

滴灌施肥参数对苹果树细根生长与周转的影响

陈静航 张绍武 杨金鑫 叶蕊蕊 孙建喜 胡田田

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为揭示不同水肥一体化模式下苹果树细根时空分布规律, 探明不同滴灌施肥参数对苹果树细根生长的调控效应, 2019—2021 年进行二因素二水平完全组合设计田间试验, 毛管铺设方式设置一行一管和一行两管, 施肥周期设置 15 d 和 30 d, 采用微根管原位监测技术, 持续观测苹果树活跃生长期细根的生长和死亡情况, 分析了苹果树细根生长和周转对毛管铺设方式和施肥周期的响应动态。细根现存量与生长量随季节动态变化为单峰曲线, 细根死亡量为双峰曲线。与施肥周期 30 d 相比, 施肥周期 15 d 在时间和空间分布上均能显著提高细根现存量、生长量和死亡量。毛管铺设方式对苹果树细根现存量和死亡量的影响在时间上未达到显著水平, 对细根生长量的影响随季节的变化而变化; 在空间分布上, 一行两管的细根现存量、生长量和死亡量在 19 ~ 38 cm 土层中显著大于一行一管, 在 57 ~ 76 cm 土层中规律相反。毛管铺设方式和施肥周期及其交互作用均对根系周转率有显著影响, 一行一管、施肥周期 15 d 较其他处理能够加快细根周转。施肥周期对苹果树细根生长和死亡有较明显的调控效应, 而毛管铺设方式能调节细根的空间分布, 一行一管、施肥周期 15 d 处理较其他处理更有利于提高细根现存量和生长量, 加快细根周转, 优化细根空间分布。

关键词: 苹果树; 细根现存量; 细根周转; 滴灌施肥周期; 毛管铺设方式; 微根管根系观测

中图分类号: S275 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2025)04-0436-11

OSID:



Effects of Drip Fertigation Parameters on Fine Root Growth and Turnover of Apple Trees

CHEN Jinghang ZHANG Shaowu YANG Jinxin YE Ruirui SUN Jianxi HU Tiantian

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The objective was to reveal the spatial and temporal distribution of apple tree fine roots under different water and fertilizer integration modes, explore the regulatory effect of different drip irrigation fertilization strategies on the growth of apple tree fine roots, and provide a theoretical basis for regulating the growth of apple tree fine roots by drip irrigation fertilization mode. In 2019—2021, a two-factor two-level complete combination design field experiment was carried out, the capillary laying method was set up with one row-one tube and one row-two tubes, the fertilization cycle was set for 15 d and 30 d, and the growth and death of fine roots during the active growth period of apple trees were continuously observed by micro-root tube in situ monitoring technology, and the response dynamics of fine root growth and turnover of apple trees to capillary laying mode and fertilization cycle were analyzed. The existing length density and growth of fine roots changed dynamically with the seasons to a unidial curve, and the amount of fine root death was a bimodal curve. The fertilization cycle of 15 d significantly increased the existing length density, growth and death of fine roots in time and space distribution compared with the 30 d of fertilization cycle. The effect of capillary arrangement on the existing length density and death of fine roots in apple trees did not reach a significant level in time, and the effect on fine root growth changed with seasonal changes. In terms of spatial distribution, the existing length density, growth and death of fine roots in one row-two tubes were significantly greater than those of one row-one tube in the 19 ~ 38 cm soil

收稿日期: 2024-02-03 修回日期: 2024-10-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0201508)

作者简介: 陈静航(1997—), 女, 硕士生, 主要从事果树水肥一体化技术模式研究, E-mail: 2503577686@qq.com

通信作者: 胡田田(1966—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事果树水肥一体化技术模式研究, E-mail: hutiant@nwsuaf.edu.cn

layer, and the law was reversed in the soil layer of 57 ~ 76 cm. The capillary laying mode and fertilization cycle and its interaction had a significant impact on the root turnover rate, the one row-one tube fertilization cycle of 15 d can accelerate the turnover of fine roots compared with other treatments. The fertilization cycle had a more obvious regulatory effect on the growth and death of fine roots in apple trees, and the capillary laying method can adjust the spatial distribution of fine roots, and the 15 d treatment of one row-one tube fertilization cycle was more conducive to improving the existing length density and growth of fine roots, accelerating the turnover of fine roots, and optimizing the spatial distribution of fine roots.

Key words: apple tree; fine root stock; fine root turnover; drip irrigation fertilization cycle; capillary arrangement; minirhizotron-based root system observation

0 引言

陕西渭北地区由于水热条件良好、光照资源充裕、土壤环境适宜,成为世界上最佳的苹果优生区之一,也是我国农业规划的苹果产业发展的重要区域^[1-2]。但该地区降雨量全年分布不均、部分地区水资源紧缺,随着苹果园种植面积不断增加,该地区水分供需矛盾日益突出^[3-4];同时,该地区采用的不合理施肥方式也造成了肥料利用率低且浪费严重^[5]。通过水肥一体化滴灌模式可以将水肥同时输送到根区土壤^[6],减少水资源和化肥浪费,提高水肥利用效率,达到增产增收目的^[7]。滴灌施肥后的土壤湿润体是作物吸收水肥的主要区域,同时也是滴灌系统对作物根系的作用区域^[8-9]。滴灌施肥参数,如施肥周期、毛管布设方式等,会影响土壤中的水分和养分分布^[10],从而影响植物根系的时空分布,进而影响作物对水肥的利用效率。因此,明确不同滴灌施肥策略对苹果树细根生长的调控效应对实现水肥高效利用具有重要意义。

细根(直径0~2 mm)承担了根系大部分的生理功能,对果树吸收和利用水分和养分具有十分重要的作用^[11]。且细根形态易受土壤环境的直接影响,细根形态会随着土壤水分和养分有效性的变化而变化^[12-13]。水肥耦合条件下,细根的根长密度会增加,细根寿命则可能延长也可能缩短^[14]。王政权等^[15]研究发现,在灌水区 and 施肥区水曲柳根系生长较快,在非施肥区以及非灌水区水曲柳根系生长较慢。施肥能促进细根生长,使细根可以吸收更深层土壤中的水分^[16]。颜克发等^[17]研究发现,在相同施肥条件下,滴灌可以促进细根生长以及增加细根数量,但对细根构型没有显著影响。水肥一体化条件下,不同毛管布设方式和施肥周期使土壤形成的湿润体以及养分分布状况不同,进而影响细根的生长发育状况,因此,细根分布状况与水肥一体化模式密切相关。蔡焕杰等^[18]研究发现,毛管布设方式会影响棉花的根长,且毛管间距110 cm处理的水分条

件、通气状况等均优于毛管间距140 cm处理。曹伟等^[19]研究表明,双管布置条件下棉花根系主要分布在20~30 cm土层,单管布置条件下主要分布在0~20 cm土层。前人关于施肥周期对根系的影响研究发现,施肥周期越短,土壤的湿润层越浅,植物细根的分布越浅,根质量则越大^[20-21]。此外,较短的施肥周期下根区养分时空变化较小,可为根系生长创造良好的养分条件^[22-23]。因此,选择合适的毛管布设方式和施肥周期,可优化根区土壤水肥分布,为细根提供适宜生长发育的土壤环境。

以往对滴灌技术参数的优化研究多集中在小麦、玉米等一年生作物上^[24-25],而关于苹果树的研究较少。且关于苹果园滴灌技术参数研究多集中在地上部生长发育、产量和水分利用效率等,如研究滴灌施肥技术参数对苹果产量、品质的影响^[26]以及对苹果矿质元素含量的影响等^[27],关于滴灌技术参数对根系时空分布与周转影响的研究较少,尤其是关于苹果树根系对不同毛管布设方式和施肥周期的响应还鲜有报道。由于土壤的不透明性严重限制了对根系功能的认识,准确测定细根生长和周转一直是根系研究中的“瓶颈”。前人对果树根系生长的研究方法多使用挖掘法、土钻法等对树体有损害的传统方法^[28-29],这些方法很难对根系生长进行原位连续监测,且操作困难、工作量大,在后期清洗细根的过程中也可能会因为遗漏细根而造成试验误差。微根管技术可以实现长时间原位、重复、无损观测根系生长发育,是较好的根系动态研究方法。而目前运用微根管技术监测根系指标的研究多集中于森林生态系统^[30-31],针对果树作物的原位监测研究还有待进一步发展。本文利用微根管根系观测技术,在细根自然生长状态下长时间监测不同滴灌施肥参数下苹果树细根的生长和死亡动态,探明毛管布设方式和施肥周期对苹果树细根动态变化和空间分布的影响,揭示不同滴灌施肥模式对苹果树细根生长的调控效应,为苹果生产选择合适的滴灌施肥技术参数提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于陕西省延安市洛川县西北农林科技大学洛川苹果试验站(35°47'04"N,109°21'44"E),地处渭北黄土高原沟壑区,属北温带大陆性湿润易干旱季风气候,平均海拔 1 100 m。试验地年均降水量 597 mm,年均气温 9.2℃,无霜期 167 d,日照时数 2 552 h,昼夜温差 15.7℃,雨热同季,自然条件优越。试验年内气象资料如图 1 所示,2019—2020 年全生育期降水量 714.7 mm,2020—2021 年全生育期降水量 690.3 mm。供试苹果树为 6 a 树龄,品种为“延长红”(富士)。种植模式为 2 m×4 m,树行为南北方向,占地总面积 1 733 m²。试验区苹果修剪、拉枝、疏花疏果及病虫害防治等与当地标准园一致。

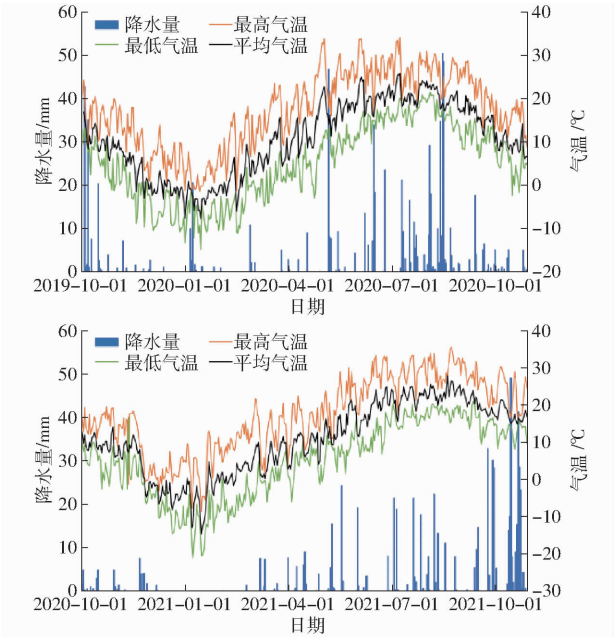


图 1 试验年内气象资料
Fig.1 Meteorological data in experimental year

1.2 试验设计

试验采用水肥一体化方式灌水施肥,设毛管布设方式(P)和施肥周期(T)两个因素,完全组合设计。毛管布设方式设置一行一管(P1)和一行两管(P2),施肥周期设置 15 d(T1)和 30 d(T2),4 个试验小区,各试验小区面积约为 124 m²,每个小区内设 5 次重复。试验处理于 2017 年 10 月苹果采收后开始。一行一管布设为一条滴灌管被铁丝固定在树干上,距地面 50 cm;一行两管布设为两条滴灌管分别铺设在树行两侧的地面,距树干 30 cm,其上覆盖防草布。苹果园灌溉施肥系统包括水泵、吸肥泵、过滤器、干管、支管、毛管和滴头。滴灌管直径为 16 mm,滴头间距为 30 cm,滴头流量为 2 L/h。各处理灌水定额、灌溉定额和总施肥

量相同,氮磷钾肥均通过滴灌系统施入。

1.2.1 灌水量设置

2020 年灌水定额计算式为

$$m = 10(\theta_{\max} - \theta_r)HB\gamma \tag{1}$$

式中 m ——灌水定额,mm
 $\theta_{\max}$ ——计划灌水土壤上限含水率实测值(质量含水率),%
 θ_r ——灌前土壤含水率实测值(质量含水率),%
 H ——计划湿润层深度,取 0.8 m(对试验苹果树根钻取样表明,>80%根系在 0~80 cm 土层)
 B ——滴灌土壤湿润比,取 0.3
 γ ——土壤干容重,g/cm³

当实测土壤质量含水率大于 80% FC(FC 为田间持水量)时,为保证肥料顺利施入,灌水量依据肥料量设置,以满足滴头处液体电导率不超过 3 mS/cm;当灌水前有降雨时,酌情减少灌水量。

根据 2020 年灌水经验,当地降雨量基本能满足苹果树的生长发育需求,2021 年灌水量在满足肥料稀释倍数的前提下,对各生育期的灌水量平均分配,当灌水前有降雨时,酌情减少灌水量。

1.2.2 施肥量设置

氮、磷、钾肥用量(纯量)分别为 240、195、240 kg/hm²。为确保与施肥周期 15 d 的灌水量相同,施肥周期 30 d 处理在不施肥时仍然保持正常灌水。各处理全生育期的施肥量和灌水量(每个生育期 2 次)见表 1 和表 2(2020 年由于疫情影响,幼果新梢期之前未施肥)。

表 1 2020 年苹果园试验灌水量和施肥量

Tab.1 Experimental irrigation and fertilization of apple orchard in 2020

生育期	施肥量/(kg·hm ⁻²)						灌水量/ mm
	施肥周期 15 d			施肥周期 30 d			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
幼果新梢期	36.0	24.4	18.0	72.0	48.8	36.0	10.2
	36.0	24.4	18.0	0	0	0	10.2
花芽分化期	24.0	26.3	30.0	48.0	52.6	60.0	8.7
	24.0	26.3	30.0	0	0	0	7.4
膨大初期	12.0	9.8	30.0	24.0	19.6	60.0	5.9
	12.0	9.8	30.0	0	0	0	5.9
膨大后期	12.0	9.7	24.0	24.0	19.6	48.0	5.2
	12.0	9.7	24.0	0	0	0	5.2
落叶期	36.0	27.3	18.0	72.0	54.6	36.0	7.8
	36.0	27.3	18.0	0	0	0	7.8

注:2020 年施肥时间为 5—11 月。

1.3 测定参数方法

1.3.1 微根管安装

2019 年 7 月于每个小区选择 5 棵长势良好且

表 2 2021 年苹果园试验灌水量和施肥量
Tab.2 Experimental irrigation and fertilization
of apple orchard in 2021

生育期	施肥量/(kg·hm ⁻²)						灌水量/ mm
	施肥周期 15 d			施肥周期 30 d			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
萌芽期	24.0	14.6	6.0	48.0	29.3	12.0	8.0
	24.0	14.6	6.0	0	0	0	4.0
开花坐果期	18.0	14.6	12.0	36.0	29.3	24.0	8.0
	18.0	14.6	12.0	0	0	0	2.0
幼果新梢期	18.0	14.6	12.0	36.0	29.3	24.0	8.0
	18.0	14.6	12.0	0	0	0	4.0
花芽分化期	12.0	16.6	24.0	24.0	33.2	48.0	8.0
	12.0	16.6	24.0	0	0	0	4.0
膨大初期	6.0	4.9	24.0	12.0	9.8	48.0	8.0
	6.0	4.9	24.0	0	0	0	4.0
膨大后期	6.0	4.9	24.0	12.0	9.8	48.0	8.0
	6.0	4.9	24.0	0	0	0.0	4.0
落叶期	36.0	27.3	18.0	72.0	54.6	36.0	12.0
	36.0	27.3	18.0	0	0	0	8.0

注：2021 年施肥时间为 3—11 月。

一致的苹果树,作为根系观测的 5 次重复,在距树干 45 cm 处的正南(S)、正西(W)及东北(X)的 3 个方向(图 2),与地面呈 60°夹角埋入微根管。微根管长 1 m,地面以下部分 90 cm,地上部分 10 cm。露出地面 10 cm 的微管用暗色胶带覆盖遮光,并在顶端开口处加盖防尘盖(图 2)。

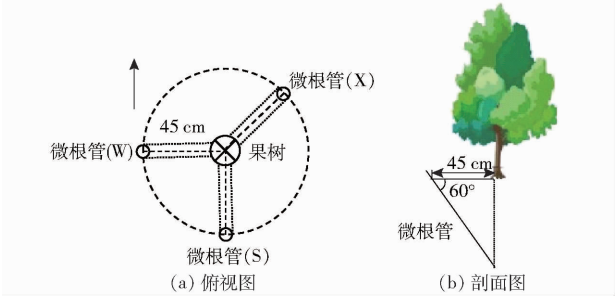


图 2 微根管田间布置示意图

Fig.2 Field layout of microroot canals

1.3.2 细根数据获取

2020 年 5 月开始使用 PMT-Root700 型根系生长监测系统(Root700 型,德国)扫描采集图像。2020 年 5 月 31 日—2021 年 11 月 10 日,每 15 d 观测一次,连续观测 27 次(由于冬天土壤冻结和疫情影响,2020 年 12 月—2021 年 3 月数据缺失),观测时间与施肥时间基本同步,且在施肥前 1 d 或 2 d 进行观测。最大观测深度约为 88 cm(垂直深度约 76 cm),每 22 cm 为一层(垂直深度约 19 cm),共观测 4 层。每管每次获取 4 帧图像,图像尺寸为 22 cm × 22 cm。使用 Root Analysis 图像分析软件对图像进行分析,记录每帧图像中每条细根长度,图像中白色

细根为新生的活根,褐色细根为活根,明显发黑或者枯萎的细根为死根,相邻两次采样间隔期消失的根定义为死根。

1.3.3 细根参数计算

- (1)细根现存量,为观测时仍存活的细根根长密度。
- (2)细根生长量,为相邻两次观测时间间隔内增加的细根根长密度,包括原有细根增长量和新根生长量。
- (3)细根死亡量,为相邻两次观测时间间隔内减少的细根根长密度,包括死亡的细根和消失的细根。
- (4)细根周转率,为细根年生长总量或死亡总量与年平均现存量之比。

上述各种根长密度计算公式为

$$RLD = L / (Ad) \tag{2}$$

式中 RLD——根长密度,m/m³
L——微根管图像中观测到的细根长度,m
A——微根管图像面积,m²
d——微根管能观察到的土壤厚度,取 2 mm^[32]

1.4 数据处理

使用 Root Analysis 专业根系研究分析软件对采集图像进行分析,利用 Excel 2016 软件对数据预处理和绘制图表,用 SPSS Statistics 17 软件对数据进行方差分析和多重比较,用 Duncan 新复极差法进行平均数显著性检验。

2 结果与分析

2.1 施肥周期和毛管布设方式对苹果树细根动态变化的影响

2.1.1 施肥周期和毛管布设方式对苹果树细根影响总体分析

0~76 cm 土层观测期内苹果树细根现存量、生长量和死亡量平均值的方差分析结果见表 3。施肥周期对苹果树细根现存量、生长量和死亡量均有显著影响(P<0.05),毛管布设方式及其与施肥周期的交互效应未达到显著水平(P>0.05)。与施肥周期 30 d 相比,15 d 水平的细根现存量、生长量和死亡量在 2020 年分别提高 57.24%、54.95% 和 74.84%,在 2021 年分别提高 69.89%、84.14% 和 78.85%,虽然 2021 年细根现存量、生长量和死亡量的总量更少,但 2021 年的相对提高幅度更大。相较其他处理,P1T1 处理在两年更有利于增加细根现存量和生长量,同时会提高细根死亡量。

从表 3 还可以看出,与 2020 年相比,2021 年细根现存量、生长量和死亡量均明显减小,各参数总体

表 3 试验因素对细根现存量、生长量和死亡量的影响

Tab.3 Effects of experimental factors on fine root length density, growth and death							m/m ³
处理	2020 年			2021 年			
	细根现存量	细根生长量	细根死亡量	细根现存量	细根生长量	细根死亡量	
P1T1	2 120.90 ^a	244.31 ^a	320.01 ^a	600.78 ^a	61.45 ^a	87.29 ^a	
P2T1	1 986.99 ^a	179.71 ^{ab}	273.11 ^a	660.26 ^a	53.58 ^a	80.08 ^b	
P1T2	1 254.26 ^b	128.82 ^b	151.82 ^b	367.03 ^b	22.40 ^b	38.82 ^c	
P2T2	1 358.31 ^b	144.82 ^b	187.42 ^b	375.25 ^b	30.81 ^b	54.76 ^{bc}	
P							
F							
T	**	*	**	**	**	**	**
P×T							

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$),*表示差异显著($P<0.05$),**表示差异极显著($P<0.01$),下同。

减少 70.19% (现存量)、58.82% (生长量) 和 72.01% (死亡量)。

2.1.2 细根现存量动态变化

图 3 (图中 * 表示差异显著 ($P<0.05$), ** 表示差异极显著 ($P<0.01$)) 为各处理 0 ~ 76 cm 土层苹果树细根现存量平均值随生育期推进的变化趋势。各处理细根现存量在两年均表现出随时间的变化先增大后减小的规律。与施肥周期 30 d 相比,施肥周期 15 d 在各生长季均能显著提高细根现存量 ($P<0.05$), 2020 年增幅为 36.68% ~ 85.40% (图 3a), 2021 年增幅为 53.54% ~ 110.85% (图 3b)。不同毛管布设方式下的细根现存量在各生长季均无显著差异。2020 年, P1T1 处理的峰值在 7 月中旬, 其他 3 个处理的峰值均在 7 月下旬; 2021 年, 4 个处理的细根现存量峰值均在 7 月上旬, 两年均为 P1T1 处理的峰值显著大于 P1T2 和 P2T2 ($P<0.05$), 略大于 P2T1。

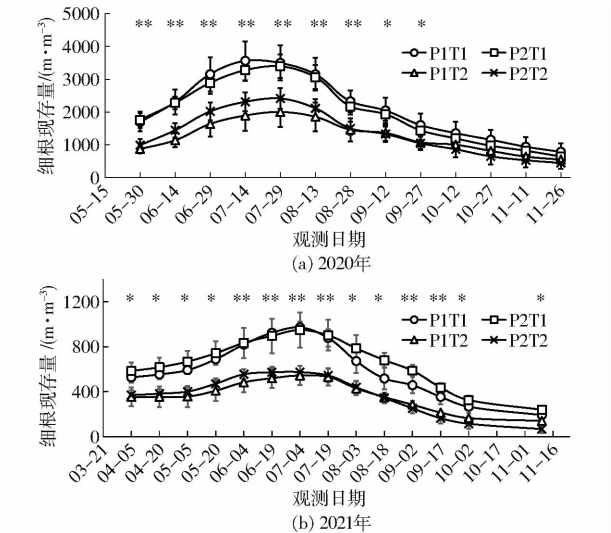


图 3 不同处理细根现存量动态变化曲线
Fig.3 Dynamic changes of fine root length density under different treatments

2.1.3 细根生长量动态变化

各处理细根生长量在 2020 年均随时间的变化先增加后减小, 峰值出现在 6 月中下旬, 在 9 月上旬

略有波动 (图 4a, 图中不同小写字母表示同一观测时间段内不同处理间差异显著 ($P<0.05$), 下同)。在 2021 年, 4 个处理细根生长量峰值均出现在 5 月下旬, 一行一管的生长量在 6 月下旬—8 月上旬平缓变化, 一行两管在 9 月上中旬略有波动 (图 4b)。相较于施肥周期 30 d, 15 d 水平下的细根生长量在两年的各生长季均显著提高 ($P<0.05$), 2020 年增幅为 9.78% ~ 103.98%, 2021 年增幅为 58.60% ~ 935.84%。与一行两管相比, 一行一管的细根生长量在 2020 年 8 月上旬—10 月下旬和 2021 年 8 月下旬—9 月下旬显著增加 ($P<0.05$), 在 2021 年 6 月下旬—8 月中旬显著降低 ($P<0.05$)。

2.1.4 细根死亡量动态变化

由图 5 可知, 细根在全年有两个死亡高峰, 且均是第 1 个峰值明显大于第 2 个。2020 年出现在 8 月中下旬和 9 月中下旬 (图 5a), 2021 年在 7 月下旬和 9 月上旬 (图 5b)。从 7 月上旬开始, 施肥周期对细根死亡量有显著影响 ($P<0.05$), 施肥周期 15 d 较 30 d 在两年均显著增加细根死亡量, 增幅分别为 24.89% ~ 391.74% (2020 年) 和 52.26% ~ 146.59% (2021 年)。其中, P1T1 处理的细根死亡量在大部分观测时间大于其他 3 个处理。不同毛管布设方式下的细根死亡量在各生长季无显著差异。

2.2 施肥周期和毛管布设方式对苹果树细根空间分布的影响

施肥周期和毛管布设方式对细根现存量、生长量和死亡量全年的影响随土层深度的变化而变化 (图 6)。与施肥周期 30 d 相比, 在 0 ~ 19 cm、19 ~ 38 cm、38 ~ 57 cm、57 ~ 76 cm 的 4 个土层中, 施肥周期 15 d 均显著提高细根现存量、生长量和死亡量 ($P<0.05$), 且增幅随土层深度的加深在 2020 年先减小后增加, 在 2021 年先增加后减小再增加, 两年的最大增幅分别在 0 ~ 19 cm (2020 年) 和 19 ~ 38 cm (2021 年) 土层, 分别为 93.35% (现存量)、161.48% (生长量)、129.80% (死亡量) 和 273.36%

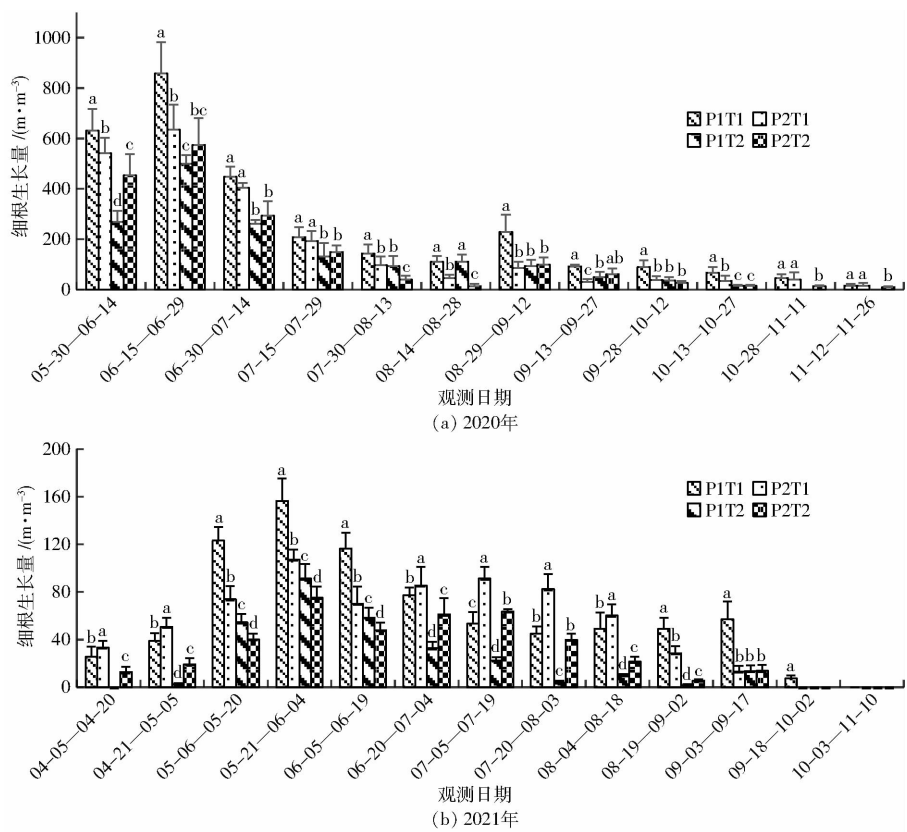


图 4 不同处理细根生长量动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of fine root growth under different treatments

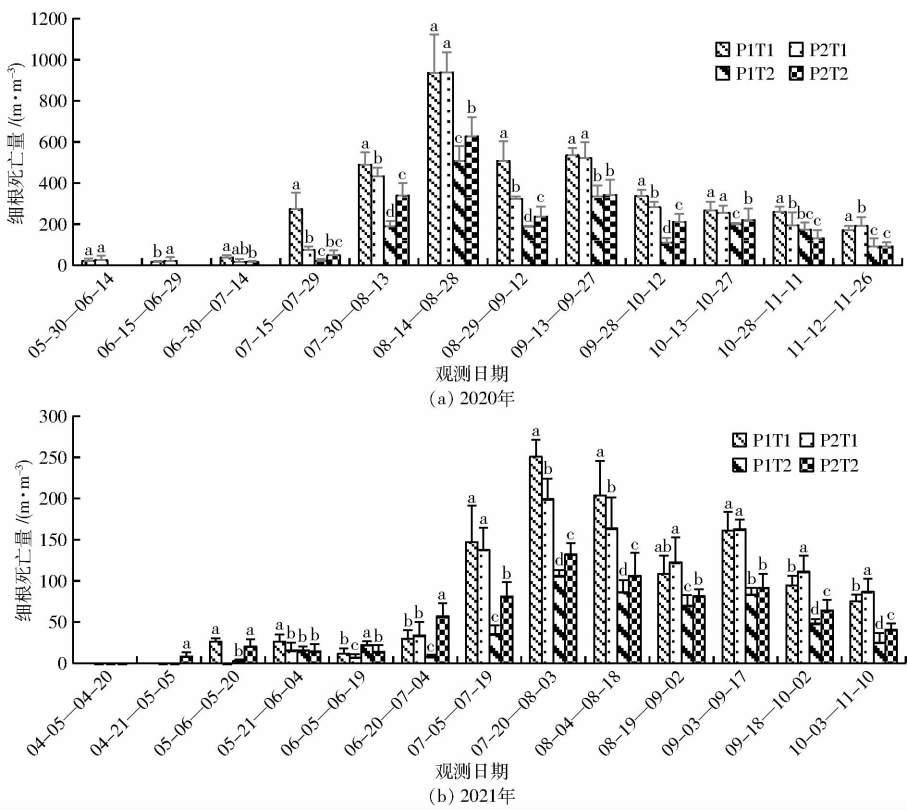


图 5 不同处理细根死亡量动态变化

Fig. 5 Dynamic changes of fine root death under different treatments

(现存量)、367.47% (生长量)、225.53% (死亡量)。一行一管的细根现存量、生长量和死亡量的垂直分布均随土层深度的加深而增加,在 57 ~ 76 cm 土层

有最大值。一行两管的细根现存量均随土层深度的加深先显著增加后平缓波动,在 19 ~ 57 cm 土层显著大于 0 ~ 19 cm 土层;一行两管的细根生长量和死

亡量在两年均随土层深度的加深先显著增加后缓慢减小,分别在 2020 年 19 ~ 38 cm 土层和 2021 年 38 ~ 57 cm 土层出现峰值。说明一行一管的细根现存量、生长量和死亡量的峰值较一行两管向下推移 20 ~ 40 cm。在 19 ~ 38 cm 土层,一行两管的细根现

存量、生长量和死亡量显著大于一行一管 ($P < 0.05$);在 57 ~ 76 cm 土层,一行两管显著小于一行一管 ($P < 0.05$);在大部分土层中,P1T1 处理的细根现存量、生长量和死亡量显著大于其他处理 ($P < 0.05$)。

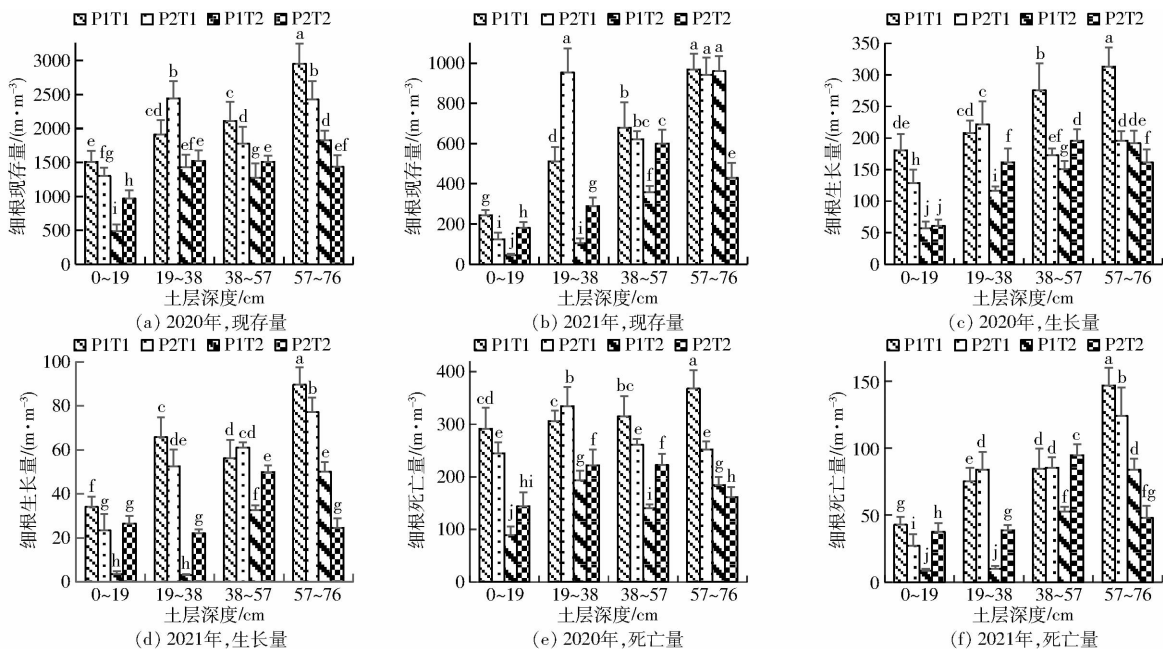


图 6 不同处理细根现存量、生长量和死亡量空间变化

Fig. 6 Spatial variations of fine root length density, growth and death under different treatments

2.3 施肥周期和毛管布设方式对苹果树细根周转的影响

以细根生长量和死亡量分别计算出相应的周转率,分别记为周转率 1 和周转率 2。对细根周转率的方差分析和多重比较表明,相较于一行两管,在 2020 年一行一管对周转率 1 的提高达到显著水平 ($P < 0.05$),在 2021 年对周转率 2 的降低达到显著水平 ($P < 0.05$)。相较于施肥周期 30 d,施肥周期 15 d 在两年均能提高细根周转率,对 2020 年的周转率 2 和 2021 年的周转率 1 的影响均达到显著水平 ($P < 0.05$)。毛管布设方式和施肥周期的交互效应对周转率的影响在两年均达到极显著水平 ($P < 0.01$) (表 4)。不同处理之间,周转率 1 和周转率 2 均表现为,P1T1 在两年均显著大于其他处理(2021 年 P2T2 的周转率 2 例外),P1T2 在两年均显著小于其他 3 个处理(2020 年周转率 1 例外)。

表 4 还表明,两种周转率相比,2020 年 4 个试验处理的周转率 2 均大于周转率 1,2021 年则相反。说明两个试验年份,细根生长量与死亡量的相对大小有所不同,这可能与两年根系观测的时间范围不同有关,2020 年观测时间为 6—11 月(受疫情影响),而 2021 年为 4—11 月,2020 年较 2021 年观测时间更短,可能缺少一部分细根生长高峰期数据。

表 4 不同处理下细根周转率方差分析

Tab. 4 ANOVA of fine root turnover rate under different treatments

处理	2020 年		2021 年	
	周转率 1	周转率 2	周转率 1	周转率 2
P1T1	1.42 ^a	1.86 ^a	2.21 ^a	1.87 ^a
P2T1	1.10 ^c	1.65 ^b	1.94 ^b	1.61 ^b
P1T2	1.23 ^b	1.47 ^c	1.80 ^c	1.43 ^c
P2T2	1.26 ^b	1.63 ^b	2.01 ^b	1.95 ^a
P	*			**
F				
T		*	*	
P × T	**	**	**	**

注:周转率 1 为细根生长量与现存量比值,周转率 2 为细根死亡量与现存量比值。

3 讨论

本研究中,细根现存量和生长量在两年的动态变化趋势均为单峰曲线,细根现存量峰值出现在 7 月,细根生长量峰值出现在 5—6 月;细根死亡量则为双峰曲线,峰值均在秋季。这可能是因为细根生长和死亡的季节变化动态受环境因子^[33-34](如土壤温度、水分等)和果树自身的生物因子^[35-36](如果树类型、胸高断面积、树龄等)的共同影响。温度等环境因子的变化具有明显的季节性,细根生长和死亡量受控于这些因子,所以

也会产生季节性变化。土壤温度的升高会促进苹果树细根的生长,在7月细根现存量达到顶峰,之后温度的持续升高反而加快细根死亡,导致现存量降低,在秋季细根死亡量达到高峰。STEELE等^[37]研究发现,在相同环境中,班克松和黑云杉细根分别在夏季和冬季达到死亡峰值,说明树种对细根生长量和死亡量有较大影响。因此,细根生长和死亡的季节性变化可能受苹果树本身生理特性和环境因素的共同影响。

本试验中,2020年和2021年的细根现存量、生长量和死亡量存在显著差异。可能是因为试验地所在区域于2020年4月下旬发生严重霜冻,其影响了苹果树地上部的枝条生长及开花坐果,同时刺激了根系的生长。枝条和根系呈交替生长规律^[38],当地上部的枝条生长被抑制时,为了维持营养物质供应的动态平衡,果树将更多的碳分配到根系,进而促进细根的生长^[39],同时延迟了峰值出现时间;而2021年气候条件正常,苹果树地上部生长发育正常,果树将更多的营养物质分配到地上部,根系生长受到一定抑制,导致2021年的细根现存量、生长量均显著小于2020年。与施肥周期30 d相比,15 d水平的细根现存量、生长量和死亡量在2021年的相对提高幅度均高于2020年。姜红英^[40]研究发现,在不同年际间,随着连续施肥年限的延长水曲柳细根生产量和死亡量均呈先减小后增加趋势,在第2年达到最小,说明长期连续施肥会影响细根生长量和死亡量在不同年际间的表现。本试验处理开始于2017年,试验时间为2020年5月—2021年11月,试验期内施肥周期15 d均能提高细根现存量、生长量和死亡量,但在不同年际间的提高效果不同。

前人研究表明,影响细根生长量和死亡量的非生物因子主要为土壤温度、土壤水分和土壤养分^[41]。灌溉频率和施肥浓度会影响土壤中水分和养分的分布状况,从而对根系的生长、死亡和周转造成影响^[42-43]。本研究发现,与施肥周期30 d相比,施肥周期15 d在时间和空间上均能显著提高细根现存量、生长量和死亡量。栗岩峰等^[22]的研究也表明,施肥周期为2周1次时细根现存量更大,施肥周期为4周1次时由于肥料在时间上分配不均,细根现存量会减小,细根生长受到抑制。这可能与施肥周期缩短条件下,较高的施肥灌溉频率使土壤水分和养分在时间和空间上分配更均匀充足有关^[23]。有研究认为土壤养分的增加会提高细根生长量和死亡量^[44],土壤氮含量提高后,地上部分可获取更多的氮,从而提高叶面积、促进光合作用,致使更多的碳投入到根系中,促进细根生长^[45];另一方面,土壤

有效氮的增加也会使细根氮含量增加,导致呼吸速率加快,增加细根现存量和死亡量^[46]。也有研究认为,土壤氮含量的增加,可以为细根的长期生长提供养分,当充足的碳被分配到细根中时,就可延长细根寿命,减缓细根死亡^[47]。这可能与土壤养分水平、植物种类等有关。关于土壤养分对细根生长量和死亡量的影响尚需进一步研究。

本研究表明,毛管布设方式对苹果树细根现存量和死亡量的影响在全年和各生长季未达到显著水平,对细根生长量的影响随季节的变化而变化。这可能是因为一行一管和一行两管每次的灌水量和施肥量相同,土壤中水分和养分在时间分配上基本一致,导致毛管布设方式对细根现存量和死亡量的影响在时间尺度上不显著^[48]。但毛管布设方式会改变水氮在土壤中的空间分布,8—9月气温逐渐降低,细根生长趋缓,一行一管下的水氮分布状况更有利于细根生长。本研究还发现,在空间上毛管布设方式的影响会随土层深度的变化而变化,在19~38 cm土层,一行两管的细根现存量、生长量和死亡量显著大于一行一管,在57~76 cm土层,规律相反,且一行一管的细根现存量、生长量和死亡量峰值较一行两管向下推移20~40 cm。此试验前期(2017—2018年生育期内)已经探明毛管布设方式会影响水分和养分在土壤中的运移,一行两管下湿润锋垂直运移距离为55 cm,一行一管湿润锋会运移至77 cm,且一行两管下土壤水分和养分分布更均匀^[23]。植物细根的分布与水分和氮素的分布密切相关^[49],一行两管的水氮分布在中层土壤(19~38 cm土层)中更均匀,一行一管的水氮分布在深层土壤(57~76 cm土层)中更充足,因此在19~38 cm土层中一行两管对细根现存量、生长量和死亡量的影响效果更大,在57~76 cm土层中一行一管的影响更显著,且一行一管的细根峰值随水氮的运移较一行两管向下推移20~40 cm,一行一管条件下有利于细根向下生长。

本研究发现,毛管布设方式和施肥周期的交互作用对细根周转率的影响在两年均达到极显著水平,一行一管施肥周期15 d处理的周转率较施肥周期30 d均显著增大,说明在一行一管条件下施肥周期对细根周转率的影响更明显。毛管布设方式改变了每个滴头的灌水量(灌水量相同条件下,一行两管的滴头更多,单个滴头的灌水量更小),施肥周期改变了单次施肥量,不同毛管布设方式和施肥周期的组合,导致了土壤中水分和氮素分布的差异。一行一管施肥、周期15 d处理下苹果根区土壤中水分和氮素的分布更有利于加快细根周转。HENDRICK等^[50]认为土壤氮含量可能加快细根周转,也可能减

缓细根周转,这取决于植物品种、植物整体碳平衡和土壤有效养分分布的空间异质性等。滴灌条件下,水肥耦合效应会影响细根对水氮的吸收效率,改变植物体内的碳分配,使呼吸强度发生变化^[14],从而影响细根周转。当根区水氮供应稳定充足时,为协调细根氮含量和呼吸速率的关系,果树必须在新的部位长出新根,代替旧根吸收水分和养分,加快细根周转和更新,避免过多的根呼吸消耗更多的能量^[51-52]。总体而言,一行一管施肥、周期 15 d 处理提高了根系现存量和新生量,加快细根周转,可优化苹果树细根的空间分布。

4 结 论

(1)细根现存量和生长量在两年的动态变化均为单峰曲线,细根现存量峰值出现在 7 月,细根生长量峰值出现在 5—6 月;细根死亡量为双峰曲线,两个峰值在 2020 年分别出现在 8 月中下旬和 9 月中下旬,在 2021 年有所提前。

(2)施肥周期对苹果树细根现存量、生长量和死亡量均有极显著影响,与施肥周期 30 d 相比,施肥周期 15 d 在时间和空间上均能显著提高细根现存量、生长量和死亡量,在 2020 年的 0 ~ 19 cm 土层和 2021 年的 19 ~ 38 cm 土层提高幅度最大。

(3)毛管布设方式对苹果树细根现存量和死亡量的影响在时间上未达到显著水平,对细根生长量的影响随季节的变化而变化。在空间上,毛管布设方式对不同土层的影响不同,一行一管细根现存量、生长量和死亡量峰值均较一行两管向下推移 20 ~ 40 cm,在 19 ~ 38 cm 土层中一行两管细根现存量、生长量和死亡量显著大于一行一管,在 57 ~ 76 cm 土层中规律相反。

(4)毛管布设方式和施肥周期及其交互作用均对根系周转率有显著影响,一行一管施肥周期 15 d 较其他处理能够加快细根周转。相较其他处理,一行一管、施肥周期 15 d 处理更有利于增加细根现存量和生长量,同时会提高细根死亡量。

参 考 文 献

[1] 唐笑天. 陕西苹果产业发展存在问题及对策建议[J]. 山西果树, 2015(1):30-31.

[2] 曹裕,程科,王学春,等. 陕西渭北旱原苹果种植区划与产业发展战略[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(3):46-50. CAO Yu, CHENG Ke, WANG Xuechun, et al. Regional planning of apple planting and development strategy of apple industry in Weibei highland of Shaanxi Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(3):46-50. (in Chinese)

[3] 李炳富,夏俊海,张林森,等. 陕西渭北苹果园节水灌溉关键技术[J]. 杨凌职业技术学院学报, 2012, 11(2):42-44. LI Bingfu, XIA Junhai, ZHANG Linsen, et al. Key technology of water-saving irrigation in apple orchard of Weibei Area in Shaanxi Province[J]. Journal of Yangling Vocational & Technical College, 2012, 11(2):42-44. (in Chinese)

[4] 路超,王金政,薛晓敏,等. 三种灌溉方式对成龄苹果树体生长发育和产量及品质的影响[J]. 落叶果树, 2011, 43(6):7-14.

[5] 郭民主. 提升陕西苹果生产水平关键技术(二)活化土、饱施肥、适灌水[J]. 西北园艺(果树), 2019(3):10-12.

[6] 杜晓东,程玉豆,陈光荣,等. 果树水肥一体化研究进展[J]. 河北农业科学, 2016, 20(2):23-26. DU Xiaodong, CHENG Yudou, CHEN Guangrong, et al. Research progress about fertigation of fruit trees[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2016, 20(2):23-26. (in Chinese)

[7] 赵佐平,段敏,同延安. 不同施肥技术对不同生态区苹果产量及品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(5):158-165. ZHAO Zuoping, DUAN Min, TONG Yan'an. Effects of different fertilizations on yield and fruit quality of Fuji apple in different ecological regions[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(5):158-165. (in Chinese)

[8] 张妙仙. 滴灌土壤湿润体与作物根系优化匹配研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(1):110-113. ZHANG Miaoxian. Optimum matching between soil infiltration body and crop root system under trickle irrigation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(1):110-113. (in Chinese)

[9] 李久生,李益农,栗岩峰,等. 现代灌溉水肥精量调控原理与应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, 16(5):373-384. LI Jiusheng, LI Yinong, LI Yanfeng, et al. Principle and application of precise regulating water and fertilizers for modernized irrigation technologies[J]. Journal of China Institute Water Resource and Hydropower Research, 2018, 16(5):373-384. (in Chinese)

[10] 张志昊,王珍,栗岩峰,等. 滴灌系统毛管单/双向供水方式对灌水和施肥均匀性的影响[J]. 水利学报, 2020, 51(6):727-737. ZHANG Zhihao, WANG Zhen, LI Yanfeng, et al. Effect of lateral layout on fertigation uniformity in drip irrigation system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(6):727-737. (in Chinese)

[11] 任雪菲,李丙智,张林森,等. 苹果中间砧入土深度对根系生长及其激素含量和果实产量品质的影响[J]. 园艺学报, 2013, 40(11):2127-2136. REN Xuefei, LI Bingzhi, ZHANG Linsen, et al. Effects of planting depth of apple dwarfing rootstock on root growth, hormone content, fruit yields and quality[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2013, 40(11):2127-2136. (in Chinese)

[12] 刘照霞,邢玥,吴晓娴,等. 矮化中间砧苹果施氮位置对细根分布、氮素吸收和产量品质的影响[J]. 园艺学报, 2021, 48(2):219-232. LIU Zhaoxia, XING Yue, WU Xiaoxian, et al. Effects of nitrogen application position on fine root distribution, nitrogen

absorption,yield and quality of dwarfing interstock apple trees[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2021, 48(2): 219 – 232. (in Chinese)

[13] 张学琴,马娟娟,孙西欢,等. 不同灌水方法对苹果树果实膨大期根系生长和土壤酶活性的影响研究[J]. *节水灌溉*, 2016(3):1 – 5,10.

ZHANG Xueqin, MA Juanjuan, SUN Xihuan, et al. Effects of different irrigation methods on root growth and soil enzyme activities of apple tree in fruit expanding stage[J]. *Water Saving Irrigation*, 2016(3):1 – 5,10. (in Chinese)

[14] 张小朋,殷有,于立忠,等. 土壤水分与养分对树木细根生物量及生产力的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2010, 27(4): 606 – 613.

ZHANG Xiaopeng, YIN You, YU Lizhong, et al. Influence of water and soil nutrients on biomass and productivity of fine tree roots: a review[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2010, 27(4): 606 – 613. (in Chinese)

[15] 王政权,张彦东,王庆成. 氮、磷对胡桃楸幼苗根系生长的影响[J]. *东北林业大学学报*, 1999, 27(1):1 – 4.

WANG Zhengquan, ZHANG Yandong, WANG Qingcheng. Effects of nitrogen and phosphorus on root growth of *Juglans mandshurica*[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 1999, 27(1):1 – 4. (in Chinese)

[16] 山仑,张岁岐. 节水农业及其生物学基础[J]. *水土保持研究*, 1999, 6(1):3 – 7,14.

SHAN Lun, ZHANG Suiqi. Water saving agriculture and its biological basis[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1999,6(1):3 – 7,14. (in Chinese)

[17] 颜克发,彭福田,房龙,等. 不同灌溉施肥处理对桃园土壤水肥状况以及植株生长的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3):160 – 164,283.

YAN Kefa, PENG Futian, FANG Long, et al. Effects of different irrigation and fertilizer methods on soil moisture, nutrient and plant growth in peach orchard[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3):160 – 164,283. (in Chinese)

[18] 蔡焕杰,邵光成,张振华. 棉花膜下滴灌毛管布置方式的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2002,18(1):45 – 48.

CAI Huanjie, SHAO Guangcheng, ZHANG Zhenhua. Lateral layout of drip irrigation under plastic mulch for cotton[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(1): 45 – 48. (in Chinese)

[19] 曹伟,魏光辉,李汉飞. 干旱区不同毛管布置方式下膜下滴灌棉花根系分布特征研究[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(4):159 – 162.

CAO Wei,WEI Guanghui,LI Hanfei. Root distribution characteristics of cotton under drip irrigation with different capillary arrangements in arid area[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(4):159 – 162. (in Chinese)

[20] 陈四龙,裴冬,王振华,等. 华北平原膜下滴灌棉花水分利用效率及产量对供水方式响应研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(6):26 – 31.

CHEN Silong, PEI Dong, WANG Zhenhua, et al. Influence of irrigation modes on water consumption and yield of cotton with drip irrigation under plastic mulch in North China Plain[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(6):26 – 31. (in Chinese)

[21] 李明思,孙海燕,谢云,等. 滴头流量对土壤湿润度的影响研究[J]. *沈阳农业大学学报*, 2004, 35(5):420 – 422.

LI Mingsi, SUN Haiyan, XIE Yun, et al. Effects of drip discharge on the wetting soil[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2004, 35(5):420 – 422. (in Chinese)

[22] 栗岩峰,李久生,饶敏杰. 滴灌系统运行方式施肥频率对番茄产量与根系分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(7):1419 – 1427.

LI Yanfeng, LI Jiusheng, RAO Minjie. Effects of drip fertigation strategies and frequencies on yield and root distribution of tomato[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(7):1419 – 1427. (in Chinese)

[23] 张绍武. 基于根区土壤水氮分布的苹果园滴灌施肥技术参数优选研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019.

ZHANG Shaowu. Optimization of technical parameters of drip fertigation based on apple root-zone soil water and nitrogen distribution[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)

[24] 马士萌,佟玲,王素芬,等. 灌水技术参数对覆膜制种玉米生长与蒸腾耗水的影响[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(9): 396 – 406, 438.

MA Shimeng, TONG Ling, WANG Sufen, et al. Effect of irrigation technical parameters on growth and transpiration and water consumption of seed maize under film[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023,54(9):396 – 406, 438. (in Chinese)

[25] 衣若晨,申孝军,李松敏,等. 豫北地区冬小麦滴灌灌水技术参数研究[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(2):208 – 216.

YI Ruochen, SHEN Xiaojun, LI Songmin, et al. Research on drip irrigation technical parameters of winter wheat in Northern Henan Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2):208 – 216. (in Chinese)

[26] 李灿. 滴灌施肥技术参数对苹果产量品质的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2021.

LI Can. Effects of technical parameters of drip fertigation on apple yield and quality [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021. (in Chinese)

[27] 罗利华. 水肥一体化模式对苹果矿质元素含量的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2021.

LUO Lihua. Effect of fertigation mode on content of several mineral elements in apple tree [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021. (in Chinese)

[28] 李鸿祥. 滴灌施肥技术参数对苹果树细根生长及分布的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2020.

LI Hongxiang. Effects of technical parameters of drip fertigation on the growth and distribution of fine roots of apple trees [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020. (in Chinese)

[29] 刘星,曹红霞,廖阳,等. 滴灌模式对黄土高原苹果树生长、产量及根系分布的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(4):57 – 66,120.

LIU Xing, CAO Hongxia, LIAO Yang, et al. Effects of drip irrigation methods on the growth, yield and root distribution of

- apple trees on the Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(4):57–66,120. (in Chinese)
- [30] 刘凯. 基于微根管成像的林木根系检测技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
LIU Kai. Research on measurement technology of tree root via minirhizotron images[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021. (in Chinese)
- [31] 熊德成, 黄锦学, 陈仕东, 等. 微根管和根箱法在亚热带细根寿命研究中的应用[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2024, 19(2):9–14.
XIONG Decheng, HUANG Jinxue, CHEN Shidong, et al. The application of minirhizotron and root box methods for the study of fine root longevity in subtropical forests[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2024, 19(2):9–14. (in Chinese)
- [32] ITOH S. In situ measurement of rooting density by micro-rhizotron[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1985, 31:653–656.
- [33] 张小全, 吴可红. 森林细根生产和周转研究[J]. *林业科学*, 2001, 37(3):126–138.
ZHANG Xiaoquan, WU Kehong. Fine-root production and turnover for forest ecosystems[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(3):126–138. (in Chinese)
- [34] FOGEL R. Root turnover and productivity of coniferous forests[J]. *Plant and Soil*, 1983, 71(1):75–85.
- [35] GILL R A, JACKSON R B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems[J]. *New Phytologist*, 2000, 147(1):13–31.
- [36] ADAMS T S, EISSENSTAT D M. On the controls of root lifespan: assessing the role of soluble phenolics[J]. *Plant and Soil*, 2015, 392(1–2):301–308.
- [37] STEELE S J, GOWER S T, VOGEL J G, et al. Root mass, net primary production and turnover in aspen, jack pine and black spruce forests in Saskatchewan and Manitoba, Canada[J]. *Tree Physiology*, 1997, 17(8–9):577–587.
- [38] 曲泽洲, 韩其谦. 苹果根系生长与地上部生长的相互关系[J]. *园艺学报*, 1983, 1(1):25–33.
QU Zezhou, HAN Qiqian. Studies on the relationship between root and top growth of apple[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 1983, 1(1):25–33. (in Chinese)
- [39] 刘江山, 楚发美, 林庄书, 等. 苹果不同类型树根系生长状况及其与地上部的相关性调查[J]. *落叶果树*, 1992(1):35–36.
- [40] 姜红英. 水曲柳和落叶松细根生产、死亡和周转及其对长期施肥的反应[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
JIANG Hongying. Fine root production, mortality and turnover and effects of nitrogen addition in *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelini* plantations[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011. (in Chinese)
- [41] 李向飞, 邵文超, 景璐, 等. 评述影响细根生长量、死亡量的几种因子[J]. *温带林业研究*, 2020, 3(2):31–33.
LI Xiangfei, TAI Wenchao, JING Lu, et al. Several influencing factors on the production and mortality of fine roots[J]. *Journal of Temperate Forestry Research*, 2020, 3(2):31–33. (in Chinese)
- [42] 杨冬艳, 桑婷, 冯海萍, 等. 灌溉频率对日光温室早春茬黄瓜果实发育及根系分布的影响[J]. *节水灌溉*, 2022(4):31–36.
YANG Dongyan, SANG Ting, FENG Haiping, et al. Effects of irrigation frequency on fruit development and root distribution of early spring cucumber in solar greenhouse[J]. *Water Saving Irrigation*, 2022(4):31–36. (in Chinese)
- [43] 朱建军, 范晓芬, 苏振洪, 等. 施肥浓度与周期对杂交兰组培苗根系生长的影响[J]. *上海农业学报*, 2014, 30(1):9–12.
ZHU Jianjun, FAN Xiaofen, SU Zhenhong, et al. Effects of fertilization concentrations and cycles on the root growth of tissue-cultured plantlets of hybrid cymbidium[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2014, 30(1):9–12. (in Chinese)
- [44] 梅莉, 王政权, 程云环, 等. 林木细根寿命及其影响因子研究进展[J]. *植物生态学报*, 2004, 28(5):704–710.
MEI Li, WANG Zhengquan, CHENG Yunhuan, et al. A review: factors influencing fine root longevity in forest ecosystems[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2004, 28(5):704–710. (in Chinese)
- [45] 王瑞丽, 程瑞梅, 肖文发, 等. 森林细根生产和周转的影响因素[J]. *世界林业研究*, 2012, 25(1):19–24.
WANG Ruili, CHENG Ruimei, XIAO Wenfa, et al. Influencing factors of fine root production and turnover in forest ecosystem[J]. *World Forestry Research*, 2012, 25(1):19–24. (in Chinese)
- [46] 梅莉, 韩有志, 于水强, 等. 水曲柳人工林细根季节动态及其影响因素[J]. *林业科学*, 2006, 42(9):7–12.
MEI Li, HAN Youzhi, YU Shuiqiang, et al. Impact factors on fine roots seasonal dynamics in *Fraxinus mandshurica* plantation[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(9):7–12. (in Chinese)
- [47] BURTON A J, PREGITZER K S, HENDRICK R L. Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests[J]. *Oecologia*, 2000, 125(3):389–399.
- [48] 刘海. 柏木细根形态的季节动态及其对土壤环境变化的响应[D]. 雅安: 四川农业大学, 2020.
LIU Hai. Seasonal dynamics of fine root morphology of *Cupressus funebris* and its response to soil environment change[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [49] GAUL D, HERTEL D, BORKEN W, et al. Effects of experimental drought on the fine root system of mature Norway spruce[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(5):1151–1159.
- [50] HENDRICK R L, PREGITZER K S. Applications of minirhizotrons to understand root function in forests and other natural ecosystems[J]. *Plant and Soil*, 1996, 185(2):293–304.
- [51] JOHNSON M G, PHILLIPS D L, TINGEY D T, et al. Effects of elevated CO₂, N-fertilization, and season on survival of ponderosa pine fine roots[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, 30(2):220–228.
- [52] MAJDI H, ANDERSSON P. Fine root production and turnover in a Norway spruce stand in Northern Sweden: effects of nitrogen and water manipulation[J]. *Ecosystems*, 2005, 8(2):191–199.