

DOI: 10.20103/j.stxb.202502120283

邓永辉, 充攀, 安世杰, 李天乐, 马凌, 陈奇凌, 郑强卿, 王国栋, 刘静, 王欣. 新疆密植模式 3 个梨品种细根空间分异及资源获取策略. 生态学报, 2026, 46(4): 2014-2023.

Deng Y H, Yan P, An S J, Li T L, Ma L, Chen Q L, Zheng Q Q, Wang G D, Liu J, Wang X. Spatial differentiation and resource acquisition strategies of fine roots in three pear varieties under high-density planting mode in Xinjiang. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(4): 2014-2023.

新疆密植模式 3 个梨品种细根空间分异及资源获取策略

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

1 新疆农垦科学院林园研究所, 石河子 832000

2 新疆农垦科学院铁门关试验站, 铁门关 841000

3 新疆农垦科学院农田水利与土壤肥料研究所, 石河子 832000

4 塔里木大学园艺与林学院, 阿拉尔 843300

摘要:为揭示不同品种梨根系土壤资源获取策略,以新疆密植模式成龄库尔勒香梨、新梨 7 号、玉露香梨为对象,测定 12 年生梨园行间距树干 30—210 cm 距离、0—100 cm 深剖面细根形态和土壤理化空间性状。结果表明:(1)库尔勒香梨根长、根表面积和根体积密度最高,其细根根长密度分别是玉露香梨、新梨 7 号 1.53、2.23 倍;比根长、比根表面积均表现为:新梨 7 号>库尔勒香梨>玉露香梨,根组织密度则相反。库尔勒香梨根系集中分布 20—80 cm 深度土层,根长占比 81.04%,随土壤深度增加根系密集区向水平方向持续扩张;新梨 7 号根系集中分布在 0—60 cm 深度土层,根长占比 78.34%,水平方向根系分布较均匀;玉露香梨根系分布范围广,无密集区域,80—100 cm 深层土壤根长密度显著高于其他品种。(2)密植梨园土壤养分表现上高下低,0—40 cm 深度土壤有机质含量较高,速效养分整体由含量最高区域向两侧和深层土壤递减;土壤容重随土层深度增加先升高后下降,在 20—60 cm 深度土层最高,孔隙度、饱和含水量、田间持水量则相反。密植梨园根系优先利用近树干处土壤水分,漫灌后 15 天,距主干 50 cm、100 cm、150 cm、200 cm 处土壤含水量分别下降 6.53%、5.06%、1.71%、3.05%。(3)库尔勒香梨、玉露香梨细根根长密度与土壤有机质和速效养分含量均为负相关关系,与土壤含水量为显著正相关关系,表明土壤水分对库尔勒香梨、玉露香梨根系分布影响较大;新梨 7 号细根根长密度与土层深度呈显著负相关关系,与土壤碱解氮呈显著正相关关系,表现养分的趋向性。综上,密植模式下 3 个梨品种资源获取策略不同,并表现为细根形态和分布差异。库尔勒香梨具有高根系密度,细根随深度增加向水平方向扩张以提高资源获取效率。新梨 7 号偏向“获取”策略,根系在土壤养分富集区分布,表现出觅食特征。玉露香梨偏向“保守”策略,占据更大土壤空间,增加深层土壤根系占比,增强对深层水分利用能力。

关键词:库尔勒香梨;新梨 7 号;玉露香梨;细根;资源获取策略;土壤理化性质;密植;不同品种

Spatial differentiation and resource acquisition strategies of fine roots in three pear varieties under high-density planting mode in Xinjiang

DENG Yonghui¹, YAN Pan¹, AN Shijie², LI Tianle², MA Ling², CHEN Qiling^{2,*}, ZHENG Qiangqing¹, WANG Guodong³, LIU Jin⁴, WANG Xin⁴

1 Institute of Horticulture, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832000, China

2 Tiemenguan Experimental Station, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Tiemenguan 841000, China

3 Institute of Agricultural Hydrology and Soil Fertiliser, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832000, China

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)

收稿日期:2025-02-21; 网络出版日期:2025-11-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Cql619@163.com

4 Horticulture and Forestry College, Tarim University, Alar 843300, China

Abstract: To reveal the soil resource acquisition strategies of different pear varieties, this study focused on mature Korla fragrantr pear, Xinli No. 7 pear, and Yuluxiang pear in Xinjiang's intensive planting mode. We measured the fine root morphology and soil physicochemical properties at a distance of 30—210 cm from the trunk and a depth of 0—100 cm in 12-year-old pear orchards. The results showed that: (1) Korla fragrantr pear has the highest root length, root surface area, and root volume density, with fine root length density 1.53 and 2.23 times higher than Yuluxiang pear and Xinli No. 7, respectively; The ratio of root length and root surface area is as follows: Xinli No. 7>Korla Fragrant Pear>Yuluxiang pear, while the root tissue density is the opposite. Korla fragrantr pear roots were mainly distributed in the 20—80 cm soil layer, accounting for 81.04% of the root length, and as soil depth increased, the dense root area expanded continuously in the horizontal direction. Xinli No. 7 pear roots were mainly located in the 0—60 cm soil layer, with a root length ratio of 78.34%, and its horizontal root distribution was relatively uniform. Yuluxiang pear had a wide root distribution range without dense areas, and its root length density in the 80—100 cm deep soil was significantly higher than other varieties. (2) The nutrient content of soil in densely planted pear orchards was high and low, with high organic matter content in the soil at depths of 0—40 cm. The available nutrients generally decreased from the highest content area to both sides and deeper soil layers; The soil bulk density first increased and then decreased with the increase of soil depth, reaching its highest point in the 20—60 cm depth soil layer, while porosity, saturated moisture content, and field water holding capacity were the opposite. The root system of the densely planted pear orchard prioritizes the use of soil moisture near the trunk. After 15 days of flood irrigation, the soil moisture content at 50 cm, 100 cm, 150 cm, and 200 cm from the main trunk decreased by 6.53%, 5.06%, 1.71%, and 3.05%, respectively. (3) The fine root length density of Korla fragrantr pear and Yuluxiang pear was negatively correlated with soil organic matter and available nutrient content but showed a significant positive correlation with soil moisture content, indicating that soil moisture has a greater impact on the root distribution of Korla fragrantr pear and Yuluxiang pear. The fine root length density of Xinli No. 7 pear was significantly negatively correlated with soil depth and positively correlated with soil alkali-hydrolyzable nitrogen, showing a tendency towards nutrient acquisition. In conclusion, under the dense planting mode, the three pear varieties have different resource acquisition strategies, which are manifested in differences in fine root morphology and distribution. Korla fragrant pear had a high root system density, and fine roots expanded horizontally with increasing depth to improve resource acquisition efficiency. New Pear No. 7 tended to adopt an “acquisition” strategy, with its roots distributed in nutrient rich areas of the soil, exhibiting foraging characteristics. Yuluxiang pear tended to adopt a “conservative” strategy, occupying more soil space, increasing the proportion of deep soil roots, and enhancing its ability to use deep water.

Key Words: Korla fragrantr pear; Xinli No. 7 pear; Yuluxiang pear; fine roots; resources acquisition strategies; soil physicochemical properties; high density planting; different varieties

新疆南疆主要林果产区干旱少雨、夏季高温,多以漫灌为主,灌溉补水不及时导致梨树缺水现象较常见。密植栽培是新疆梨园主要发展模式^[1-2],长期条状施肥导致密植梨园土壤养分和物理性状在行间呈现显著差异^[3]。库尔勒香梨是新疆主栽梨品种,占比达 80%^[4],新梨 7 号和玉露香梨是以库尔勒香梨为母本杂交出早熟和中熟梨品种,在新疆适应性强,经持续发展种植面积仅次于库尔勒香梨。探明新疆干旱气候下密植模式 3 个主要梨品种根系响应土壤资源空间异质性特征,对揭示不同品种梨根系土壤资源获取策略,提升密植梨园科学水肥管理水平至关重要。

植物根系空间分布特征受遗传因素和外界环境的双重影响^[5-6],具有高度可塑性,尤其是直径小于 2mm 的细根,为适应土壤资源异质性常表现根系构型、形态、化学和生物等一系列功能属性差异^[7]。细根比根长、比根面积和根组织密度等是根经济学谱重要的根系功能性状指标^[8],可以判断植物不同地下觅食策略之间

的权衡,在根经济谱假设下,根据根的性状表现可分为快速觅食和短寿命(即获取策略),及缓慢觅食和长寿命(即保守策略)^[9-10]。细根分布特征在果树响应土壤资源异质性中也发挥着重要作用,由于果树根系分布范围广,取样难度大,与根系分泌物、菌根共生、微生物等有关根系养分获取机制方面的研究相比^[11-12],获得具有代表性的根系分布特征样本更加困难。同时,由于栽植模式、土壤质地、树龄和研究方法的差异性,对不同品种果树根系形态分布特征研究结果难以比较,而以盆栽、尚未形成稳定产量的幼树为对象开展^[13-14],对生产指导实践意义有限。目前,对不同品种梨根系环境适应性和土壤资源获取策略方面认识仍存在不足。

本研究以新疆梨主产地库尔勒垦区同时栽植库尔勒香梨、新梨7号、玉露香梨的成龄密植梨园为研究对象,通过调查细根形态和分布,结合土壤理化性状空间特征,阐明干旱气候密植模式下不同梨品种根系对土壤环境的适应策略,为新疆密植梨园水肥管理优化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于库尔勒垦区新疆生产建设兵团第二师29团。选择12年生密植梨园,土壤为砂壤土,砧木均为杜梨,东西行向,株行距1.0 m×4.0 m,平均冠幅为2.70 m(南北)×1.60 m(东西)。该密植梨园间隔多种种植库尔勒香梨、新梨7号和玉露香梨,3个梨品种树龄、栽培管理措施一致,花期4月10日至18日,平均产量22 500 kg/hm²,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/hm²。生长季追施复合肥800 kg/hm²,10月中旬施基肥1次,生物有机肥1000 kg/hm²和磷肥为主的复合肥400 kg/hm²,施肥时距主干约100 cm处开沟施肥,沟宽、深约15 cm。隔年施羊粪90 m³/hm²,开沟位置距主干150—200 cm,沟宽、深约30 cm。于2024年7月至10月,各品种选取3株平均基径相近、树势健壮的样株,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。调查区域以树干为中心,在南北两侧距离树干30—210 cm水平距离,按照分层取样法采集宽50 cm、深100 cm的土壤区域根系,采样单元的大小为50 cm×30 cm×20 cm,具体方法如图1所示。将单个采样单元带根土样倒入0.1 mm筛进行浸泡、冲洗,利用

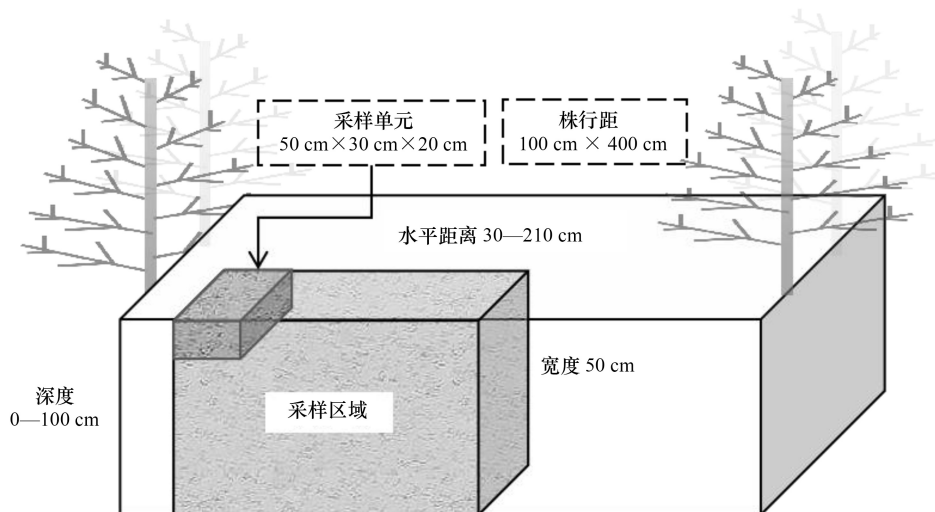


图1 根系采样示意图

Fig.1 Schematic diagram of root sampling

Epson V850 Pro 扫描仪对根系进行扫描,WinRHIZO 软件分析细根(直径<2 mm)根长、根表面积、根体积指标。扫描后,将根系样品放入 65℃ 烘箱,烘干 48 h 至恒重并称重,计算细根比根长、比根表面积、组织密度。

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^[15]。于 7 月漫灌后第 5 天、10 天、15 天采集距主干 50、100、150、200 cm 处土样,垂直方向每 20 cm 深度为一层,取样至 100 cm 深度土壤,5 次重复,测定土壤含水量。10 月,采集根系前使用体积为 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 100 cm 深度土壤,测定土壤容重、孔隙度、饱和含水量和田间持水量。

取根系的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含量,利用碱解扩散法测定碱解氮含量,利用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定速效磷含量;利用乙酸铵浸提-火焰光度计测定速效钾含量。

1.3 数据分析

使用 SPSS 19 软件进行数据处理与分析,Origin 作图。文中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。相关性分析中细根性状指标为根长密度。

2 结果与分析

2.1 不同品种梨细根形态特征

3 个梨品种细根形态特征存在显著差异。库尔勒香梨根系最密集,其细根根长、根表面积、根体积密度分别是玉露香梨 1.53、1.54、1.52 倍,是新梨 7 号的 2.23、2.60、2.91 倍,且差异显著,表明库尔勒香梨表现高根系密度,养分吸收能力强于玉露香梨和新梨 7 号。比根长、比根表面积均表现为:新梨 7 号>库尔勒香梨>玉露香梨,根组织密度则相反,玉露香梨细根组织密度是库尔勒香梨和新梨 7 号的 1.86、2.09 倍,且差异显著。表明,不同梨品种对资源获取策略存在显著差异,新梨 7 号具有较高的比根长,通过提高单位生物量投资的资源获取效率,增加根系的吸收能力。而玉露香梨细根表现高组织密度,资源获取策略更加保守。

表 1 不同品种梨细根形态特征

Table 1 Morphological characteristics of root systems in different pear varieties

品种 Varieties	根长密度 Root Length density/ (mm/cm ³)	根表面积密度 Root surface area density/ (mm ² /cm ³)	根体积密度 Root volume density/ (mm ³ /cm ³)	比根长 Specific root length/ (cm/g)	比根表面积 Specific root area/ (cm ² /g)	根组织密度 Root tissue density/ (g/cm ³)
库尔勒香梨 Korla fragrant pear	0.49±0.10a	1.25±0.11a	0.32±0.03a	238.31±4.47b	60.85±2.84b	0.65±0.04b
新梨 7 号 Xinli No.7 pear	0.22±0.03c	0.48±0.07c	0.11±0.02c	336.96±41.19a	73.89±7.89a	0.58±0.06b
玉露香梨 Yuluxiang pear	0.32±0.05b	0.81±0.13b	0.21±0.03b	125.48±8.86c	32.03±2.13c	1.21±0.08a

不同小写字母表示不同品种间差异显著($P<0.05$)

2.2 不同品种梨细根水平和垂直分布特征

由图 2 可知,水平方向,3 个梨品种细根根长密度整体随与主干距离增加呈下降趋势,但在距主干 90—120 cm、120—150 cm 区域,即施肥沟附近细根根系密度保持稳定。距主干 30—150 cm 水平区域为库尔勒香梨细根密集区,细根根长占比为 76.37%;新梨 7 号细根在水平方向分布较均匀,距主干 150—180 cm 区域细根密度较小,其他区域无显著差异,不同水平区域细根根长密度为 0.15—0.26 mm/cm³,占比为 11.5%—19.7%;玉露香梨细根根长密度表现为先下降后升高,180—210 cm 区域根长密度显著高于邻近区域,表明其行间根系存在交叉现象。

垂直方向,库尔勒香梨和新梨 7 号根长密度随土壤深度增加先升高后下降,库尔勒香梨细根密集区分布较深,在 40—80 cm 深度土层根长密度最高,为 0.74—0.77 mm/cm³,显著高于其他深度土层,根系较集中分布

在 20—80 cm 深度土层,根长占比 81.04%;新梨 7 号细根根系密集区分布浅,在 20—40 cm 深度土层根长密度最高,根系较集中分布在 0—60 cm 深度土层,根长占比 78.34%;玉露香梨在 20—100 cm 深度各土层根长占比 17.81%—26.60%,无密集区域。

3 个品种细根密度在各区域差异显著。水平方向,距主干 30—180 cm 水平区域、20—80 cm 深度土层区域库尔勒香梨根长密度始终高于玉露香梨和新梨 7 号,且差异显著,表明该区域库尔勒香梨养分吸收能力强于其他品种;但在距主干较远处 180—210 cm 区域和 80—100 cm 深层土壤,玉露香梨根长密度高于库尔勒香梨和新梨 7 号,并与新梨 7 号相比差异显著,说明玉露香梨细根延伸能力较强,对深层和距树干较远处土壤资源利用能力强于其他品种。

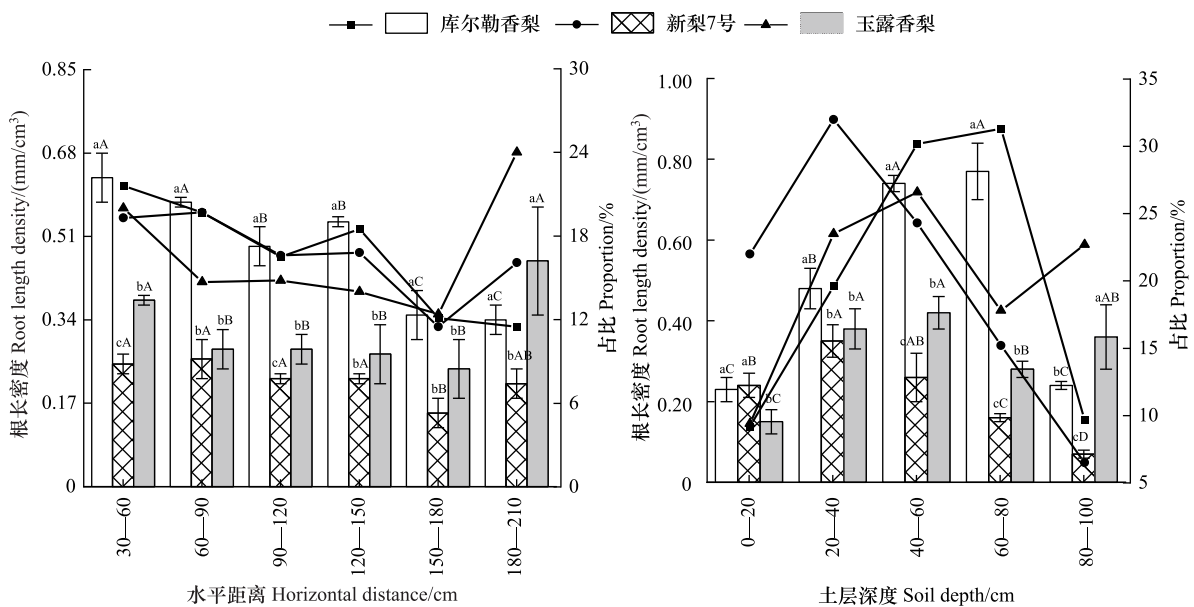


图 2 不同梨品种细根根长密度在水平和垂直方向的分布

Fig.2 Distribution of fine root length density in horizontal and vertical directions among different pear varieties

柱上不同小写字母表示相同区域不同品种间差异显著,不同大写字母表示同一品种不同区域间差异显著 ($P < 0.05$);折线表示该土层根长占采样区域总根长的比例

2.3 不同品种梨细根空间分布特征

由图 3 可知,3 个梨品种根系空间分布差异明显,随土壤深度增加库尔勒香梨细根密集区域向行间方向不断扩张,密集区呈倾斜向下分布,在 0—40 cm 上层土壤,根系集中分布在近树干侧,在 60—80 cm 深层土壤,细根密集区延伸行间区域。新梨 7 号根系水平方向延伸至行间,且较集中分布在 0—60 cm 深度土层,细根平均根长密度为 0.31 mm/cm^3 ;80—100 cm 深层土壤根系分布极少,细根根长密度为 0.07 mm/cm^3 。玉露香梨根系分布范围广,无较明显的根系密集区,且在 80—100 cm 深层土壤仍分布较多根系,细根根长密度为 0.36 mm/cm^3 ,是库尔勒香梨 1.52 倍;在 0—20 cm 浅层土壤,水平距离 120—180 cm 区域根系较稀疏,细根平均根长密度小于 0.07 mm/cm^3 ;在行间 180—210 cm 区域,玉露香梨根系分布变密集,表明细根与邻近树行存在根系交叉。综上,库尔勒香梨根系在水平和垂直方向分布较集中、根系密集,玉露香梨水平和垂直方向分布范围广、无根系密集区域,新梨 7 号根系水平方向延伸能力强,但根系密集区分布较浅。

2.4 土壤养分空间分布特征

由图 4 可知,密植梨园土壤有机质、碱解氮、速效磷均表现出明显层性分布特征,0—40 cm 深度土壤有机质、碱解氮、速效磷含量分别为 14.65 g/kg 、 71.36 mg/kg 、 44.97 mg/kg ,是 40—100 cm 深度土壤的 2.71、3.64、3.71 倍,40—100 cm 深度土壤各采样单元有机质、碱解氮、速效磷分别为 $4.16—7.94 \text{ g/kg}$ 、 $15.72—27.23 \text{ mg/kg}$ 、

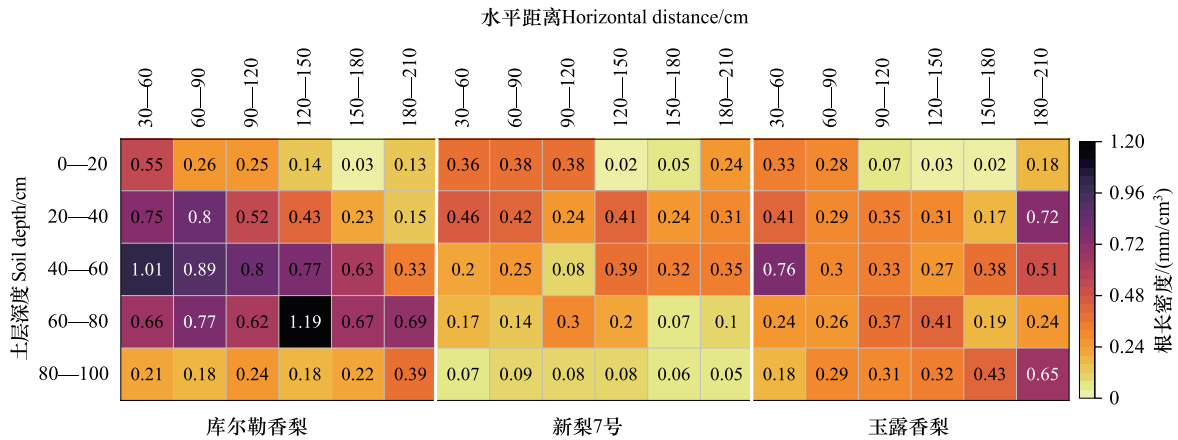


图 3 不同梨品种细根根长密度空间分布

Fig.3 Spatial distribution of fine root length density in different pear varieties

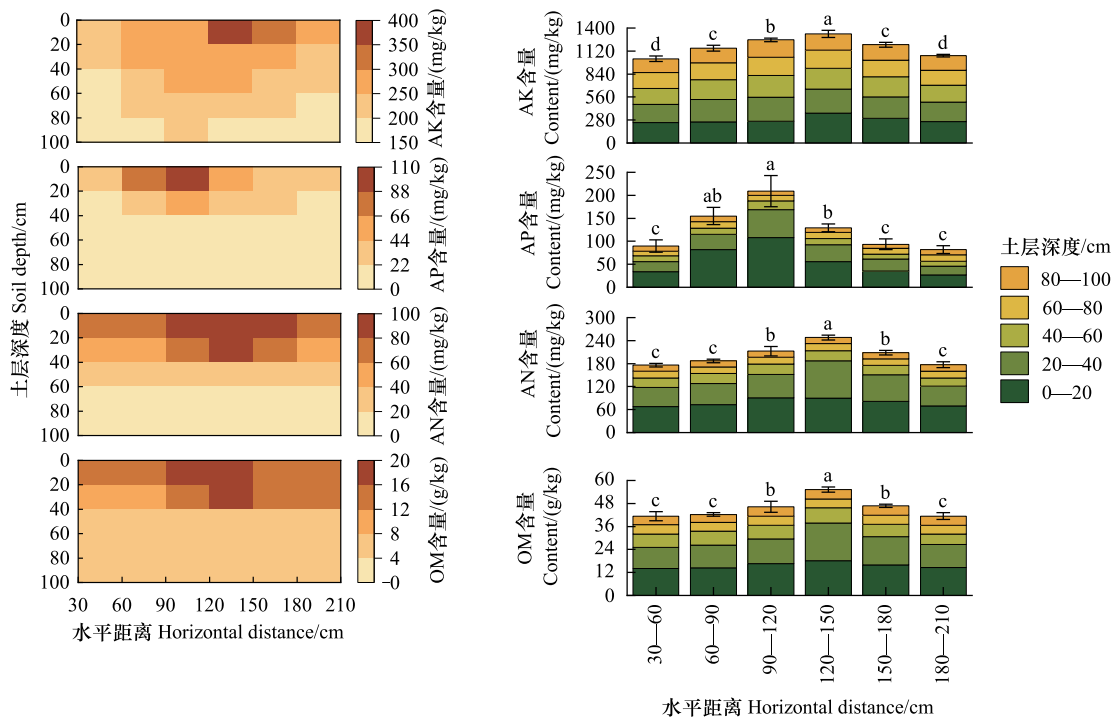


图 4 土壤养分空间分布特征

Fig.4 Spatial distribution characteristics of soil nutrients

OM: 土壤有机质 Soil organic matter; AN: 碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen; AP: 速效磷 Available phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium

9.47—19.71 mg/kg。速效钾含量随土壤深度增加而逐渐下降,各采样单元速效钾含量为 166.42—364.34 mg/kg,远高于碱解氮和速效磷含量。各养分在水平方向分布存在显著差异,并表现在 0—40 cm 深度土层,有机质、碱解氮、速效钾在距主干水平距离 120—150 cm 区域含量最高,分别为 18.88 g/kg、93.59 mg/kg、327.31 mg/kg,速效磷在水平距离 90—120 cm 区域含量最高;碱解氮、速效钾和速效磷含量表现由养分最高区向两侧和深层土壤递减趋势。

2.5 土壤物理性质空间特征

由图 5 可知,密植梨园土壤物理性质整体表现层性分布特征,同时在水平方向存在差异性。20—60 cm

深度土壤容重为 1.65 g/cm^3 , 整体高于 0—20 cm 浅层土壤和 60—100 cm 深层土壤, 而孔隙度、饱和含水量和田间持水量则相反。水平方向, 0—20 cm 浅层土壤, 距主干 150 cm 处土壤长期受机械碾压影响, 容重最高, 为 1.64 g/cm^3 , 孔隙度、饱和含水量和田间持水量最小, 分别为 40.40%、24.69%、22.74%; 距主干水平距离 50 cm、100 cm、200 cm 处自然生草, 土壤容重为 $1.27—1.49 \text{ g/cm}^3$, 孔隙度为 46.70%—50.60%, 饱和含水量和田间持水量分别高于 150 cm 处 6.75%—15.27%、5.21%—10.67%。

漫灌后 10 d, 密植梨园距树干 50 cm、100 cm 处土壤含水量分别降低 2.18%、3.02%; 漫灌后 15 d, 距主干 150 cm、200 cm 处土壤含水量有明显下降, 较漫灌后 5 d 分别下降 1.71%、3.05%, 此时, 距主干 50 cm、100 cm 处土壤含水量下降 6.53%、5.06%。表明, 密植梨园根系优先利用近树干处土壤水分。

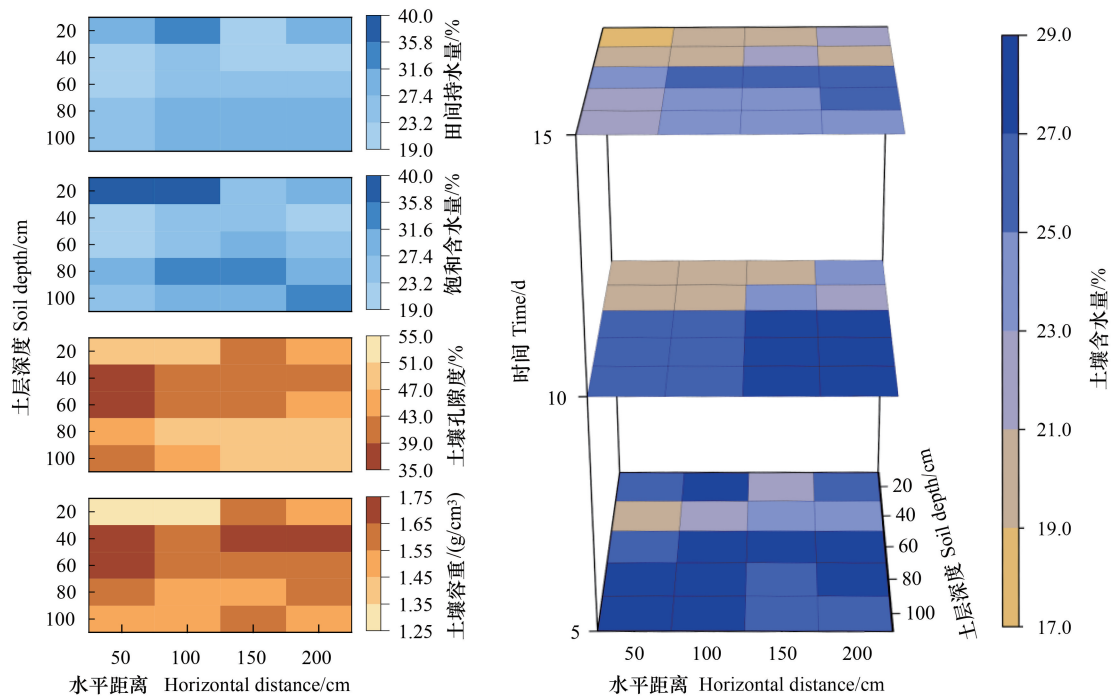


图 5 土壤物理性质的空间特征

Fig.5 Spatial characteristics of soil physical properties

2.6 不同梨品种细根与土壤性状空间相关性分析

由图 6 可知, 土壤养分含量、含水量与土层深度密切相关。土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾与土层深度呈极显著负相关关系, 相关系数为 $-0.70—-0.90$ 。漫灌后 5 d、10 d、15 d 土壤含水量与土层深度呈极显著正相关性, 相关系数为 $0.58—0.84$ 。

3 个品种梨细根根长密度与土壤理化性质空间关系存在差异。库尔勒香梨细根根长密度与碱解氮呈显著负相关关系, 相关系数为 -0.38 ; 与漫灌后第 15 天土壤含水量呈显著正相关关系, 相关系数为 0.38 。表明土壤含水量对库尔勒香梨细根分布影响较大。新梨 7 号细根分布与土层深度呈极显著负相关关系, 相关系数为 -0.54 , 与有机质和土壤养分呈正相关关系, 与碱解氮呈显著正相关, 相关系数为 0.40 。表明新梨 7 号根系分布浅, 呈现化学向性生长特征。玉露香梨细根根长密度与土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量均呈显著负相关关系, 相关系数为 $-0.45—-0.64$, 表明土壤养分不是决定玉露香梨根系空间分布的主要因素。

3 讨论

3.1 不同梨品种细根形态分布与资源获取策略差异

果树根系形态和结构能直接反映其功能状态及环境适应性。通过对 3 个梨品种细根形态比较发现, 库尔

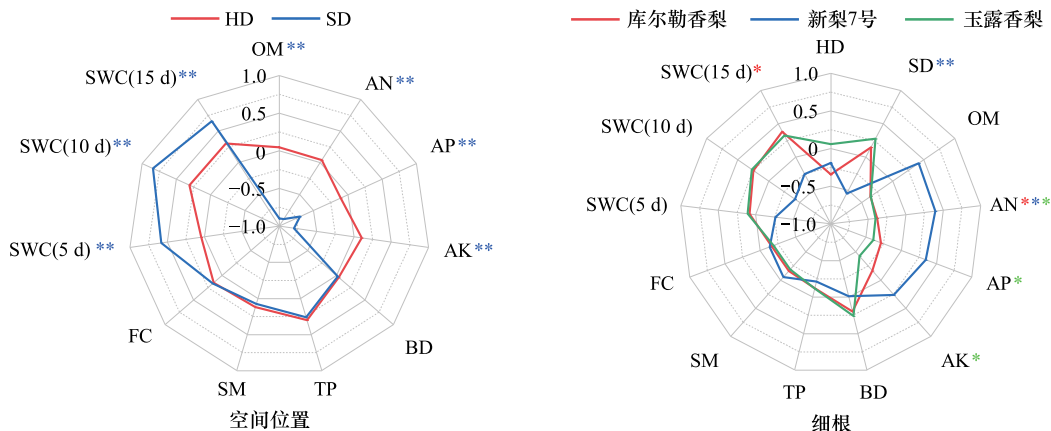


图 6 根系和土壤养分空间分布相关性分析

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

不同颜色“*”“**”分别表示对应品种、空间位置属性与土壤理化性质在 0.05 水平、0.01 水平上显著相关;HD:水平距离 Horizontal distance;SD:土壤深度 Soil depth;SWC(5d):漫灌后第 5 天土壤含水量 Soil water content on the 5th day;SWC(10d):漫灌后第 10 天土壤含水量 Soil water content on the 10th day;SWC(15d):漫灌后第 15 天土壤含水量 Soil water content on the 15th day

勒香梨表现高根长、根表面积密度,表明其资源获取能力强于新梨 7 号和玉露香梨。根经济谱反映了根在养分获取效率与资源维持成本两者之间的权衡,草本植物根的性状表现为快速觅食和短寿命,具有较高比根长,即获取策略,木本植物根系表现缓慢觅食和长寿命,根组织密度高、根比表面积低,即保守策略^[16]。新梨 7 号的比根长、比根表面积最高,表现获取策略,玉露香梨则相反,其根组织密度最高,比根长、比根表面积小,表现保守策略。

植物通过调节根系构型、根分泌物、菌根共生等差异化策略提高对土壤资源获取能力^[10,12],而根系构型在树木养分获取中发挥主导作用^[17]。以往根系养分吸收的研究更多关注根系根分泌物、菌根,以及根系活力、根系碳氮等理化性状^[8,18],这些指标多以特定位置较小区域的根系为样本获得。对于根系分布范围较广的果树,根系空间分布特征对土壤资源的获取发挥着更为重要的作用,如表层土壤中细根的发育是获取有限养分的常见策略^[19]。库尔勒香梨、皇冠梨、新兴梨细根较集中分布在 20—60 cm 深度土层,根系密度随与主干距离增加逐渐下降^[20—25]。本研究发现,库尔勒香梨根系倾斜向下分布,随土壤深度增加根系密集区域向行间方向不断扩张,并对资源获取能力增强;新梨 7 号根系较集中分布在 0—60 cm 深度土层,对浅层土壤养分利用能力较强;玉露香梨根系分布范围广,倾向于占据更大土壤空间获取养分,对深层土壤资源利用能力高于库尔勒香梨和新梨 7 号。综上,3 个梨品种通过调控根系形态和空间分布的方式提高对土壤资源获取能力。

3.2 密植梨园土壤理化性质空间特征

果园土壤养分空间异质性主要是由施肥和各种管理措施引起,同一果树根系所处不同位置的养分浓度可相差几个数量级^[26],表层土壤有机质和磷含量多高于深层土壤,呈现表聚效应^[27—28]。水肥管理方式显著影响养分分布特征,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^[29]。密植梨园土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾与土壤深度存在极显著负相关关系,0—40 cm 深度土壤含量较高,表现出明显层性分布特征,这与前人研究结果相符^[30]。生产中成龄密植梨园以条状开沟施肥为主,磷素移动性弱,因此表现在施肥沟位置聚集,羊粪施入多在树冠外至行间区域,因此距主干水平距离 120—180 cm 区域有机质含量较高。由于施肥深度较浅,长期条状施肥,导致密植梨园各养分在水平方向分布存在差异,主要表现在 0—40 cm 深度土层。

土壤紧实会减少土壤孔隙,破坏孔隙网络,从而使土壤中空气和水分的输送受阻^[31]。本研究发现,密植梨园氮、钾富集区与磷素存在一定差异,密植梨园频繁机械通行,距主干 150 cm 处土壤长期受机械碾压,土壤

容重增加、孔隙度下降,不利于水分和养分移动,导致碱解氮、速效钾在距主干水平距离 120—150 cm 区域集聚。苹果园土壤紧实化研究表明 20—60 cm 深度苹果园土壤容重随种植年限显著增大,主要原因包括土壤团聚作用差、有机质含量低,人为扰动少,土壤中分散的黏粒会向下层移动等^[32]。密植梨园 20—60 cm 深度土壤容重整体高于浅层土壤和深层土壤,并表现孔隙度、饱和含水量和田间持水量下降。新疆密植梨园受行距限制,大型机械无法作业,现有的机械土壤翻耕往往只能达 20 cm 深度,深层土壤扰动少,又多采用漫灌方式,可能是导致 20—60 cm 土壤容重增加的原因,也是根系功能发挥的不利因素。

3.3 不同梨品种细根分布与土壤理化性状关系

密植梨园配套水肥管理措施导致土壤养分和水分资源分布具有明显空间异质性,为高效获取土壤资源,3 个梨品种细根表现在 90—150 cm 养分富集区保持较高的根长密度,并未随与主干距离增加而下降,同时又呈现空间分布的差异性适应特征。新梨 7 号表现根系化学向性生长特征,倾向于在有机质和速效养分富集的 0—60 cm 深度土层分布,这与根系觅食作用相符^[33]。然而,库尔勒香梨和玉露香梨细根与土壤有机质和速效养分呈负相关关系,表明养分不是其根系分布的主要决定因素。土壤干旱胁迫使树木根系向下生长,增加根系长度,以扩大资源获取效率^[34]。新疆南疆果园以漫灌方式为主,在生长季常得不到及时灌溉,与新梨 7 号相比,库尔勒香梨和玉露香梨根系表现对水分的高度依赖性,细根在持续保持较高水分的深层土壤分布增加,以维持树体正常生理代谢。由土壤水分时空变化可知漫灌后近树干和浅层土壤水分优先被利用,玉露香梨根系在 80—100 cm 深度细根密度显著高于库尔勒香梨和新梨 7 号,对深层和距树干较远处土壤的水分利用能力增强。根序分级法在研究物种间细根生理生态功能属性差异方面广泛应用^[35],本研究重点关注整体细根的空间分布和形态特征不同品种梨树相同根序级细根化学组成、形态结构、生理活性等功能属性上是否存在差异,并表现多维度的资源获取策略差异,还缺乏更深入的研究。

3.4 不同梨品种水肥管理建议

在生产中,新梨 7 号根系分布浅的特征更适合土层薄的地区,库尔勒香梨和玉露香梨更加注重土壤水分管理。密植模式下成龄库尔勒香梨根系密集区向深层土壤分布,远离富含养分上层土壤,导致对富集区养分获取能力减弱,增加肥料施用深度,使养分富集区与根区吻合,可能是增强库尔勒香梨根系对土壤养分吸收利用的有效措施。玉露香梨行间存在根系交叉现象,施入羊粪、磷肥等基肥时可在树行中间开沟施肥,提高养分吸收利用效率。

4 结论

3 个梨品种细根形态分布与资源获取策略存在差异。库尔勒香梨表现高根系密度,资源获取能力强于新梨 7 号和玉露香梨;新梨 7 号的比根长、比根表面积最高,表现“获取”策略,玉露香梨则相反,其根组织密度最高,比根长、比根表面积小,表现“保守”策略。在根系分布方面,密植模式养分在施肥沟富集,3 个梨品种细根表现在 90—150 cm 养分富集区保持较高的根长密度的相似性,同时又呈现空间分布的差异性适应特征。库尔勒香梨和玉露香梨根系表现对水分的高度依赖性,细根在持续保持较高水分的深层土壤分布增加,库尔勒香梨细根随深度增加向水平方向扩张以提高资源获取效率;玉露香梨通过占据更大土壤空间,增加深层土壤根系占比,增强对深层和距树干较远处土壤的水分利用能力;新梨 7 号根系主要在土壤养分富集区域水平方向较均匀分布,表现出觅食特征。

参考文献 (References):

- [1] 王春峰,张峰,程嘉宝,关晓媛,秦飞. 库尔勒香梨产业发展现状、存在问题与对策建议. 果树资源学报, 2024, 5(5): 88-91.
- [2] 位杰,谢宏江,蒋媛. 巴州地区库尔勒香梨产业现状、问题及持续发展对策. 果树资源学报, 2024, 5(5): 108-112.
- [3] 邓永辉,宛攀,安世杰,陈奇凌,郑强卿,马凌,王振东,王国栋,刘静,王欣. 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. 果树学报, 2025, 42(2): 336-347.
- [4] 马友福. 西北梨产区品种结构调查及良种筛选[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2022.
- [5] 马雄忠,王新平. 阿拉善高原 2 种荒漠植物根系构型及生态适应性特征. 生态学报, 2020, 40(17): 6001-6008.

- [6] 魏庐璐, 徐婷婷, 马周娟, 张隆安, 王子钰, 马飞. 同质园环境下不同种源鬼箭锦鸡儿根叶功能性状差异. 应用生态学报, 2024, 35(11): 3005-3014.
- [7] Zhang Z Y, Fan B M, Song C, Zhang X X, Zhao Q W, Ye B. Advances in root system architecture: functionality, plasticity, and research methods. *Journal of Resources and Ecology*, 2023, 14(1): 15-24.
- [8] 韦柳端, 朱济友, 李夏榕, 孙广鹏, 张新娜, 徐程扬. 根系功能性状对干瘠立地适应的种间差异—以北京石质山地主要观赏树种为例. 生态学报, 2021, 41(23): 9492-9501.
- [9] 孙佳慧, 史海兰, 陈科宇, 纪宝明, 张静. 植物细根功能性状的权衡关系研究进展. 植物生态学报, 2023, 47(8): 1055-1070.
- [10] 陈晨, 杨雨春, 申方圆, 周思雨, 姜雨希, 赵宪军, 郝景祥, 杨立学. 间伐对红松吸收根功能性状的影响. 生态学报, 2025, 45(8): 1-9.
- [11] Wen Z H, White P J, Shen J B, Lambers H. Linking root exudation to belowground economic traits for resource acquisition. *New Phytologist*, 2022, 233(4): 1620-1635.
- [12] Wang G R, Lin G G, Zhang Y S, Zheng L L, Zeng D H, Lambers H. Shifts from an extensive to an intensive root nutrient-acquisition mode with stand development of three *Pinus* species. *Journal of Ecology*, 2024, 112(4): 886-900.
- [13] 朱杰, 李璐, 孙明飞, 高美娜, 梁博文, 徐继忠, 李中勇. 普通型与短枝型苹果接穗对嫁接幼树根系构型的影响. 园艺学报, 2023, 50(10): 2183-2191.
- [14] 杨韞可. 柑橘不同接穗对积砧根系分布、土壤理化及微生物的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] Roumet C, Birouste M, Picon-Cochard C, Ghestem M, Osman N, Vrignon-Brenas S, Cao K F, Stokes A. Root structure-function relationships in 74 species: evidence of a root economics spectrum related to carbon economy. *New Phytologist*, 2016, 210(3): 815-826.
- [17] Duan M C, Li L, Ding G G, Ma Z Q. Leading nutrient foraging strategies shaping by root system characteristics along the elevations in rubber (*Hevea brasiliensis*) plantations. *Tree Physiology*, 2022, 42(12): 2468-2479.
- [18] 徐肖阳, 刘青, 王云霞, 刘莹, 王国梁. 黄土高原典型树种根系抗旱生理响应机制. 生态学报, 2025, 45(7): 3293-3301.
- [19] Fujii K. Plant strategy of root system architecture and exudates for acquiring soil nutrients. *Ecological Research*, 2024, 39(5): 623-633.
- [20] 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. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(8): 1563-1572.
- [21] 晏清洪, 王伟, 任德新, 武阳, 马英杰, 黄兴法. 滴灌湿润比对成龄库尔勒香梨树根系分布的影响. 灌溉排水学报, 2011, 30(2): 63-67.
- [22] 吉光鹏, 姜继元, 牛龄磊, 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. 北方园艺, 2021(4): 10-16.
- [23] 武阳, 赵智, 王伟, 黄兴法, 马英杰. 调亏灌溉和灌溉方式对香梨树吸收根系重分布的影响. 农业机械学报, 2017, 48(5): 244-250, 257.
- [24] 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. 南京农业大学学报, 2017, 40(3): 473-480.
- [25] 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. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 164-171.
- [26] WANG L Y, LIAO D, Rrengel Z, SHEN J B. Soil-plant-microbe interactions in the rhizosphere: incremental amplification induced by localized fertilization. *Fron Agricultural Science and Engineering*, 2025, 12(1): 57-68.
- [27] 方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文. 设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素. 环境科学, 2023, 44(1): 452-462.
- [28] 陈伟, 王红阳, 王志坚, 王佳, 李亚新, 孙从建. 黄土丘陵区香梨园土壤水分、养分分布特征及其与产量的关系. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3159-3166.
- [29] 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. 水土保持学报, 2022, 36(6): 330-339.
- [30] 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. 西部林业科学, 2016, 45(1): 62-67.
- [31] 张方博, 侯玉雪, 敖园园, 申建波, 金可默. 土壤紧实胁迫下根系-土壤的相互作用. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(3): 531-543.
- [32] 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. 应用生态学报, 2021, 32(3): 976-982.
- [33] 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. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 995-1004.
- [34] 苏丽, 董波涛, 孙佳, 赵西梅, 吴春红, 夏江宝. 地下水位对黄河三角洲怪柳根系生长的影响. 生态学报, 2021, 41(10): 3794-3804.
- [35] 高巧, 徐刚, 段宝利. 根系分级方法概述及应用进展. 生态学杂志, 2024, 43(8): 2480-2492.