

# 滴灌条件下不同土壤质地对水稻苗期根系生长和分布的影响

徐强<sup>1,3</sup> 马晓鹏<sup>2,4,\*</sup> 吕廷波<sup>1,3</sup> 王东旺<sup>1,3</sup> 白蒙<sup>1,3</sup> 王泽林<sup>1,3</sup> 牛靖冉<sup>1,3</sup>

(<sup>1</sup>石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000; <sup>2</sup>新疆农业科学院 土壤肥料与农业节水研究所, 乌鲁木齐 830000; <sup>3</sup>现代节水灌溉兵团重点实验室, 新疆 石河子 832000; <sup>4</sup>农业部西北绿洲农业环境重点实验室, 乌鲁木齐 830000; \*通讯联系人, E-mail: xp.ma@qq.com)

## Effects of Different Soil Texture on Root Growth and Distribution of Rice Seedlings Under Drip Irrigation

XU Qiang<sup>1,3</sup>, MA Xiaopeng<sup>2,4,\*</sup>, LÜ Tingbo<sup>1,3</sup>, WANG Dongwang<sup>1,3</sup>, BAI Meng<sup>1,3</sup>, WANG Zelin<sup>1,3</sup>, NIU Jingran<sup>1,3</sup>

(<sup>1</sup>College of Water Conservancy and Building Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China; <sup>2</sup>Institute of Fertilizer and Agricultural Water Saving, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830000, China; <sup>3</sup>Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation of Xinjiang Bingtuan, Shihezi 832000, China; <sup>4</sup>Key Laboratory of Northwest Oasis Agriculture Environment, Ministry of Agriculture, Urumqi 830000, China; \*Corresponding author, E-mail: lvtingbo@126.com)

**Abstract:** 【Objective】 The effects of different soil textures on root growth and distribution of drip-irrigated rice during seedling stage were studied, and the important role of soil environment on rice seedling growth under drip irrigation was revealed. 【Method】 A potted soil column experiment was conducted in the experimental site of the Shihezi University. Three treatments, heavy loam, light loam and sandy soil, were designed. Each treatment was repeated for five times. Samples were taken 10, 20, 30 and 40 days after sowing. The seedling emergence rate, root morphology, biomass, root activity and root distribution under different treatments were compared and analyzed. Effects of soil conditions on root growth and distribution of rice seedlings under drip irrigation were analyzed. 【Result】 The average seedling emergence rate in sandy soil was 15.21% higher than that in heavy loam soil and 4.6% higher than that in light loam soil, respectively. The root volume in heavy loam soil was 18.53% and 43.15% higher than that in light loam and sandy soil respectively; the longest root length in sandy soil treatment was 38.44% and 12.69% higher than that in heavy loam and light loam, respectively; the total biomass in heavy loam soil was 19.76% and 41.48% higher than that in light loam and sandy soils, respectively. The root biomass of heavy loam soil increased by 14.98% and 35.83% compared with that in light loam and sandy soils. The root activity in seedling stage followed the following trend: heavy loam soil > light loam soil > sandy soil, and the average root activity within 40 days in heavy loam soil was 3.54% and 13.91% higher than that in light loam soil and sandy soil, respectively. The proportion of roots in the soil at depth from 0 to 5 cm in each period was always the largest. 【Conclusion】 The results showed that different soil textures had significant effects on rice seedling emergence rate, root morphology, biomass, root activity and root distribution under drip irrigation. Therefore, in order to achieve the goal of high quality, high yield and high efficiency, different sowing amounts and corresponding cultivation practices should be taken in the process of popularizing drip irrigation.

**Key words:** soil texture; drip irrigation under mulch; rice; seedling stage; root growth and distribution

**摘要:** 【目的】研究滴灌条件下不同土壤质地对水稻苗期根系生长和分布的影响, 揭示土壤质地对滴灌水稻苗期生长的重要作用, 阐明滴灌水稻苗期生长发育机理。【方法】在石河子大学试验场采用盆栽土柱试验, 设置重壤土、轻壤土、砂土共 3 个处理, 每个处理重复 3 次, 在播后 10、20、30、40 d 取样, 对比不同处理出苗率、根系形态、生物量、根系活力、根系分布等指标, 分析不同土壤条件对滴灌水稻苗期根系生长及分布的影响。【结果】砂土平均出苗率比重壤土、轻壤土分别高 15.21 和 4.6 个百分点; 计算各项指标 40 d 平均值可知, 重壤土处理根数比轻壤土、砂土处理分别高 26.73% 和 15.67%; 重壤土处理平均根长比轻壤土、砂土处理分别高 4.52% 和 13.92%; 重壤土处理根系体积比轻壤土、砂土处理分别高 18.53% 和 43.15%; 砂土处理最长根长比重壤土、轻壤土处理分别高 38.44% 和 12.69%; 重壤土处理总生物量比轻壤土、砂土处理分别高 19.76% 和 41.48%。重壤土处理根系生物量比轻壤土、砂土处理分别高 14.98% 和 35.83%。苗期根系活力表现为重壤土 > 轻壤土 > 砂土, 重壤土处理 40 d 内平均根系活力比轻壤土、砂土处理分别高 3.54% 和 13.91%; 滴灌水稻苗期根系分布情况表现为前期

收稿日期: 2018-08-26; 修改稿收到日期: 2018-11-16。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51569033, 51669030)。

水稻根系集中在 0–5 cm 土层中, 后期根系开始逐渐分布于 0–20 cm 土层。【结论】不同的土壤质地对滴灌水稻出苗率、根系形态、生物量、根系活力和根系分布影响显著。因此, 滴灌水稻的种植推广过程中, 不同土壤质地应采取不同的播种量和相应的栽培措施, 才能达到滴灌水稻的优质、高产和高效的目标。

关键词: 土壤质地; 滴灌水稻; 苗期; 根系生长分布

中图分类号: S511.043; S511.061

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2019)03-0249-08

作物的生长状态与土壤环境息息相关, 只有作物的生长需求与周围环境条件相适应, 才能表现出良好的生长状态。根系是作物的主要吸收器官, 其生长发育和土壤环境密切相关, 并且影响着地上部分生长。传统淹灌种植水稻的方式对土壤质地要求低, 而滴灌水稻是一种全新的水稻种植方式<sup>[6]</sup>。滴灌条件下作物的生长与土壤环境有密切联系<sup>[7]</sup>。而土壤质地是主要的环境因素, 直接或间接地影响土壤水、肥、气、热状况, 从而影响作物对肥力的吸收和生长<sup>[1-5]</sup>。因此, 对不同土壤质地条件下滴灌水稻苗期根系的生长发育进行研究, 将有助于理解滴灌条件下水稻苗期根系生长对土壤环境的反应特征。陈惠哲等<sup>[8]</sup>研究表明, 水稻植株根系生长与土壤透水性关系较大, 在前期往往表现为透水土壤的根系生长较好, 根总量、白根数和深层根数均高于不透水对照, 但后期根总量与对照相差不大, 表明透水土壤易造成水稻生长后期营养不足。土壤容重影响土壤的通透性, 从而影响根系的生长和分布, 随土壤容重提高, 根系下扎能力减弱<sup>[10,17]</sup>。水稻旱作或水作条件下土壤质地对根系影响的研究较多, 但在滴灌条件下不同土壤质地对水稻根系影响的研究鲜有报道。本研究通过盆栽方式进行, 以滴灌水稻为研究对象, 研究不同土壤质地对水稻苗期根系生长动态的影响。通过比较不同土壤质地条件下滴灌水稻苗期根系生长和分布的差异, 以期为膜下滴灌水稻的推广种植提供可靠的理论依据及改善途径。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2018 年在新疆石河子大学现代节水灌溉兵团重点实验室试验基地(东经 85°59'47", 北纬 44°19'29", 海拔 412 m)进行, 5 月 5 日播种, 6 月

15 日试验结束。该站区为温带大陆性干旱气候。按照卡庆斯基土壤质地划分标准, 玛纳斯河流域土壤质地主要为砂土类和壤土类。本次研究选择了玛纳斯河流域 3 种主要土壤质地: 砂土、轻壤土、重壤土。不同土壤质地的物理性质见表 1。

### 1.2 试验设计

水稻品种采用新稻 16 号。采用盆栽土柱方式进行试验, 盆栽土柱由高 30 cm、直径 35 cm 的聚乙烯塑料管制成。试验设置灌水定额 6 mm/d, 灌水频率为每 3 天 1 灌, 设置重壤土、轻壤土、砂土共 3 个处理, 每个处理 5 个重复。施肥处理每盆的肥料用量为氮肥(折合纯氮)0.35 kg, 磷肥(折合成  $P_2O_5$ ) 0.25 kg, 钾肥(折合成  $K_2O$ ) 0.20 kg 用作基肥。每盆苗期分 2~3 次随水滴施氮肥(纯氮)0.3 g, 磷肥( $P_2O_5$ ) 0.25 g、钾肥( $K_2O$ ) 0.15 g 和锌肥 0.04 g。每盆播种 4 穴, 播种方式为干播湿出, 出苗后到 2 叶 1 心时期开始定苗, 每穴留长势相近的 6 株稻苗。

### 1.3 观测项目

#### 1.3.1 出苗率

播种方式为干播湿出, 出苗以叶片露出土面 2 cm 为准, 播种后 10 d 开始观测出苗率, 2 周后结束, 并将不同土壤质地出苗率进行对比。

#### 1.3.2 根系形态

播后每隔 10 d 取一次样, 苗期共取样 4 次。用水冲去盆中泥土, 将植株冲洗干净, 测根系条数; 将根系放在背面贴有坐标纸的玻璃上测量根系长度; 后使用排水法测量根系体积。

#### 1.3.3 生物量

每隔 10 d 取一次样, 苗期共取样 4 次。将水稻植株冲洗干净, 把根、冠分开, 在恒温箱中 105℃ 下杀青 30 min, 70℃ 烘至恒重, 使用万分之一克感

表 1 不同土壤质地的物理性质

Table 1. Physical properties of different soils.

土壤质地 Soil texture	物理性黏粒 Physical clay /%	土壤容重 Soil bulk density/(g · cm <sup>-3</sup> )	总空隙度 Total porosity /%
重壤土 Heavy loam soil	56.5	1.62	53.4
轻壤土 Light loam soil	28.0	1.52	49.2
砂土 Sand	18.1	1.45	47.6

表 2 不同土壤质地对滴灌水稻出苗情况的影响

Table 2. Effects of different soil textures on seedling emergence of drip-irrigated rice.

土壤质地 Soil texture	平均出苗率 Average emergence rate/%
重壤土 Heavy loam soil	73.95 c
轻壤土 Light loam soil	79.16 b
砂土 Sand	83.33 a

平均数±标准差(n=9)。不同小写字母者表示差异达到 0.05 显著水平(LSD 检验)。

Mean±SD(n=9). Different lowercase letters indicate significant difference among the soils at 0.05 level(LSD test). The same as below.

量电子天平称量。

### 1.3.4 根系活力

播后 10、20、30、40 d 共取 4 次样，采用 TTC 法测定根系活力<sup>[11]</sup>。

### 1.3.5 根系分布

播后 10、20、30、40 d 共取 4 次样，将土柱取出后，切开分为 0–5 cm、5–10 cm、10–15 cm 和 15–20 cm 共 4 个土层，分别挑取各个土层中所有的根系，将其冲洗干净。在烘箱中 105℃ 下杀青 30

min，70℃ 烘至恒重，称量。

## 1.4 数据分析

试验数据采用 Excel 2003 进行整理，采用 Spass statistic 19.0 进行统计分析，使用 Origin 8.5 作图。

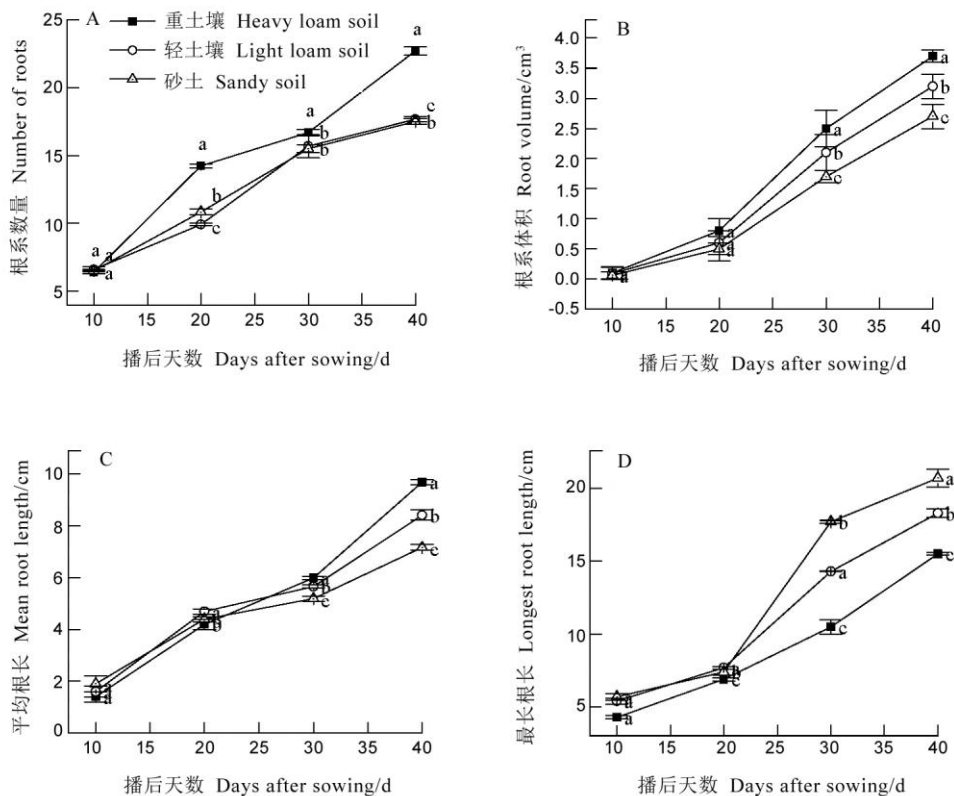
## 2 结果与分析

### 2.1 土壤质地对滴灌水稻出苗率的影响

由于不同土壤质地具有特定的水、肥、气、热条件，对滴灌水稻的出苗会产生不同的影响。对不同土壤质地中水稻的出苗率方差分析可知，不同土壤质地间出苗率差异达极显著水平，出苗率表现为砂土>轻壤土>重壤土，砂土中出苗率最高，平均出苗率比重壤土、轻壤土分别高 15.21% 和 4.6%。

### 2.2 土壤质地对苗期滴灌水稻根系形态的影响

随着播后天数的逐渐增加，不同处理根系形态各项指标均呈明显上升趋势。不同阶段升幅不同(图 1)。在播后 10 d 时，各项指标差异不显著；播后 20 d 时，各项指标差异逐渐显现出来。其中根系数量、根系体积表现为重壤土>轻壤土>砂土，而最长根



平均数±标准差(n=9)。不同小写字母者表示差异达到 0.05 显著水平(LSD 检验)。

Mean±SD(n=9). Different lowercase letters indicate significant difference among the soils at 0.05 level(LSD test). The same as below.

图 1 不同土壤质地对滴灌水稻苗期根系形态指标的影响

Fig. 1. Effect of different soil texture on root morphology index of rice under drip irrigation.

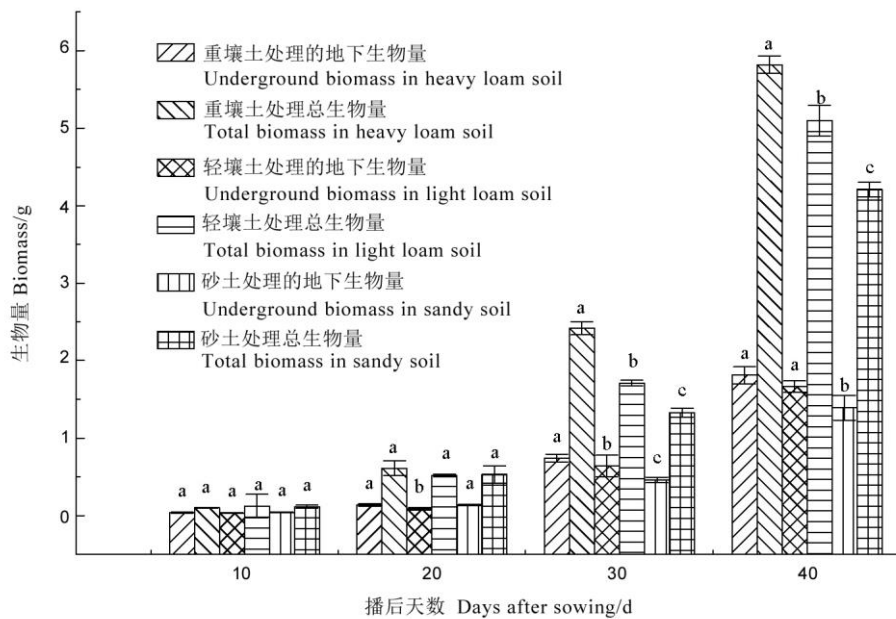


图2 不同土壤质地对滴灌水稻苗期生物量的影响

Fig. 2. Effect of different soil texture on total biomass of drip-irrigated rice at seedling stage.

长表现为砂土>轻壤土>重壤土;播后30 d各项指标的差异性进一步扩大,重壤土处理根数比轻壤土、砂土处理分别高21.95%和7.5%;重壤土处理平均根长比轻壤土、砂土处理分别高5.8%和15.41%;重壤土处理根系体积比轻壤土、砂土处理分别高19.04%和47.06%;播后40 d,重壤土处理根数比轻壤土、砂土处理分别高28.29%和29.54%;重壤土处理平均根长比轻壤土、砂土处理分别高4.99%和11.44%;重壤土处理根系体积比轻壤土、砂土处理分别高15.63%和37.04%。

苗期40 d内各指标平均值显示,重壤土处理根数比轻壤土、砂土处理分别高26.73%和15.67%;重壤土处理平均根长比轻壤土、砂土处理分别高4.52%和13.92%;重壤土处理根系体积比轻壤土、砂土处理分别高18.53%和43.15%;砂土最长根长比重壤土、轻壤土处理分别高38.44%和12.69%。

### 2.3 土壤质地对滴灌水稻苗期生物量的影响

滴灌水稻苗期的总生物量随着生长,表现出不断增加的趋势,但不同阶段升幅不同(图2)。播种10 d后,各处理水稻总生物量无明显差异;播种20 d后,各处理总生物量升幅增大,但不同处理升幅明显不同。重壤土上升速率最快,砂土上升速率最慢。各处理播种后20、30、40 d都表现为重壤土>轻壤土>砂土,其中播后20 d时,重壤土处理总生物量比轻壤土、砂土处理分别增加5.69%和22.15%;播后30 d重壤土处理总生物量比轻壤土、砂土处理

相比分别增加34.48%、81.39%;播种后40 d表现为重壤土处理总生物量比轻壤土、砂土处理分别增加14.79%和35.66%。计算各处理40 d内平均总生物量,重壤土处理比轻壤土、砂土处理分别增加19.76%和41.48%。

播后10 d,各处理的根系生物量没有显著差别。随着生长进程,水稻根系生物量呈现持续增长的趋势,增长速率在20 d之后明显加快(图2)。播后20 d,重壤土处理水稻根系生物量比轻壤土、砂土处理分别增加2.70%和58.33%;播后30 d,重壤土处理根系生物量比轻壤土、砂土处理分别增加25.00%和66.67%;播后40 d,重壤土处理根系生物量比轻壤土、砂土处理分别增加8.51%和27.50%;计算各处理40 d内平均根系生物量,重壤土处理比轻壤土、砂土处理分别增加14.98%和35.83%。

### 2.4 土壤质地对滴灌水稻苗期根系活力的影响

由图3可知,随着稻苗生长,水稻根系活力不断增强,根系活力呈现先快速增强后平缓上升的趋势,并且各处理同一时期的根系活力差异也达显著水平。播后10 d,各处理根系活力差异不明显,播后20、30和40 d,各处理之间差异明显,其中重壤土处理始终保持较高的根系活力,砂土处理根系活力较差,轻壤土处理根系活力处于两者之间。播后20 d时,重壤土处理根系活力比轻壤土、砂土处理分别增加7.5%和34.24%;播后30 d时,重壤土处理比砂土处理根系活力增加9.9%;播后40 d时,

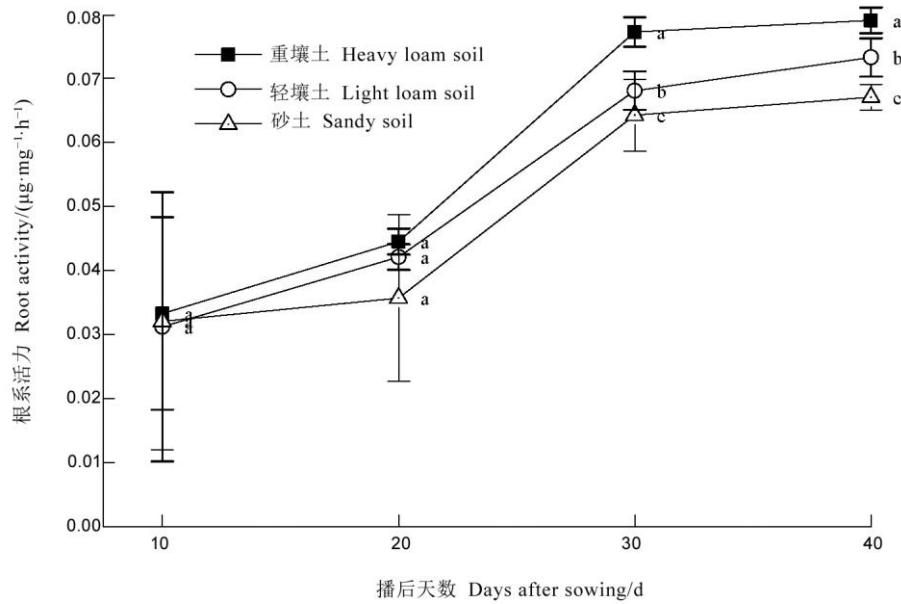


图3 不同土壤质地对滴灌水稻苗期根系活力的影响

Fig. 3. Effect of different soil texture on root activity in drip-irrigated rice at seedling stage.

重壤土处理根系活力比轻壤土、砂土处理分别增加4.0%和11.89%。重壤土处理40 d内平均根系活力最高,分别比轻壤土、砂土处理高3.54%和13.91%。由此可见,重壤土有利于提高苗期水稻根系活力。

### 2.5 土壤质地对滴灌水稻苗期根系分布的影响

播后不同天数的水稻根系分布情况如图4所示。前期根系主要分布在0–5 cm的土层,随着生长发育,水稻根系逐渐向下扩展,各处理间差异显著。播种后10 d、20 d重壤土和轻壤土处理水稻根系全部分布0–5 cm土层,而砂土处理绝大部分根系处于0–5 cm土层,在5–10 cm土层也有少量分布,各处理间差异显著,并且重壤土处理在0–5 cm土层根系量显著高于其他处理;播后30 d,各处理在0–15 cm土层中都有根系分布,0–5 cm、5–10 cm、10–15 cm土层根系生物量占总生物量的比例分别为70.10%~80.69%、18.45%~26.22%、0%~3.7%。在各土层根系生物量表现出明显的差异性,在0–5 cm土层表现为重壤土>轻壤土>砂土,而在5–10 cm土层和10–15 cm土层则表现为砂土>轻壤土>重壤土;播种后40 d,根系继续下扎同时各土层的根系量持续增加,0–5 cm、5–10 cm、10–15 cm、15–20 cm和20–25 cm土层根系生物量占总生物量的比例分别为45.67%~52.69%、24.75%~31.75%、12.75%~14.02%、4.4%~6.13%和1.61%~3.1%。重壤土处理0–5 cm、0–10 cm土层中根系占比分别为

49.36%、81.24%;其中轻壤土处理0–5 cm、0–10 cm土层中根系占比分别为52.69%、77.44%;其中砂土处理0–5 cm、0–10 cm土层中根系占比分别为45.67%、77.42%。

### 3 讨论

砂土中出苗率最高,重壤土出苗率最低,轻壤土居中。这与惠静夷等<sup>[12]</sup>研究结果一致。在重壤土和轻壤土中,由于水稻的出苗率较低,所以应适当加大播种量,促进水稻出苗、齐苗和壮苗,保证滴灌水稻的优质和高产;而砂土中出苗率较高,但砂土漏水漏肥,这就需要在滴灌水稻不同生育时期分期施肥和浇水。所以,不同的土壤质地应采用不同的播种量和相应的栽培措施,才能达到滴灌水稻的优质、高产和高效的目标。

传统淹灌稻田长期处于淹水状态,长期的厌氧环境抑制了水稻根系正常的生长发育。而水稻滴灌后根系和地上部形态发生变化,水稻根系弯曲多,特别是粗分枝大量发生,根毛茂密<sup>[14]</sup>,增加了根长密度、根重密度及根系活力<sup>[15]</sup>。播种后20、30、40 d重壤土根系生物量及总生物量始终高于轻壤土和砂土。重壤土中苗期根系发生量大,为水稻后期的光合作用及细胞的生理生化反应都提供了强大的支持,对耕作层中的水分、养分利用更加高效。随



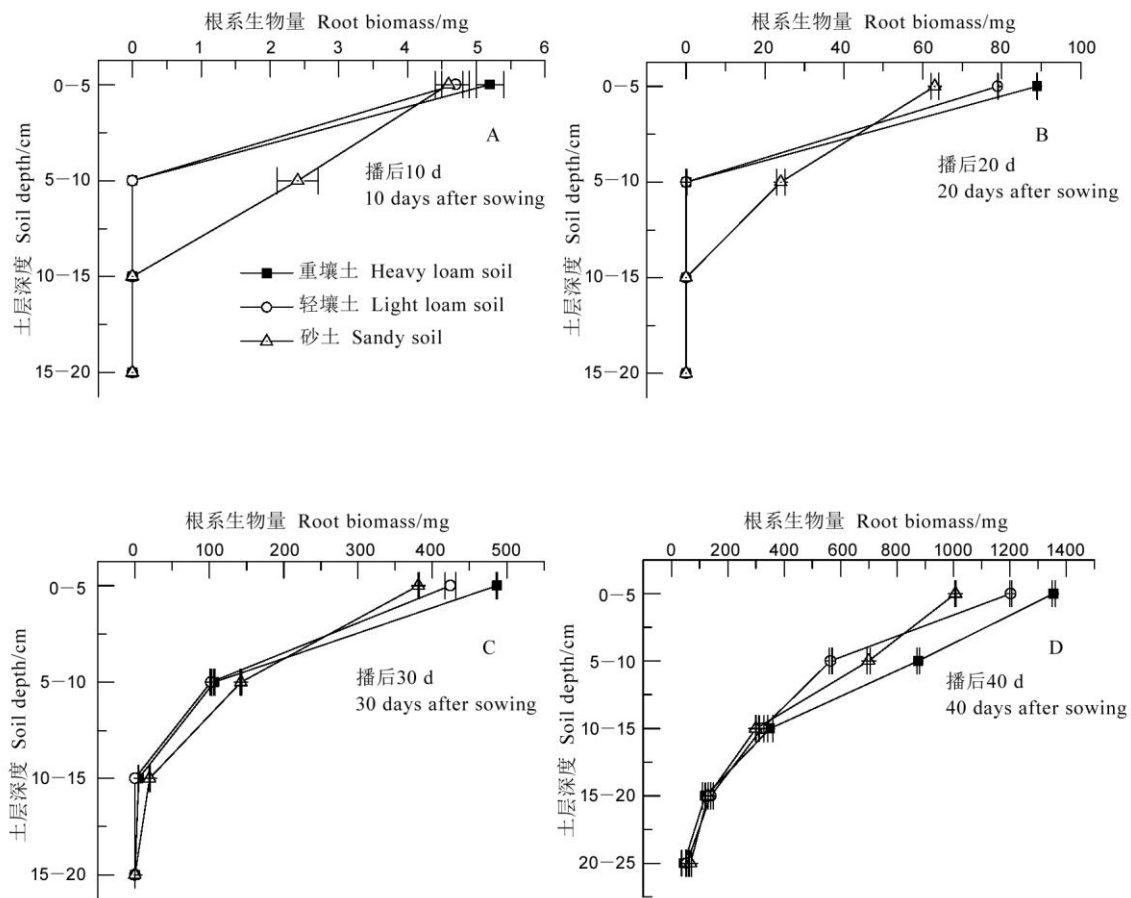


图4 不同土壤质地对滴灌水稻苗期根系分布的影响

Fig. 4. Effect of different soil texture on root distribution of drip-irrigated rice at seedling stage.

着稻苗生长,根系活力不断增强,水稻根系活力前期增加快速后期平缓,这与钱永德等<sup>[15]</sup>、李丽等<sup>[16]</sup>发现水稻根系氧化力都呈先增大、后减小,分蘖期以后根系氧化力开始呈现不断下降趋势一致。

3个处理土壤容重为重壤土>轻壤土>砂土,根系下扎能力表现为砂土>轻壤土>重壤土。质地不同的土壤容重不同,致使根系在其中的穿透阻力差别很大,从而影响根系的生长和分布,随土壤容重提高,根系下扎能力减弱<sup>[9]</sup>。重壤土中水稻苗期根系的最长根长较小,但根系体积、根系数量大于轻壤土、砂土中的根系,这一点与以前的研究结论是一致的<sup>[9]</sup>。

水稻幼苗前期生长发育所需要的养分主要是从胚乳中获得,根系以地表广度扩展为主,对根系垂直分布影响较小。所以试验中播种后10d各处理分布没有表现出明显差异。水稻生长初期根系主要分布于土壤的表层,之后开始向深度扩展,表现为前期水稻根系集中在0-5cm土层中,后期根系开始逐渐分布于0-20cm土层。播后40d时0-5cm

土层中根系占比为45.67%~52.69%,滴灌水稻苗期根系向土壤深层下扎明显。这与顾东祥等<sup>[21]</sup>水稻苗期0-5cm土层根系占比始终最大的研究结果不一致。滴灌条件下水稻根系层间占比与旱作水稻有差异,浅层根系占比有所下降,可能是滴灌条件下有利于构建深层根系,深层根系有助于增强作物对土壤不良环境的适应能力,提高水稻抗逆性<sup>[12]</sup>,从而增强苗期水稻的水分和养分吸收能力。孙海燕等<sup>[19]</sup>研究结果表明水稻苗期80%~90%根系生长在土层20cm以内,这与本研究结果相似。

滴灌条件下不同土壤质地对水稻出苗率、根系形态、生物量、根系活力和根系分布影响显著。重壤土中水稻苗期生物量、根系活力显著提高,根系分布相对浅而量大,重壤土处理0-10cm土层中的深层根系的比例及生物量显著高于其他处理。这可能与重壤土中物理性黏粒含量较多(表1),粒间空隙小,毛管空隙多,保水、保肥性强,昼夜温差小的特性有关<sup>[22]</sup>。水稻是水分敏感作物,重壤土的保水、保肥性可以为滴灌水稻苗期提供充足的水

分及养分。

#### 4 结论

1) 不同土壤质地对滴灌水稻出苗率影响显著, 表现为砂土处理的出苗率最高, 重壤土出苗率最低, 轻壤土居中。

2) 不同土壤质地对滴灌水稻苗期根系形态影响显著, 其中最根长表现为砂土>轻壤土>重壤土, 根系数量、根系平均根长、根系体积均表现一致为重壤土>轻壤土>砂土。

3) 滴灌水稻苗期总生物量与根系生物量表现一致, 随着播后日期推进逐渐上升, 具体表现为重壤土>轻壤土>砂土。

4) 滴灌水稻苗期根系活力受土壤影响显著, 重壤土处理 40 d 内平均根系活力比轻壤土和砂土处理分别高 3.54% 和 13.91%。重壤土有利于提高苗期水稻根系活力。

5) 滴灌水稻苗期根系主要分布于浅土层, 苗期结束后各处理 70% 以上根系分布在 0-10 cm 浅土层之中, 重壤土处理根系量显著提高。

综上所述, 不同的土壤环境对滴灌水稻出苗率、根系形态、生物量、根系活力和根系分布影响显著。因此, 滴灌水稻的种植推广过程中, 不同土壤质地采取不同的播种量和相应的栽培措施, 才能达到滴灌水稻的优质、高产和高效的目标。

#### 参考文献:

- [1] Arora V K, Singh C B, Sidhu A S, Thiad S S. Irrigation, tillage and mulching effects on soybean yield and water productivity in relation to soil texture. *Agric Water Manag*, 2011, 98(4): 563-568.
- [2] Jalota S K, Singh S, Chahal G B S, Ray S S, Panigrahy B S, Singh K B. Soil texture, climate and management effects on plant growth, grain yield and water use by rainfed maize-wheat cropping system: Field and simulation study. *Agric Water Manag*, 2010, 97(1): 83-90.
- [3] Katerji N, Mastrorilli M. The effect of soil texture on the water use efficiency of irrigated crops: Results of a multi-year experiment carried out in the Mediterranean region. *Eur J Agron*, 2009, 30(2): 95-100.
- [4] 张亚丽, 李怀恩, 张兴昌. 土壤质地对坡地土壤水分运动与转化特征的影响研究. *灌溉排水学报*, 2008, 27(6): 27-30.  
Zhang Y L, Li H E, Zhang X C. Effects of soil texture on soil water movement and transport on slope land. *J Irrig Drain*, 2008, 27(6): 27-30. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王萌萌, 何新林, 吕廷波, 曹玉斌, 王东旺. 土壤质地对机采棉土壤水热状况及生长发育影响研究. *灌溉排水学报*, 2017, 36(10): 28-33.  
Wang M M, He X L, Lv T B, Cao Y B, Wang D W. Effect of Soil texture on Soil water and temperature, as well as the growth of machine-harvest cotton. *J Irrig Drain*, 2017, 36(10): 28-33. (in Chinese with English abstract)
- [6] 陈林, 郭庆人. 膜下滴灌水稻栽培技术的形成与发展. *作物研究*, 2012, 26(5): 587-588.  
Chen L, Guo Q R. The formation and development of rice cultivation techniques in plastic mulch with drip irrigation. *Crop Res*, 2012, 26(5): 587-588. (in Chinese with English abstract)
- [7] 杨开静. 滴灌条件下马铃薯田间土壤水、气交互效应与调控机理研究. 北京: 中国农业大学, 2017.  
Yang K J. Interaction and regulation mechanism of soil water and gases in potato field under drip irrigation. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陈惠哲, 朱德峰, 林贤青, 张玉屏. 土壤透水状况对水稻根系生长与氮素利用的影响. *中国生态农业学报*, 2007, 15(5): 34-37.  
Chen H Z, Zhu D F, Lin X Q, Zhang Y P. Effects of soil permeability on root growth and nitrogen utilization in rice. *Chin J Eco-Agric*, 2007, 15(5): 34-37. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李潮海, 李胜利, 王群, 侯松, 荆棘. 不同质地土壤对玉米根系生长动态的影响. *中国农业科学*, 2004, 37(9): 1334-1340.  
Li C H, Li S L, Wang Q, Hou S, Jing J. Effect of different textural soils on root dynamic growth in corn. *Sci Agric Sin*, 2004, 37(9): 1334-1340. (in Chinese with English abstract)
- [10] 朱德峰, 林贤青, 曹卫星. 水稻根系生长及其对土壤紧密度的反应. *应用生态学报*, 2002, 13(1): 60-62.  
Zhu D F, Lin X Q, Cao W X. Root growth in rice and its response to soil density. *Chin J Appl Ecol*, 2002, 13(1): 60-62. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张志勇, 卜晶晶, 王素芳, 胡海根, 王清连. 冠菌素对不同钾水平下 TTC 法测定的棉花根系活力的影响. *植物生理学报*, 2015, 51(5): 695-701.  
Zhang Z Y, Bu J J, Wang S F, Hu H G, Wang Q L. Effect of coronatine on cotton root activity determined by TTC assay at different levels of potassium. *Plant Physiol J*, 2015, 51(5): 695-701. (in Chinese with English abstract)
- [12] 惠静夷, 王秋兵, 黄毅. 不同质地土壤玉米出苗适宜墒情研究. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(4): 62-67.  
Hui J Y, Wang Q B, Huang Y. A study on suitable moisture for emergence of corn under different soil

- textures. *Agric Res Arid Areas*, 2006, 24(4): 62-67. (in Chinese with English abstract)
- [13] 崔国贤, 沈其荣, 崔国清, 李良勇. 水稻旱作及对旱作环境的适应性研究进展. 作物研究, 2001, 15(3): 70-76. Cui G X, Shen Q R, Cui G Q, Li L Y. Progress in rice dry farming and its adaptability to dry farming environment. *Crop Res*, 2001, 15(3): 70-76. (in Chinese with English abstract)
- [14] 彭世彰. 水稻节水灌溉技术. 郑州: 黄河水利出版社, 2012. Peng S Z. Water Saving Irrigation Technology for Rice. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2012. (in Chinese)
- [15] Yang C M, Yang L Z, Yang Y X, Zhu O Y. Rice root growth and nutrient uptake as influenced by organic manure in continuously and alternately flooded paddy soils. *Agric Water Manag*, 2004, 70(1): 67-81.
- [16] 钱永德, 李金峰, 郑桂萍, 吕艳东, 郭晓红, 孙长艳. 垄作栽培对寒地水稻根系生长的影响. 中国水稻科学, 2005, 19(3): 238-242. Qian Y D, Li J F, Zheng G P, Lv Y D, Guo X H, Sun C Y. Effects of Ridge cultivation on root growth of rice in cold regions. *Chin J Rice Sci*, 2005, 19(3): 238-242. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李丽, 陈林, 张婷婷, 银永安, 朱江艳, 赵双玲. 膜下滴灌对水稻根系形态及生理性状的影响. 排灌机械工程学报, 2015, 33(6): 536-540. Li L, Chen L, Zhang T T, Ying Y A, Zhu J Y, Zhao S L. Effect of mulch drip irrigation on the form of rice root and physiological characteristics. *J Drain Irrig Mech Engin*, 2015, 33(6): 536-540. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张玉屏, 朱德峰, 林贤青, 焦桂爱, 黄群. 田间条件下水稻根系分布及其与土壤容重的关系. 中国水稻科学, 2003, 17(2): 48-51. Zhang Y P, Zhu D F, Lin X Q, Jiao G A, Huang Q. Roots distribution of rice in field and its relation to soil bulk density. *Chin J Rice Sci*, 2003, 17(2): 48-51. (in Chinese with English abstract)
- [19] 孙海燕, 李小坤, 任涛, 丛日环, 鲁剑巍. 浅层施肥对水稻苗期根系生长及分布的影响. 中国农业科学, 2014, 47(12): 2476-2484. Sun H Y, Li X K, Ren T, Cong R H, Lu J W. Effects of fertilizer in shallow soils on growth and distribution of rice roots at seedling stage. *Sci Agric Sin*, 2014, 47(12): 2476-2484. (in Chinese with English abstract)
- [20] 徐芬芬, 曾晓春, 石庆华, 叶利民. 不同灌溉方式对水稻根系生长的影响. 干旱地区农业研究, 2007, 25(1): 102-104. Xu F F, Zeng X C, Shi Q H, Ye L M. Effects of different irrigation patterns on the growth of rice root. *Agric Res Arid Areas*, 2007, 25(1): 102-104. (in Chinese with English abstract)
- [21] 顾东祥, 汤亮, 徐其军, 雷晓俊, 曹卫星, 朱艳. 水氮处理下不同品种水稻根系生长分布特征. 植物生态学报, 2011, 35(5): 558-566. Gu D X, T L, Xu Q J, Lei X J, Cao W X, Zhu Y. Root growth and distribution in rice cultivars as affected by nitrogen and water supply. *Chin J Plant Ecol*, 2011, 35(5): 558-566. (in Chinese with English abstract)
- [22] 桑以琳. 土壤学与农作学. 北京: 中国农业出版社, 2005. Sang Y L. Pedology and Science of Farming System. Beijing: China Agriculture Press, 2005. (in Chinese)