG Mengmeng, GUO Wei, HAO Xiyang. Effects of adding conditioner on soil moisture and nutrients under different irrigation and fertilization combinations[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2024, 39(Suppl. 1): 175-186.
- [17] PINTO J R, CHANDLER R A, DUMROESE R K. Growth, nitrogen use efficiency, and leachate comparison of subirrigated and overhead irrigated pale purple coneflower seedlings[J]. HortScience, 2008, 43(3): 897-901.
- [18] 宰松梅.水肥一体化灌溉模式下土壤水分养分运移规律研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2010.
ZAI Songmei. Soil water and nutrient transport under the integration of irrigation and fertilization[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2010.
- [19] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科学技术出版社,2000.

- LU Rukun. Methods for agrochemical analysis of soil[M]. China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [20] ALONSO-FORN D, BUESA I, FLOR L, SABATER A, MEDRANO H, ESCALONA J M. Implications of root morphology and anatomy for water deficit tolerance and recovery of grapevine rootstocks[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2025, 16: 1541523.
- [21] 周伟权, 侯毅兴, 刘春燕, 阿克居里德孜·努尔改里得, 薛靖, 李树德, 周龙. 不同葡萄砧穗组合嫁接对根系生长特性及解剖结构的影响[J]. *新疆农业科学*, 2023, 60(5): 1170-1180.
- ZHOU Weiquan, HOU Yixing, LIU Chunyan, AKJURIDZI Nurgaride, XUE Jing, LI Shude, ZHOU Long. Effects of hard branch grafting on root growth characteristics and anatomical structure of different grape rootstock and scion combinations[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2023, 60(5): 1170-1180.
- [22] 魏欣悦, 苏源, 杨静, 刘林, 李成云. 微波快速石蜡切片法观察水稻叶片组织[J]. *云南农业大学学报(自然科学版)*, 2011(4): 454-457.
- WEI Xinyue, SU Yuan, YANG Jing, LIU Lin, LI Chengyun. Microwave paraffin section in rice leaf tissue[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2011(4): 454-457.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 56-82.
- BAO Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 56-82.
- [24] WANG H D, WANG X K, BI L F, WANG Y, FAN J L, ZHANG F C, HOU X H, CHENG M H, HU W H, WU L F, XIANG Y Z. Multi-objective optimization of water and fertilizer management for potato production in sandy areas of northern China based on TOPSIS[J]. *Field Crops Research*, 2019, 240: 55-68.
- [25] 王博. 滴灌水分运动研究进展[J]. *黑龙江水利科技*, 2014, 42(1): 171-172.
- WANG Bo. Research progress on drip irrigation water movement[J]. *Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy*, 2014, 42(1): 171-172.
- [26] VISHWAKARMA D K, KUMAR R, ALI ABED S, AL-ANSARI N, KUMAR A, KUSHWAHA N L, YADAV D, KUMAWAT A, KURIQI A, ALATAWAY A, DEWIDAR A Z, MATTAR M A. Modeling of soil moisture movement and wetting behavior under point-source trickle irrigation[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 14981.
- [27] CAI Y H, WU P T, ZHANG L, ZHU D L, CHEN J Y, WU S J, ZHAO X. Simulation of soil water movement under subsurface irrigation with porous ceramic emitter[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 192: 244-256.
- [28] 潘晓迪, 张颖, 邵萌, 马黎明, 郭新宇. 作物根系结构对干旱胁迫的适应性研究进展[J]. *中国农业科技导报*, 2017, 19(2): 51-58.
- PAN Xiaodi, ZHANG Ying, SHAO Meng, MA Liming, GUO Xinyu. Research progress on adaptive responses of crop root structure to drought stress[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, 19(2): 51-58.
- [29] LUO H H, ZHANG Y L, ZHANG W F. Effects of water stress and rewatering on photosynthesis, root activity, and yield of cotton with drip irrigation under mulch[J]. *Photosynthetica*, 2016, 54(1): 65-73.
- [30] LI P F, MA B L, WEI X F, GUO S, MA Y Q. Deeper root distribution and optimized root anatomy help improve dryland wheat yield and water use efficiency under low water conditions[J]. *Plant and Soil*, 2024, 501(1): 437-454.
- [31] HERNANDEZ- ESPINOZA L H, BARRIOS- MASIAS F H. Physiological and anatomical changes in tomato roots in response to low water stress[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 265: 109208.
- [32] 侯晓华, 朱耀辉, 李发永, 夏梓洋, 孟宪刚, 贾宏坤. 不同灌溉方式对枣树根区土壤速效养分赋存及空间异质性的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2018(10): 125-135.
- HOU Xiaohua, ZHU Yaohui, LI Fayong, XIA Ziyang, MENG Xiangang, JIA Hongkun. Effects of irrigation methods on soil available nutrient state and its spatial heterogeneity in jujube root zone[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018(10): 125-135.
- [33] XIE G, SU Z H, FU Y M, LI J, MAO D Q, WANG S W. Distribution of subsurface nitrogen and phosphorus from different irrigation methods in a maize field[J]. *Hydrology*, 2024, 11(10): 171.
- [34] DJAMAN K, IRMAK S, MARTIN D L, FERGUSON R B, BERNARDS M L. Plant nutrient uptake and soil nutrient dynamics under full and limited irrigation and rainfed maize production[J]. *Agronomy Journal*, 2013, 105(2): 527-538.
- [35] GUO Y H, WANG Z, LI J S. Effects of phosphorus fertilizer type and dripline depth on root and soil nutrient distribution, nutrient uptake, and maize yield under subsurface drip fertigation[J]. *Field Crops Research*, 2024, 318: 109585.
- [36] 曹雪松, 郑和祥, 王军, 李和平, 冯亚阳, 岳湘鸿. 微纳米气泡水地下滴灌对紫花苜蓿根际土壤养分和产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(7): 24-30.
- CAO Xuesong, ZHENG Hexiang, WANG Jun, LI Heping, FENG Yayang, YUE Xianghong. Effects of subsurface drip irrigation with micro-nano bubble water on rhizosphere soil nutrients and yield of alfalfa[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(7): 24-30.
- [37] 魏刚刚, 杨建军, 程平, 吴亚楠, 程辉玲. 井式节水灌溉下苹果园土壤水分和养分空间分布特征研究[J]. *节水灌溉*, 2023(5): 24-32.
- WEI Ganggang, YANG Jianjun, CHENG Ping, WU Yanan, CHENG Huiling. Study on soil moisture and nutrient distribution characteristics of apple orchards under well-type water-saving irrigation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2023(5): 24-32.