

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.033.

王达未, 陈东凯, 骆汉, 等. 渭北旱塬不同树龄矮砧密植苹果园土壤水分空间分布特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6):188-198.

Wang Dawei, Chen Dongkai, Luo Han, et al. Spatial Characteristics of Soil Moisture in Dense Planting Dwarf Rootstock Apple Orchards with Different Tree Ages in Weibei Dry Highland [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6):188-198.

渭北旱塬不同树龄矮砧密植苹果园 土壤水分空间分布特征

王达未^{1,2,3}, 陈东凯⁴, 骆汉^{2,4}, 谢永生^{2,4,5}

(1.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学, 北京 100049;

4.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 5.陕西汉唐环保农业有限公司, 西安 710065)

摘要: [目的] 提高土壤水分利用效率, 为矮砧密植苹果园水分管理提供参考, 实现果园的可持续高质量发展。 [方法] 通过空间代时间的方法, 以人工打土钻的方式定期采集 6 a、9 a 和 12 a 果园 0—300 cm 的土样, 监测树下、株间、中间点和行间位置的土壤水分状况, 揭示了不同树龄和空间位置的果园土壤水分变化特征。 [结果] (1) 在垂直方向上, 各树龄果园的土壤含水量在雨季前、中、后期差异显著, 土壤含水量随土层深度呈现减—增—减—增的变化趋势。(2) 在水平方向上, 各树龄果园在雨季前、中、后期的土壤含水量分布特征相似, 即树下的含水量明显小于株间、行间和中间点, 尤其是树下位置浅层(0—60 cm)和中层(60—160 cm)的土壤水分亏损最多。 [结论] 雨季前(3—6 月)是矮砧密植苹果园水分亏缺最多的时期, 此时应及时人工灌溉; 苹果树主要吸水部位是树下土壤浅层(0—60 cm)和中层(60—160 cm), 应加强对树下部位的灌溉。

关键词: 渭北旱塬; 矮砧密植; 苹果园; 土壤水分; 空间分布特征

中图分类号: S661.1; S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0188-11

Spatial Characteristics of Soil Moisture in Dense Planting Dwarf Rootstock Apple Orchards with Different Tree Ages in Weibei Dry Highland

Wang Dawei^{1,2,3}, Chen Dongkai⁴, Luo Han^{2,4}, Xie Yongsheng^{2,4,5}

(1. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment,

Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. Shaanxi Hantang Environmental Protection Agriculture Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to enhance soil water utilization efficiency, to provide a reference for water management in dense planting dwarf rootstock apple orchards, and to realize the sustainable and high-quality development of orchards. [Methods] The space-time substitution method was employed to regularly collect soil samples of 0—300 cm from 6-year-old, 9-year-old, and 12-year-old orchards through artificial drilling. Soil moisture conditions at different spatial positions such as under trees, between plants, midpoints and rows were consistently monitored to reveal the characteristics of soil moisture changes in orchards with varying tree ages and spatial positions. [Results] (1) Vertically, significant differences existed

收稿日期: 2024-01-11

修回日期: 2024-04-15

资助项目: 陕西省科技重大专项资助项目“苹果优质高效生产关键技术研发与示范”(2020zdzx03-02-01)

第一作者: 王达未(2000—), 女, 内蒙古通辽人, 硕士研究生, 研究方向为植物生理生态。E-mail: wangdawei@nwafu.edu.cn

通信作者: 骆汉(1985—), 男, 山东淄博人, 博士, 副研究员, 主要从事水土保持与土壤侵蚀研究。E-mail: hanl@iswc.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

in soil moisture content among orchards of different ages during pre-rainy season periods, mid-rainy season periods and post-rainy season periods. The trend of soil moisture content exhibited a ‘decrease-increase-decrease-increase’ shape with the depth. (2) Horizontally, the distribution characteristics of soil moisture content in orchards of different ages during pre-rainy season, mid-rainy season, and post-rainy seasons were similar. Specifically, the moisture content under trees was significantly lower than between plants, between rows, and at intermediate points. Especially, the shallow layer (0—60 cm) and middle layer (60—160 cm) of soil under trees experienced the most water loss. [Conclusion] The period before rainy season (March—July) is the most serious period of water deficit in dense planting dwarf rootstock apples. Timely artificial irrigation should be carried out. The main water absorption parts of apple trees are the shallow layer (0—60 cm) and the middle layer (60—160 cm) of the soil under the tree. The irrigation in the soil under the tree should be strengthened.

Keywords: Weibei dry highland; dwarf rootstock dense planting; apple orchards; soil moisture; spatial distribution

苹果(*Malus pumila* Mill.)属蔷薇科苹果亚科苹果属多年生木本植物,是黄土高原地区的支柱产业^[1-2],其中渭北苹果产量高,品质好,正逐渐从“数量规模型”进入“质量效益型”转变阶段^[3]。这得益于黄土高原地区是全国苹果主产区中唯一符合生产优质苹果7项气象指标要求的最佳优生区^[4],该地区四季分明、日照充足,光热资源丰富,海拔高(800~1 200 m),昼夜温差大,土层深厚且质地疏松,富含多种微量元素(钾、钙、镁、锌、硒等),其中渭北苹果主产区远离工业区,污染少,更具有生产绿色无公害果品的优越条件^[5]。尽管渭北旱塬拥有得天独厚的种植条件,但渭北旱塬属于干旱半干旱气候,降水量年际变化大,季节分配不均,65%以上集中在雨季,导致自然降水与苹果需水时期极不协调,同时渭北地区土壤蒸发量大,蒸发量达1 400~1 600 mm,降水补给少于蒸腾蒸发量,导致渭北果树大多存在水分亏缺状态,因此水分是制约该地区苹果生长的关键影响因素^[6-7]。

由于乔化密植苹果园树冠高大、郁闭,根系分布深而广,在降水偏少且分布不均、无灌溉水源的渭北旱塬易产生果园土壤干燥化^[8-9],造成果园早衰,影响苹果产业的健康持续发展^[10],矮砧密植早花、早果、丰产,且树体矮小,果实品质高,便于日常管理,是世界苹果矮化密植及集约化、商品化、区域化栽培的主要途径^[11],因此苹果树栽培的关注点从过去的乔化密植到如今的矮砧密植。然而矮砧苹果树也有明显缺点,由于根系浅生长快,如果水分不足很容易出现“大小脚”,树体早衰的现象,严重影响苹果产量^[11],所以,矮砧苹果园尤其要重视土壤水分的时间和空间变化状况,以及雨季后的雨水分状况,这对提高苹果品质,增加果农收入,发展黄土高原林果业有重要意义。在现有研究中,王宪志等^[12]利用EPIC模型对乔化果园多年来的水分变化和水分生产力加以评估,曹裕等^[13]总结

了洛川旱塬乔化果园的水肥特征,以及通过多年田间定位试验发现长期合理的施肥能有效提升苹果产量及品质^[14],目前已有研究对各地区矮砧密植苹果园的土壤水分研究进行初步探索;白岗栓等^[15]通过研究不同栽培模式下的苹果树对土壤干燥化的影响程度,得出渭北旱塬应积极推广矮化密植栽培的结论;曹辉等^[16]在新疆南疆研究了不同灌水量对矮砧密植苹果光合特性、产量及水分利用效率的影响。以往研究主要针对乔化苹果园的水肥管理,关于渭北地区矮砧密植苹果园土壤水分管理的相关研究相对较少,尤其针对不同树龄矮砧密植苹果园土壤含水量,在不同时间段(尤其是雨季前后)动态变化研究仍较少。

因此,本文以渭北旱塬矮砧密植苹果园为研究对象,通过分析雨季前、中、后期不同树龄矮砧密植苹果园土壤含水量的变化,揭示矮砧密植苹果园土壤的时空水分分布和变化特征,以期在当地果园生态系统的可持续管理提供理论依据和数据支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

渭南市白水縣(35°04'N, 109°16'E)位于黄土高原丘陵沟壑区,属于半湿润大陆性季风气候,昼夜温差大,年平均气温11.4℃,平均海拔850 m,光照充足且降水较为丰沛,无霜期207 d,年均降水量550 mm,年蒸发量1 500 mm。

选择位于白水縣的“西北农林科技大学白水苹果试验站”“汉唐现代农业园”和“白水生态矮砧密植示范园”3个园区作为试验果园。所选3个果园其种植年限分别为6龄(6 a)、9龄(9 a)和12龄(12 a),均为南北走向管理措施一致,主要土壤类型为黄绵土,砧木品种为“M26”,接穗品种为“富士”,果园株行距1.5 m×4 m,定植带宽50 cm,每行定植带中部位置

起垄,果园拥有水肥一体化设施,滴灌带位于定植带上方 30 cm。具体的管理措施有:每年春季疏花,夏季和冬季各修剪一次果树使果树形呈高纺锤形;每年秋季采摘后,施加基肥标准为氮肥 200~300 g/株、磷肥 600~700 g/株、钾肥 150~200 g/株、有机肥 30~40 kg/株,夏季时进行追肥,追肥标准为氮肥 150~200 g/株、磷肥 200~300 g/株、钾肥 200~300 g/株。施肥方式为沟施,沟施地点位于平行于定植带、距果树主干 50 cm 的带外,其中施肥沟深 40 cm、宽 30 cm,长度与定植带长度一致。

1.2 研究方法

试验于 2022 年 7 月开始,2023 年 7 月结束,根据当地气候特点,将试验期分为雨季中(2022 年 7 月—10 月)、雨季后(2022 年 11 月—2023 年 2 月)与雨季前(2023 年 3 月—6 月)3 个试验阶段,雨季前、中和后期分别对应苹果一年内的不同生长时期,雨季前(3—6 月)对应果树开花坐果期(4 月 20 日)、幼果膨大期(5 月 20 日)、花芽分化期(6 月 20 日),雨季中(7—10 月)对应果实膨大期,雨季后(11 月—次年 2 月)对应果树休眠期。

其中每月首日和中旬对各果园定位取样,为避免边际效应,选择在果园中部位置进行。选择 3 棵长势相同的果树,以中间果树为试验树,再在相邻两行以同样的方式选择两棵果树,每个果园共选择 3 棵果树,最终使所选果树的连线呈三角形。在每棵试验树周围采用人工打土钻的方式采集土样,土钻钻头直径 5 cm,每次采样深度 20 cm,总深度 300 cm。根据表现出的土壤剖面水分分布特点,从而将 0—300 cm 土层分为土壤浅层(0—60 cm),土壤中层(60—160 cm)和土壤深层(160—300 cm)以便于宏观上对土壤水分进行分析。每棵试验树设置 5 个采样点,分别为树下(在定植带内距树干 10 cm)、株间(离树干中心两侧 75 cm 各一处取样点)、中间点(垂直于定植带距树干中心 1 m 处)、行间(垂直于定植带距树干中心 2 m 处),中间点和行间取样点的位置应选择试验当年未施肥的一侧。每个果园共计 15 个采样点,分布如图 1 所示。

1.3 样品处理与测定

将每层土内各个取样点的土样进行混合,挑拣出树枝,树叶等杂质,使用烘干法求得各点每层土壤的质量含水量(W)

$$W = \frac{m_w - m_s}{m_s} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_w 为烘干前的土壤鲜量(g); m_s 为烘干后的土壤干量(g); W 为质量含水量(%),每 20 cm 土层的土样都使用同样的方法测量 3 次,求平均值作为该

层土壤的质量含水量,代表该地土壤的湿度水平。

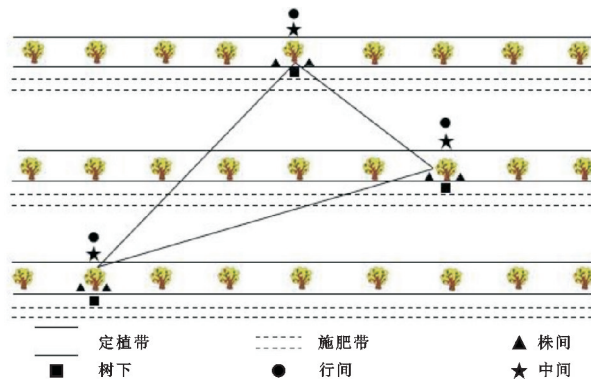


图 1 采样示意图

Fig. 1 Schematic illustration of sampling points

土壤储水量由下式计算:

$$SWS = 0.1 \times \theta_m \times BD_i \times d \quad (2)$$

式中: SWS 为土壤储水量(mm); θ_m 为测得的该层土壤质量含水量(%); BD_i 为该层土壤容重(g/cm^3); d 为土层厚度(cm)。

利用该地区雨季后 5 a(2007—2011 年)平均含水量来代表矮砧密植果园土壤的田间持水量,即初始土壤水分状态。该地区年平均气温无较大波动,尽管有异常湿润或者干旱的年份,但连续 3 a 或者 4 a 的田间持水量变化不大^[17]。土壤水分亏缺量是指土壤储水量与田间持水量之间的差额^[18],因此苹果园初始含水量为多年田间持水量平均值。计算苹果园初始含水量与苹果园吸水后在同一深度上土壤水分的差异表示果园栽植后的土壤水分减少量,即土壤水分亏缺。具体计算如下:

$$\Delta S = \sum_{i=1}^n (\theta_c - \theta_a) \times BD_i \times d_i \times 0.1 \quad (3)$$

式中: ΔS 为土壤水分亏缺量(mm); θ_c 和 θ_a 分别为初始含水量和苹果园在第 i 层的土壤质量含水量(%); d_i 为该层的土层厚度(cm); n 为取样的土层数($n=15$); BD_i 为土壤容重(g/cm^3),其中测定的土壤容重为 $1.2 g/cm^3$ 。

1.4 数据处理

同龄果园中,3 棵果树同一水平方向含水量取多次测量平均值,分析雨季前、中、后土壤含水量的水平分布;对 3 棵果树的各个水平方向上同一土层位置含水量统计平均值,分析雨季前、中、后土壤含水量的垂直分布。使用 Excel 2021 对数据进行记录和预处理并统计不同水平位置各测点下土壤含水量 3 次测定的平均含水率,土壤储水量和土壤水分亏损。使用 SPSS 23.0 进行含水量的方差分析(检验水平为 95.0%)。使用 Origin 2022 绘制图表。图中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 雨季前、中、后不同树龄苹果园土壤剖面水分变化特征

2.1.1 雨季前、中、后不同树龄苹果园土壤剖面含水量变化特征 在雨季前、中、后3个时期里(图2),6 a,9 a和12 a果园300 cm内的土壤含水率几乎保持在10%~20%,在土壤剖面上表现出相似的变化特征,均呈现出3个含水量折点:分别出现在60,100,160 cm土层深度,其中60 cm和160 cm为土壤浅层,中层和深层的分界深度,含水量随土层深度增加整体上表现为“减—增—减—增”的变化趋势,3个含水量峰值为变化的折点,但折点对应的准确的实际土层深度可能略有不同,这可能是不同树龄果园对土壤水分的吸收能力不同所造成的细微差别。

在土壤水分垂直分布的剖面上,6 a,9 a和12 a果园的土壤含水量在整体上存在着雨季中>雨季前>雨季后的规律,且雨季前、中、后时期各树龄果园土壤水分垂直变化规律相似(图2):浅层土壤(0—60

cm)和中层(60—160 cm)土壤水分变化剧烈,深层土壤(160—300 cm)水分增长平缓,且同时期内各果园土壤深层水分增长速率基本一致。

雨季前(图2A),各树龄果园的土壤浅层中,土壤水分随着土层深度的增加显著降低($p<0.05$),雨季中(图2B)和雨季后(图2C)各树龄土壤水分变化情况与雨季前(图2A)相同。雨季前(图2A)土壤浅层(0—60 cm)和土壤中层(60—160 cm)含水量相较于雨季中(图2B)出现了明显的减少($p<0.05$),土壤深层(160—300 cm)相较于雨季中(图2B)同样出现了不明显减少($p>0.05$)。而雨季前(图2A)相较于雨季后(图2C)各土层产生不明显的增加($p>0.05$),6 a果园浅层和中层土壤含水量增加了约3%,深层土壤含水量增加了约1%,9 a果园浅层土壤含水量增加了约4%,中层和深层土壤含水量增加了2%,12 a果园浅层、中层和深层土壤含水量分别增加了约2%,3%,4%,总体上各树龄果园雨季中到雨季后这段时期土壤失水严重,且雨季后到来年的雨季前时期水分虽有恢复但恢复较少。

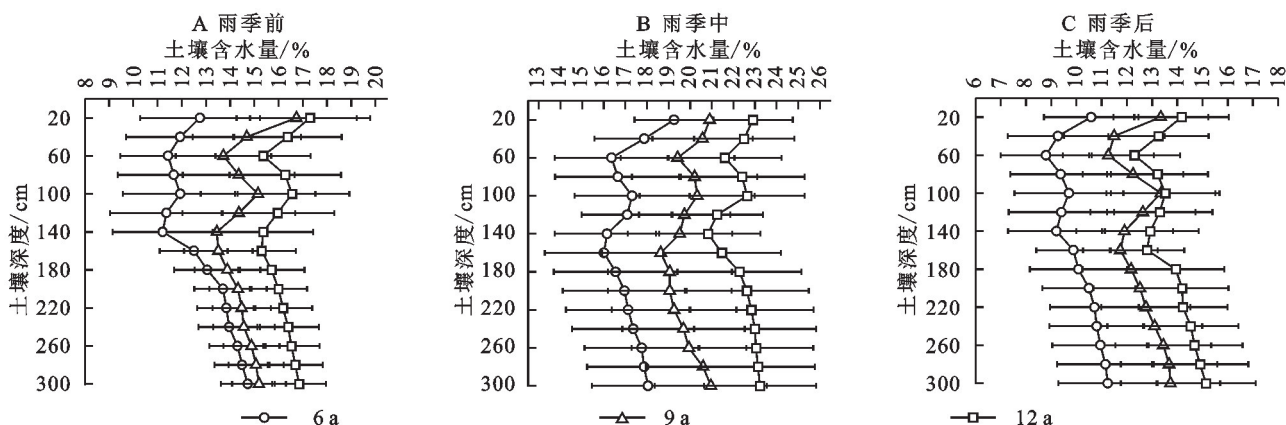


图2 不同时期不同树龄苹果园土壤剖面含水量

Fig. 2 Soil profile water content in apple orchards of different ages in different periods

2.1.2 雨季前、中、后不同树龄苹果园土壤剖面储水量变化特征 在雨季前、中、后3个时期,经过多次统计并计算平均值得出,同树龄果园0—300 cm内土壤储水总量差异显著($p<0.05$)。雨季中时期各树龄果园土壤储水量最大,其次是雨季前和雨季后时期;在雨季前时期,9 a果园储水量(524.1 mm)比6 a果园(462.9 mm)显著增加了13%($p<0.05$),12 a果园储水量(582.8 mm)比9 a果园(524.1 mm)显著增加了11%($p<0.05$);在雨季中时期,9 a果园储水量(714.9 mm)比6 a果园(620.2 mm)显著增加了15%($p<0.05$),12 a果园储水量(805.7 mm)比9 a果园(714.9 mm)显著增加了11%($p<0.05$);在雨季后时期,9 a果园储水量(454.5 mm)比6 a果园(364.0 mm)显著增加

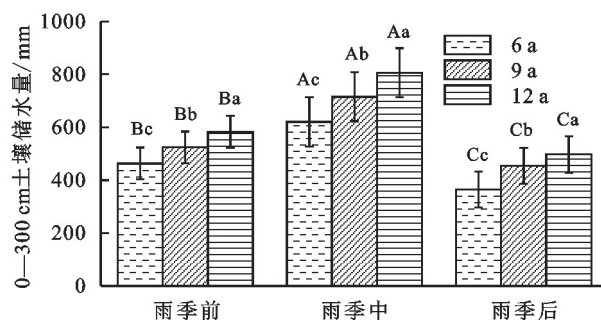
了13%($p<0.05$),12 a(497.1 mm)果园储水量比9 a果园(454.5 mm)显著增加了13%($p<0.05$)。在雨季前、中、后3个时期,6 a果园土壤储水量最少,12 a果园土壤储水量最大,9 a果园储水量居中(图3)。

2.2 雨季前、中、后不同树龄苹果园土壤水分水平变化特征

2.2.1 雨季前、中、后不同树龄苹果园土壤含水量水平变化特征 对于6 a果园来说,雨季前(图4A)各水平位置含水量差值在8%~18%,雨季中(图4B)各水平位置的含水量差值在12%~28%,雨季后(图4C)各水平位置的含水量差值在6%~15%,雨季中土壤含水量最大,其次是雨季后,雨季前含水量最小。不同时期下各位置的含水量大小表现为中间>行间>株间>树下,对

于树下位置来说,雨季前(图 4A)和雨季后(图 4C)各土层的土壤含水量变异程度比雨季中(图 4B)变异程度大,株间位置水分变异程度和树下位置变异程度相似。行间和中间位置下各土层含水量变异程度表现为各时期下雨季前和雨季中小,雨季后大的特征。

对于 9 a 果园(图 5),雨季前、中、后 3 个时期内各水平位置的土壤含水量变化趋势相似,中间>行间>株间>树下,9 a 果园各水平位置的土壤水分无明显的变化,雨季前各水平位置土壤含水量在 9%~20%,雨季中在 14%~27%,雨季后各水平位置含水量集中在 10%~20%,这与 6 a 苹果园浅层土壤(0—60 cm)水分波动幅度大,深层土壤(160—300 cm)水分波动幅度小相同。



注:图柱上方不同小写字母表示同一时间内不同树龄果园间土壤储水量差异显著($p<0.05$);不同大写字母表示同一树龄果园内不同时间内的土壤储水量差异显著($p<0.05$)(下同)。

图 3 不同时期 6 a, 9 a 和 12 a 果园土壤储水量
Fig. 3 Soil water storage in orchards of 6 a, 9 a and 12 a trees at different periods

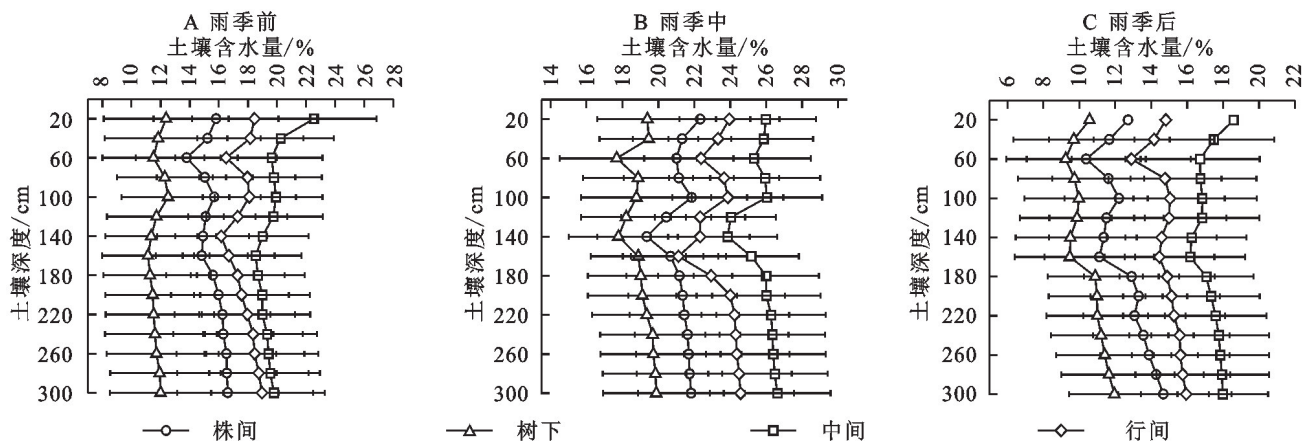


图 4 6 a 苹果园不同时期不同水平位置土壤含水量

Fig. 4 Soil water content in 6-year-old apple orchard at different periods and different horizontal positions

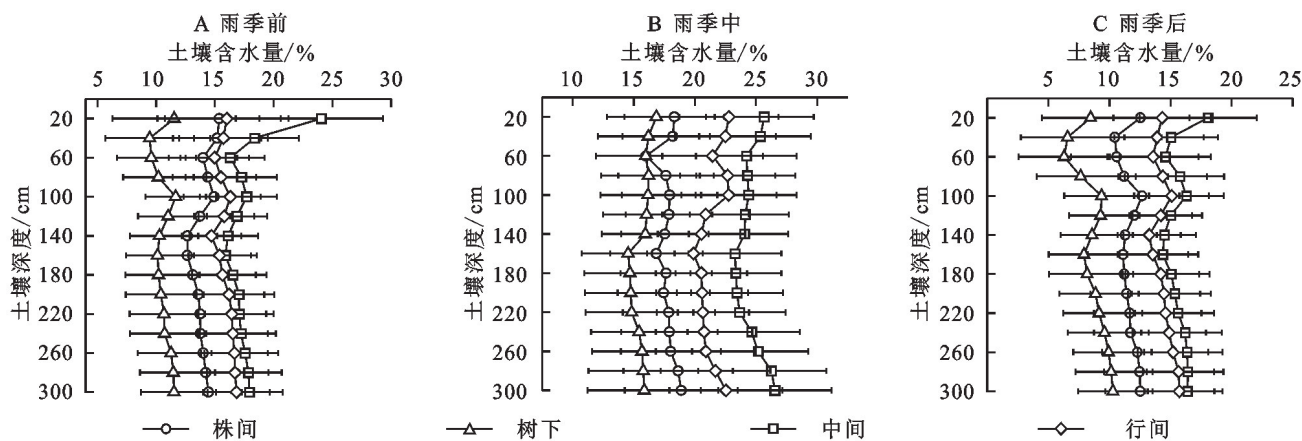


图 5 9 a 苹果园不同时期不同水平位置土壤含水量

Fig. 5 Soil water content in 9-year-old apple orchard at different periods and different horizontal positions

同 6 a 苹果园相同,9 a 果园各水平位置含水量在土壤剖面下总体表现为减少—增加—减少—增加的规律,雨季前(图 6A),土壤浅层(0—60 cm)各位置含水量减少,土壤中层(60—160 cm)各位置含水量在各位置下含水量减少,土壤深层(160—300 cm)各水平位置含水量增加,雨季中(图 6B)和雨季后(图 6C),土壤浅层(0—60 cm)、土壤中层(60—160 cm)

和土壤深层(160—300 cm)各位置含水量随着深度的变化与雨季前(图 5A)基本相同。对于树下位置来说,雨季前(图 5A)和雨季后(图 5C)各土层的土壤含水量变异程度比雨季中(图 5B)变异程度大,株间位置水分变异程度和树下位置变异程度相似。各位置下土壤含水量变异程度表现为树下>株间>行间>中间。

对于12 a苹果园(图6),雨季前、中、后3个时期土壤含水量随土层深度呈现出相似的水平规律,不同水平位置的含水量大小表现为中间>行间>株间>树下,各水平位置含水量在土壤剖面下总体表现为减少—增加—减少—增加的规律,这与6 a和9 a相同。

雨季前(图6A),各水平位置含水量在12%~23%;雨季中(图6B),各水平位置含水量在17%~26%;雨季后(图6C),各水平位置含水量在8%~19%,土壤深层(160—300 cm)内各水平位置含水量

在11%~17%,不同时期内浅层含水量在不断减少,中层含水量先增加后减少,深层含水量不断增加。另外,雨季前、中、后浅层土壤(0—60 cm)土壤含水量变化表现为中间和树下变化大,株间和行间变化小的特点,对于树下位置来说,雨季中(图6B)和雨季后(图6C)各土层的土壤含水量变异程度比雨季前(图6A)变异程度大,其他位置水分变异程度和树下位置变异程度相似。各位置下土壤含水量变异程度表现为树下>株间>行间>中间。

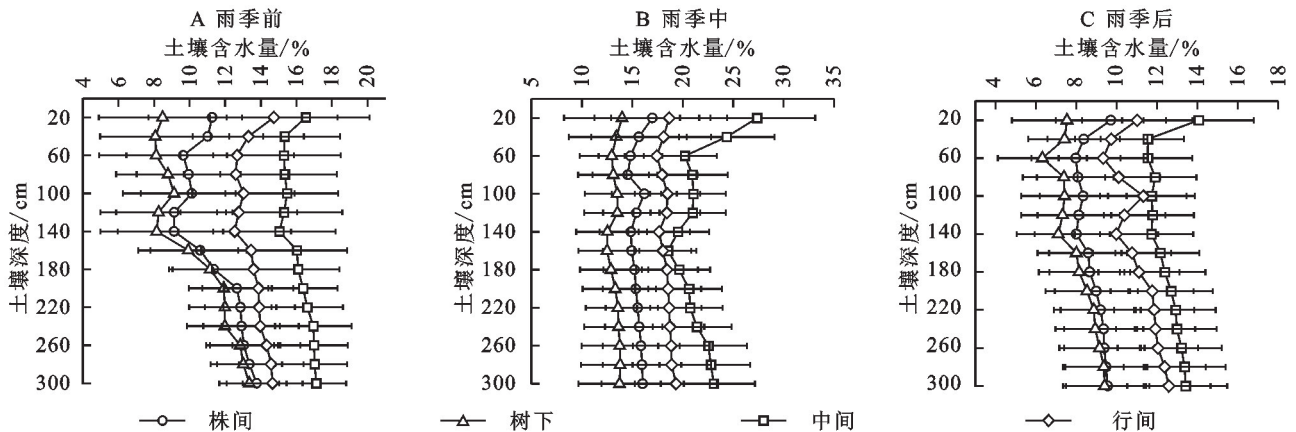


图6 12 a苹果园不同时期不同水平位置土壤含水量

Fig. 6 Soil water content in 12-year-old apple orchard at different periods and different horizontal positions

2.2.2 雨季前、中、后不同树龄苹果园土壤储水量水平变化特征 对于6 a果园(图7),经过对各水平位置土壤储水总量数值多次统计并计算平均值得出,同时期内各水平位置0—300 cm内土壤储水总量差异显著($p<0.05$)。雨季前时期,树下位置土壤储水量(372.5 mm)与其他位置差异显著,比株间(410.1 mm)、中间(579.7 mm)和行间(489.5 mm)位置分别少9%,35%,31%;雨季中时期,树下位置土壤储水量(480.9 mm)与其他位置差异显著,比株间(480.9 mm)、中间(777.4 mm)和行间(662.9 mm)位置分别少14%,38%,27%;雨季后时期,株间、树下、株间和行间位置土壤储水量分别为316.5,290.3,450.0,399.2 mm,各位置间土壤储水量差异不显著。各位置储水量中间>行间>株间>树下,雨季中与雨季后亦然。同时,各时期内雨季中各位置的土壤储水量最大,其次是雨季前,雨季后各位置的土壤储水量最小。各水平位置中,各土层土壤含水量既有消耗也有补充,但仅有树下位置补充量比消耗量少,且浅层土壤水分的消耗量大于中层土壤的水分消耗量。

对于9 a果园(图8),经过对各水平位置土壤储水总量数值多次统计并计算平均值得出,同时期内各水平位置0—300 cm内土壤储水总量差异显著($p<0.05$)。雨季前时期,树下位置土壤储水量(384.5 mm)与株间位置(503.8 mm)差异不显著,但与其他位置差异显著,比

中间(633.2 mm)和行间位置(574.8 mm)分别少35%和31%;雨季中时期,树下位置土壤储水量(564.2 mm)与其他位置差异显著,比株间(640.3 mm)、中间(884.5 mm)和行间位置(770.8 mm)分别少9%,35%和31%;雨季后时期,树下位置土壤储水量(312.7 mm)与株间位置(420.5 mm)差异不显著,但与其他位置差异显著,比中间(564.1 mm)和行间(520.8 mm)位置分别少35%和31%,各位置储水量中间>行间>株间>树下,雨季中与雨季后亦然。同时,各时期内雨季中各位置的土壤储水量最大,其次是雨季前,雨季后各位置的土壤储水量最小。

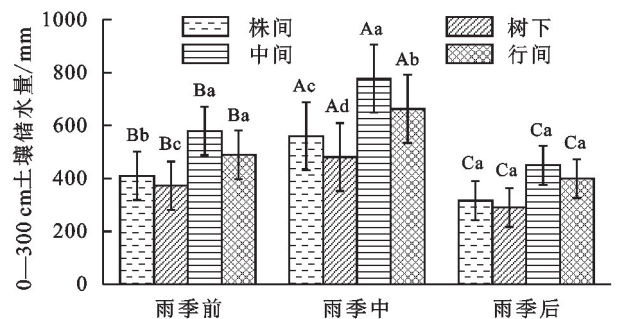


图7 6 a苹果园不同时期不同水平位置土壤储水量

Fig. 7 Soil water storage capacity of 6-year-old apple orchards at different periods and different horizontal positions

对于12 a果园(图9),经过对各水平位置土壤储水总量数值多次统计并计算平均值得出,同时期内各水平位置0—300 cm内土壤储水总量差异显著($p<0.05$)。

雨季前时期,树下位置土壤储水量(423.1 mm)与株间位置(562.2 mm)差异不显著,但与其他位置差异显著,比中间(705.8 mm)和行间位置(639.9 mm)分别少40%和34%;雨季中时期,株间、树下、中间和行间位置土壤储水量分别为765.6,685.7,927.1,844.5 mm,树下位置土壤储水量(685.7 mm)与其他位置差异显著,比株间(765.6 mm)、中间(927.1 mm)和行间位置(844.5 mm)分别少12%,26%和19%;雨季后时期,株间、树下、株间和行间位置土壤储水量分别为451.8,377.2,621.8,537.3 mm,树下位置土壤储水量与其他位置差异显著,比株间、中间和行间位置分别少16%,39%,30%,各位置储水量中间>行间>株间>树下,雨季中与雨季后亦然。同时各时期内雨季中各位置的土壤储水量最大,其次是雨季前,雨季后各位置的土壤储水量最小。

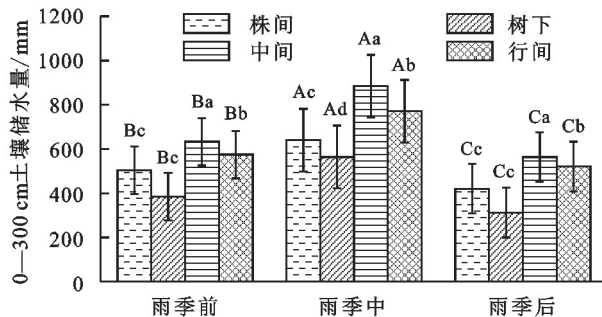


图8 9 a 苹果园不同时期不同水平位置土壤储水量

Fig. 8 Soil water storage capacity of 9-year-old apple orchards at different periods and different horizontal positions

2.3 土壤水分亏缺量

2.3.1 不同树龄果园各土层土壤水分亏缺量 本研究中由于不同土层间土壤质地差异不显著,所以植物吸水的影响远大于土壤质地的影响,由此可通过水分亏损量来间接了解苹果树生长旺盛期对水分的需求量。

如图10所示,3次时间节点将一年分成了两个

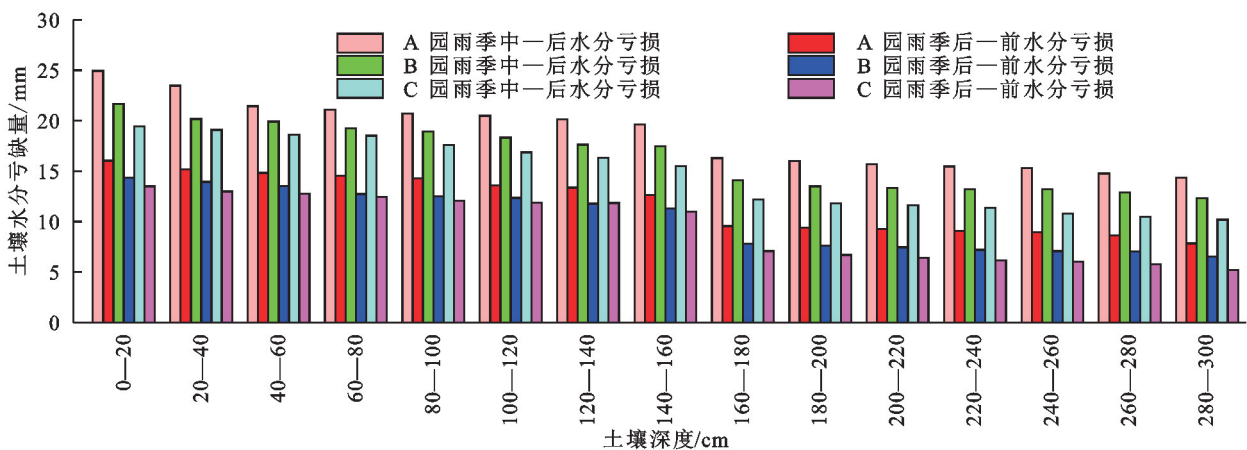


图10 不同土层土壤水分亏缺量

Fig. 10 Soil water deficit in different soil layers

主要的历史时期,雨季中到雨季后这段时间内水分亏缺量最大,且树龄与这段时间的水分亏缺量成反比;雨季后到第二年的雨季前土壤水分亏缺量也与树龄成反比,相较于雨季中到雨季后这段时间,各土层土壤水分都得到了补充,因此水分亏缺量减少。雨季后到第二年的雨季前这一时期浅层和中层的土壤水分亏损量大于深层,说明此时在土壤浅层和中层各树龄果园的土壤水分补充量较大,而深层土壤水分补充量较小。无论是雨季中到雨季后还是雨季后到第二年雨季前,各树龄果园各土层土壤水分补充量差距不大($p>0.05$);不同树龄果园两个历史时期的土壤水分亏损量差异显著($p<0.05$)。雨季前到雨季中这一期间内由于自然降雨和人工灌溉,无法仅通过简单计算这一时期内土壤水分的变化量来代表苹果树对土壤水分的吸收量,但这一部分的土壤水分变化量仍具有现实意义,土壤亏损量的大小能够一定程度代表苹果树的吸水能力。在苹果树的主要生长期(雨季中—雨季后—第二年雨季前)对土壤水分亏缺量进行分析:通过对每层土壤水分亏损求和可知,12 a 苹果树水分总亏缺量为362.35 mm,9 a 苹果树水分总亏缺量为399.30 mm,6 a 苹果树水分总亏缺量为457.05 mm,土壤水分总亏缺量随树龄增大而减少。

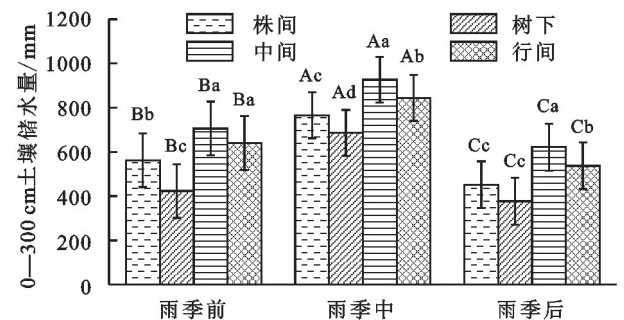


图9 12 a 苹果园不同时期不同水平位置土壤储水量

Fig. 9 Soil water storage capacity of 12-year-old apple orchards at different periods and different horizontal positions

2.3.2 各树龄果园不同水平位置下各土层土壤水分亏缺量 尽管不同树龄果园各土层内的土壤水分亏缺量已经表明,不同水平位置下各土层土壤水分亏缺量仍需进一步分析,对于6 a果园(图11),雨季中到雨季后期间每20 cm土层土壤水分亏缺量中间<行间<树下,雨季后到第二年雨季前期土壤各土层水分亏缺量树下>株间>行间>中间,土壤各层水分补充量树下<株间<行间<中间,对于9 a果园(图12)和12 a果园(图13)也是如此。不同树龄果园下,不同水平位置的土壤水分亏损大于土壤水分补充,且每层土壤的亏损量接近于补充量的2倍。随着树龄的增加,树下位置的土壤水分亏损明显减少,土壤水分的补充量变化不明显;其余位置土壤水分亏损量和补充量均增减不明显。

6 a果园(图11)株间、树下、中间和行间位置土壤水分总亏损量分别为488.9,521.6,455.2,362.7 mm; 9 a果园(图12)株间、树下、中间和行间位置土壤水分

总亏损量分别为411.3,485.9,380.1,319.8 mm;12 a果园(图13)株间、树下、中间和行间位置土壤水分总亏损量分别为369.2,463.3,340.4,276.5 mm。随着树龄的增加,各水平位置土壤水分亏缺量逐渐减少,树下位置9 a果园土壤水分亏缺量比6 a果园减少了7%,12 a果园土壤水分亏缺量比9 a果园减少了5%,中间位置9 a果园土壤水分亏缺量比6 a果园减少了16%,12 a果园土壤水分亏缺量比9 a果园减少了10%,株间位置和行间位置的土壤水分亏缺总量随树龄的增加而减少,株间和中间位置的土壤水分亏缺总量减少不明显。各树龄果园中,各位置下的水分亏损量表现出浅层(0—60 cm)和深层(60—160 cm)显著大于中层(160—300 cm)亏损量的规律($p<0.05$),各水平位置中树下位置水分亏损量随季节幅度变化最大而其他3个水平位置幅度变化较小。综上,随树龄增长树下位置的土壤水分亏缺量相较于其他位置减少较多,其他位置的水分亏缺量变化相对不明显。

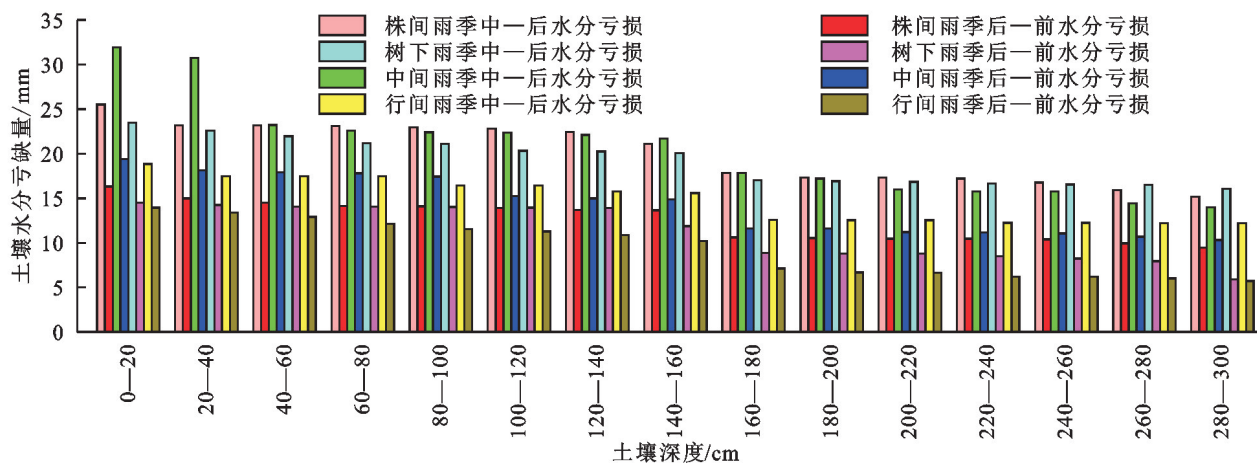


图11 6 a果园不同水平位置土层水分亏缺量

Fig. 11 Water deficit in different soil layers at different horizontal positions of 6-year-old orchards

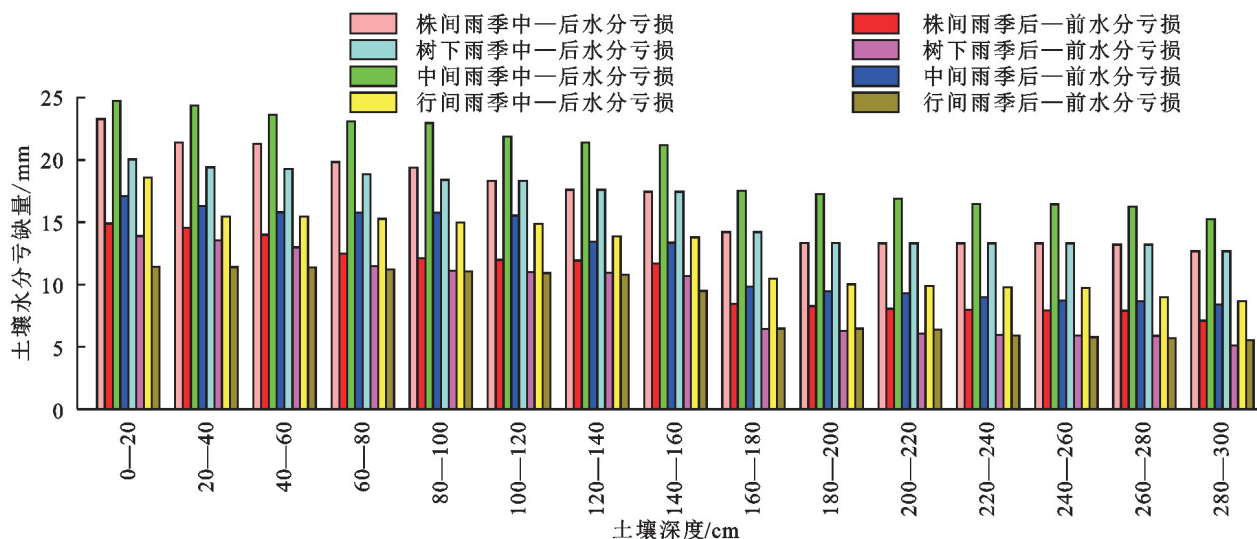


图12 9 a果园不同水平位置土层水分亏缺量

Fig. 12 Water deficit in different soil layers at different horizontal positions of 9-year-old orchards

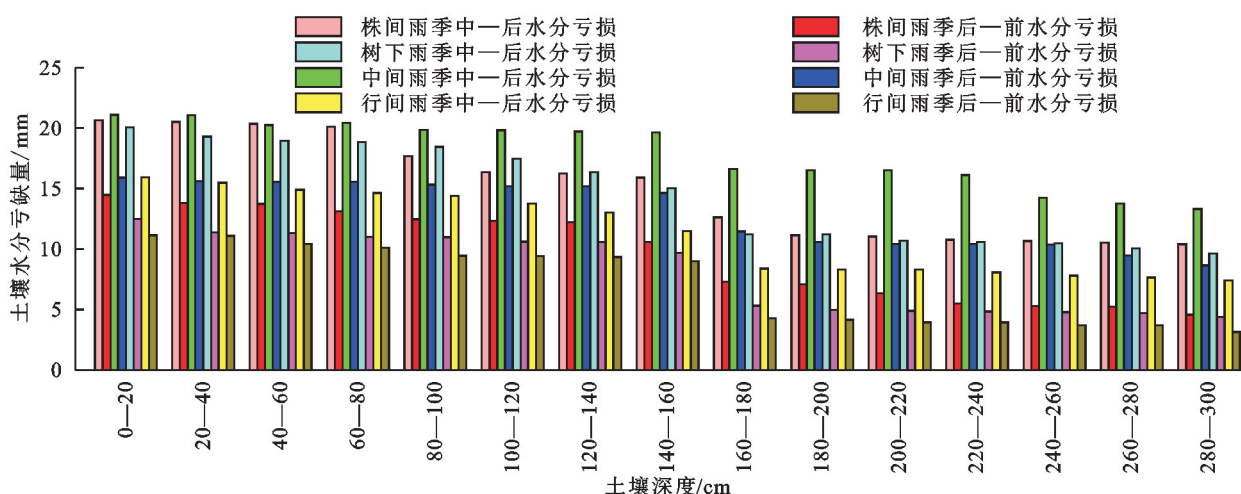


图 13 12 a 果园不同水平位置土层水分亏缺量

Fig. 13 Water deficit in different soil layers at different horizontal positions of 12-year-old orchards

3 讨论与结论

3.1 讨论

渭北旱塬作为雨养农业区,果园土壤水分既受到天然降水影响也受到果树生长的影响^[8,19]。不同树龄果园 0—300 cm 土层的土壤含水量分布特征具有相似性(图 2),呈现减—增—减—增的变化趋势,在土壤浅层(0—60 cm)和土壤中层(60—160 cm)变化剧烈,土壤深层(160—300 cm)增长缓慢,这是由于矮砧密植苹果根系分布较浅,另外土壤浅层的蒸散加剧了浅层土壤水分的变化程度,土壤中层含水量随着土层深度加深先增加后减少是因为受到果树吸水和土壤水分下渗共同作用,而土壤深层水分在不断增加但增加幅度不明显($p>0.05$)的原因是土壤深层果树吸水较少且得到上层土壤水分下渗补充。各树龄果园中,雨季中的土壤储水量最大,其次是雨季前,雨季后最小,雨季前土壤储水量比雨季后反而增加,且在 6 a, 9 a 和 12 a 果园中表现出相似的规律,原因是雨季后到第二年雨季前这一时期自然降雨增多,土壤水分得到了补充。同时因为雨季后是苹果树的果实采摘期和落叶期,果树生长对土壤水分的需求降低,雨季前对应苹果生长果树开花坐果期(4 月 20 日)、幼果膨大期(5 月 20 日)、花芽分化期(6 月 20 日)是苹果树耗水较多的时期,此时期土壤的严重失墒,雨季中对对应果树的果实膨大期以及对应全年雨量丰沛期,此时期土壤水分亏损不严重。各时期下,不同树龄的果园土壤储水量 12 a>9 a>6 a(图 3),这和矮砧密植果树随着年龄的增加细根数量明显减少,吸水能力逐渐减弱有关^[20]。

各水平位置的土壤含水量随土层深度的增加逐渐接近(图 4—6),曲线也随着树龄的增长出现这种形状的原因是 6~12 a 是苹果树的生长旺盛期^[21],耗水量较大,因此各个水平方向的浅层土壤含水量减少,但由于矮砧

密植果园抚育措施的统一性,最终表现出相似的吸水规律:在土壤剖面中(图 4—6),土壤水分最低出现位置是植物吸收利用最多的层面^[22],其出现的具体位置和含水量数值大小产生细微区别的原因是矮砧密植苹果根系的浅层分布更密集。各年龄段的苹果树在土壤浅层和中层吸水较多,而在土壤深层吸水不明显,说明土壤浅层和中层是果树吸收土壤水分的主要土层,吸收区间为 0—160 cm。这和邹养军等^[23]通过对不同树龄和不同产量苹果园的根系水分变化特征分析得出 0~2 m 是苹果园主要吸水土层的研究结果相似。

不同水平位置的含水量大小一致表现为中间>行间>株间>树下(图 4—6),出现这种结果既有水分蒸散也有根系吸水的影响,由于根系分布数量随着距离的增加逐渐减少呈现树下>株间>中间>行间的变化^[20],含水量的变化应与之相反。但结果却是中间点位置的含水量最大,这是由于各水平位置下蒸散速率相差很大($p<0.05$),中间点位置位于冠幅下方,根系较少且有树荫遮蔽抑制蒸发,所以含水量最高,行间没有遮蔽且根系数量最少,所以含水量次之。树下与株间位置都有遮蔽,所以这两个位置下土壤含水量的差异主要是根系多少引起的。对于不同深度不同水平位置的土壤储水量来说(图 7—9),浅层土壤树下位置含水量减少得最多,其次是中层土壤,另外几个水平方向未表现明显的供给特征,可认为矮砧密植苹果树的主要吸水位置是在树下土壤浅层和中层。

本试验中随着树龄的增加土壤水分利用深度未明显改变(图 3—9),这和来自长武的几项研究结论“果树根系吸收利用深层土壤的水分的深度随树龄的增加而加深”不符^[24-25],也和程立平等^[26]发现土壤深层含水量会随着树龄的增加而减少的研究结论有所不同,这是由于矮砧密植果园生长根系普遍较浅,不随树龄的增加而产生较大的根系分布变化,且在研究区

域内由于土壤重力水的运动随着土层深度的增加土壤含水量反而呈现先降低后略有恢复的趋势,其恢复主要集中在1~3 m土层内,这与张义^[27]等的研究结果相同。有研究表明,雨季后降雨蒸散发殆尽,苹果树根系不得不通过吸引深层地下水来维持自身生长吸水^[28],这证明了乔化果树的深层吸水,李玉山^[18]、Huang等^[29]的研究也有相同观点,而本研究中矮砧苹果园内的浅层和中间(0—160 cm)土壤含水量变化剧烈,而深层(160—300 cm)土壤含水量随着土层深度的增加出现增加的趋势,两类果树各有不同的吸水深度,更印证前文矮砧密植苹果浅层吸水的观点。

不同树龄果园内(图11—13),各位置不同土层的雨季中到雨季后土壤水分亏损量显著大于该位置的雨季后到第二年雨季前水分亏缺量($p < 0.05$),亏损量减少的原因是自然降雨的补充,且各果园间各水平位置雨季后到第二年雨季前水分亏缺量相差不大($p > 0.05$)。不同水平位置的土壤水分亏损量随着果龄的增加而减少,这和一些研究者发现的土壤水分亏损量随着果龄的增加而增加不同^[30],这是因为该研究土壤水分亏损量考虑了乔化苹果的深层土壤水分亏缺但本研究是针对矮砧苹果的土壤水分亏缺量进行的。

3.2 结论

(1) 土壤剖面含水量呈现季节性波动,含水量大小表现为雨季中>雨季前>雨季后,且总体呈现减少—增加—减少—增加的变化趋势,雨季前对应果树开花坐果期、幼果膨大期和花芽分化期,是苹果树生长的重要阶段,此时期缺水明显且对果树生长影响较大,应加强人工灌溉。

(2) 不同水平方向上,树下位置的含水量显著小于株间、中间和行间位置($p < 0.05$),其中树下位置的浅层和中间(0—160 cm)是矮砧密植苹果树的主要吸水区域。由于不同树龄果园不同水平位置的土壤水分亏损量不同,为了节约灌溉成本,在进行人工灌溉时可根据不同水平位置分别计算灌溉量进行区别灌溉,尤其应增加树下位置的灌溉量。

参考文献(References):

[1] 陈学森,韩明玉,苏桂林,等.当今世界苹果产业发展趋势及我国苹果产业优质高效发展意见[J].果树学报,2010,27(4):598-604.
Chen X S, Han M Y, Su G L, et al. Discussion on today's world apple industry trends and the suggestions on sustainable and efficient development of apple industry in China [J]. Journal of Fruit Science, 2010,27(4):598-604.

[2] 束怀瑞,张世忠.我国苹果产业70年发展历程与展望[J].落叶果树,2021,53(1):1-3.
Shu H R, Zhang S Z. The 70 years' development and prospect of apple industry in China [J]. Deciduous

Fruits, 2021,53(1):1-3.

[3] 韩振海.苹果矮化密植栽培:理论与实践[M].北京:科学出版社,2011.
Han Z H. Apple Dwarf Close Planting Cultivation: Theory and Practice[M]. Beijing: Sciences Press,2011.

[4] 郑小春,卢海蛟,车金鑫,等.白水苹果产量及施肥现状调查[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2011,39(9):145-151,158.
Zheng X C, Lu H J, Che J X, et al. Investigation of present yield and fertilization on Fuji apple in Baishui County [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2011,39(9):145-151,158.

[5] 高华,赵政阳,梁俊,等.陕西苹果品种发展历史、现状及育种进展[J].西北林学院学报,2008,23(1):130-133.
Gao H, Zhao Z Y, Liang J, et al. Advances in the researches of apple breeding and development in Shaanxi Province [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008,23(1):130-133.

[6] Naor A, Naschitz S, Peres M, et al. Responses of apple fruit size to tree water status and crop load [J]. Tree Physiology, 2008,28(8):1255-1261.

[7] Zydlik Z, Pacholak E, Przybyla C. Effect of water deficit on the growth and yield of 'Topaz' apple trees planted in different former soil management [J]. Folia Horticulturae, 2004,16(2):71-78.

[8] Liu Y, Gao M S, Wu W, et al. The effects of conservation tillage practices on the soil water-holding capacity of a non-irrigated apple orchard in the Loess Plateau, China [J]. Soil and Tillage Research, 2013,130:7-12.

[9] Feng J, Wei W, Pan D L. Effects of rainfall and terracing-vegetation combinations on water erosion in a loess hilly area, China [J]. Journal of Environmental Management, 2020,261:110247.

[10] 黄金辉,廖允成,高茂盛,等.耕作和覆盖对黄土高原果园土壤水分和温度的影响[J].应用生态学报,2009,20(11):2652-2658.
Huang J H, Liao Y C, Gao M S, et al. Effects of tillage and mulching on orchard soil moisture content and temperature in Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009,20(11):2652-2658.

[11] 张强,魏钦平,刘松忠,等.SH6矮化中间砧富士苹果幼树至结果初期树冠结构、产量和品质的形成[J].中国农业科学,2013,46(9):1874-1880.
Zhang Q, Wei Q P, Liu S Z, et al. Formation of canopy structure, yield and fruit quality of 'fuji' apple with SH6 dwarf interstock from juvenility to fruiting early stage [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013,46(9):1874-1880.

[12] 王宪志,赵西宁,高晓东,等.黄土高原苹果园土壤水分及水分生产力模拟[J].应用生态学报,2021,32(1):201-210.
Wang X Z, Zhao X N, Gao X D, et al. Simulation on soil moisture and water productivity of apple orchard

- on the Loess Plateau, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021,32(1):201-210.
- [13] 曹裕,居玛汗·卡斯木,范鹏,等.陕西洛川旱塬苹果园地深层土壤水分和养分特征[J].应用生态学报,2013,24(2):388-396.
- Cao Y, Jumahan K, Fan P, et al. Moisture and nutrient characteristics of deep layer soil in apple orchards on the Luochuan highland of Shaanxi, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013,24(2):388-396.
- [14] 赵佐平,同延安,刘芬,等.长期不同施肥处理对苹果产量、品质及土壤肥力的影响[J].应用生态学报,2013,24(11):3091-3098.
- Zhao Z P, Tong Y A, Liu F, et al. Effects of different long-term fertilization patterns on Fuji apple yield, quality, and soil fertility on Weibei Dryland, Shaanxi Province of Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013,24(11):3091-3098.
- [15] 白岗栓,邹超煜,杜社妮.渭北旱塬苹果密植栽培模式对土壤水分的影响[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,2020,46(3):308-318.
- Bai G S, Zou C Y, Du S N. Effects of dense-planting pattern of apple on soil moisture in Weibei dry plateau [J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences, 2020,46(3):308-318.
- [16] 曹辉,王洪博,张楠,等.矮砧密植苹果光合特性及产量对水分的响应[J].新疆农业科学,2022,59(6):1409-1417.
- Cao H, Wang H B, Zhang N, et al. Photosynthetic characteristics and yield response to water content of apple under close planting on dwarf rootstocks in southern Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2022,59(6):1409-1417.
- [17] 赵志远,郑伟,刘杰,等.渭北旱塬苹果园不同水肥管理模式下的土壤水分差异[J].应用生态学报,2018,29(4):1249-1258.
- Zhao Z Y, Zheng W, Liu J, et al. Soil moisture variation under different water and fertilization managements in apple orchard of Weibei dryland, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018,29(4):1249-1258.
- [18] 李玉山,黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响[J].生态学报,1983,3(2):91-101.
- Li Y S. The properties of water cycle in soil and their effect on water cycle for land in the loess region[J]. Acta Ecologica Sinica, 1983,3(2):91-101.
- [19] 高茂盛,温晓霞,黄灵丹,等.耕作和秸秆覆盖对苹果园土壤水分及养分的影响[J].自然资源学报,2010,25(4):547-555.
- Gao M S, Wen X X, Huang L D, et al. The effect of tillage and mulching on apple orchard soil moisture and soil fertility [J]. Journal of Natural Resources, 2010,25(4):547-555.
- [20] 陈东凯,骆汉,吕佼容,等.不同树龄矮化自根砧苹果树细根空间分布特征[J].北方园艺,2022(4):8-16.
- Chen D K, Luo H, Lyu J R, et al. Fine roots spatial distribution characteristics of dwarfing self-rooted rootstock apple trees from different ages [J]. Northern Horticulture, 2022(4):8-16.
- [21] Liu Z Q, Jia G D, Yu X X. Water uptake and WUE of Apple tree-Corn Agroforestry in the Loess hilly region of China[J]. Agricultural Water Management, 2020,234:106138.
- [22] 樊军.渭北旱塬苹果园土壤深层干燥化与硝酸盐累积[J].应用生态学报,2004,15(7):1213-1216.
- Fan J. Desiccation and nitrate accumulation of apple orchard soil on the Weibei dryland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004,15(7):1213-1216.
- [23] 邹养军,陈金星,马锋旺,等.渭北旱塬不同种植年限苹果园土壤水分的变化特征[J].干旱地区农业研究,2011,29(1):41-43,47.
- Zou Y J, Chen J X, Ma F W, et al. Characteristics of soil moisture change of apple orchards of different planting years in Weibei dryland [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011,29(1):41-43,47.
- [24] Li H J, Si B C, Wu P T, et al. Water mining from the deep critical zone by apple trees growing on loess[J]. Hydrological Processes, 2019,33(2):320-327.
- [25] 王锐,刘文兆,李丽霞.土地利用类型对黄土塬区深层土壤含水量的影响:以长武塬区为例[J].干旱区资源与环境,2014,28(11):127-132.
- Wang R, Liu W Z, Li L X. Effect of land use types on the deep soil moisture of the loess tableland: A case of Changwu[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014,28(11):127-132.
- [26] 程立平,刘文兆,李志.黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征[J].生态学报,2014,34(8):1975-1983.
- Cheng L P, Liu W Z, Li Z. Soil water in deep layers under different land use patterns on the Loess Tableland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(8):1975-1983.
- [27] 张义,谢永生,郝明德.黄土高原沟壑区塬面苹果园土壤水分特征分析[J].土壤,2011,43(2):293-298.
- Zhang Y, Xie Y S, Hao M D. Study on characteristics of apple orchard soil moisture in Gully Region of Loess Plateau[J]. Soils, 2011,43(2):293-298.
- [28] Su B Q, Shangguan Z P. Decline in soil moisture due to vegetation restoration on the Loess Plateau of China[J]. Land Degradation & Development, 2019,30(3):290-299.
- [29] Huang M B, He F H, Yang X M, et al. Effect of apple production base on regional water cycle in Weibei upland of the Loess Plateau [J]. Journal of Geographical Sciences, 2001,11(2):239-243.
- [30] Shi P J, Gai H Q, Li Z. Partitioned soil water balance and its link with water uptake strategy under apple trees in the loess-covered region[J]. Water Resources Research, 2023,59(1):e2022WR032670.