

渭北旱塬不同龄苹果细根空间分布特征

甘卓亭^{1,2,3}, 刘文兆^{1,*}

(1. 西北农林科技大学、中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100;

2. 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室、宝鸡文理学院, 宝鸡 721007; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:以渭北旱塬 3 龄、10 龄、15 龄和 20 龄苹果树为对象, 采用根钻法, 沿 3 等分园半径方向(径向)、距树干 1.0、1.5m 和 2.0m 处设置采样点, 研究了不同树龄的细根空间分布特征。结果表明, 3 龄苹果细根主要分布于径向 1.5m 以内和垂向 0.5m 以上, 15 龄和 20 龄苹果细根分布超出径向 2.0m 和垂向 1.4m, 10 龄细根分布范围大于 3 龄, 与 15 龄和 20 龄接近。在根系主要分布区内 3 龄和 10 龄细根分布稀疏, 15 龄和 20 龄细根分布密集; 细根空间分布演化过程可分为 3 个阶段, 即 3~10 龄为细根范围扩张阶段, 10~15 龄为细根密度扩张阶段, 15~20 龄为细根密度退化阶段; 苹果细根空间分布无明显方向性差异; 10 龄、15 龄和 20 龄苹果表层(0~20cm)平均根长密度低于下层(20~40cm), 高峰值一般出现在 40~80cm, 此深度以下根长密度随深度递减, 3 龄苹果表层平均根长密度高于下层; 在径向 2.0m 内随径向距离增大, 3 龄、15 龄和 20 龄平均根长密度逐渐降低, 而 10 龄根长密度逐渐增加。根长密度在径向变化上存在局部变异现象。

关键词:根长密度; 细根分布; 苹果; 渭北旱塬

文章编号: 1000-0933(2008)07-3401-07 中图分类号: S181 文献标识码: A

Distribution of the fine roots of different aged apple trees in Weibei rainfed tableland of the Loess Plateau

GAN Zhuo-Ting^{1,2,3}, LIU Wen-Zhao^{1,*}

1 Northwest A & F. University, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China

2 Key Laboratory of Disaster Survey and Mechanism Simulation of Shaanxi Province, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 721007, China

3 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3401~3407.

Abstract: Root distribution and its resource demands of different aged apple trees are not same. Numerous studies focused on the spatial distribution of roots of specific aged trees and however, few studies were done for different aged apple trees. The spatial distribution of the fine roots of different aged apple trees in the Weibei rainfed tableland was investigated. The fine roots of the 3-aged apple tree were distributed mainly within a range of 1.5 m, horizontally, and within a thickness of 0.5 m, vertically, while those of the 20 and 15-aged apple trees exceeded 2 m in the radial direction and 1.4 m in the vertical direction. The dominated distribution range of the 10-aged tree was greater than that of the 3-aged tree, and it was close to those of the 15 and 20-aged trees. The fine roots of the 3 and 10 aged trees were sparsely distributed, while those

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD09B09); 陕西省教育厅自然科学研究计划资助项目(06JK359)

收稿日期:2007-12-14; **修订日期:**2008-04-29

作者简介:甘卓亭(1973~), 男, 安徽池州人, 博士生, 主要从事流域水文生态与节水农业研究. E-mail: ztgan73@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wzliu@ms.iswc.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by China's national S&T development program of the 11th Five-year plan (No. 2006BAD09B09); Foundation of Shaanxi Province Education Committee (No. 06JK359)

Received date:2007-12-14; **Accepted date:**2008-04-29

Biography: GAN Zhuo-Ting, Ph. D. candidate, mainly engaged in watershed hydroecology and water saving agriculture. E-mail: ztgan73@126.com

of the 20 and 15-aged trees were densely distributed. Evolution of root length density (*RLD*) of the fine roots can be divided into three stages: range expanding stage (3 and 10-aged), density expanding stage (10 and 15-aged), and density degradation stage (15 and 20-aged). Directional difference in the *RLD* of fine roots was not distinct. The *RLDs* in 0–20 cm surface soil for 10, 15, and 20-aged trees were less than those in 20–40 cm soil layer. Peak values for the trees were observed in 40–80 cm soil layer below which the *RLDs* decreased gradually. The *RLD* of the 3-aged tree in 0–20 cm surface soil was higher than those in deeper layers. Within 2 m range in radial direction, the *RLDs* of the 3, 15, and 20-aged trees increased with distance, while that of the 10-aged tree decreased. Some variations of *RLD* in radial direction were found for all aged trees.

Key Words: root length density; fine root distribution; apple; Weibei rainfed tableland

植物的结构和形态主要取决于从环境中获取资源的器官的空间分布,根系是植物从土壤环境中获取资源的器官^[1]。根系生理功能几乎全部由细根(<2mm)完成^[2]。因此,细根的空间分布格局对于植物生长发育和植物生产力至关重要^[3,4]。

不同年龄期植物的根系分布和资源需求不同^[5]。针对根系分布和资源需求状况调控根系,是根系管理的基础,农业生产中根系修剪正是这一理论的实践体现^[6,7]。就果园管理而言,各种农艺措施的正确实施又依赖于对果园现状特别是根系分布特征的掌握及趋势预测。因而,开展不同树龄的果树根系空间分布调查,研究果树根系分布的现状和发展趋势,无疑是果园合理管理的前提和保证。

以往关于苹果根系分布的研究多集中于根系分布与土壤的理化性质、土壤养分、土壤水分以及剪枝整形等因素的关系方面^[8~12],而且这些研究多以特定的年龄时期为基础,针对不同年龄时期的苹果根系空间分布特征的对比研究较少。为此,本文以黄土高原中南部的渭北旱塬苹果园为对象,分析不同年龄期根系的空间分布特征,运用空间代替时间的分析方法^[13],探讨苹果根系空间分布的演化规律,以期为实施合理的果园农艺管理和衰老期果园的改造提供依据和指导。

1 研究区自然条件和研究方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于渭北旱塬王东沟流域(107°40′30″~107°42′30″ E, 35°12′16″~35°16′00″ N),塬、梁、沟三大地貌类型各约占 1/3,塬面海拔 1200m,属典型的高塬沟壑区。年平均降水量 584mm,年均温 9.1℃,无霜期 171 d。该区属于粘黑垆土地带,母质为深厚的中壤质马兰黄土。由于严重的水土流失,整个流域仅塬面尚保存有完整的黑垆土剖面,而梁状地类包括梁顶、梁坡,粘化层侵蚀殆尽,无明显剖面发育,称为黄壤土。近年来在种植结构调整的宏观政策引导和经济效益的驱动下,流域内农业种植结构逐步形成了以果业为主的农、果二元型结构。

1.2 研究方法

研究区海拔较高,平均气温较低,降水不足且时空分布不均,在温度和水分的双重影响下果树生长发育相对迟缓,大冠稀植的梁坡果园定植后 8~10a 进入初果期,而果树强烈耗水,果园土壤干层发育,使得 20 龄以上果园的产量较低,果实品质较差,果树病虫害严重,腐烂病发生率较高,基本处于退化阶段,针对上述试区果园实际状况,2006 年 8 月选择流域梁坡中部定植 3、10、15a 和 20a 的梯田苹果园设为临时标准地,对应果树的幼年期、初果期、盛果期和衰老期。考虑地上部分与地下部分存在相关性^[14],同时减小根系取样对果园的扰动,试验中以地上部分具有代表性的 1 株果树作为细根调查的样本。由于树高、冠幅等受剪枝整形的影响较大,而胸径与树龄在一定程度上具有一致性,如试验样地全部 144 株果树树龄和胸径 *DBH*(diameter at breast height)回归方程为 $y = 0.8962x + 0.2803$ ($r^2 = 0.9771$, $p = 0.0001$),故在测定全部标准地果树胸径的基础上,以平均胸径作为选择地上部分具有代表性果树的依据。果树品种为富士,以秋子 (*M. prunifolia* (wild.) *Borkh*) 为基础,行距×株距为 4m×4m,样地概况见表 1。

表 1 苹果根系调查样地概况

Table 1 Conditions of sample areas in the survey of root system survey

地形 Site	坡位 Position on slope	土壤 Soil	树龄 Stand age	平均树高 Average height (m)	平均胸径 Average DBH (cm)	套种作物 Intercropping
梁坡梯田 Upper slope terrace	中部 Middle	黄壤土 Huangshan soil	3	2.45	2.8	甜瓜 melon
梁坡梯田 Upper slope terrace	中部 Middle	黄壤土 Huangshan soil	10	3.45	10	—
梁坡梯田 Upper slope terrace	中部 Middle	黄壤土 Huangshan soil	15	3.35	12.5	—
梁坡梯田 Upper slope terrace	中部 Middle	黄壤土 Huangshan soil	20	2.83	18.5	—

根系调查采用土钻($\phi=9\text{cm}$)以树干为中心,每 120° 沿半径方向(以下简称径向)等间距设置取样点(即取样点分别位于径向 1.0、1.5m 和 2.0m),分层(100cm 以上每 10cm 为一层,100cm 以下每 20cm 为一层)钻取土样,取样深度为 140 cm。试验中为了便于取样,结合树枝位置对部分方向进行了微调。各层钻取的土样过筛,拣出所有根系,剔除套种作物根系和粗大根(若侧部有细根需剪下),利用游标卡尺将 $\phi>2\text{mm}$ 的根系剔除后,冲洗、晾干、扫描,80℃ 烘干。用美国 CID 公司的 CIAS2.0 图像分析软件测定根长,计算根长密度 *RLD* (root length density)。采用 SPSS11.0 和 Origin7.5 进行数据分析和绘图。

2 结果分析

2.1 不同龄苹果细根非零发生率

由于细根分布的空间变异性,土钻取样常出现根长密度(root length density, *RLD*)零值点,即便在细根分布密集区也存在零值点,Silva 等^[15]为此引入非零 *RLD* 发生率(Occupancy ratio)的概念。所谓非零 *RLD* 发生率是指非零 *RLD* 出现数与全部取样数之比,非零 *RLD* 的发生率可以在一定程度上反映根系的空间分布特征。

图 1 为 3、10、15 龄和 20 龄苹果树细根径向 1.0、1.5m 和 2.0m 处非零 *RLD* 的平均发生率。由图可知,15 龄和 20 龄苹果径向 1.0、1.5m 和 2.0m 处非零 *RLD* 发生率变化较小,发生率均在 85% 以上,表明大龄苹果细根分布的径向变化较小,较高的发生率表明细根分布较为密集,从而说明细根主要分布区超出径向 2.0m。3 龄苹果径向 1.0、1.5m 和 2.0m 的非零 *RLD* 发生率分别为 63%、33% 和 20%,沿径向显著下降,且发生率低于大龄果树,表明 3 龄苹果细根主要分布区在径向 1.5m 以内,较低的发生率表明细根分布较为稀疏。10 龄苹果径向 1.0、1.5m 和 2.0m 处非零 *RLD* 发生率随径向距离的增大而升高,分别为 39%、56% 和 64%,表明 10 龄果树细根主要分布区已接近 15 龄和 20 龄果树,但空间分布较为稀疏。

2.2 不同龄苹果细根平均分布密度差异

表 2 显示 3 龄和 10 龄苹果平均 *RLD* 显著低于 15 龄和 20 龄,而 3 龄和 10 龄之间以及 15 龄和 20 龄之间的差异均不显著。平均 *RLD* 在一定程度上反映细根的平均分布密度状况。3 龄和 10 龄平均 *RLD* 相差不大,表明此阶段细根的平均分布密度差异较小。10 龄和 15 龄的平均 *RLD* 分别为 $0.019\text{cm}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $0.102\text{cm}\cdot\text{cm}^{-3}$,约增加了 4 倍,表明细根在前期分布范围扩展的基础上,转向以密度扩展为主的阶段。15 龄到 20 龄平均 *RLD* 约降低了 30%,表明细根空间分布密度减小,细根的生长发育已步入退化阶段。

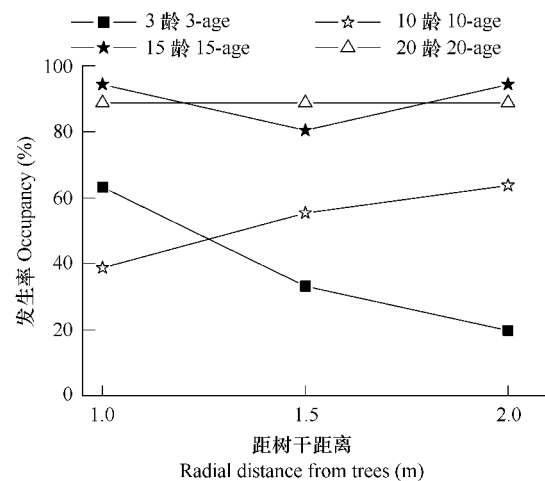


图 1 各龄苹果非零 *RLD* 发生率
Fig. 1 Occupancy ratio of non-zero root length densities (*RLD*) for different aged apple trees

2.3 不同龄苹果树的细根空间分布特征

2.3.1 细根 *RLD* 分级分布特征

图2显示各龄苹果不同等级的 *RLD* 空间分布特征。径向 1.0m 处 3 龄苹果细根的 *RLD* 在垂向 0.5m 以上分布密集,为细根的主要分布区,而在垂向 0.5m 以下或径向 1.5m 和 2.0m 处 *RLD* 分布较少且散乱。在细根的主要分布区内, $RLD > 0.02 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的点约占 70% 以上,表明在细根的主要分布区内细根分布密集。在细根主要分布区外仍有 $RLD > 0.02 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的点存在,表明在细根主要分布区之外存在局部细根密集区,可能是细根在合适的土壤条件下簇状生长的结果。10 龄苹果树细根的 *RLD* 垂向和径向分布分别达到 1.4m 和 2.0m,同时在径向 1.0m 处 *RLD* 分布减少,表明 10 龄苹果细根主要分布区在扩张的同时其分布重心外移。15 龄和 20 龄苹果的 *RLD* 在观测范围内均匀分布,同 10 龄相比,在径向 1.0m 处两种树龄的 *RLD* 分布点显著增加,说明细根在分布区内分布加密。

图2同时表明,苹果细根 *RLD* 的分布没有明显的方向性差异。*RLD* 各方向的差异性检验也表明,在同树龄 A、B、C 方向间除 15 龄存在显著差异外 ($P < 0.01$), 3 龄、10 龄和 20 龄 *RLD* 各方向间的差异均不显著。*RLD* 的空间分布并未出现类似于地上部分常见的阴、阳面分布不一致的现象。

2.3.2 细根 *RLD* 垂直分布特征

图3为径向 1.0、1.5m 和 2.0m 处 3 龄、10 龄、15 龄和 20 龄苹果树平均 *RLD* 的垂直分布。在整个观测深度内,1.0m 和 1.5m 处均有 20 龄和 15 龄细根平均 *RLD* 显著大于 10 龄和 3 龄,并且表现为 15 龄高于 20 龄,3 龄和 10 龄差别不大;2.0m 处因 3 龄仅观测了阳面,所以没有纳入讨论,仅就 10 龄、15 龄和 20 龄而言,10 龄的平均 *RLD* 接近 15 龄,20 龄除局部存在高值点外与 15 龄趋于一致。对各径向测点同一土层不同龄 *RLD* 方差分析 (GLM) 表明,在径向 1.0m 和 1.5m 测点 15 龄、20 龄与 3 龄、10 龄差异极显著,2.0m 在局部土层差异显著。总体上看,10 龄、15 龄和 20 龄的表层 (0 ~ 20cm) 平均 *RLD* 均低于下层 (20 ~ 40cm), 高峰值一般出现在 40 ~ 80cm, 此深度以下平均 *RLD* 随深度递减,3 龄果树的表层平均 *RLD* 值高于下层,同时,局部深度存在平均 *RLD* 高值点,对各径向测点同一树龄不同土层 *RLD* 的方差分析表明,15 龄和 20 龄各径向测点的土层间差异显著,10 龄在径向 2m 测点差异显著。

2.3.3 细根 *RLD* 径向分布特征

图4显示各龄苹果不同深度的细根平均 *RLD* 径向变化。3 龄苹果细根平均 *RLD* 在 60cm 土层以上各层基本表现为随径向距离增大而减小,方差分析表明除 0 ~ 20cm 外,径向间差异不显著。在 60cm 以下各层由于细根分布较少,以及细根的簇状生长,*RLD* 的径向变化规律不明显。10 龄苹果细根平均 *RLD* 在 80cm 土层以上总体随径向距离的增大而增大,但差异不显著,在 80cm 以下各层次径向变化规律不明显。15 龄苹果树细根平均 *RLD* 在观测深度内基本表现为随径向距离的增加而减小,径向 1.0m 和 2.0m 间差异显著,同时各层次的变动幅度存在差异。20 龄苹果树平均 *RLD* 在观测深度内以随径向距离增加而减小为主,但局部层次存在随径向距离增大而增大或不变的现象。从总体上看,3 龄、15 龄和 20 龄苹果树细根平均 *RLD* 以随径向距离增大而降低为主,10 龄 *RLD* 则以随径向距离增大而升高为主,但各树龄的 *RLD* 均存在局部径向变异的现象。

3 结语

细根是苹果树吸收土壤水分和养分的重要器官。苹果细根的空间分布状况反映了其利用环境资源的能力,是其生产力及稳定性高低的决定因素^[16]。

表2 不同树龄苹果平均根长密度

Table 2 Average root length densities (RLDs) for different aged apple trees

树龄 Stand age (a)	样本数 Sample number	平均根长密度 ± 标准误 M ± SE (cm cm ⁻³)
3	70	0.015 ± 0.003 a
10	108	0.019 ± 0.003 a
15	108	0.102 ± 0.016 b
20	108	0.072 ± 0.010 b

* 显著性水平为 $\alpha = 0.01$, 相同字母表示处理间没有显著差异

The test results are at significant level of 0.01% based on LSD's test; the same letter in each column indicates that there is no significant difference between the treatments

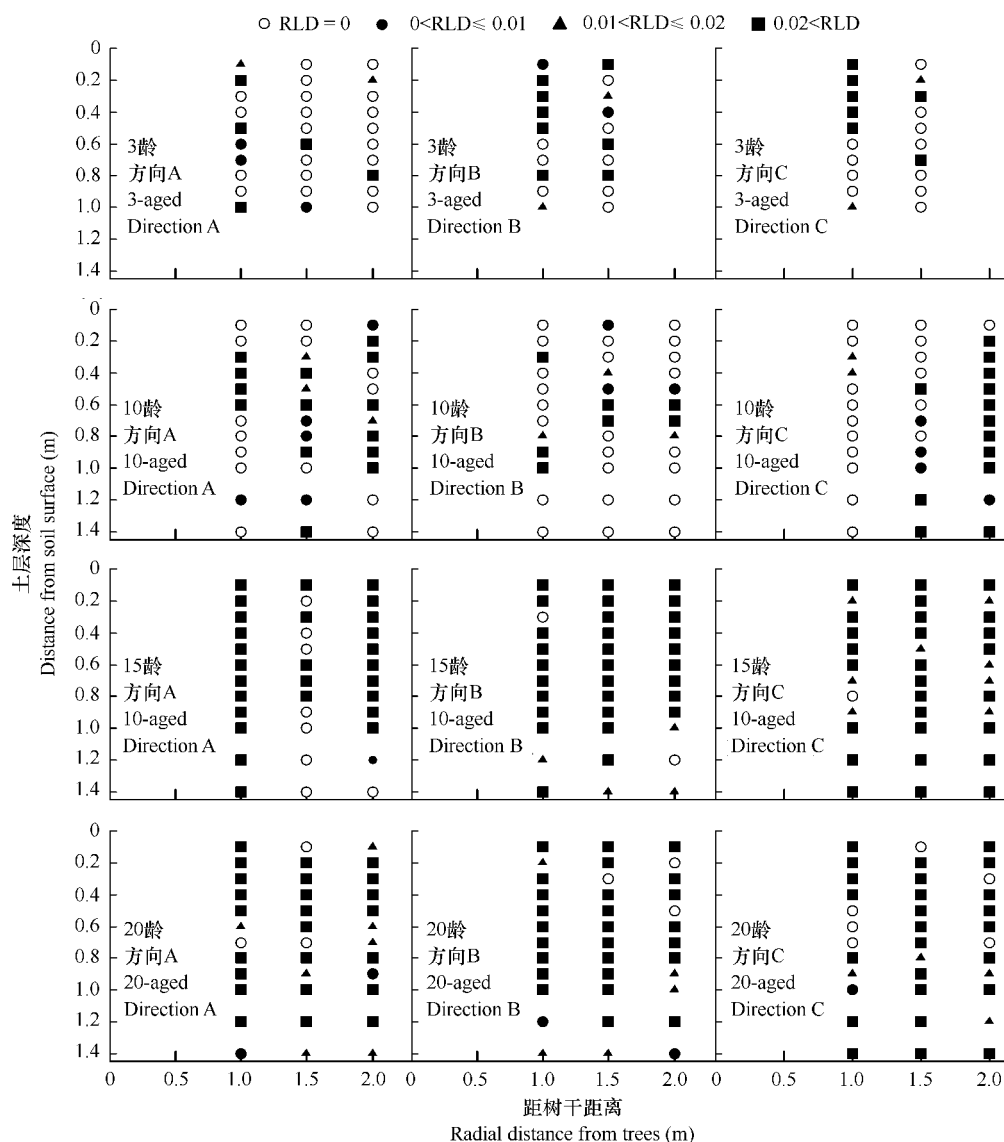


图2 各龄苹果树细根根长密度空间分级分布

Fig. 2 Spatial distribution of root length density (RLD) for different aged apple trees

A 方向为阳面, A、B、C 逆时针方向间隔 120° A, B, and C designate aspect by an interval of 120°, starting with A designating sunny aspect

苹果树生命周期一般可分为幼年期、初果期、盛果期和衰老期 4 个年龄时期,细根的空间分布在果树不同年龄时期具有不同的特征,表现出一定的阶段性^[14]。不同的年龄期细根空间分布的差异主要表现为细根分布范围和细根分布密度的差异,细根空间分布的变化也即细根分布范围和细根分布密度的变化。试验结果显示 3 龄和 10 龄苹果细根平均 RLD 相差不大,细根分布密度差异不大,而 3 龄细根主要分布范围在径向 1.5m 以内,10 龄细根已接近 15 龄和 20 龄,说明从 3 龄到 10 龄细根生长主要表现为分布范围的扩张。10 龄和 15 龄的平均 RLD 分别为 $0.019\text{cm}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $0.102\text{cm}\cdot\text{cm}^{-3}$,约增加了 4 倍,表明细根在前期分布范围扩展的基础上,转向以密度扩展为主的阶段。15 龄到 20 龄平均 RLD 约降低了 30%,表明细根空间分布密度减小,细根的生长发育已步入退化阶段。根据细根平均 RLD 的变化规律可将细根空间分布演化过程变化划分成 3 个阶段,即 3~10 龄为细根的范围扩张阶段,10~15 龄为细根的密度扩张阶段,15~20 龄为细根的密度退化阶段。研究结果显示,在不同的年龄期苹果细根范围变化和密度变化不一致,细根的发育经历了以范围扩张为主的阶段,然后是密度扩张的阶段,最后进入细根的密度退化阶段。

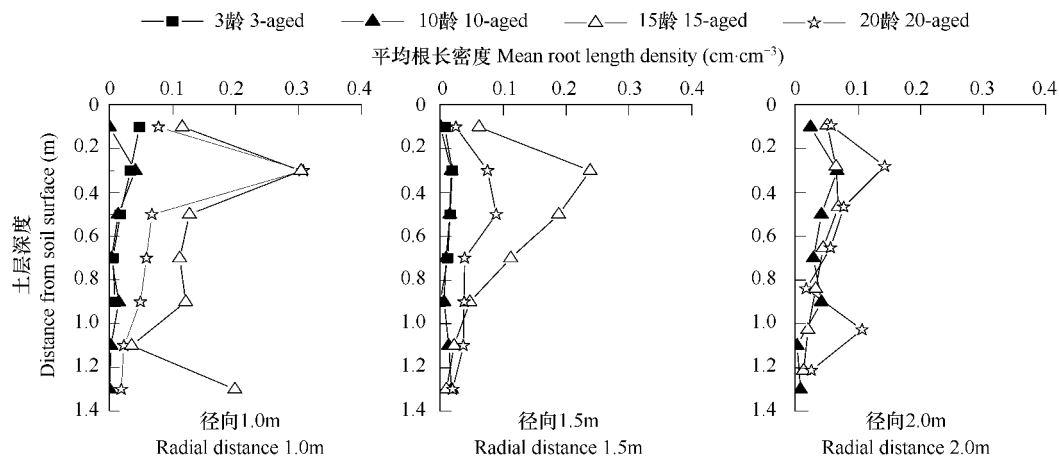


图3 各径向测点的苹果细根根长密度垂直分布

Fig. 3 Root length density against soil depth for different aged apple trees in different radial distances

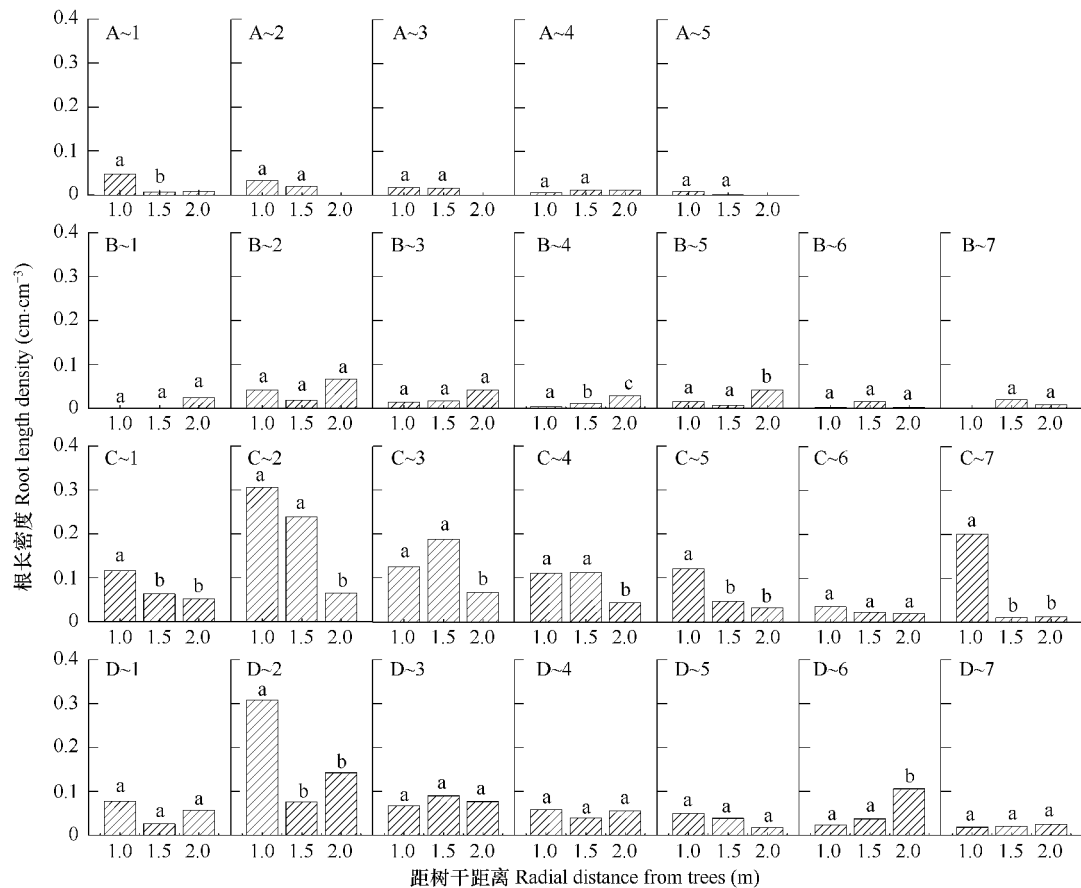


图4 各土层的苹果细根根长密度径向分布

Fig. 4 Root length density against radial distance from trees at different depths

A: 3龄 3-aged apple tree; B: 10龄 10-aged apple tree; C: 15龄 15-aged apple tree; D: 20龄 20-aged apple tree; ~1: 深度 depth 0—20cm; ~2: 深度 depth 20—40cm; ~3: 深度 depth 40—60cm; ~4: 深度 depth 60—80cm; ~5: 深度 depth 80—100cm; ~6: 深度 depth 100—120cm; ~7: 深度 depth 120—140cm

根系空间分布特征除受树种遗传特性的影响外,还很大程度上受到土壤环境条件的影响^[9]。郝仲勇

等^[17]研究发现有灌溉的 7 龄富士细根根长密度垂直分布随深度的增加而逐渐减小,而本试验表明苹果根长密度一般在 40~80cm 最大。水资源亏缺是本区的主要环境特征之一,如试验同期测得衰老期果园 6m 剖面土壤平均含水量仅为 9.4%,接近当地的水分凋萎系数(9%~12%),而长期处于水分亏缺状态势必导致根系以下扎方式获取水分,从而表现出根系分布中心下移的现象。

References:

- [1] Schenk H J. Vertical vegetation structure below ground scaling from root to globe. *Ecology*, 2005, 66: 341—373.
- [2] Bowen G D. Tree roots and the use of soil nutrients. In: G. D. BOWEN, ed. *Nutrition of Plantation Forests*. London: Academic Press, 1984. 147—177.
- [3] Johnson M G, Tingey D T, Phillips D L, *et al.* Advancing fine root research with minirhizotrons. *Environmental and Experimental Botany*, 2001, 45: 263—289.
- [4] Hendrick R L, Pregitzer K S. Patterns of fine root mortality in two sugar maple forest. *Nature*, 1993, 361: 59—61.
- [5] Hughes K A, Gandar P W. Length densities, occupancies and weights of apple root system. *Plant and Soil*, 1993, 148: 211—221.
- [6] Yang H Q, Jie Y L, Zhang L Z, *et al.* Effects of root pruning and shoot pruning on water use efficiency of apple leaves. *Acta Horticulturae Sinica*, 2002, 29(3): 197—202.
- [7] Liu W Z, Li Y Y. Effect of crop root-cutting on grain yield and water use efficiency: a review. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin*, 2003, 23(8): 1320—1324.
- [8] Eissenstat D M, Bauerle T L, Comas L H, *et al.* Seasonal patterns of root growth in relation to shoot phenology in grape and apple. In: J. B. Retamales, G. A. Lobos, eds. *Proceedings of the fifth international symposium on mineral nutrition of fruit plants*. *Acta Horticulture* 721, 2006. 21—26.
- [9] Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, *et al.* A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 1996, 108: 389—411.
- [10] He W M, Dong M. Root growth of the annual tillering grass *panicum milliaceum* in heterogeneous nutrient environments. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(8): 846—851.
- [11] Wang D S, Shu H R. Effects of soil physical and chemical factors on the growth development of apple roots. *Journal of Fruit Science*, 1997, 14(2): 110—112.
- [12] Zhang J S, Meng P, Yin C J. Spatial distribution characteristics of apple tree roots in the apple-wheat intercropping. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(4): 30—33.
- [13] Wang Z Q, Liu B Y, Lu B J. A study on water restoration of dry soil layers in the semi-arid area of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1944—1950.
- [14] Guo M Z. Matching techniques for safe, high quality and benefit of apple production. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2006. 5—8
- [15] Silva H N, Hall A J, Tustin D S, *et al.* Analysis of distribution of root length density of apple trees on different dwarfing rootstocks. *Annals of Botany*, 1999, 83: 335—345.
- [16] Stone E L, Kalisz P J. On the maximum extent of tree roots. *Forest Ecology and Management*, 1991, 46: 59—102.
- [17] Hao Z Y, Yang P L, Liu H L, *et al.* Experimental investigation on root system distribution. *Journal of China Agricultural University*, 1998(6): 63—66.

参考文献:

- [6] 杨洪强, 接玉玲, 张联忠, 等. 断根和剪枝对盆栽苹果叶片光合蒸腾及 WUE 的影响. *园艺学报*, 2002, 29(3): 197~202.
- [7] 刘文兆, 李秧秧. 断伤作物根系对籽粒产量与水分利用效率的影响研究现状及问题. *西北植物学报*, 2003, 23(8): 1320~1324.
- [11] 王东升, 束怀瑞. 土壤理化因子对苹果树根系生长发育的影响. *果树科学*, 1997, 14(2): 110~112.
- [12] 张劲松, 孟平, 尹昌君. 果农复合系统中果树根系空间分布特征. *林业科学*, 2002, 38(4): 30~33.
- [13] 王志强, 刘宝元, 路炳军. 黄土高原半干旱区土壤干层水分恢复研究. *生态学报*, 2003, 23(9): 1944~1950.
- [14] 郭民主. 苹果安全优质高效生产配套技术. 北京: 中国农业出版社, 2006. 5~8