

滴灌施肥周期和毛管布设方式对苹果树 细根直径时空分布的影响

陈静航¹, 叶蕊蕊¹, 孙建喜¹, 罗利华¹, 李 灿¹, 吴 勇², 胡田田¹

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

2.全国农业技术推广服务中心节水农业处, 北京 100125)

摘 要:为探明不同滴灌施肥策略对苹果树细根直径的调控效应,于 2019—2021 年开展二因素二水平完全组合设计田间试验,毛管布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,分苹果树正南、正西及东北 3 个方位和 0~19、19~38、38~57、57~76 cm 不同深度土层,持续观测苹果树活跃生长期细根直径的动态变化,分析了苹果树细根直径对毛管布设方式和施肥周期的响应。结果表明:细根直径主要集中在 0.5~1.5 mm 范围内,约占 90%,0~0.5 mm 和 1.5~2.0 mm 直径的细根占比很少。在夏季之前,直径 ≤ 1.0 mm 的细根增多;夏季之后,细根直径加粗,直径 > 1.0 mm 的细根迅速增加。相较于施肥周期 15 d,施肥周期 30 d 在 2020 年 6—11 月和 2021 年 4—7 月均能增加细根直径;在大部分土层中,施肥周期 30 d 会增加细根直径,施肥周期 15 d 会减小细根直径;在 2020 年正南和东北方向上,施肥周期 15 d 会减小细根直径,施肥周期 30 d 会增加细根直径。一行一管较一行两管在 2020 年和 2021 年 8 月均能增加细根直径;在浅中层土壤(0~38 cm 土层)中,一行两管趋向于增加细根直径,在中深层土壤(38~76 cm 土层)中,一行一管趋向于增加细根直径;在 2021 年正南和东北方向上,一行一管会增加细根直径,一行两管会减少细根直径。

关键词:苹果树;细根直径;滴灌施肥周期;毛管布设方式

中图分类号:S661.1;S275.6 **文献标志码:**A

Effects of drip irrigation and fertilization cycle and capillary layout on spatio-temporal distribution of fine root diameters in apple trees

CHEN Jinghang¹, YE Ruirui¹, SUN Jianxi¹, LUO Lihua¹, LI Can¹, Wu Yong², HU Tiantian¹

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

2.National Agricultural Technology Push Light Service Center Water-Saving Agriculture Division, Beijing 100125, China)

Abstract: To explore the regulatory effect of different drip irrigation and fertilization strategies on the fine root diameter of apple trees, a field experiment was conducted during 2019–2021 for a two-factor two-level complete combination design. The capillary laying method was set up with one row and one tube and one row and two tubes. The fertilization cycle was set for 15 days and 30 days. The micro root tube in situ monitoring technology was used, which was divided into three directions of the apple tree due south, west and northeast and 0~19 cm, 19~38 cm, 38~57 cm, 57~76 cm soil layers at different depths. The dynamic change of fine root diameter during the active growth period of apple trees was continuously observed, and the response of fine root diameter to capillary arrangement and fertilization cycle of apple trees was analyzed. The results showed that the diameter of fine roots was mainly concentrated in the range of 0.5~1.5 mm, accounting for about 90%, and the diameter of fine roots of 0~0.5 mm and 1.5~2.0 mm was very small. Before July 2020 and June 2021, there was an increase in the number of fine roots with a diameter of ≤ 1.0 mm. After July and June, the diameter of the fine roots was thickened, and the number of

fine roots with a diameter of > 1.0 mm increased rapidly. Compared with the fertilization cycle of 15 days, the fertilization cycle of 30 days increased the fine root diameter in June–November 2020 and April–July 2021. In most soil layers, the fertilization cycle of 30 days increased the fine root diameter, and the fertilization cycle of 15 days reduced the fine root diameter. In the south and northeast directions of 2020, the fertilization cycle of 15 days reduced the fine root diameter, and the fertilization cycle increased the fine root diameter for 30 days. One row and one tube increased the fine root diameter in 2020 and August 2021 compared with one row and two tubes. In shallow middle soils (0~38 cm soil layer), one row and two tubes tended to increase the diameter of fine roots. In medium and deep soils (38~76 cm soil layer), one row and one tube tended to increase the diameter of fine roots. In the south and northeast directions of 2021, one row and one tube increased the diameter of fine roots, and one row and two tubes reduced the diameter of fine roots.

Keywords: apple trees; fine root diameter; drip irrigation fertilization cycle; capillary layout

水肥一体化滴灌模式是实现水肥同时抵达根区土壤的一项先进农业技术^[1],能在减少水资源浪费的同时节约化肥的施用,提高水肥利用效率,从而实现增产增收^[2]。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^[3-4]。滴灌施肥技术参数,如施肥周期、毛管布设方式等,会影响土壤中水分和养分的分布^[5],从而影响植物根系的时空分布,进而影响作物对养分的利用效率。

根系是果树吸收必需养分和有效水分的主要器官,且细根(直径<2 mm)承担了根系大部分的生理功能^[6]。直径是细根重要的形态特征之一,不仅直接反映了其生长发育状况,还体现了细根的功能水平。细根直径越小,氮含量越高,碳含量越低,非木质化程度高,越容易衰老和死亡^[7]。细根直径减小的同时,也会增加自身根长和根表面积,从而提高细根对土壤水分和养分的吸收效率^[8]。当土壤中水肥分布发生变化时,植物会通过增加或减小细根直径来应对环境变化^[9]。曾宏达等^[10]研究发现,土壤性质具有明显的空间变异性,且养分在空间上具有不同分布特征,而植物细根对土壤资源的觅食反应,会导致细根的空间异质性现象^[11-12]。因此,对细根直径时空分布进行研究具有十分重要的科学意义。但根系埋藏在地下,不易研究,传统的根系研究大多采用破坏性取样,如挖掘法、剖面法和土钻法等^[13],但这些方法均会干扰研究对象的正常生长,同时无法对细根直径的变化进行长期监测,可能导致试验结果误差较大。微根管法是一种能观测植物根系在自然状态生长和死亡的新方法^[14],可在不破坏果树生长环境下持续反映细根直径的变化动态,具有成本低、操作简便以及可实现连续观测等优点。

已有研究表明,施肥周期和毛管布设方式对细

根根长密度和根重密度有显著影响^[15],但对细根直径的影响尚未可知。目前微根管根系监测技术多用于森林生态系统研究,采用微根管技术研究苹果树的细根动态变化鲜有报道。基于此,本研究利用微根管法,持续观测不同滴灌施肥技术参数下苹果树细根直径的动态变化,探明毛管布设方式和施肥周期对苹果树细根直径动态变化和空间分布的影响,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°47'4"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。年均气温 9.2℃,昼夜温差 15.7℃,日照时间 2 552 h,多年平均降水量 622 mm,无霜期 167 d,雨热同季,自然条件优越。试验年内气象资料如图 1。

供试苹果树于 2014 年栽植,2016 年挂果,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。果园土壤类型为黑垆土,试验布设前土壤的基础理化性质为:有机质 7.33 g·kg⁻¹,硝态氮 8.96 mg·kg⁻¹,铵态氮 1.58 mg·kg⁻¹,速效磷 17.40 mg·kg⁻¹,速效钾 179.70 mg·kg⁻¹。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。

1.2 试验方案

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)2 个因素,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),采用完全组合设计,共 4 个处理:一行一管施肥周期 15 d(P1T1)、一行一管

施肥周期 30 d (P1T2)、一行两管施肥周期 15 d (P2T1)、一行两管施肥周期 30 d (P2T2)。共布置 4 个试验小区,各小区面积约为 124 m²,每个小区内设 5 次重复。田间布置于 2017 年 10 月苹果采收后开始,本田间试验于 2019 年开始进行。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,其上覆盖地布。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。毛管管径为 16 mm,滴头间距为 0.3 m,滴头流量为 2 L·h⁻¹。各处理灌水定额、灌溉定额和总施肥量相同。

由于试验年(2020—2021 年)苹果树生育期的降雨量较大,同时试验果园实施地布覆盖措施,抑制了土壤水分蒸发,0~80 cm 土层土壤含水率维持在 75%~85%田间持水率水平,能够满足果树生长发育,无需额外灌溉。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⁻¹的安全稀释浓度。当施肥前一天遇上降雨时,酌情调整灌水量。施肥量设置:试验使用的氮肥为尿素,磷、钾肥为磷酸二氢钾,不足的钾肥用氯化钾补充。氮、磷、钾肥每年总量(纯量)分别为 240、195、240 kg·hm⁻²,以滴灌方式施入。每年 10 月底额外沟施有机肥基肥(羊粪) 15 kg·

株⁻¹,有机质含量 23.12%。为确保与施肥周期 15 d 的灌水量相同,施肥周期 30 d 的处理在不施肥时仍然正常灌水。各处理全生育期的施肥量和灌水量见表 1(2020 年由于疫情影响,幼果新梢期之前未灌水施肥,为使两年施肥总量一致,2020 年调整了幼果新梢期之后的施肥比例)。

1.3 测定指标与方法

2019 年 7 月于每个小区分别选择 5 棵长势良好且一致的苹果树,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,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 的微管用黑色塑料袋缠绕覆盖,进行遮光处理,并在顶端开口处加盖防尘盖,避免灰尘和水分进入(图 2)。

2020 年 5 月开始用 PMT-Root 700 根系生长监测系统(Root 700,德国)扫描并采集图片。2020 年 5 月 31 日—2021 年 11 月 10 日期间,每 15 d 观测 1 次,连续观测 27 次(由于冬天土壤冻结和疫情影响,2020 年 12 月至 2021 年 3 月数据缺失)。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 张图片,图片尺寸为 21.7 cm×22.0 cm。使用 Root Analysis 图像分析软件对图片进行分析,获

表 1 2020—2021 年苹果试验灌水施肥情况
Table 1 Apple experiment irrigation and fertilization in 2020–2021

生育期 Growth period	施肥量 Fertilization amount/(kg · hm ⁻²)						灌水量 Irrigation amount/mm
	施肥周期 15 d Fertilization cycle 15 days			施肥周期 30 d Fertilization cycle 30 days			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
萌芽期	(0.0)24.0	(0.0)14.6	(0.0)6.0	(0.0)48.0	(0.0)29.3	(0.0)12.0	(0.0)8.0
Stages in germination	(0.0)24.0	(0.0)14.6	(0.0)6.0	(0.0)0.0	(0.0)0.0	(0.0)0.0	(0.0)4.0
开花坐果期	(0.0)18.0	(0.0)14.6	(0.0)12.0	(0.0)36.0	(0.0)29.3	(0.0)24.0	(0.0)8.0
Blossom and fruit period	(0.0)18.0	(0.0)14.6	(0.0)12.0	(0.0)0.0	(0.0)0.0	(0.0)0.0	(0.0)2.0
幼果新梢期	(36.0)18.0	(24.4)14.6	(18.0)12.0	(72.0)36.0	(48.8)29.3	(36.0)24.0	(10.2)8.0
Young fruit new shoot stage	(36.0)18.0	(24.4)14.6	(18.0)12.0	(0.0)0.0	(0.0)0.0	(0.0)0.0	(10.2)4.0
花芽分化期	(24.0)12.0	(26.3)16.6	(30.0)24.0	(48.0)24.0	(52.6)33.2	(60.0)48.0	(8.7)8.0
Flower bud differentiation stage	(24.0)12.0	(26.3)16.6	(30.0)24.0	(0.0)0.0	(0.0)0.0	(0.0)0.0	(7.4)4.0
膨大初期	(12.0)6.0	(9.8)4.9	(30.0)24.0	(24.0)12.0	(19.6)9.8	(60.0)48.0	(5.9)8.0
Early expansion period	(12.0)6.0	(9.8)4.9	(30.0)24.0	(0.0)0.0	(0.0)0.0	(0.0)0.0	(5.9)4.0
膨大后期	(12.0)6.0	(9.7)4.9	(24.0)24.0	(24.0)12.0	(19.6)9.8	(48.0)48.0	(5.2)8.0
Late expansion period	(12.0)6.0	(9.7)4.9	(24.0)24.0	(0.0)0.0	(0.0)0.0	(0.0)0.0	(5.2)4.0
落叶期	(36.0)36.0	(27.3)27.3	(18.0)18.0	(72.0)72.0	(54.6)54.6	(36.0)36.0	(7.8)12.0
Abscission period	(36.0)36.0	(27.3)27.3	(18.0)18.0	(0.0)0.0	(0.0)0.0	(0.0)0.0	(7.8)8.0
全生育期	(240)240.0	(195)195.0	(240)240.0	(240)240.0	(195)195.0	(240)240.0	(74.3)90.0
Whole growth period							

注:表中括号内数据表示 2020 年苹果试验灌水施肥情况,括号外数据表示 2021 年苹果试验灌水施肥情况。
Note: The data in parentheses in the table represent the irrigation and fertilization situation of apple experiment in 2020, and the data outside parentheses represent the irrigation and fertilization situation of apple experiment in 2021.

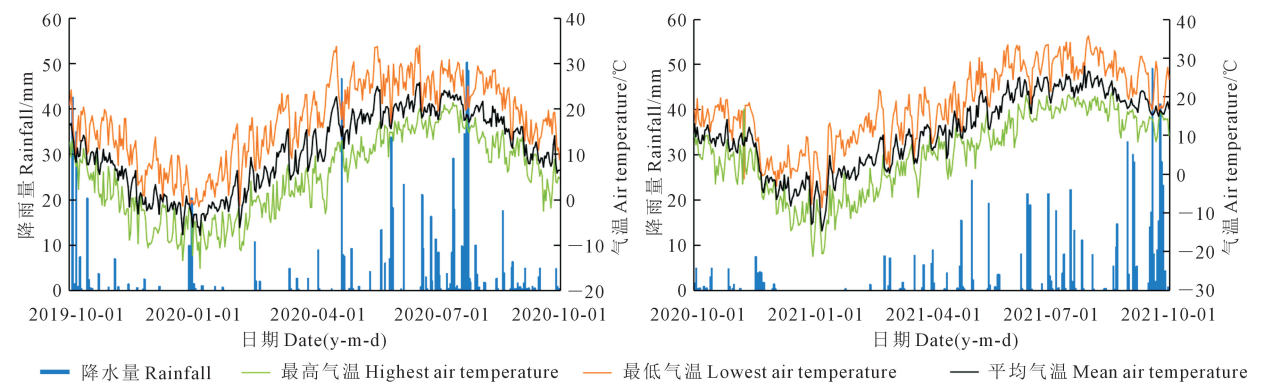


图 1 试验年内气象资料
Fig.1 Meteorological data in the experimental year

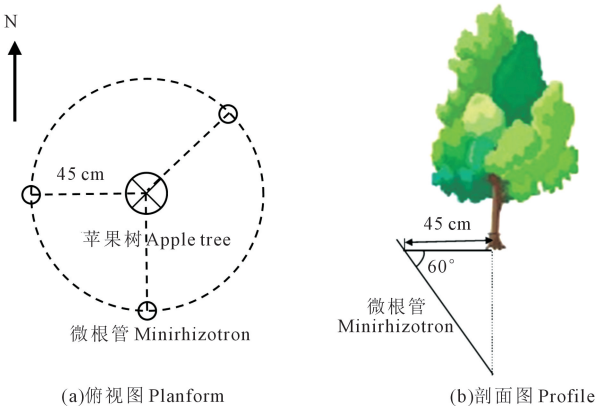


图 2 微根管田间布置图
Fig.2 Field layout of microroot canals

取细根直径数据。将细根直径分为 0~0.5、0.5~1.0、1.0~1.5 mm 和 1.5~2.0 mm 4 个级别,分别记录 4 个级别直径的细根出现的频次,并计算 4 个级别直径的细根频率。

2.3 统计分析

利用 Excel 2016 软件对数据进行预处理,用 SPSS Statistics 17 软件对数据进行分析,采用 Origin 2019 绘图。

2 结果与分析

2.1 苹果树细根直径的统计分析

不同试验处理下,苹果树细根直径在 2020 年和 2021 年 0~76 cm 土层内平均值的方差分析如表 2 所示,施肥周期和毛管布设方式及其二者的交互作用对细根直径均无显著影响。但 2020 年各处理的细根直径均大于 2021 年,这可能是因为 2020 年调整的施肥比例影响了细根直径的变化。

2.2 苹果树细根直径动态变化

对细根直径平均值的方差分析发现,4 个处理之间无显著差异,这可能是因为平均之后抵消了各处理细根直径之间的差异,所以对细根直径进行分

表 2 试验处理对细根直径的影响

处理 Treatment	直径 Diameter/mm	
	2020 年	2021 年
P1T1	0.63a	0.56a
P2T1	0.65a	0.54a
P1T2	0.66a	0.45a
P2T2	0.67a	0.55a
P	ns	ns
T	ns	ns
P×T	ns	ns

注:同列相同字母表示处理间差异不显著 ($P>0.05$), ns 表示无显著影响。

Note: The same letter in the same column means no significant difference between treatments ($P>0.05$), ns means there is no significant effect.

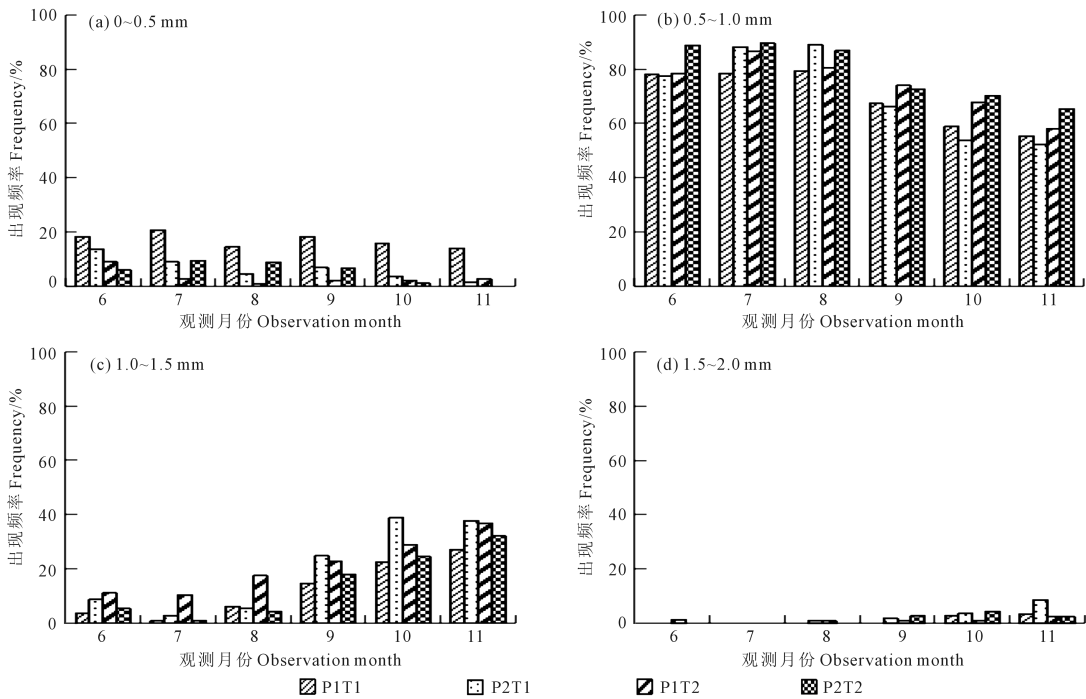
级处理。将细根直径分为 0~0.5、0.5~1.0、1.0~1.5 mm 和 1.5~2.0 mm 4 个级别,分别计算 4 个级别直径细根的出现频率,分析不同直径细根出现频率的时空分布特征。图 3 和图 4 分别表示 2020 年 6—11 月和 2021 年 4—10 月各处理不同直径的细根出现频率随时间的动态变化。可以看出,2020 年和 2021 年细根直径均集中在 0.5~1.5 mm 范围内(约为 90%),0~0.5 mm 和 1.5~2.0 mm 级别的细根直径占比很少。

不同直径细根的出现频率在时间上呈现不同变化趋势。在 2020 年 7 月之前,0~1.0 mm 直径细根的频率随时间的推移略有上升,1.0~2.0 mm 直径细根的频率略有下降;7 月之后,则表现出相反的规律。在 2021 年 6 月之前,0~1.0 mm 直径细根的频率缓慢上升,1.0~2.0 mm 直径细根的频率缓慢下降;6 月之后规律相反。0~2.0 mm 直径细根在 2020 年与 2021 年表现出相似的变化规律,而变化临界时间分别为 7 月和 6 月,这可能是两年气候条件差异所导致的。

毛管布设方式和施肥周期对细根直径有不同影响。在 2020 年 6—11 月,施肥周期 30 d 条件下的 0~0.5 mm 直径细根频率小于施肥周期 15 d 处

理,0.5~1.0 mm 直径细根频率的规律相反(8 月除外);在 2021 年 4—7 月,施肥周期 15 d 条件下的 0.5~1.0 mm 直径细根频率大于施肥周期 30 d 的,1.0~1.5 mm 直径细根频率的规律相反。说明在 2020 年 6—11 月和 2021 年 4—7 月施肥周期 30 d 相较于 15

d 能增加细根直径。在 2020 年 7—8 月和 2021 年 8 月,一行一管条件下的 0.5~1.0 mm 直径细根频率小于一行两管的处理,1.0~1.5 mm 直径细根频率的规律相反,说明在这个时间段一行一管相较于一行两管能增加细根直径。



注:图中 0~0.5、0.5~1.0、1.0~1.5 mm 和 1.5~2.0 mm 分别表示 4 个不同级别的细根直径。下同。

Note: 0~0.5、0.5~1.0、1.0~1.5 mm and 1.5~2.0 mm indicate four different levels diameter of fine root, respectively. The same as below.

图 3 2020 年各处理不同直径细根出现频率的动态变化

Fig.3 Dynamic changes of fine root frequency with different diameters under different treatments in 2020

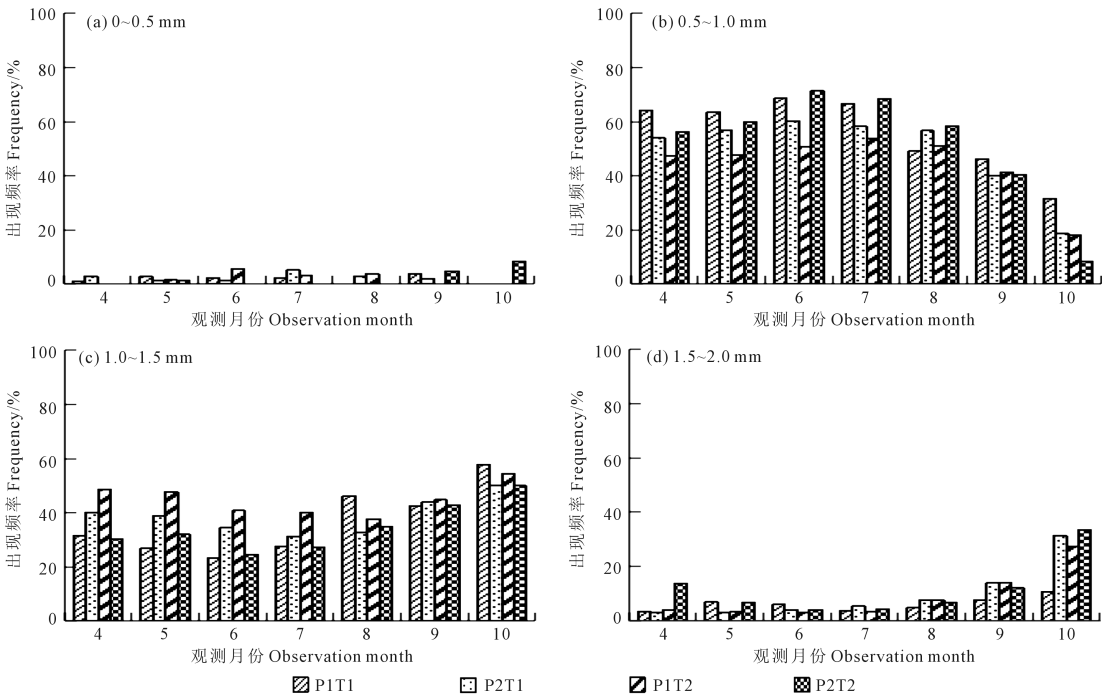


图 4 2021 年各处理不同直径细根出现频率的动态变化

Fig.4 Dynamic changes of fine root frequency with different diameters under different treatments in 2021

2.3 苹果树细根直径的垂直变化

图 5 和图 6 分别表示 2020 年和 2021 年各处理不同直径的细根出现频率在 0~19、19~38、38~57

cm 和 57~76 cm 4 个不同土层深度的垂直分布。可以看出,施肥周期对不同直径细根出现频率的影响在不同土层深度有不同表现。在 2020 年 0~19 cm 和 19

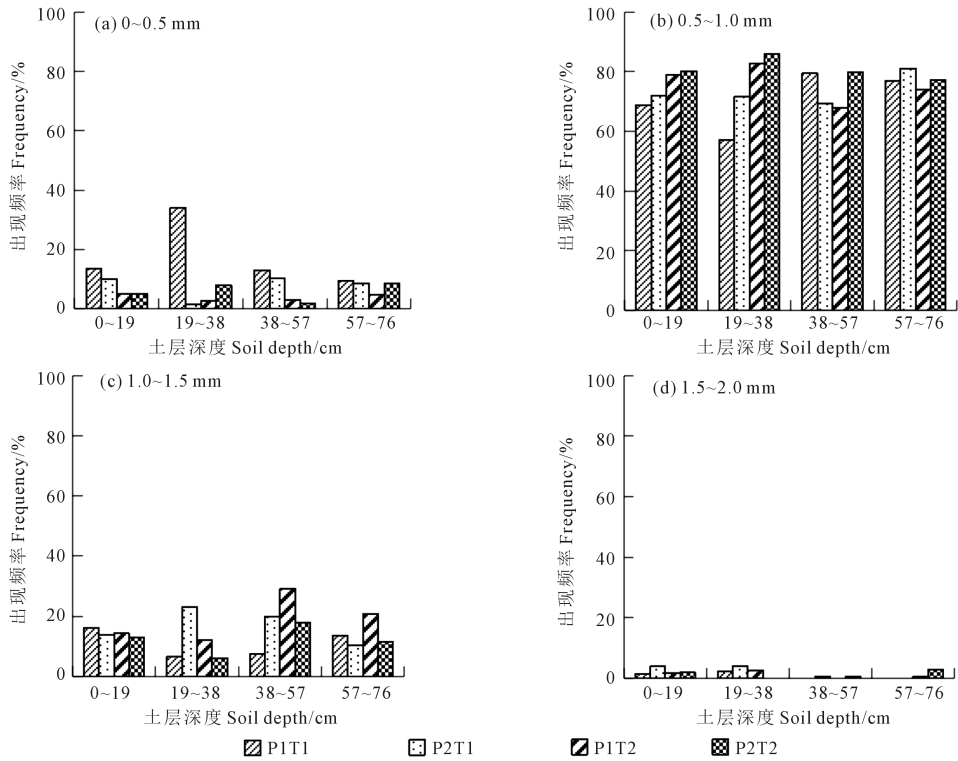


图 5 2020 年各处理不同直径细根出现频率垂直分布特征

Fig.5 Vertical distribution characteristics of fine root frequency with different diameters under different treatments in 2020

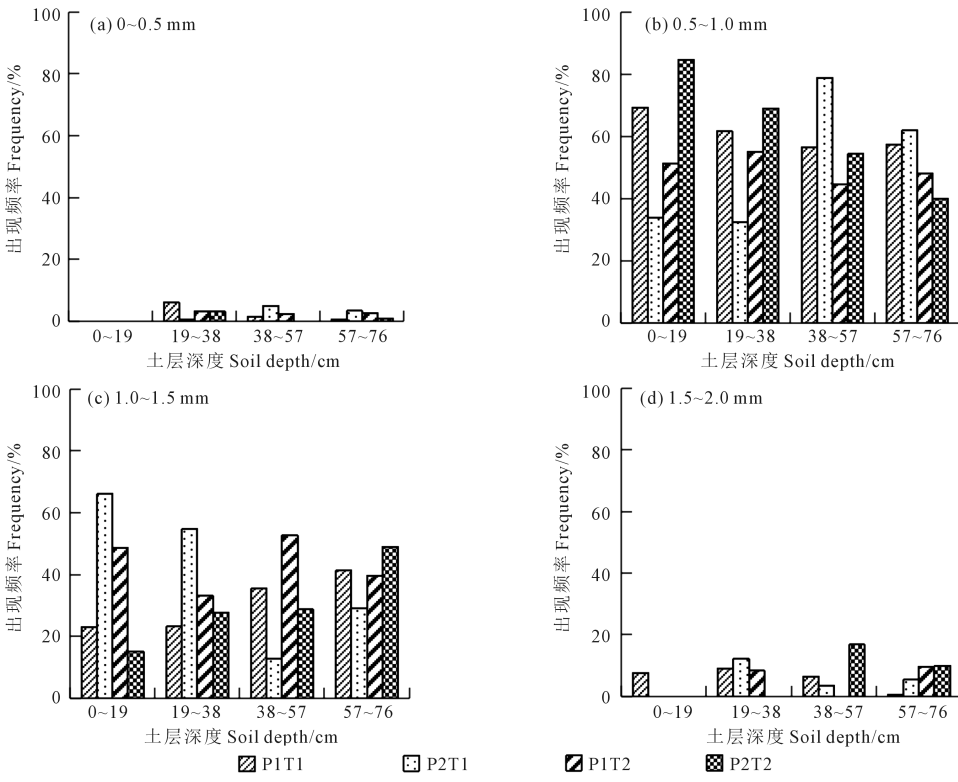


图 6 2021 年各处理不同直径细根出现频率垂直分布特征

Fig.6 Vertical distribution characteristics of fine root frequency with different diameters under different treatments in 2021

~38 cm 土层,相较于施肥周期 30 d,15 d 处理的 0~0.5 mm 直径细根频率显著提高,而 0.5~1.0 mm 直径细根频率显著降低;在 57~76 cm 土层,施肥周期 15 d 较 30 d 处理的 0~1.0 mm 直径细根频率提高,而 1.0~2.0 mm 直径细根频率降低。在 2021 年 38~57 cm 和 57~76 cm 土层,施肥周期 15 d 较 30 d 处理的 0.5~1.0 mm 直径细根频率显著提高,而 1.0~1.5 mm 直径细根频率显著降低。以上结果说明,在 2020 年和 2021 年大部分土层中,施肥周期 30 d 较 15 d 均能增加细根直径。

毛管布设方式对不同直径细根出现频率在不同土层有不同影响。在 2020 年 0~19 cm 和 19~38 cm 土层,一行一管较一行两管显著提高了 0~0.5 mm 直径细根频率,而显著降低了 0.5~1.0 mm 直径细根频率。在 2020 年 57~76 cm 土层和 2021 年 38~57 cm 土层中,一行一管较一行两管显著降低了 0.5~1.0 mm 直径细根频率,而显著提高了 1.0~1.5 mm 直径细根频率。综上可知,在浅中层土壤(0~38 cm 土层)中,一行两管有利于增加细根直径;在中深层土壤(38~76 cm 土层)中,一行一管有利于增加细根直径。

2.4 苹果树细根直径的水平变化

图 7 和图 8 分别表示 2020 年 2021 年不同处理不同直径细根频率在不同水平方向(S、W、X)的分

布。可以看出,在 2020 年,施肥周期 15 d 处理的 0~0.5 mm 直径细根频率在 S、W 和 X 方向上均明显高于施肥周期 30 d,0.5~1.0 mm 直径细根频率在 S 和 X 方向上均明显低于施肥周期 30 d。相较于一行两管,在 2021 年 S 和 X 方向上,一行一管处理的 0.5~1.0 mm 直径细根频率降低,1.0~1.5 mm 直径细根频率均提高。不同处理之间,2020 年,一行一管施肥周期 30 d 处理的 0~0.5 mm 和 0.5~1.0 mm 直径细根频率在 3 个方向上均小于一行两管施肥周期 30 d,反之,1.0~1.5 mm 直径细根频率均大于一行两管施肥周期 30 d。在 2020 和 2021 年 W 方向上,一行一管施肥周期 15 d 处理的 0.5~1.0 mm 直径细根频率最大,1.0~1.5 mm 和 1.5~2.0 mm 直径细根频率最小。综上,在 2020 年 S 和 X 方向上,相较于施肥周期 30 d,15 d 会减少细根直径;在 2021 年 S 和 X 方向上,相较于一行两管,一行一管会增加细根直径;在 15 d 条件下,一行一管布设方式会增加细根直径,而一行两管会减小细根直径;一行一管施肥周期 15 d 处理较其他处理会减小 W 方向上的细根直径。

3 讨 论

细根是果树吸收、输导和贮存水分和养分的重要器官,在果树生理代谢上充当着重要角色,细根直

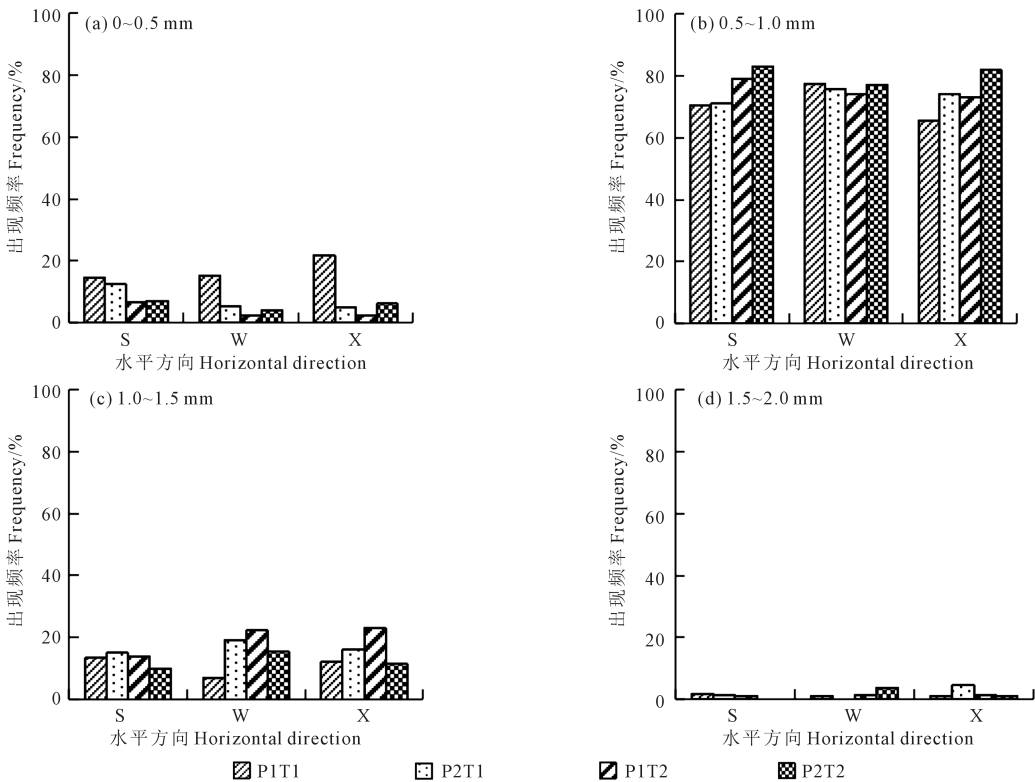


图 7 2020 年各处理不同直径细根出现频率水平分布特征

Fig.7 Horizontal distribution characteristics of fine root frequency with different diameters under different treatments in 2020

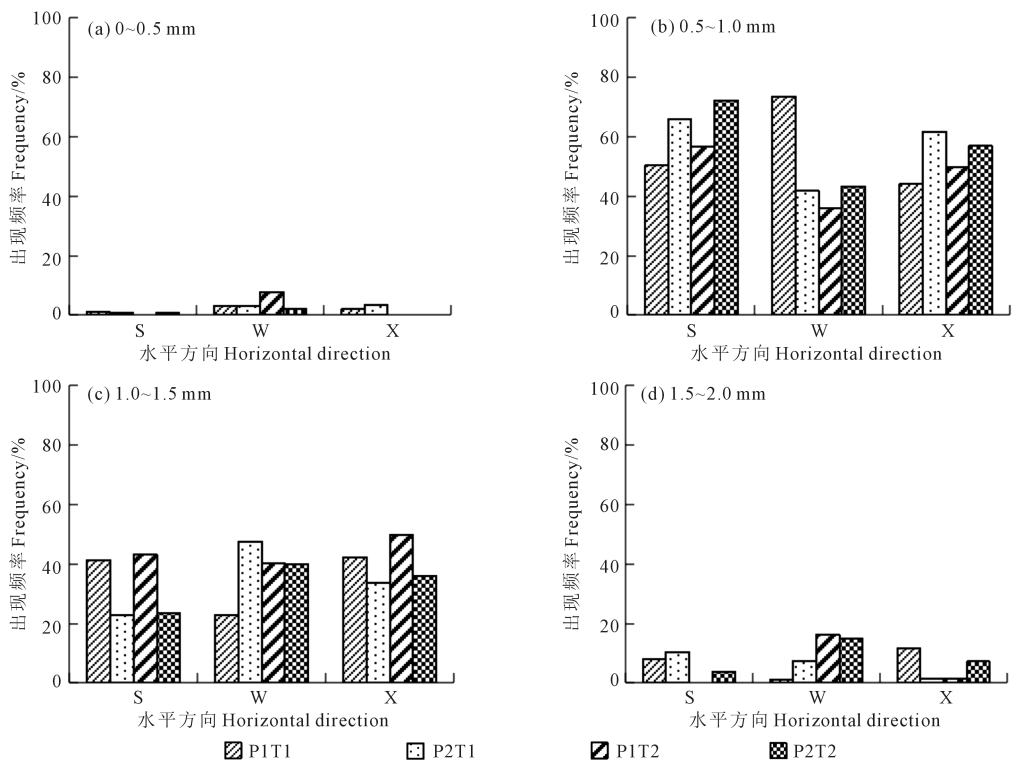


图 8 2021 年各处理不同直径细根出现频率的水平分布特征

Fig.8 Horizontal distribution characteristics of fine root frequency with different diameters under different treatments in 2021

径等形态特征对果树的生长和分布具有十分重要的指示作用,并且能反映部分环境变化信息^[16]。本研究发现,细根直径具有季节性变化特征,7月之前(2021年为6月)小直径细根增加,而7月之后大直径细根增加。Barbaroux等^[17]研究了树体地上部与地下根系的碳分配,结果表明在春季小直径细根会利用上一年秋季较大直径细根贮存的碳水化合物来进行生长发育。Comas等^[18]研究发现,土壤环境变化和不同时期细根对碳的需求共同影响了树体对细根的碳分配。因此,细根直径的季节性变化可能与植物的生理活动有关,在春季,植物为从土壤中获取更多营养物质支持树体的生长发育,会减少细根中的碳投入,诱导小直径细根增加,以提高细根对水分和养分的吸收效率^[19];在夏季和秋季,树体对养分的需求不再迫切,细根的碳分配增加,小直径细根的增加量减少,而大直径细根开始增多,为次年春天细根的发生贮存碳水化合物^[20]。另外,细根直径的季节性变化还可能温度有关,前人研究发现,增温对细根直径具有正面影响^[21],本研究中7月后的平均气温要高于7月前(图1),故7月之后相较于7月之前细根直径有所增加。对于2020年和2021年细根直径变化的临界点分别为7月和6

月,也可能与2020年和2021年开始施肥时间不同有关,即2021年从萌芽期开始施肥,较2020年从幼果新梢期开始施肥有所提前,故2021年直径变化的临界点也早于2020年。

本研究发现,施肥周期15 d较30 d在时空分布上趋向于减小细根直径。细根直径的变化会受土壤有效资源分布的影响。施肥周期改变了单次施肥量和施肥时间,在施肥周期缩短条件下,较高的施肥灌溉频率使根区土壤中水分和养分在时间和空间上分配更均匀充足,而延长施肥周期,会导致根区土壤的水氮分布不均^[22]。于立忠等^[23]在日本落叶松人工林的试验中发现,氮添加处理会显著减小细根的平均直径,这与本文研究结果类似。分析认为,土壤有效养分较为充足时,细根呼吸速率提高,碳投入不能满足呼吸作用的消耗,反而会导致细根直径减小^[24];而土壤有效养分欠充足时,细根会通过增加直径延长寿命,同时保存原有的养分^[25]。而郝倩薇等^[26]研究发现,氮添加处理会增加3级根的细根直径。Liu等^[27]以14个亚热带树种为研究对象发现,氮素对细根直径无显著影响。细根直径对养分的差异化响应可能与养分对细根的限制程度和不同树种对养分的吸收策略有关。

果树会通过调整细根直径使获取资源的效率最优。当养分适宜时,细根可能采取“获取型”资源获取策略^[20],通过减小根系直径、增加细根数、扩大根表面积来增加对土壤资源的利用范围,提高对养分的吸收速率;当养分过高或过低时,限制了细根的生理活动,细根可能采取“保守型”资源获取策略,通过增加细根直径,延长细根寿命,降低呼吸消耗,来减少对养分的消耗。

本研究发现,一行两管在浅中层土壤(0~38 cm 土层)中会增加细根直径,一行一管在中深层土壤(38~76 cm 土层)中会增加细根直径。前人研究表明,毛管布设方式会影响水分和养分在土层空间的运移^[5],一行两管条件下湿润峰的垂直运移距离为 55 cm,一行一管处理的湿润峰则会运移至 77 cm,且一行两管下土壤水分和养分布更均匀^[22],故一行两管处理的水氮分布在浅中层土壤中更均匀,一行一管处理的水氮分布在中深层土壤中更充足。细根直径的变化与土壤养分的分布密切相关,当土壤中有效氮含量增加时,植物可能通过增加细根直径和细根吸收面积来获取足够养分,同时,增加细根直径可以增加细根的运输能力^[28]。因此,在浅中层土壤中一行两管能增加细根直径,在中深层土壤中一行一管能增加细根直径。

4 结 论

1)细根直径主要集中在 0.5~1.5 mm 范围内,0~0.5 mm 和 1.5~2.0 mm 直径细根占比很少。在夏季之前,直径≤1.0 mm 的细根增加,而夏季之后,直径>1.0 mm 的细根迅速增加。

2)施肥周期 30 d 较 15 d 在 2020 年 6—11 月和 2021 年 4—7 月均能增加细根直径;在大部分土层中,施肥周期 30 d 会增加细根直径,施肥周期 15 d 会减小细根直径;在 2020 年正南和东北方向上,施肥周期 15 d 会减小细根直径,施肥周期 30 d 会增加细根直径。

3)一行一管较一行两管在 2020 年和 2021 年 8 月均能增加细根直径;在浅中层土壤(0~38 cm 土层)中,一行两管趋向于增加细根直径,在中深层土壤(38~76 cm 土层)中,一行一管趋向于增加细根直径;在 2021 年正南和东北方向上,一行一管有利于增加细根直径,一行两管则会减少细根直径。

参 考 文 献:

[1] 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 X D, CHENG Y D, CHEN G R, et al. Research progress about

fertigation of fruit trees[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2016, 20(2): 23-26.
[2] 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 Z P, DUAN M, TONG Y A. 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.
[3] 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): 104-107.
ZHANG M X. Optimum matching between soil infiltration body and crop root system under trickle irrigation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(1): 104-107.
[4] 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 J S, LI Y N, LI Y F, et al. Principle and application of precise regulating water and fertilizers for modernized irrigation technologies[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018, 16(5): 373-384.
[5] 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 Z H, WANG Z, LI Y F, et al. Effect of lateral layout on fertigation uniformity in drip irrigation system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(6): 727-737.
[6] 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 X F, LI B Z, ZHANG L S, 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.
[7] 常文静,郭大立. 中国温带、亚热带和热带森林 45 个常见树种细根直径变异[J]. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1248-1257.
CHANG W J, GUO D L. Variation in root diameter among 45 common tree species intemperate, subtropical and tropical forests in China[J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(6): 1248-1257.
[8] 孙文泰,董铁,刘兴禄,等. 覆盖处理苹果细根分布与土壤物理性状响应关系研究[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(2): 88-95.
SUN W T, DONG T, LIU X L, et al. The relationship between root distribution of apple and soil physical properties by different ground covering approaches[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(2): 88-95.
[9] FORDE B, LORENZO H. The nutritional control of root development[J]. Plant and Soil, 2001, 232(1): 51-68.
[10] 曾宏达,杨玉盛,陈光水,等. 不同尺度下森林土壤特性空间变异与取样策略[J]. 亚热带资源与环境学报, 2008, 3(3): 32-39.
ZENG H D, YANG Y S, CHEN G S, et al. Spatial variability and sampling strategy of forest soil in different scales[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2008, 3(3): 32-39.
[11] LIAO L P, DENG S J, YU X J, et al. Growth, distribution and exudation of fine roots of Chinese fir trees grown in continuously cropped plantations[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(4): 569-573.
[12] METCALFE D, MEIR P, ARAGÃO L E O C, et al. Sample sizes for

estimating key ecosystem characteristics in a tropical *terra firme* rain-forest [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255 (3/4): 558-566.

[13] 李俊英,王孟本,史建伟. 应用微根管法测定细根指标方法评述[J]. 生态学杂志, 2007, 26(11): 1842-1848.

LI J Y, WANG M B, SHI J W. Minirhizotron technique in measuring fine root indices;a review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26 (11): 1842-1848.

[14] JOHNSON M G, TINGEY D T, PHILLIPS D L, et al. Advancing fine root research with minirhizotrons[J]. Environmental and Experimental Botany, 2001, 45(3): 263-289.

[15] 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 H X. 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.

[16] 曲秋玲,王国梁,刘国彬,等. 施氮对白羊草细根形态和生长的影响[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 74-79.

QU Q L, WANG G L, LIU G B, et al. Effect of N addition on root morphological characteristics and growth of *Bothriochloa ischaemum* [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(2): 74-79.

[17] BARBAROUX C, BRÉDA N, DUFRÈNE E. Distribution of above-ground and below-ground carbohydrate reserves in adult trees of two contrasting broad-leaved species (*Quercus petraea* and *Fagus sylvatica*) [J]. New Phytologist, 2003, 157(3): 605-615.

[18] COMAS L H, ANDERSON L J, DUNST R M, et al. Canopy and environmental control of root dynamics in a long-term study of Concord grape[J]. New Phytologist, 2005, 167(3): 829-840.

[19] 史建伟.施肥对水曲柳和落叶松细根动态影响研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2006.

SHI J W. Study on the dynamic effects of fertilization on ash willow and larch fine roots[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2006.

[20] 孙文泰,马明,董铁,等. 旱地覆膜苹果树根系年生长周期的时空动态研究[J]. 甘肃农业科技, 2021, 52(10): 55-62.

SUN W T, MA M, DONG T, et al. Spatiotemporal dynamics of root growth during annual growth cycle of apple trees covered with film in dry tableland of eastern Gansu[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2021, 52(10): 55-62.

[21] JARVI M P, BURTON A J. Root respiration and biomass responses to experimental soil warming vary with root diameter and soil depth[J]. Plant and Soil, 2020, 451(1): 435-446.

[22] 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 S W. Optimization of technical parameters of drip fertigation based on apple root-zone soil water and nitrogen distribution[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.

[23] 于立忠,丁国泉,史建伟,等. 施肥对日本落叶松人工林细根直径、根长和比根长的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(5): 957-962.

YU L Z, DING G Q, SHI J W, et al. Effects of fertilization on fine root diameter, root length and specific root length in *Larix kaempferi* plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(5): 957-962.

[24] 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 X Q, WU K H. Fine-root production and turnover for forest ecosystems[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2001, 37(3): 126-138.

[25] FORT F, CRUZ P, LECLOUX E, et al. Grassland root functional parameters vary according to a community-level resource acquisition-conservation trade-off[J]. Journal of Vegetation Science, 2016, 27 (4): 749-758.

[26] 郝倩葳,于水强,曹雨婷,等. 外源养分对麻栎细根生长形态及氮磷含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 66-73.

HAO Q W, YU S Q, CAO Y T, et al. Effects of different exogenous nutrients on fine roots growth, morphology and N and P contents of *Quercus acutissima* [J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2022, 50(4): 66-73.

[27] LIU B T, LI H B, ZHU B, et al. Complementarity in nutrient foraging strategies of absorptive fine roots and arbuscular mycorrhizal fungi across 14 coexisting subtropical tree species[J]. The New Phytologist, 2015, 208(1): 125-136.

[28] 闫国永,王晓春,邢亚娟,等. 兴安落叶松林细根解剖结构和化学组分对 N 沉降的响应[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(4): 36-43.

YAN G Y, WANG X C, XING Y J, et al. Response of root anatomy and tissue chemistry to nitrogen deposition in larch forest in the Great Xing'an Mountains of northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(4): 36-43.