

长期条状施肥下成龄密植库尔勒香梨根系和土壤性状空间关系

邓永辉¹, 充攀¹, 安世杰², 陈奇凌^{2*}, 郑强卿¹, 马凌², 王振东¹, 王国栋³, 刘静⁴,
王欣⁴

(¹新疆农垦科学院林园研究所, 新疆石河子 832000; ²新疆农垦科学院铁门关试验站, 新疆铁门关市 841000; ³新疆农垦科学院农田水利与土壤肥料研究所, 新疆石河子 832000; ⁴塔里木大学园艺与林学院, 新疆阿拉尔 843300)

摘要:【目的】通过探明长期条状施肥下密植成龄库尔勒香梨根系和土壤理化性质的特征, 为密植梨园科学高效水肥管理提供依据。【方法】采用剖面挖掘法和 WinRHIZO 根系分析系统, 分析 11 年生梨园行间距树干 50~200 cm 距离、10~110 cm 深剖面根系的形态和土壤理化性质指标。【结果】梨根长和根表面积均以吸收根为主, 占比分别为 92.57%、62.62%; 根体积以输导根为主, 占比 52.98%。在施肥沟附近, 根长、根表面积的占比最高, 分别为 32.32%、27.06%; 在深度 10~90 cm、水平距离 140 cm 以内的区域, 平均根长密度为 0.62 mm·cm⁻³, 占整个采样区域根长的 75.56%, 表明该区域是梨根系密集分布区。长期条状施肥导致不同养分的富集区存在差异性, 有机质和速效磷在施肥沟处聚集, 表现层性分布的特征, 且在深层土壤含量极少, 其中 10~30 cm 深度土壤有机质、速效磷含量分别是 90~110 cm 深层土壤的 2.62 倍、16.28 倍; 碱解氮和速效钾由施肥沟向主干方向分布显著高于行间方向, 50~80 cm 处土壤碱解氮、速效钾含量分别是 140~170 cm 处土壤 1.35 倍、1.21 倍; 碱解氮和速效钾在深层土壤积累, 90~110 cm 深度碱解氮含量是 10~30 cm 土层的 2.28 倍。10~50 cm 深度土壤, 施肥沟与行间土壤的部分物理性质存在显著差异。与施肥沟处相比, 行间距主干 150 cm 长期受机械碾压处的土壤容重显著增加而孔隙度、饱和持水量、田间持水量均显著下降。吸收根的根长密度与速效磷含量呈极显著正相关关系。【结论】长期条状施肥下, 有机质和速效养分的空间差异性分布以及施肥沟和机械压实处土壤物理性质的差异是成龄密植库尔勒香梨园根系延伸生长的不利因子。

关键词: 库尔勒香梨; 密植; 树龄; 根系; 土壤养分; 空间分布; 条状施肥; 土壤物理性质

中图分类号: S661.2 文献标志码: A 文章编号: 1009-9980(2025)02-0001-08

Spatial relationship between root system and soil properties of mature and densely planted Korla fragrant pear under long-term strip fertilization

DENG Yonghui¹, YAN Pan¹, AN Shijie², CHEN Qiling², ZHENG Qiangqing^{1*}, MA Lin², WANG Zhendong¹, WANG Guodong³, LIU Jin⁴, WANG Xin⁴

(1. Institute of Horticulture, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi, Xinjiang 832000, China; 2. Tiemenguan Experimental Station, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Tiemenguan 841000, Xinjiang; 3. Institute of Agricultural Hydrology and Soil Fertiliser, Xinjiang Academy of

收稿日期: 2024-10-23 接受日期: 2024-12-02

基金项目: 兵团农业科技创新工程专项 (NCG202312), 新疆农垦科学院院级项目 (2023YJ008)。

作者简介: 邓永辉, 男, 助理研究员, 硕士, 研究方向为果树栽培生理生态。E-mail: 923236203@qq.com

*通信作者 Author for correspondence. E-mail: Cql619@163.com

Abstract: 【Objective】 Pear is a billion dollar characteristic forest fruit industry in southern Xinjiang, and Korla fragrant pear is the main cultivated variety. In recent years, the main trunk dense planting pear orchard has developed rapidly and entered the peak fruiting period. With the increase of tree age, problems such as weak tree resistance, easy death, and unstable yield have become prominent in dense planting pear orchards. Fertilization methods affect the distribution of fruit tree roots and nutrient utilization, and are closely related to tree resistance and yield. Fertilization in mature and densely planted pear orchards is often carried out at the edge of the tree crown, about 1 meter away from the main trunk, by opening a strip-shaped ditch for fertilization. As the tree ages, further research is needed to determine whether this fertilization method is reasonable under dense planting conditions. Study the spatial characteristics of root system and soil physicochemical properties of densely planted mature Korla pears under long-term strip fertilization, providing a basis for scientific and efficient water and fertilizer management in densely planted pear orchards. 【Methods】 Using profile excavation method and WinRHIZO root analysis system, the root morphology of 11 year old pear orchard was analyzed at a distance of 50-200 cm between rows and tree trunks, and at a depth of 10-110 cm. Soil organic matter, available nutrients, soil bulk density, porosity, saturated water content, field water holding capacity and other soil physical and chemical properties were measured. 【Results】 The results showed that the length and surface area of pear roots were mainly dominated by absorbing roots, accounting for 92.57% and 62.62%, respectively; The root volume is mainly transported by roots, accounting for 52.98%. In the horizontal direction, the root length and root surface area density are highest near the fertilization ditch, accounting for 32.32% and 27.06% respectively; The proportion of root length and root surface area in the soil layer at a depth of 30-50 cm in the vertical direction is the highest, accounting for 26.33% and 25.99%, respectively. The average root length density in the area with a depth of 10-90 cm and a horizontal distance of 140 cm is 0.62 mm/cm³, accounting for 75.56% of the total root length in the sampling area. It is a densely distributed area of pear root system. There are differences in the enrichment areas of different nutrients in long-term strip fertilization. Organic matter and available phosphorus accumulate at a distance of 1 meter from the main stem in the fertilization ditch, and exhibit layered distribution characteristics. The content of organic matter and available phosphorus in deep soil is extremely low, with soil organic matter and available phosphorus content at a depth of 10-30 cm being 2.62 times and 16.28 times higher than that at a depth of 90-110 cm, respectively; The distribution of alkaline nitrogen and available potassium from the fertilization ditch towards the main stem direction is significantly higher than that towards the inter row direction. The content of alkaline nitrogen and available potassium in the soil at 50-80 cm is 1.35 times and 1.21 times higher than that at 140-170 cm, respectively; Alkaline hydrolyzable nitrogen and available potassium accumulate in deep soil layers, with the alkaline hydrolyzable nitrogen content at depths of 90-110 cm being 2.28 times higher than that at depths of 10-30 cm. There is a significant difference in the

physical properties of soil between fertilization ditches and rows at a depth of 10-50 cm. Compared with the fertilization ditches, the soil bulk density significantly increases at the main stem 150 cm away from rows that are subjected to mechanical compaction for a long time, while porosity, saturated water holding capacity, and field water holding capacity decrease. The nutrient content of roots and soil is closely related to spatial location. The correlation coefficients between V and VI grade roots and soil depth are 0.45 and 0.62, respectively, showing a significant positive correlation and extremely significant positive correlation. The correlation coefficients between I and IV grade roots and horizontal distance are -0.55 and -0.45, respectively, showing a significant negative correlation; The correlation coefficients between organic matter and available phosphorus and soil depth are -0.73 and -0.74, respectively, showing a highly significant negative correlation. The correlation coefficient between alkaline nitrogen and soil depth is 0.55, showing a significant positive correlation. The correlation coefficient between available potassium content and horizontal distance is -0.66, showing a highly significant negative correlation. There is a highly significant positive correlation between grade I-II root systems and available phosphorus, with correlation coefficients of 0.70 and 0.64, respectively.【Conclusion】In summary, under long-term strip fertilization, organic matter and phosphorus nutrients in densely planted pear orchards accumulate in and near the fertilization ditch, and the soil porosity and water holding capacity at the inter row mechanical compaction site decrease. The spatial differences in the distribution of organic matter and available nutrients, as well as the differences in soil physical properties between the fertilization ditch and mechanical compaction site, are unfavorable factors for the root extension and growth of mature densely planted Korla fragrant pear orchards.

Key words: Korla pear; close planting; Tree age; root system; Soil nutrients; Spatial distribution; Strip fertilization; Soil physical properties

梨是新疆南疆的百亿特色林果产业，2022 年新疆梨的产量为 151.37 万 t，全国第二，占比 7.86%，主要栽培品种为库尔勒香梨^[1]。库尔勒香梨皮薄肉细、香味馥郁、酥脆多汁、贮藏性强，受到国内外消费者的喜爱。库尔勒香梨的区域公用品牌价值从 2018 年的 98.88 亿元跃升至 2023 年的 171.28 亿元，在梨类中连续 6 年排名第一^[2]。2022 年新疆生产建设兵团梨产量为 62.41 万 t，占新疆梨产量的 41.23%，主要分布在南疆第一师、第二师和第三师。第二师是新疆香梨优势产区，近年来该产区主干形密植梨园快速发展，并进入盛果期，面积约 0.33 万 hm²^[3]。密植香梨园株行距一般为 1.0 m × 4.0 m，株距和冠幅较传统稀植果园窄，有利于机械化管理。但是，随着树龄增长，密植梨园易出现树体抗性弱、易死亡、产量不稳等问题。施肥方式影响果树根系分布和养分利用，也与树体抗性和产量密切相关^[4]。成龄密植梨园施肥多在树冠边缘，即距主干约 1 m 处开条状沟施肥，随树龄增长，这种密植条件下的施肥方式是否合理还需要进一步的研究。

掌握根系分布特征是高效水肥管理的基础，也对调控树势和产量具有指导意义。关于成龄梨根系多围绕稀植果园开展研究，随树龄增长根系密集区的范围在水平方向不断扩大，如

8年生梨的根系主要分布在水平方向0~1.2 m处^[5],而25年生梨的吸收根主要分布在水平方向0~2.5 m^[6]。在垂直方向上梨根系密集分布的变化相对较小,不同树龄梨树根系主要集中在0.2~0.9 m深度土层^[7],随树龄增长根系密度的最高区域有下移的趋势。除树龄外,栽植密度也影响果树根系分布,栽植密度不同往往导致施肥管理措施的差异化,如稀植梨园以环状沟或钻施肥穴施肥而密植梨园以条状沟施为主。施肥方式造成养分空间的差异性分布,是决定根系分布特征的重要因素。目前,对密植梨园的根系分布特征的研究较为缺乏。已有报道幼龄期密植梨根系主要分布在20~60 cm深度土层^[9],6年生密植梨根系密集区水平方向延伸至距主干1.2 m处^[10],成龄密植梨园根系的分布特征未见报道。

对梨园土壤理化性质的研究多为大尺度区域性分布调查。有研究表明库尔勒垦区香梨园土壤属性空间异质性强^[11],养分具有表聚效应,即随着土壤深度增加,有机质、速效养分含量均逐渐减少^[12]。尽管土壤养分具有较强的空间变异性,但长期的施肥和种植制度能显著影响土壤养分空间分布^[13-14],并呈现出一定规律性。现有的研究多关注大区域养分分布的差异,忽略了在长期稳定水肥管理方式下单个果园土壤养分空间分布的规律性。与稀植梨园不同,新疆密植梨园施肥、打药均已实现机械化,因受行距和载具的限制,行间距主干150 cm附近的土壤长期被机械碾压。在有限的行间距范围内机械频繁通行造成土壤结构发生显著的变化。机械压实易使土壤容重增加、孔隙度下降,不利于养分流动和根系生长^[15]。目前关于密植梨园土壤容重、孔隙度等物理性质的研究较缺乏。

针对长期条状施肥下成龄密植库尔勒香梨根系分布和土壤理化性质特征开展研究,可为密植梨园合理施肥技术创新提供理论支撑,对新疆密植梨园栽培模式的健康持续发展具有重要现实意义。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地位于新疆生产建设兵团第二师29团2连,选择11年生主干形密植库尔勒香梨园,平均产量22 500 kg·hm⁻²,土壤为砂壤土,砧木为杜梨,东西行向,株行距1.0 m×4.0 m,树干的平均基径为9.50 cm,平均冠幅为2.70 m(南北)×1.60 m(东西)。全年漫灌5次,漫灌时间为3月中旬(萌芽期)、5月(新梢生长期、幼果期)、6月或7月(果实膨大期)、8月(果实成熟期)和10月(果实采收后),灌溉定额为11 250 m³·hm⁻²。定植第6年进入结果期后,距离主干约100 cm处开沟施肥,每年生长季追施复合肥800 kg·hm⁻²。10月中旬施基肥1次,隔年施羊粪90 m³·hm⁻²或生物有机肥1000 kg·hm⁻²,添加以磷肥为主的复合肥400 kg·hm⁻²,开沟宽、深均约为20 cm,施羊粪时开沟宽、深均约30 cm。于2023年10月,选取3株平均基径相近、树势健壮的香梨树作为样株,调查根系和土壤理化性质的空间特征。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 根系采集与分析

于10月上旬果实采收后,采用剖面挖掘法调查根系的分布特征。参考常规施肥位置,

调查区域以树干为中心，在南北两侧距离树干 50~200 cm 水平距离处，去除表层 10 cm 土壤后，按照分层取样法采集宽 30 cm、深 110 cm 的区域土壤根系，采样单元的大小为 30 × 30 × 20 cm，具体方法如图 1 所示。将单个采样单元的带根土样倒入 0.1 mm 筛进行浸泡、冲洗，利用 WinRHIZO 根系分析系统对根系进行扫描，分析不同径级根系在各采样单元的根长、根表面积、根体积指标。不同深度和水平距离土层根系占比为该土层所有采样单元总根系与整个采样区域根系比值。参考李宏等^[7]、李楠等^[8]的方法，按照直径大小将梨根系分为 7 个等级，I 级为 0 mm < 直径 < 1 mm，II 级为 1 mm ≤ 直径 < 2 mm，III 级为 2 mm ≤ 直径 < 3 mm，IV 级为 3 mm ≤ 直径 < 4 mm，V 级为 4 mm ≤ 直径 < 5 mm，VI 级为 5 mm ≤ 直径 < 10 mm，VII 级为直径 ≥ 10 mm。根据根系功能描述将梨根系分为吸收根（直径 < 2 mm，对应 I 级和 II 级根系）、输导根（2 mm ≤ 直径 < 10 mm，对应 III~VI 级根系）、粗根（直径 ≥ 10 mm，对应 VII 级根系）^[10]。

按照以下公式计算单个采样单元（土体体积为 18 000 cm³）的根长、根表面积和根体积密度：

$$\text{根长密度 (mm cm}^{-3}\text{)} = \text{根长} / \text{土体体积}$$

$$\text{根表面积密度 (mm}^2\text{ cm}^{-3}\text{)} = \text{根表面积} / \text{土体体积}$$

$$\text{根体积密度 (mm}^3\text{ cm}^{-3}\text{)} = \text{根体积} / \text{土体体积}$$

1.2.2 土壤样品采集与测定

采用常规分析方法测定土壤养分和物理性质^[16]。使用体积为 100 cm³ 的环刀在行间分别距离主干 50、100、150、200 cm 处取土样，垂直方向每 20 cm 深度为一层，取样至 110 cm 深度土壤，测定土壤容重（BD）、孔隙度（TP）、饱和含水量（SMC）和田间持水量（FC）。除根系外同时采集各采样单元的土样，土样风干后用于测定土壤有机质、速效养分含量。利用重铬酸钾容量法-外加热法测定有机质（SOM）含量，利用碱解扩散法测定碱解氮（AN）含量，利用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定速效磷（AP）含量；利用乙酸铵浸提-火焰光度计测定速效钾（AK）含量。

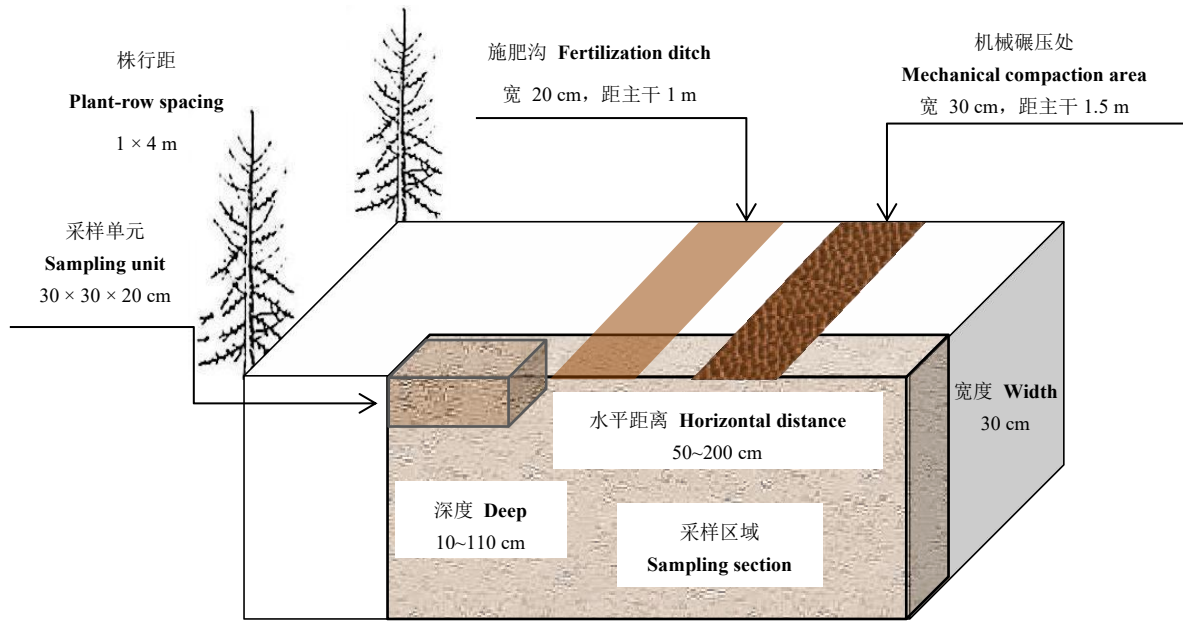


图 1 根系采样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of root sampling

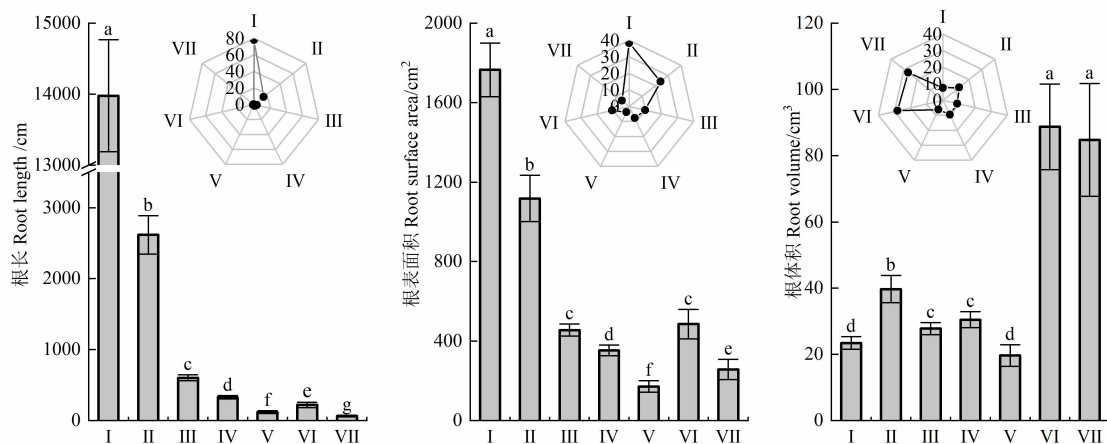
1.3 数据分析

利用 SPSS19 软件进行数据处理与分析，利用 Excel 和 Origin 作图。文中不同小写字母表示样品间差异显著 ($p < 0.05$)。相关性分析中不同径级根系的性状指标为根长密度。

2 结果与分析

2.1 梨不同径级根系组成

由图 2 可知，成龄库尔勒香梨根长和根表面积均以 I~II 级的吸收根为主，占比分别为 92.57%、62.62%。各径级根系中，根长以 I 级根系占比最高为 77.98%，III~VII 级根长占比仅为 0.36%~3.36%；根表面积以 I 级根系占比最高为 38.33%，输导根（III~VII 级）总表面积占比 31.8%，粗根（VII 级）表面积占比仅为 5.58%。根体积以输导根为主，占比 52.98%，吸收根和粗根的占比分别为 20.05%、26.96%。



柱上不同小写字母表示差异显著 ($p < 0.05$)，I~VII 表示不同径级根系。下同。

Different lowercase letters on the column indicate significant differences ($p < 0.05$), I~VII indicate different diameter classes of root systems. The same below.

图 2 不同径级梨根长、根表面积和根体积占比

Fig. 2 Root length, root surface area, root volume and proportion of different diameter grades of pear

2.2 梨根系空间分布特征

由表 1 可知,垂直方向上,根长、根表面积在 30~50 cm 深度土层占比最高,分别为 26.33%、25.99%。水平方向上,根系主要分布在距离主干 140 cm 以内的区域,该区域根长、根表面积、根体积累计占比分别为 81.42%、75.94%、71.61%。其中,水平方向距主干 80~110 cm 施肥沟处的根长和根表面积占比最高,分别为 32.32%、27.06%。

由图 3 可知,成龄库尔勒香梨根系主要分布在深度 10~90 cm、水平距离 50~140 cm 的区域,平均根长密度为 0.62 mm cm⁻³,占整个采样区域根长的 75.56%。深度 10~30 cm 的土壤根系分布范围小,水平距离距主干 140 cm 以外的区域无根系分布。深度 30~110 cm 的土壤根系分布范围大,水平距离均延伸至距主干 200 cm 处,距主干 140 cm 以外区域的平均根长密度为 0.18 mm cm⁻³,根系较为稀疏。根表面积和根体积密集区在空间中的分布与根长密集区分布相似,整体上根系呈现倾斜向下分布的特征,随深度增加密集区域向外移动。

由图 3 采样区域各单元不同径级根系组成可知,吸收根的分布范围最大,随根系粗度增加,分布范围逐渐下降。I~III级根系在整个根系分布区均有分布, VII级粗根分布的区域最小,深度 10~30 cm 的土层无粗根,深度 30~110 cm 的土层有粗根,且粗根表现出倾斜向下分布的趋势。在根长密集区吸收根的占比为 77.55%~99.67%,所以根长密集区也是吸收根密集分布区。输导根中 III~IV级分布范围广,与吸收根分布范围基本一致, III~IV级根系发挥运输养分的关键作用。

表 1 不同深度和水平区域根长、根表面积、根体积占比
Table 1 Proportion of root length, root surface area, and root volume in different vertical and horizontal regions /%

		根长 Root length/cm	根表面积 Root surface area/cm ²	根体积 Root volume/cm ³
土层深度 Soil depth/cm	10~30	19.94 ± 2.53 b	14.03 ± 1.97 b	6.13 ± 1.02 d
	30~50	26.30 ± 2.62 a	25.99 ± 3.87 a	21.26 ± 5.50 bc
	50~70	21.25 ± 4.76 ab	19.43 ± 3.57 a	15.19 ± 3.72 c
	70~90	18.43 ± 2.34 b	21.02 ± 2.85 a	33.18 ± 5.20 a
	90~110	14.08 ± 1.79 c	19.52 ± 2.62 a	24.25 ± 3.00 b
水平距离 Horizontal distance/cm	50~80	25.91 ± 2.50 b	25.89 ± 2.63 a	22.56 ± 5.30 b
	80~110	32.32 ± 1.12 a	27.06 ± 1.73 a	18.19 ± 1.54 b
	110~140	23.19 ± 1.52 b	23.00 ± 1.24 a	30.87 ± 2.00 a
	140~170	7.88 ± 0.84 d	10.57 ± 1.53 b	15.15 ± 1.15 c
	170~200	10.70 ± 1.14 c	13.49 ± 1.95 b	13.23 ± 1.46 c

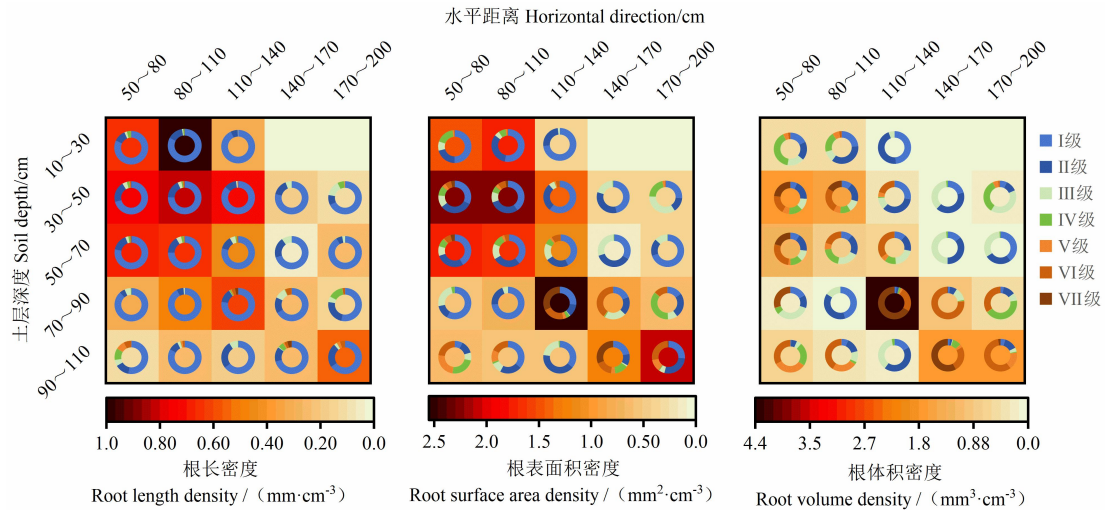


图 3 根长、根表面积和根体积密度空间分布和各采样单元不同径级根系组成

Fig. 3 Spatial distribution of total root length, root surface area, and bulk density, as well as the composition of root systems of different diameter classes in each sampling unit

2.3 土壤养分空间分布特征

由图 4-A 可知,水平方向上,有机质和速效磷在距主干 80~110 cm 处含量最高,其有机质含量分别是 140~170 cm、170~200 cm 处土壤的 1.48 倍、2.43 倍,速效磷含量分别是 2.61 倍、4.05 倍;垂直方向上,有机质和速效磷在 10~50 cm 深度土层含量较高,10~30 cm 上层土壤有机质、速效磷含量分别是 90~110 cm 深层土壤的 2.62 倍、16.28 倍,呈现出养分的表聚效应。在水平方向距树干 50~80 cm、80~110 cm 处碱解氮和速效钾的含量较高,分别为 101.88~103.42 mg·kg⁻¹、294.40~297.20 mg·kg⁻¹,80~110 cm 处土壤碱解氮、速效钾含量分别是 140~170 cm 处土壤 1.33 倍、1.20 倍,是 170~200 cm 处土壤的 1.47 倍、1.29 倍。整体上碱解氮含量随土壤深度增加逐渐升高,90~110 cm 深度土层碱解氮含量是 10~30 cm 土层的 2.28 倍。速效钾在 10~70 cm 深度土层含量相近,70~90 cm、90~110 cm 深层土壤速效钾含量较 50~70 cm 土层分别增加了 13.53%、11.54%。

由图 4-B 可知,密植梨园土壤有机质和速效养分富集区的分布不同。有机质和速效磷在条状施肥沟位置处聚集,同时明显表现出层性分布的特征,在深度 10~50 cm 土层含量较高。碱解氮和速效钾含量在水平距离 50~110 cm 区域较高,并随土壤深度增加含量升高;碱解氮和速效钾在 70~110 cm 深层土壤不断积累,表明漫灌下碱解氮和速效钾向下移动性较强;水平方向移动小,与施肥沟附近相比,行间 140~200 cm 区域碱解氮和速效钾含量下降明显。在 90~110 cm 深层土壤不同水平距离土壤碱解氮含量均较高,说明深层土壤碱解氮的横向移动性增强。

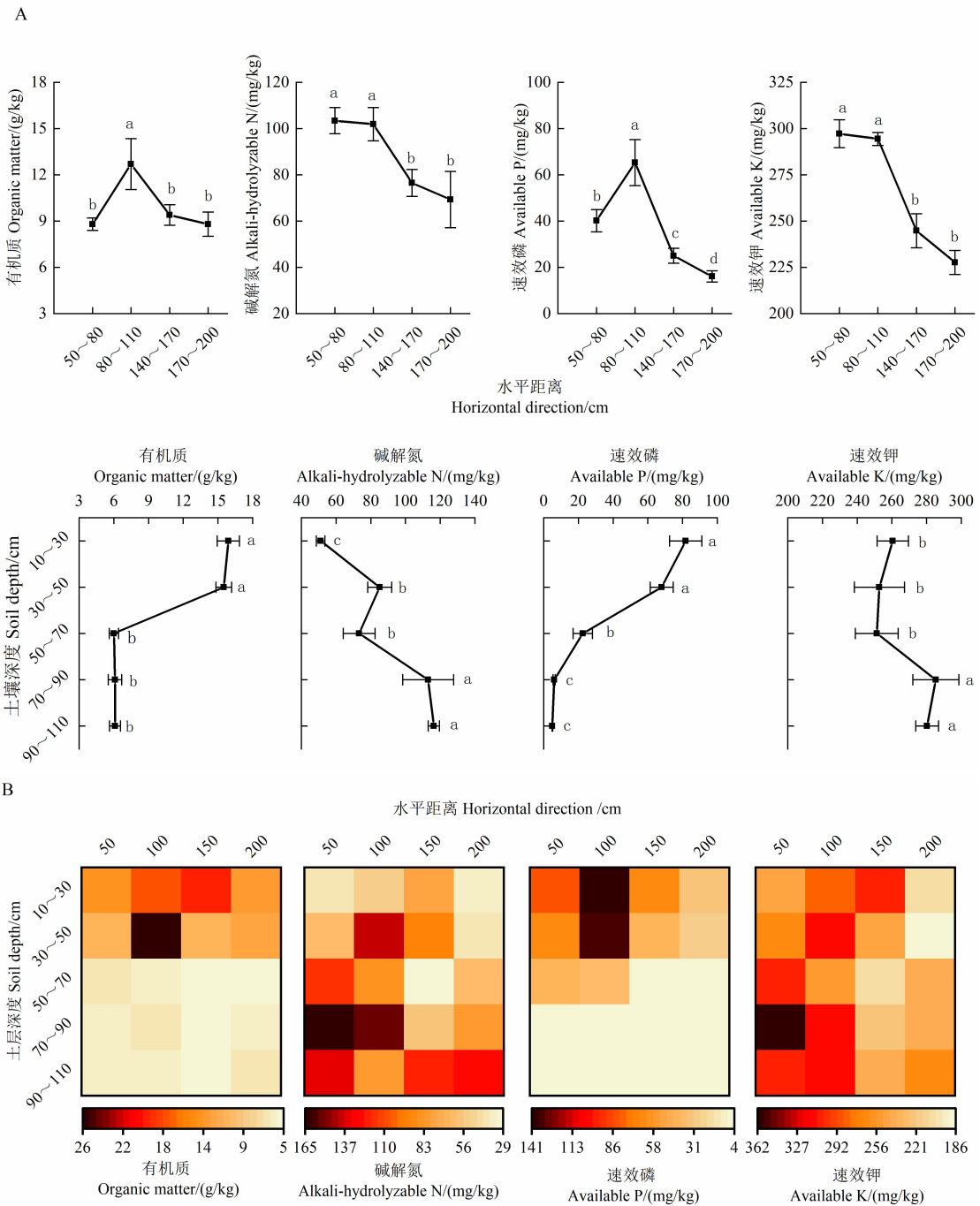


图 4 土壤养分在水平和垂直方向的空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution characteristics of soil nutrients in horizontal and vertical directions

2.4 土壤物理性质空间特征

由图 5 可知，长期条状施肥下 10~50 cm 深度土层，施肥沟和行间土壤部分物理性质存在显著差异，距主干水平距离 100 cm 施肥沟处土壤容重最小，孔隙度、饱和含水量、田间持水量均显著高于其他水平距离。在 10~30 cm 深度，距主干 150 cm 水平距离的行间土壤长期受机械碾压，其容重显著高于距主干 50、100 cm 处，而孔隙度、饱和含水量和田间持水量均显著小于距主干 50、100 cm 处。50~110 cm 深度，不同水平距离的土壤容重无显著差

异；距离主干 50 cm 水平距离的土壤孔隙度、饱和含水量、田间持水量均低于其他水平距离，并在 70~110 cm 深层土壤处均显著低于其他水平距离。

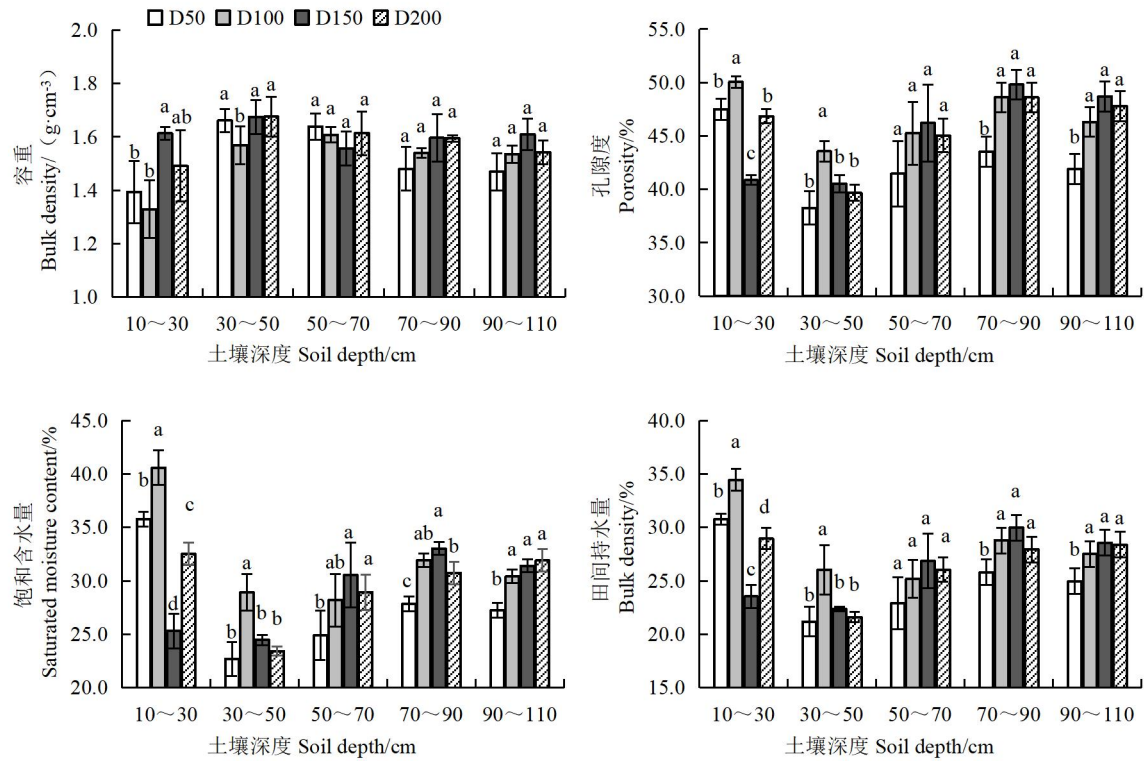


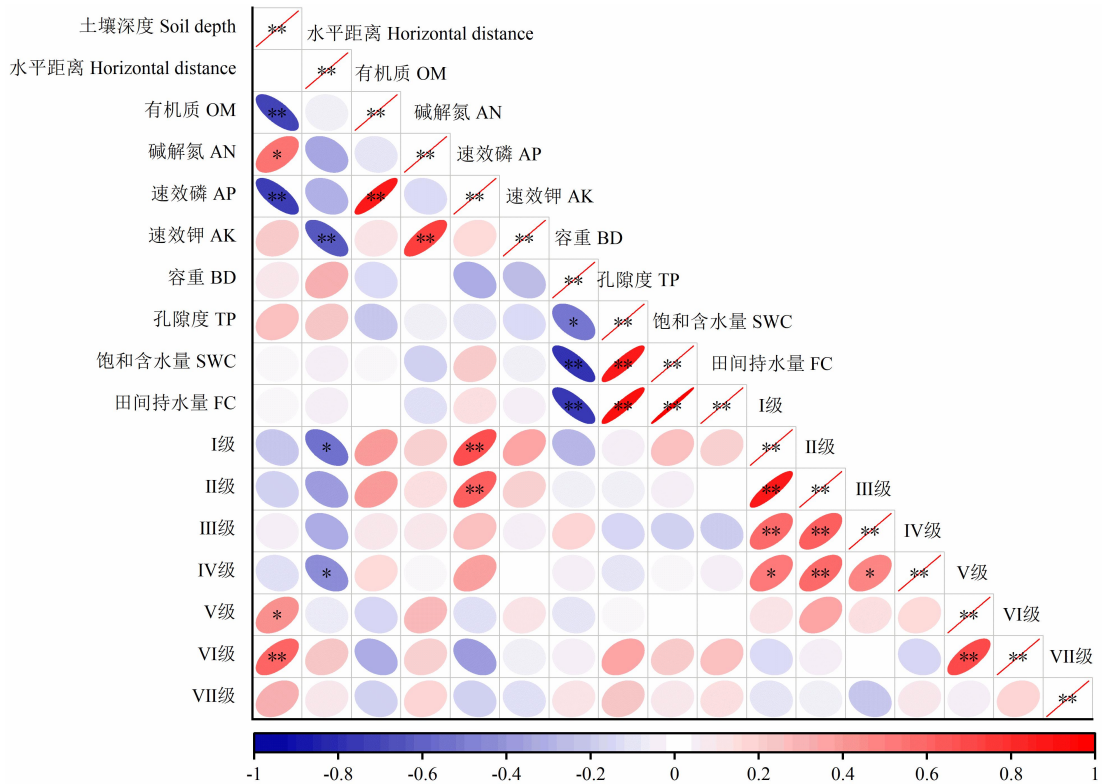
图 5 土壤物理性质的空间特征

Fig. 5 Spatial distribution characteristics of soil nutrients in horizontal and vertical directions

2.5 根系与土壤性状空间相关性分析

由图 6 可知，根系和土壤养分含量与空间位置关系密切。V 级、VI 级根系与土壤深度相关系数分别为 0.45、0.62，分别呈显著正相关、极显著正相关关系；I 级、IV 级根系与水平距离相关系数分别为-0.55、-0.45，呈显著负相关关系。有机质和速效磷与土壤深度的相关系数分别为-0.73、-0.74，均为极显著负相关；碱解氮与土壤深度的相关系数为 0.55，为显著正相关关系；速效钾含量与水平距离相关系数为-0.66，呈极显著负相关关系。

I~II 级根系与速效磷呈极显著正相关关系，相关系数分别为 0.70、0.64。根长密度与土壤容重、孔隙度等物理指标空间分布相关性不显著。



“*”“**” 分别表示在 0.05 水平、0.01 水平上显著相关，红色和蓝色分别代表正相关和负相关。

“*” and “**” indicate significant correlation at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. Red and blue represent positive and negative correlations, respectively.

图 6 根系和土壤养分空间分布相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of root distribution and soil nutrient spatial distribution

3 讨论

3.1 密植成龄库尔勒香梨根系构成和分布特征

成龄库尔勒香梨根长和根表面积始终以直径小于 2 mm 的吸收根为主，其中直径小于 1 mm 的根长占比最高，为 78.0%，这与前人研究结果相似^[5]。幼龄期香梨根系主要分布在 20~60 cm 深度的土层^[9]。本研究表明成龄香梨根系分布的深度和广度增加，与 6 年生库尔勒香梨相比^[10]，10~70 cm 根系密集区根长密度下降，70~110 cm 深层土壤根长密度增长明显，说明成龄香梨树主要通过扩大根系分布范围获取水分和养分，随树龄增长香梨树对深层土壤水分和养分利用增强。

从根系密集区整体分布可见，根系整体呈倾斜向下生长趋势，这种趋势可能受机械压实的影响^[15-17]。在树冠外行间 10~50 cm 深度土壤容重增加，距主干 140 cm 外区域根系密度显著下降，根系表现延伸生长受阻，因此呈现出根系倾斜向下生长趋势，也表明在行间 140~200 cm 范围香梨根系仍有较大的生长空间。与稀植老果园相比^[7-8]，密植香梨园根系密集区分布范围较窄，根系获取水分养分空间小。同时密植香梨园株距窄、冠幅小，成龄后存在株间遮光的情况^[18]，单株光合产物的积累量小，树体储存的养分低于稀植梨园。以上原

因均可能导致密植香梨树体抗性弱、产量不稳。

3.2 密植成龄库尔勒香梨园土壤理化性质空间特征

果园土壤养分呈现出表聚效应，有机质和磷在表层土壤的含量显著高于深层土壤^[12]。本研究表明有机质和速效磷表现明显的层性分布，在深层土壤含量极少，这与前人研究结果相符。汪宗兰等^[11]研究认为库尔勒垦区梨园土壤有机质和速效养分变异与农业生产活动关系密切，采样位置不同导致肥力评价存在差异性。研究大尺度的果园土壤肥力时，采样应该考虑常规的水肥管理措施，单个果园土壤养分空间变异性与水肥管理措施密切相关，如滴灌施肥的养分主要聚集在滴头附近，随土层深度加深，养分含量降低^[19]。生产中密植主干形香梨园一般在距主干 100 cm 行间处开 20 cm 深沟施肥，有机质和速效磷移动性弱，在施肥沟位置聚集，这是养分空间变异大的主要原因。笔者发现在 70~110 cm 深度土壤碱解氮、速效钾的含量远高于在 10~30 cm 深度土壤，说明因长期漫灌碱解氮、速效钾向下运移并在深层土壤积累。研究还发现碱解氮含量在 90~110 cm 深层土壤不同水平距离区域均较高。含水量增加显著促进氮素迁移^[20]。漫灌下 90~110 cm 深层土壤保持较高的含水量，促进碱解氮在水平方向移动。

李勇等^[21]研究表明直径 1 mm 有效根密度和根量的增大，显著增强土壤元素迁移强度，树冠下方靠近主干一侧梨根系密集，更有利于养分在水平方向运移。已有研究表明土壤容重大、孔隙度小不利于土壤水分入渗，造成持水能力下降^[22-23]，抑制根系的生长^[24-25]。距主干约 150 cm 行间因打药施肥反复受机械碾压，每年达 30 次以上，与施肥沟处相比，树冠外行间 10~50 cm 深度土壤容重增加，不利于养分向行间运移，是水平方向养分分布差异的原因之一。

3.3 密植成龄库尔勒香梨根系分布与土壤性质的关系

根系分布与水平距离和土壤深度有关，同时具有较强的向水向肥性^[26-29]。本研究表明在施肥沟附近根长和根表面积密度占比最高，这与根系化学向性生长特征相符。研究还发现香梨吸收根根长密度与速效磷含量呈极显著正相关关系。磷素易被带有正电荷的土壤颗粒结合，移动性弱^[30]，优化施磷位置可显著提高磷的有效性，增加根长和根表面积密度^[31-32]，磷素空间分布差异性可能是香梨园根系生长分布的限制因子。长期条状施肥下碱解氮等速效养分和根系密度在水平距离 110 cm 以内区域显著高于行间 140~200 cm 距离区域，同时，与施肥沟处相比，行间土壤受机械压实影响容重增加、持水能力下降，均不利于根系向行间方向延伸生长。

3.4 密植成龄库尔勒香梨园水肥管理建议

长期条状施肥下，密植梨园有机质和磷素养分在施肥沟及附近聚集，所以施肥位置应适当外扩，如逐年扩大磷肥和有机肥的施肥距离，同时增加施肥深度达 40 cm 为宜，以增加养分在深层和水平空间的分布，促进根系扩张和养分吸收。漫灌条件下，氮素易淋溶至深层土壤，所以氮肥不宜施入过深。在机械碾压位置距主干 150 cm 附近增施有机肥，通过果园生

草、深翻等方式，改善行间因机械压实导致土壤孔隙度和持水能力下降等问题，促进养分侧向移动和根系延伸生长。

4 结 论

长期条状施肥下，密植成龄库尔勒香梨吸收根在深度 10~90 cm、水平距离 140 cm 以内的区域密集分布。有机质和速效磷在施肥沟位置聚集，速效养分在施肥沟向主干方向分布显著高于行间方向。10~50 cm 深度，与施肥沟处相比，机械碾压处土壤容重显著增加，孔隙度和田间持水能力均降低。长期条状施肥下养分的空间变异，以及施肥沟和机械压实处土壤物理性质的差异是成龄密植库尔勒香梨园根系延伸生长的不利因子。

参考文献 References:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook 2023[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.
- [2] 王秋萍. 新疆: 库尔勒香梨区域公用品牌价值大幅提升[J]. 中国果业信息, 2023, 40(12): 64-65.
WANG Qiuping. Xinjiang: The value of the regional public brand of Korla pear has increased significantly[J]. China Fruit News, 2023, 40(12): 64-65.
- [3] 马建江, 王刚, 姜丰, 黄国辉, 梁义忠. 兵团第二师库尔勒香梨主干形栽培模式生产现状及发展建议[J]. 农业科技通讯, 2020(12): 296-297.
MA Jianjiang, WANG Gang, JIANG Feng, HUANG Guohui, LIANG Yizhong. Production status and development suggestions for the trunk-shaped cultivation model of korla fragrant pear in the second division of the corps[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2020(12): 296-297.
- [4] 李伟, 谢文歌, 张曦瑜, 冯雷, 徐巧, 柴仲平. 施氮对香梨园土壤养分、根系生物量及产量品质的影响[J]. 经济林研究, 2023, 41(3): 235-243.
LI Wei, XIE Wenge, ZHANG Xiyu, FENG Lei, XU Qiao, CHAI Zhongping. Effect of nitrogen fertilization on soil nutrients, root biomass, yield and quality in Korla Fragrant Pear orchard[J]. Non-wood Forest Research, 2023, 41(3): 235-243.
- [5] 姜海波, 赵静文, 张乃文, 王红, 董彩霞, 徐阳春. 不同土表管理措施对梨树根系分布特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 164-171.
JIANG Haibo, ZHAO Jingwen, ZHANG Naiwen, WANG Hong, DONG Caixia, XU Yangchun. Effects of different soil surface management on distribution characteristics of pear roots[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(1): 164-171.
- [6] 李楠, 廖康, 成小龙, 耿文娟, 李永闲, 宁万军, 邱晨. ‘库尔勒香梨’根系分布特征研究[J]. 果树学报, 2012, 29(6): 1036-1039.
LI Nan, LIAO Kang, CHENG Xiaolong, GENG Wenjuan, LI Yongxian, NING Wanjun, QIU Chen. Studies on characteristics of root distribution of ‘Korla’s Xiangli’ [J]. Journal of Fruit Science, 2012, 29(6): 1036-1039.
- [7] 李宏, 程平, 郑朝晖, 郭光华, 杨婵. 库尔勒香梨根系空间分布特征[J]. 西北农业学报, 2012, 21(12): 97-104.
LI Hong, CHENG Ping, ZHENG Zhaohui, GUO Guanghua, YANG Chan. Spatial distribution characteristics of roots of Korla fragrant pear trees[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2012, 21(12): 97-104.
- [8] 李楠, 廖康, 成小龙, 赵世荣, 廖小龙, 刘曼曼. 库尔勒香梨根系与地上部生长发育动态及相关性

[J]. 新疆农业大学学报, 2013, 36(2): 131-135.

LI Nan, LIAO Kang, CHENG Xiaolong, ZHAO Shirong, LIAO Xiaolong, LIU Manman. Correlation and growth dynamic state of growth and development in root and aboveground organ of Korla fragrant pear[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2013, 36(2): 131-135.

[9] 吉光鹏, 姜继元, 牛岭磊, 张栋海, 赵思峰, 吴玉蓉. “库尔勒香梨”根系分布及不同流量点源入渗湿润体特征[J]. 北方园艺, 2021(4): 10-16.

Ji Guangpeng, JIANG Jiyuan, NIU Linglei, ZHANG Donghai, ZHAO Sifeng, WU Yurong. Characteristics of root distribution and wetting body of infiltration with different flow rate for ‘Korla Pear’ [J]. Northern Horticulture, 2021(4): 10-16.

[10] 邓永辉, 尧攀, 郑强卿, 陈奇凌, 王振东, 王文军, 王晶晶, 张锦强. 漫灌下幼树期库尔勒香梨根系分布特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(8): 1563-1572.

DENG Yonghui, YAN Pan, ZHENG Qiangqing, CHEN Qiling, WANG Zhendong, WANG Wenjun, WANG Jingjing, ZHANG Jinqiang. Distribution of young Korla fragrant pear tree roots under flooding irrigation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(8): 1563-1572.

[11] 汪宗兰, 王春霞, 马建江, 张景瑞, 舒靖. 库尔勒香梨园土壤肥力空间变异特征与综合评价分析[J]. 节水灌溉, 2024(3): 83-90.

WANG Zonglan, WANG Chunxia, MA Jianjiang, ZHANG Jingrui, SHU Jing. Spatial variability characteristics and comprehensive evaluation analysis of soil fertility in Korla fragrant pear orchard[J]. Water Saving Irrigation, 2024(3): 83-90.

[12] 丁阔, 王雪梅, 柴仲平, 顾奥运. 新疆库尔勒香梨园土壤养分特征[J]. 西部林业科学, 2016, 45(1): 62-67.

DING Kuo, WANG Xuemei, CHAI Zhongping, GU Aoyun. Characteristics of soil nutrients in Korla fragrant pear orchard[J]. Journal of West China Forestry Science, 2016, 45(1): 62-67.

[13] 张加良, 孔涛, 高熙彬, 李多美, 李佳, 梁静一. 辽西北沙地苹果-农作物间作对土壤养分分布和收益的影响[J]. 生态学杂志, 2024, 43(5): 1314-1323.

ZHANG Jialiang, KONG Tao, GAO Xicen, LI Duomei, LI Jia, LIANG Jingyi. Effects of apple-crop intercropping on soil nutrient distribution and income in sandy land of northwestern Liaoning Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(5): 1314-1323.

[14] 余洁, 石云, 赵娜, 马小燕, 朱晓雯, 张凤红, 何洪源, 郭瑞, 张铁昭. 土壤养分的空间变异性研究进展[J]. 山东农业科学, 2023, 55(1): 165-172.

SHE Jie, SHI Yun, ZHAO Na, MA Xiaoyan, ZHU Xiaowen, ZHANG Fenghong, HE Hongyuan, GUO Rui, ZHANG Tiezhao. Progress of spatial variability of soil nutrients[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2023, 55(1): 165-172.

[15] 魏彬萌, 李忠徽, 王益权. 渭北旱塬苹果园土壤紧实化现状及成因[J]. 应用生态学报, 2021, 32(3): 976-982.

WEI Binmeng, LI Zhonghui, WANG Yiquan. Status and causes of soil compaction at apple orchards in the Weibei Dry Highland, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(3): 976-982.

[16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 10-30.

BAO Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 10-30.

[17] BECERRA A T, BOTTA G F, BRAVO X L, TOURN M, MELCON F B, VAZQUEZ J, RIVERO D, LINARES P, NARDON G. Soil compaction distribution under tractor traffic in almond (*Prunus amygdalus* L.)

orchard in Almería España[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 107(1): 49-56.

[18] 兗攀, 王振东, 邓永辉, 陈奇凌, 郑强卿. 库尔勒香梨的光能截获率及冠层结构优化[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(5): 965-979.

YAN Pan, WANG Zhendong, DENG Yonghui, CHEN Qiling, ZHENG Qiangqing. Light interception rate and canopy structure optimization of Korla fragrant pear[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(5): 965-979.

[19] 刘子君, 叶赞, 王丽, 张遥, 齐永波, 穆静, 章力干. 滴喷灌施肥方式对土壤养分空间分异及茶苗根系生长的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(6): 330-339.

LIU Zijun, YE Yun, WANG Li, ZHANG Yao, QI Yongbo, MU Jing, ZHANG Ligan. Effects of drip irrigation and spray irrigation fertilization on spatial differentiation of soil nutrients and root growth of tea seedlings[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6): 330-339.

[20] 张磊, 宋航, 陈小琴, 卢殿君, 王火焰. 穴施条件下肥料养分在土壤中迁移规律的初步研究[J]. *土壤*, 2020, 52(6): 1145-1151.

ZHANG Lei, SONG Hang, CHEN Xiaoqin, LU Dianjun, WANG Huoyan. Primary study on nutrient migration under hole fertilization in soils[J]. *Soils*, 2020, 52(6): 1145-1151.

[21] 李勇, 张晴雯, 李璐, 万国江, 黄荣贵, 朴河春. 黄土区植物根系对营养元素在土壤剖面中迁移强度的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(4): 427-434.

LI Yong, ZHANG Qingwen, LI Lu, WAN Guojiang, HUANG Ronggui, PIAO Hechun. Effects of plant root on nutritious elements transport in soil profiles of the Chinese Loess Plateau[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2005, 11(4): 427-434.

[22] 赵月, 鲍雪莲, 梁超, 王钢, 解宏图. 压实对农田土壤特性的影响及应对措施[J]. *土壤通报*, 2023, 54(6): 1457-1469.

ZHAO Yue, BAO Xuelian, LIANG Chao, WANG Gang, XIE Hongtu. Effects of compaction on farmland soil properties of farms and prevention measures[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(6): 1457-1469.

[23] FRENE J P, PANDEY B K, CASTRILLO G. Under pressure: elucidating soil compaction and its effect on soil functions[J]. *Plant and Soil*, 2024, 496(6): 1036-1039.

[24] 刘学松, 王翼飞, 师嫫菲, 张方博, 伍梦起, 唐晓燕, 申建波, 金可默. 基于根际生命共同体理论的根区土壤结构构建与调控[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(5): 972-979.

LIU Xuesong, WANG Yifei, SHI Yuanfei, ZHANG Fangbo, WU Mengqi, TANG Xiaoyan, SHEN Jianbo, JIN Kemo. Construction and regulation of soil structure in root zone based on the theory of rhizobiont[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(5): 972-979.

[25] WANG X, WHALLEY W R, MILLER A J, WHITE P J, ZHANG F S, SHEN J B. Sustainable cropping requires adaptation to a heterogeneous rhizosphere[J]. *Trends in Plant Science*, 2020, 25(12): 1194-1202.

[26] 李洪波, 薛慕瑶, 林雅茹, 申建波. 土壤养分空间异质性与根系觅食作用: 从个体到群落[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(4): 995-1004.

LI Hongbo, XUE Muyao, LIN Yaru, SHEN Jianbo. Spatial heterogeneity of soil nutrients and root foraging: from individual to community[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(4): 995-1004.

[27] 郑强卿, 陈奇凌, 李铭, 王晶晶. 滴灌条件下骏枣根系分布特征及根际土壤水分变化研究[J]. *北方园艺*, 2013(22): 177-180.

ZHENG Qiangqing, CHEN Qiling, LI Ming, WANG Jingjing. Study on root distribution characteristics and changes of rhizosphere soil moisture under drip irrigation of Junzao[J]. *Northern Horticulture*, 2013(22): 177-180.

[28] 伍从成, 姜海波, 赵静文, 范学山, 董彩霞, 沈其荣, 徐阳春. 连续 5 年施用生物有机肥对梨树

根系形态及分布的影响[J]. 南京农业大学学报, 2017, 40(3): 473-480.

WU Congcheng, JIANG Haibo, ZHAO Jingwen, FAN Xueshan, DONG Caixia, SHEN Qirong, XU Yangchun. Effect of continuous application of bio-organic fertilizer for five years on the morphology and distribution of pear roots[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2017, 40(3): 473-480.

[29] 邓永辉, 郑强卿, 尧攀, 王文军, 陈奇凌, 王晶晶, 张锦强, 王振东. 干旱区骏枣根系分布和土壤养分关系分析[J]. 新疆农业科学, 2024, 61(1): 156-164.

DENG Yonghui, ZHENG Qiangqing, YAN Pan, WANG Wenjun, CHEN Qiling, WANG Jingjing, ZHANG Jinqiang, WANG Zhendong. Research on the relationship between root distribution characteristics of Jun-jujube and soil nutrient in arid area[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(1): 156-164.

[30] 严玉鹏, 王小明, 刘凡, 冯雄汉. 有机磷与土壤矿物相互作用及其环境效应研究进展[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1290-1299.

YAN Yupeng, WANG Xiaoming, LIU Fan, FENG Xionghan. Progress in researches on interactions between organic phosphates and soil minerals and their environmental impacts[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(6): 1290-1299.

[31] LIU P, YAN H H, XU S N, LIN X, WANG W Y, WANG D. Moderately deep banding of phosphorus enhanced winter wheat yield by improving phosphorus availability, root spatial distribution, and growth[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 220: 105388.

[32] LIU C H, YAN H H, WANG W Y, HAN R F, LI Z Y, LIN X, WANG D. Layered application of phosphate fertilizer increased winter wheat yield by promoting root proliferation and phosphorus accumulation[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 225: 105546.