

洛川苹果园土壤水分变化特征*

王延平¹ 韩明玉^{2**} 张林森³ 党永建⁴ 屈军涛⁴

(¹西北农林科技大学资源环境学院/农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100; ²西北农林科技大学科技推广处, 陕西杨凌 712100; ³西北农林科技大学园艺学院, 陕西杨凌 712100; ⁴洛川县果树局, 陕西洛川 727400)

摘要 全面掌握洛川果园的土壤水分环境特征, 不仅可为苹果的园址选择、砧穗组合和改进土壤水分管理措施提供理论依据, 而且对我国苹果产区果园提质增效具有借鉴价值. 采用定点土壤水分连续监测法, 对洛川苹果园的总体土壤水分环境以及不同生长年限、不同立地类型和乔、矮化果园的土壤水分分异特征进行分析. 结果表明: 苹果树根际区 (0~200 cm) 土壤水分普遍亏欠, 且 0~60 cm 土层的水分亏欠小于 60~200 cm 土层; 生长季 0~60 cm 土层贮水量与降水量的变化一致, 土壤相对含水量大多 < 60%, 季节性旱象严重; 果园剖面土壤含水量变异系数随土壤深度加深而递减; 随果园生长年限的增大, 土壤剖面贮水量下降; 在栽培密度一致的条件下, 矮化果园 5 m 土层土壤含水量均高于乔化果园, 而栽培密度大的矮化果园的土壤贮水量低于栽培密度小的乔化果园; 塬地成龄果园的土壤水分含量最高, 川地次之, 台地相对较低. 密度对果园土壤水分含量有很大影响, 在栽培密度一致的条件下, 采用矮化栽培能减少土壤水分消耗, 显著提高果园土壤含水量; 挖株降低栽培密度是维持苹果园土壤水分平衡、实现可持续发展的有效途径.

关键词 洛川县 苹果 土壤水分

文章编号 1001-9332(2012)03-0731-08 **中图分类号** S15 **文献标识码** A

Variation characteristics of soil moisture in apple orchards of Luochuan County, Shaanxi Province of Northwest China. WANG Yan-ping¹, HAN Ming-yu², ZHANG Lin-sen³, DANG Yong-jian⁴, QU Jun-tao⁴ (¹Ministry of Agriculture Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shannxi, China; ²Division of Science and Technology, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shannxi, China; ³College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shannxi, China; ⁴Fruit Bureau of Luochuan County, Luochuan 727400, Shannxi, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2012, 23(3): 731-738.

Abstract: To have an overall understanding on the soil moisture characteristics in the apple orchards of Luochuan County can not only provide theoretical basis for selecting apple orchard sites, choosing the best root-stock combination, and improving the soil water management, but also has reference importance in increasing the productive efficiency of our apple orchards. In this study, a fixed-point continuous monitoring was conducted on the overall soil moisture environment and the variation characteristics of soil moisture in the County apple orchards differed in age class, stand type, and tree type (standard or dwarfed). For the apple orchards in the County, the rhizosphere (0-200 cm) soils of most apple trees were water-deficient, and the deficit in 0-60 cm soil layer was less than that in 60-200 cm layer. During growth season, the water storage in 0-60 cm soil layer had the same variation trend as the rainfall pattern. The relative soil moisture content in most orchards was less than 60%, and seasonal drought was quite severe. The coefficient of variation of soil moisture content decreased with soil depth. With the increasing age of the orchards, soil water storage decreased. At the same planting density, the orchards with dwarfed trees had more water

* 农业部现代苹果产业技术体系项目 (CARS-28)、陕西省科技统筹创新工程计划项目 (2011KTZB02-02-05)、陕西省科技创新项目 (2011NXC01-03)、陕西省科技攻关项目 (2009K01-19) 和西北农林科技大学科研专项资助。

** 通讯作者. E-mail: hanmy@nwsuaf.edu.cn

2011-07-12 收稿, 2011-12-18 接受.

storage in 0–5 m soil layer than the orchards with standard trees. However, when the orchards were planted with dwarfed trees at a higher density, the soil water storage in the orchards with dwarfed trees was lesser than that in the standard orchards. The mature orchards on highland had the highest soil moisture content, followed by the mature orchards on flat land, and on terraced land. Tree density had great effects on the soil moisture content. When the tree density was the same, planting dwarfed trees could decrease the water consumption, and increase the soil moisture content significantly. To decrease the planting density through the removal of trees would be an effective way to maintain the soil water balance of apple orchards, and achieve the sustainable development of the orchards.

Key words: Luochuan County; apple; soil moisture.

陕西省洛川县是全国唯一的优势农产品(苹果)产业化建设示范县,是陕西省和全国重要的苹果生产基地.洛川苹果的发展关系着陕西苹果产业和国民经济的长期可持续发展,在陕西经济建设和社会发展中占有非常重要的地位.2008年,全县苹果种植面积达 $3.33 \times 10^4 \text{ hm}^2$,农民人均 0.21 hm^2 ,居全国之首,总产量 $60 \times 10^4 \text{ t}$,总产值14亿元,农民人均苹果纯收入达到4228元,占农民人均纯收入的95%.苹果树生育期间耗水量大,季节性干旱带来的土壤水分胁迫是洛川苹果生产最主要的限制因素之一^[1–4].近年来,洛川苹果的果实品质有逐年下降趋势,其原因可能是果园土壤水分和养分环境恶化所致.全面系统地分析苹果园的土壤水分环境特征,对实现果园科学管理、增产提质具有重要意义,对我国广大苹果产区果园的土壤水分管理具有参考价值.一些学者曾经对干旱区果园的土壤水分状况进行研究^[5–8],发现果园土壤水分主要受大气降水^[9–12]、气候^[13–14]、地形地势、土壤特性^[15–16]、果树生理耗水^[17–19]和人为活动^[19–21]等因素的影响,但以往的研究大多集中在土壤水分动态和不同生长年限等局部问题,缺乏全面系统的深入研究.为此,本文选定8种具有较好代表性的不同类型苹果园,从不同降水年份和季节、不同立地类型、不同生长年限、不同砧穗组合4个方面系统地定量研究了苹果园土壤水分环境特征,比较不同类型果园土壤水分环境状况,以期苹果的园址选择、砧穗组合和土壤水分管理措施的改进提供理论依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 试验区概况

洛川县地处陕西渭北旱塬中部($35^\circ 21' 09''$ — $36^\circ 04' 12'' \text{ N}$, $109^\circ 18' 14''$ — $109^\circ 45' 47'' \text{ E}$),黄土塬和沟壑面积分别约占1/3和2/3,平均海拔1100 m.该区属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均气温9.2

℃,日照时数2552 h,日照率56%,年总辐射量 $554.1 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$, $\geq 10^\circ \text{C}$ 年积温3040℃,气温日差较大,全生育期昼夜温差的最高月和最低月平均值分别为12.6和9.5℃,利于苹果光合物质的积累和运转,使该地区成为世界上最佳苹果优生区的核心地带之一.年均降水量622.3 mm,6—9月降水量占年总降水量的80%左右,年无霜期180 d,具有典型的季节性干旱特点.境内黄土层厚度达80~220 m,质地为中壤,通透性强.

1.2 样地设置及项目测定

在分析洛川县苹果分布现状和全面实地踏查的基础上,选定8种具有较好代表性的不同类型苹果园为样地(表1),树龄包括6年生初果幼树、14~16年生盛果树和23年生衰败树;立地包括塬地、台地和川地,塬地土壤类型为黄土母质发育的疏松黑垆土,台地和川地的土壤类型为黄绵土;砧穗组合包括乔化和矮化两种,品种均为富士(Fuji),乔化砧木为新疆野苹果,矮化中间砧木为M26.连续定点测定土壤水分含量.通过分析土壤水分含量时间和空间上的分异特征,来分析果园土壤水分环境状况.2008—2010年每年生长季(4—11月)的每月初,在样地中心用土钻取土测定土壤水分,钻深为5 m.每次取样重复3次.采用质量法测定土壤水分,用烘箱在 105°C 条件下连续烘干10 h,再用精度为0.001 g的电子天平称量,计算土壤水分的质量百分含量.土壤容重和土壤田间持水量用环刀法测定.土壤贮水量的公式为: $W_c = 0.1 \theta_m V H$.式中: W_c 为土壤贮水量(mm); θ_m 为土壤质量含水量(%); V 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); H 为土层深度(cm).土壤水分亏欠量(mm)=60%土壤田间持水量(F_c , mm)–土壤实际贮水量(W_c , mm).

使用Microsoft Office Excel 2003软件作图;使用DPS软件对土壤水分进行统计分析.

表 1 样地基本情况
Table 1 Condition of different sample sites

| 样地编号 No. of plot | 采样地 Sampling plot | 纬度 Latitude (N) | 经度 Longitude (E) | 海拔 Elevation (m) | 立地 Site | 树龄 Tree age (a) | 密度 Density (m) | 树形 Shape | 土壤类型 Soil type |
|---------------------|---------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|------------|--------------------|-------------------|----------------|---------------------|
| 1 | 卢家河村 Lujiahe Village | 35°47′15″ | 109°19′55″ | 853 | I | 14 | 4×3 | 乔化 Standard | 黄绵土 Loessal soil |
| 2 | 卢白村 Lubai Village | 35°47′00″ | 109°20′24″ | 968 | II | 14 | 5×4 | 乔化 Standard | 黄绵土 Loessal soil |
| 3 | 桥西村 Qiaoxi Village | 35°46′27″ | 109°23′26″ | 1121 | III | 23 | 5×4 | 乔化 Standard | 黑垆土 Heilu soil |
| 4 | 桥西村 Qiaoxi Village | 35°46′28″ | 109°23′30″ | 1121 | III | 14 | 4×3 | 乔化 Standard | 黑垆土 Heilu soil |
| 5 | 洛阳村 Luoyang Village | 35°50′59″ | 109°33′14″ | 1295 | III | 15 | 6×4 | 乔化 Standard | 黑垆土 Heilu soil |
| 6 | 王家村 Wangjia Village | 35°51′06″ | 109°32′31″ | 1268 | III | 6 | 6×5 | 乔化 Standard | 黑垆土 Heilu soil |
| 7 | 王家村 Wangjia Village | 35°51′07″ | 109°32′30″ | 1268 | III | 6 | 4×2 | 矮化 Dwarfing | 黑垆土 Heilu soil |
| 8 | 西贝兴村 Xibeixing Village | 35°47′14″ | 109°28′17″ | 1197 | III | 16 | 4×2 | 矮化 Dwarfing | 黑垆土 Heilu soil |

I：川地 Flat land；II：台地 Platform；III：塬地 Highland.

2 结果与分析

2.1 果园土壤水分的总体环境特征

果树的水分供应主要来自土壤,土壤水分含量丰欠对果树的生长发育有直接影响.就陕西黄土高原苹果产区而言,关中平原果园的土壤水分亏缺较少^[22-25],中部残塬沟壑区果园次之^[26-27],北部丘陵沟壑区果园较多^[28].当土壤水分降低到一定程度时作物就会出现旱象.一般认为,当土壤相对含水量小于40%时,果树受旱严重;当土壤相对含水量为40%~60%时,果树呈现旱象;60%~80%为果树生长适宜的土壤相对含水量^[29-30].田间测定的结果表明(表2):洛川县苹果树根际区土壤(0~200 cm)水分普遍亏欠,且0~60 cm土层的水分亏欠小于60~200 cm土层.原因在于尽管苹果树根系主要分布在0~60 cm土层,对该层土壤水分消耗较多,但雨水的下渗深度也大多在1 m深土层以上^[12,31-32],水分补充进入量较大;而果树对下层土壤水分的消耗大于雨水补充进入量.从生长年限来看,随生长年限的增大,土壤水分亏欠量增大,如塬地23年生和14年生乔化果园0~200 cm土层的土壤水分亏欠量分别为176.2和159.7 mm,而6年生乔化果园相同土层的土壤水分还盈余52.3 mm.从乔矮化果园来看,矮化果园0~200 cm土层的土壤水分亏欠量大于乔化果园,如塬地16年生矮化果园土壤水分亏欠量高达301.7 mm,比14年生乔化果园(159.7 mm)增加了88.9%.200~500 cm土层,塬地初果幼树、川地和台地果园的土壤贮水量均略有盈余,而塬

地盛果大树和衰败果园的土壤水分则严重亏欠;乔化果园的亏欠量大于矮化果园.说明乔化果树根系深、树冠大,严重消耗了土壤深层水分.

表 2 不同果园的土壤水分环境
Table 2 Soil moisture content of different apple orchards

| 样地编号 No. of plot | 土层深度 Soil depth (cm) | 土壤容重 Soil bulk density (g·cm ⁻³) | 平均贮水量 Average water storage (mm) | 60%田间最大持水量 60% Field maximum moisture capacity (mm) | 水分亏欠量 Water deficit (mm) |
|---------------------|-------------------------|---|-------------------------------------|--|-----------------------------|
| 1 | 0~60 | 1.31 | 88.6 | 88.2 | 0.4 |
| | 60~200 | 1.35 | 195.2 | 203.3 | -8.1 |
| | 200~500 | 1.36 | 520.0 | 432.0 | 88.0 |
| 2 | 0~60 | 1.32 | 82.6 | 91.8 | -9.2 |
| | 60~200 | 1.37 | 195.1 | 210.0 | -14.9 |
| | 200~500 | 1.38 | 493.5 | 450.0 | 43.5 |
| 3 | 0~60 | 1.35 | 86.6 | 136.1 | -49.5 |
| | 60~200 | 1.43 | 203.6 | 330.3 | -126.7 |
| | 200~500 | 1.48 | 529.2 | 732.6 | -203.4 |
| 4 | 0~60 | 1.35 | 89.8 | 137.1 | -47.2 |
| | 60~200 | 1.42 | 215.5 | 328.0 | -112.5 |
| | 200~500 | 1.45 | 583.5 | 717.8 | -134.3 |
| 5 | 0~60 | 1.35 | 149.0 | 138.5 | 10.5 |
| | 60~200 | 1.43 | 352.3 | 330.3 | 22.0 |
| | 200~500 | 1.46 | 734.2 | 722.7 | 11.5 |
| 6 | 0~60 | 1.36 | 128.6 | 138.1 | -9.5 |
| | 60~200 | 1.42 | 389.8 | 328.0 | 61.8 |
| | 200~500 | 1.46 | 1021.3 | 722.7 | 298.6 |
| 7 | 0~60 | 1.36 | 115.1 | 139.5 | -24.5 |
| | 60~200 | 1.42 | 322.4 | 328.0 | -5.6 |
| | 200~500 | 1.46 | 889.0 | 722.7 | 166.3 |
| 8 | 0~60 | 1.35 | 109.4 | 138.5 | -29.1 |
| | 60~200 | 1.42 | 274.1 | 328.0 | -272.6 |
| | 200~500 | 1.45 | 649.1 | 717.8 | -68.7 |

2.1.1 果园土壤水分的季节变化特征 在整个生长季(4—11月)内,雨养果园0~60 cm土层贮水量随着降雨量的变化而上下波动,表现为较一致的季节变化特征,土壤贮水量的变化滞后于降雨量的变化.通常情况下,4月初至7月中旬,由于降雨少,气温回升很快,表层土壤蒸发潜力很大,加之果树生长发育耗水强度大,土壤水分消耗大于补给,贮水量逐渐减少;7月下旬至8月,由于降雨量增多,土壤水分得以补偿和恢复,贮水量逐渐增加,8—9月达到最高;以后降雨量迅速减少,而蒸腾蒸发还在不断消耗水分,土壤贮水量有所减少.不同类型果园的果树生长发育耗水强度不同,土壤贮水量的起伏变幅不尽相同,随时间而异.方差分析表明,洛阳村塬地15年生乔化果园与其他果园的土壤平均贮水量之间差异显著($P<0.05$),这可能一方面由于2006年该果园的果树种植密度由4 m×3 m挖株调整为6 m×4 m,另一方面,表层覆有20~30 cm厚的优质牛粪,增强了吸纳雨水和保水能力;初果幼园的土壤贮水量显著高于成龄果园和衰败园($P<0.05$),成龄果园与衰败园之间差异不显著.若以土壤相对含水量小于60%为旱象指标,则研究区季节性干旱导致的土壤水分胁迫频繁发生(图1).除2010年7—8月降雨量大、果园水分得到正常供应外,大多数情况下仅有洛阳村塬地15年生乔化果园的土壤含水量能够满

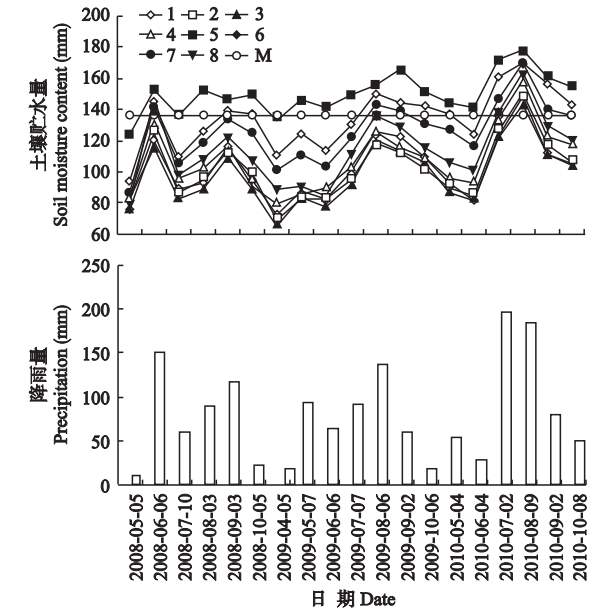


图1 不同类型果园0~60 cm土层土壤贮水量及降雨量的变化

Fig.1 Variation of precipitation and soil water storage in 0-60 cm depth of different apple orchards.

不同类型果园的编号见表1 Numbers of different types of orchards referred to Table 1. 下同 The same below.

足苹果树生长的水分需求,这也说明挖株降低密度和大量覆施牛粪是提高果园土壤含水量、满足果树正常水分需求的有效举措.

2.1.2 果园土壤剖面含水量的垂直变异特征 苹果树生长季内,土壤水分具有高度的异质性,土壤水分的转化和贮存受土壤结构、植物根系分布深度及耗水量、降水等综合因素的影响,表现为土壤含水量的空间分布特征.由表3可以看出,果园土壤含水量随土壤深度的增加而先减后增;生长季不同土层土壤含水量的变化幅度有所不同,通过变异系数(CV)可以反映这个特征(CV值越大,土壤含水量变化越剧烈;CV值越小,土壤含水量越稳定),研究区果园的剖面土壤含水量变异系数均表现为随土壤深度加深而递减的趋势,表明随土层深度的增加,其含水量变化程度越小.0~80 cm土层,各种果园土壤含水量的变异系数均较高,说明该层土壤水分的变化主要受到降水、径流和蒸发等影响;80 cm以下土层,各种果园土壤含水量的变异系数都较小,这是由于该层土壤水分的变化受外界环境影响较小,且根系数量相对较少、吸水消耗较少.

2.2 不同生长年限果园的土壤水分差异

在苹果树生命期内,不同生长年限苹果树的蒸腾和地面蒸发有所差异,对水分的消耗量亦不同,必然导致土体内水分状况的差异.由图2可以看出,随苹果树生长年限的增大,土壤剖面贮水量下降,初果幼园与盛果园的土壤贮水量差异大于盛果园与衰败园的土壤贮水量差异.6年生乔化初果幼园5 m土层的土壤贮水量为1068.6 mm,比14年生盛果园(620.7 mm)高447.9 mm,比15年生盛果园(858.7 mm)高209.9 mm;23年生衰败园仅有562.5 mm,比14年生盛果园低58.2 mm,比15年生盛果园低

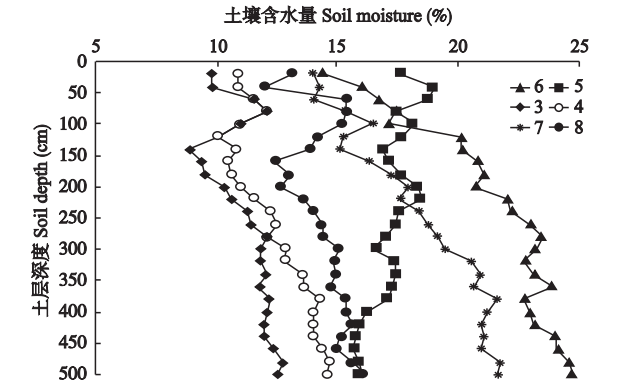


图2 不同生长年限果园的土壤水分

Fig.2 Soil moisture in apple orchards of different growth years.

表 3 生长季果园土壤水分的垂直变化
Table 3 Vertical changes of soil moisture in different apple orchards in growing season

| 样地编号 No. of plot | 土壤含水量 Soil moisture (%) | 土层深度 Soil depth (cm) | | | | | | |
|---------------------|-------------------------------|----------------------|---------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 0 ~ 40 | 40 ~ 80 | 80 ~ 120 | 120 ~ 200 | 200 ~ 300 | 300 ~ 400 | 400 ~ 500 |
| 1 | 平均值 Mean | 11. 7 | 10. 6 | 10. 7 | 10. 9 | 12. 2 | 13. 2 | 13. 3 |
| | 标准差 SD | 3. 8 | 2. 5 | 1. 6 | 1. 7 | 1. 1 | 1. 6 | 1. 3 |
| | 变异系数 CV | 32. 4 | 23. 2 | 14. 5 | 15. 7 | 9. 1 | 11. 9 | 9. 8 |
| 2 | 平均值 Mean | 15. 3 | 15. 7 | 14. 3 | 12. 3 | 11. 7 | 12. 8 | 15. 5 |
| | 标准差 SD | 3. 6 | 3. 3 | 2. 7 | 1. 9 | 2. 1 | 2. 1 | 2. 6 |
| | 变异系数 CV | 23. 6 | 21. 0 | 18. 7 | 15. 6 | 17. 6 | 16. 0 | 14. 0 |
| 3 | 平均值 Mean | 10. 1 | 12. 4 | 10. 9 | 11. 0 | 12. 4 | 12. 3 | 12. 5 |
| | 标准差 SD | 3. 3 | 2. 6 | 2. 1 | 2. 0 | 0. 8 | 0. 4 | 1. 0 |
| | 变异系数 CV | 32. 4 | 20. 5 | 18. 8 | 18. 3 | 6. 7 | 3. 3 | 8. 0 |
| 4 | 平均值 Mean | 12. 2 | 12. 0 | 11. 9 | 11. 6 | 12. 6 | 12. 9 | 12. 9 |
| | 标准差 SD | 3. 5 | 2. 6 | 1. 8 | 1. 0 | 0. 8 | 0. 5 | 0. 6 |
| | 变异系数 CV | 28. 5 | 22. 0 | 15. 5 | 8. 8 | 6. 6 | 3. 8 | 4. 4 |
| 5 | 平均值 Mean | 19. 9 | 19. 2 | 19. 3 | 17. 9 | 17. 4 | 17. 1 | 15. 9 |
| | 标准差 SD | 2. 6 | 2. 3 | 1. 6 | 1. 6 | 1. 5 | 0. 9 | 1. 1 |
| | 变异系数 CV | 13. 1 | 12. 1 | 8. 2 | 9. 0 | 8. 0 | 5. 0 | 6. 8 |
| 6 | 平均值 Mean | 15. 3 | 17. 5 | 19. 9 | 22. 4 | 23. 2 | 25. 4 | 24. 6 |
| | 标准差 SD | 3. 7 | 3. 0 | 1. 8 | 1. 6 | 1. 8 | 2. 4 | 2. 0 |
| | 变异系数 CV | 24. 1 | 17. 1 | 8. 9 | 7. 2 | 7. 6 | 9. 4 | 8. 1 |
| 7 | 平均值 Mean | 14. 1 | 14. 9 | 16. 9 | 17. 2 | 18. 4 | 22. 6 | 21. 6 |
| | 标准差 SD | 3. 7 | 3. 9 | 2. 8 | 0. 6 | 1. 0 | 0. 8 | 1. 2 |
| | 变异系数 CV | 26. 0 | 25. 9 | 16. 7 | 3. 2 | 5. 2 | 3. 7 | 5. 5 |
| 8 | 平均值 Mean | 12. 7 | 15. 3 | 15. 6 | 13. 6 | 15. 4 | 16. 2 | 16. 1 |
| | 标准差 SD | 3. 3 | 3. 6 | 2. 1 | 1. 1 | 1. 6 | 0. 4 | 1. 0 |
| | 变异系数 CV | 25. 7 | 23. 7 | 13. 3 | 8. 0 | 10. 2 | 2. 7 | 6. 1 |

296. 2 mm;6 年生矮化初果幼园为 920. 5 mm,比 16 年生矮化盛果园(721. 7 mm)高 198. 8 mm. 与盛果园相比,初果幼园树冠小、冠层薄、产量低;与衰败园相比,盛果园树冠大小和冠层厚度接近,只是产量有所下降. 从土壤剖面水分变化来看,0 ~ 100 cm 土层,不同生长年限果园的土壤含水量均表现为随土层深度的增加而增大,且不同生长年限果园的土壤贮水量差异不大;23 年生乔化衰败果园的土壤贮水量为 108. 7 mm,仅比 6 年生(163. 7 mm)低 55. 0 mm,16 年生矮化盛果园的土壤贮水量为 142. 1 mm,仅比 6 年生(148. 1 mm)低 6. 0 mm,说明苹果园 0 ~ 100 cm 土层的土壤含水量受自然降水入渗和蒸发的影响较大,果树生长年限对该层土壤含水量的影响较小. 100 ~ 500 cm 土层,初果幼园土壤含水量随土层深度的增加而增加,盛果园和衰败园土壤含水量随土层深度的增加而保持相对稳定,但不同生长年限果园土壤贮水量的差异较大,23 年生乔化果园的土壤贮水量为 453. 8 mm,比 15 年生盛果园(676. 8 mm)降低 33. 0%,比 6 年生初果幼园(904. 9 mm)降低 49. 9%,16 年生矮化盛果园的土壤贮水量为 579. 6 mm,比 6 年生初果幼园(772. 7 mm)降低

25. 0%,说明随着种植年限的增加,苹果生长需水量增加,当天然降水满足不了苹果树生长需要时,根系就会从土壤深层吸取水分,来补充生长发育所需要的水分^[14].

2.3 不同立地类型果园的土壤水分差异

立地条件是果园配置和建立的重要因素. 在干旱半干旱地区,自然降水是果园水分的主要来源,而不同立地条件下的降水入渗、土壤水分蒸发和植株蒸腾都存在较大差异,必然会导致果园土壤含水量的不同. 将苹果生长发育阶段的土壤含水量平均后进行分析(图 3),结果表明,在位于黄土残塬沟壑区的洛川县,塬地土壤水分含量最高,川地次之,台地最低. 5 m 土层内,塬地、川地和台地的土壤贮水量分别为 1121. 8、770. 1 和 626. 1 mm;耕作层(0 ~ 60 cm)塬地的土壤水分平均含量达 18. 4%,显著高于川地和台地($P<0. 05$),川地和台地的土壤水分平均含量分别为 11. 3%和 10. 7%,二者差异不显著;苹果树根区(0 ~ 200 cm)塬地的土壤水分平均含量达 17. 8%,显著高于川地和台地($P<0. 05$),川地和台地的土壤水分平均含量分别为 10. 5%和 9. 9%,二者差异不显著.

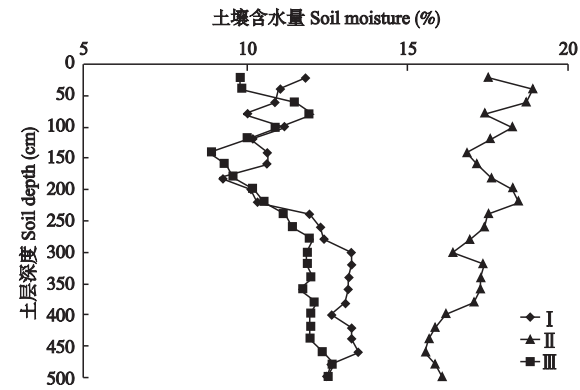


图3 不同立地类型果园的土壤水分分布
Fig. 3 Distribution of soil moisture of apple orchards under different site types.
I: 川地 Flat land; II: 台地 Platform; III: 塬地 Highland.

2.4 乔、矮化果园的土壤水分差异

乔化苹果树与矮化苹果树的根系分布和树冠大小存在明显差异。一般情况下,乔化苹果树根系分布广而深,矮化苹果树根系分布浅而密集,乔化树冠高大,矮化树冠相对矮小,这必然引起两者树冠蒸腾耗水量大小的差异。将苹果生长发育阶段的土壤含水量平均后进行分析(图4),结果表明,栽培密度一致的条件下,矮化果园的土壤贮水量明显高于乔化果园。14年生乔化果园5 m土层的土壤贮水量为620.7 mm,相当于16年生矮化果园(721.7 mm)的86.0%。密度对土壤水分的影响远大于乔、矮化的影响,低密度乔化果园的土壤贮水量大于高密度的矮化果园。如密度较小的15年生乔化果园5 m土层土壤贮水量为858.7 mm,是16年生矮化果园(721.7 mm)的119.0%,是14年生乔化果园(620.7 mm)的138.3%;密度较小的6年生乔化初果果园5 m土层土壤贮水量为1068.6 mm,是密度较大的6年生矮化果园(920.5 mm)的116.1%。可见,生产中根据当

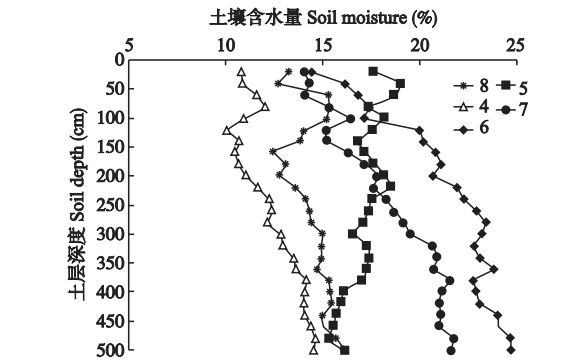


图4 乔矮化果园的土壤水分分布
Fig. 4 Distribution of soil moisture in standard and dwarfing orchards.

地气候条件和地形条件合理配置密度^[33],是旱地果园可持续发展的关键。

3 讨论

在地处黄土高原残塬沟壑区的洛川县,苹果树根际区(0~200 cm)土壤水分普遍亏欠,原因在于降水偏少且分布不均,土壤蒸发强烈,地下水埋藏较深,加之苹果树蒸腾耗水强烈^[15]。0~60 cm土层水分亏欠小于60~200 cm土层,这是由于苹果树根系主要分布在0~60 cm土层,土壤水分消耗较多,但雨水下渗补充进入量也较大,而果树对下层土壤水分的消耗大于雨水补充进入量。研究区土壤水分的亏缺程度小于陕北丘陵沟壑区宝塔^[14,28]等地,可能是北部丘陵沟壑区的降雨少、雨水流失多和蒸发强烈所致;研究区土壤水分的亏缺程度略小于同属残塬沟壑区的长武县^[26-27],这是由于降水量差异所致;研究区土壤水分的亏缺程度亦小于关中平原苹果栽植密度过大的西安^[22]、咸阳^[23]、长安^[24]、耀州^[8]、高陵^[6]、礼泉^[25]等地的部分果园,但大于栽植密度接近的果园^[33],可见,栽植密度对果园土壤水分含量有很大的影响。

在洛川,随着种植年限的增加,苹果生长需水量不断增加,当天然降水满足不了苹果树生长需要时,根系就会从土壤深层吸取水分,来补充生长发育需要的水分,这必然导致土体内土壤贮水量下降。与幼园相比,种植年限较长的果园的土壤深层水分含量大幅下降,这是由于在黄土旱塬区,2 m以下土壤水分在苹果生长期间很难得到降水的补偿而发生大幅度变化^[16-17]。

不同立地条件下降水入渗、土壤水分蒸发和植株蒸腾都存在较大差异,必然会导致果园土壤含水量的不同。在洛川县,塬地的土壤水分含量最高,川地次之,台地相对较低。这可能是由于塬地土层深厚,达80~220 m,地面平坦广阔,土壤为质地优于黄绵土的黑垆土,蓄纳雨水的性能强于台地和川地。对于不同立地类型的果园,生产上应采用合理的土壤水分管理、生长结实调控等措施,力求果园土壤水分的动态平衡,实现果园的持续健康发展。

树冠高大、根系分布广而深的乔化苹果树对土壤水分的消耗远大于树冠相对矮小、根系分布浅而密集的矮化树。但密度对土壤水分的影响远大于树形(乔、矮化)的影响,低密度乔化果园的土壤贮水量大于高密度的矮化果园。

果园土壤含水量的高低与栽培管理密切相关。

本研究中,洛阳村塬地 15 年生乔化果园的土壤含水量始终高于其他果园,已成为当地高产优质的示范果园,产量高达 $57000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,且果个大、品质优,每公顷收入超过 225000 元,主要原因是 2006 年该园的果树密度由 $4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 挖株调整为 $6 \text{ m} \times 4 \text{ m}$,且每年增施大量农家肥,改善了土壤结构,增强了蓄水性能.说明降低密度是改善当地果园水分环境、实现增产增收的有效措施,同时也证明洛川县大面积开展隔一株挖一株以降低果园密度的措施是切实可行的之举.

4 结 论

受大气降水、气候、地形地势、土壤特性、果树生理耗水和人为活动等因素的影响,洛川不同雨养果园土壤水分的变化和分布存在明显差异.季节性干旱导致的水分胁迫频繁发生,其中,4 月下旬至 6 月中旬土壤水分亏缺最严重,影响苹果树的花器发育、坐果、新梢生长、幼果膨大,因此,生产上应重点加强该季节的果园水分管理.

随苹果树生长年限的增大,土壤剖面贮水量下降.初果幼园与盛果园的贮水量差异较大,盛果园与衰败园的贮水量差异相对较小.因此,苹果树进入盛果期后应通过修剪、疏花疏果等生产调控技术手段控制枝梢旺长、合理负载、保证树体健康,以实现苹果的优质和稳产.

源地的土壤水分含量最高,川地次之,台地相对较低.生产上,不同立地类型的果园应采用科学合理的土壤水分管理措施,维持土壤水分的动态平衡,实现果园的持续健康发展.

密度对苹果园土壤水分有很大影响.在栽培密度一致的情况下,采用矮化栽培能够减少土壤水分消耗,显著提高果园土壤含水量;低密度乔化果园的土壤贮水量大于高密度的矮化果园.生产上,采用挖株降低栽培密度是维持苹果园土壤水分平衡、实现可持续发展的有效途径;大量施用农家肥可提高果园土壤上层有机质含量,改善土壤结构,增强土壤的蓄水性能,有助于提高果园的土壤水分含量.

参考文献

- [1] Fan Z-P (范志平), Zeng D-H (曾德慧), Jiang F-Q (姜凤岐), *et al.* Application of sustainable and intensive management model of windbreaks/shelterbelts. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **12**(6): 811–814 (in Chinese)
- [2] Wang J-X (王进鑫), Zhang X-P (张晓鹏), Gao B-S (高保山), *et al.* Study on water requirement and limited irrigation effects of dwarfing red Fuji apple tree on Weibei of Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2000, **7**(1): 69–74 (in Chinese)
- [3] Wei Q-P (魏钦平), Cheng S-H (程述汉), Tang F (唐 芳), *et al.* Relationship between fruit quality of Fuji apple and meteorological factors. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1999, **10**(3): 289–232 (in Chinese)
- [4] Zhang Y (张 扬), Wu F-Q (吴发启), Zhang J (张进), *et al.* Study on topsoil water characteristics of high quality apple orchards in Shaanxi Province. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica* (西北农业学报), 2010, **19**(10): 91–95 (in Chinese)
- [5] Du J (杜 娟), Zhao J-B (赵景波). Research on soil dryness and the recovery below artificial forest in Lintong of Xi'an. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2005, **19**(6): 163–167 (in Chinese)
- [6] Du J (杜 娟), Zhao J-B (赵景波). Seasonal change of soil moisture content in dried soil layer in artificial forest in Gaoling of Xi'an. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2007, **27**(1): 98–103 (in Chinese)
- [7] Fan J (樊 军), Shao M-A (邵明安), Hao M-D (郝明德), *et al.* Desiccation and nitrate accumulation of apple orchard soil on the Weibei dryland. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(4): 1213–1216 (in Chinese)
- [8] Gao L-F (高利峰), Zhao X-G (赵先贵), Wei L-H (韦良焕). Studies on soil moisture of the apple field in Yaozhou of Tongchuan City. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2007, **25**(3): 120–124 (in Chinese)
- [9] Gu J (顾 静), Zhao J-B (赵景波), Zhou J (周杰), *et al.* The research on the soil moisture change and its moisture balance of apple trees in Xianyang. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2009, **24**(5): 898–906 (in Chinese)
- [10] Huang M-B (黄明斌), He F-H (何福红), Yang X-M (杨新民), *et al.* Effect of apple production base on regional water cycle in Weibei upland of the Loess Plateau. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2001, **11**(2): 239–243 (in Chinese)
- [11] Li Y-Q (李瑜琴), Zhao J-B (赵景波). Research of soil moisture below artificial forest in Chang'an. *Journal of Shaanxi Normal University* (陕西师范大学学报), 2005, **33**(1): 105–109 (in Chinese)
- [12] Liu X-Z (刘贤赵), Huang M-B (黄明斌). Status of soil water environment in apple orchards located in the area of Loess Plateau. *Journal of Fruit Science* (果树学报), 2002, **19**(2): 75–78 (in Chinese)
- [13] Liu X-Z (刘贤赵), Song X-Y (宋孝玉). Study on the

- characteristics of soil moisture content in the apple growing subregions of the Weibei dry highland in Shaanxi Province. *Arid Land Geography* (干旱区地理), 2004, **27**(3): 320–326 (in Chinese)
- [14] Wang J (王 健), Wu F-Q (吴发启), Meng Q-Q (孟秦倩). Analysis on soil moisture character of dry orchard on hilly and gully regions on the Loess Plateau. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2006, **21**(5): 65–68 (in Chinese)
- [15] Liu X-Z (刘贤赵), Yi H-P (衣华鹏), Li S-T (李世泰). Soil moisture characteristics of apple planting sub-area in Weibei dry highland, Shaanxi Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(11): 55–60 (in Chinese)
- [16] Zou Y-J (邹养军), Chen J-X (陈金星), Ma F-W (马锋旺), *et al.* Characteristics of soil moisture change of apple orchards of different planting years in Weibei dryland. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2011, **29**(1): 41–43 (in Chinese)
- [17] Ran W (冉 伟), Xie Y-S (谢永生), Hao M-D (郝明德). Study on change of soil water in orchards of different planting-life in gully region of Loess Plateau. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica* (西北农业学报), 2008, **17**(4): 229–233 (in Chinese)
- [18] Chen HS, Shao MA, Li YY. The characteristics of soil water cycle and water balance on steep grassland under natural and simulated rainfall conditions in the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 2008, **360**: 242–251
- [19] Ro HM. Water use of young “Fuji” apple trees at three soil moisture regimes in drainage lysimeters. *Agricultural Water Management*, 2001, **50**: 185–196
- [20] Celano G, Palese AM, Ciucci A, *et al.* Evaluation of soil water content in tilled and cover-cropped olive orchards by the geoelectrical technique. *Geoderma*, 2011, **63**: 163–170
- [21] Radersma S, Ong CK. Spatial distribution of root length density and soil water of linear agroforestry systems in sub-humid Kenya: Implications for agroforestry models. *Forest Ecology and Management*, 2004, **188**: 77–89
- [22] Li Y-Q (李瑜琴). Change of soil moisture in artificial forests in Xi'an region in different precipitation years. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2010, **24**(1): 143–147 (in Chinese)
- [23] Wang L (王 玲), Zhao J-B (赵景波), Li Y-Q (李瑜琴), *et al.* Study on soil moisture and soil dry layer in apple land and farmland in Xianyang of Shaanxi Province. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), 2009, **37**(29): 14298–14300 (in Chinese)
- [24] Lu A-G (卢爱刚), Dong W (董 雯), Zhao J-B (赵景波). Contrast research of the soil moisture content below artificial forest land in Chang'an and of Qujiang of Shaanxi Province. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2009, **16**(3): 155–158 (in Chinese)
- [25] Zheng M-S (郑明山), Zhao J-B (赵景波), Gong C-S (龚成双), *et al.* Research on soil moisture content under apple trees and farmland of Liquan in Shaanxi. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), 2010, **38**(12): 6424–6426 (in Chinese)
- [26] Cheng L-P (程立平), Liu W-Z (刘文兆). Soil moisture distribution in deep layers and its response to different land use patterns on Loess Tableland. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2011, **27**(9): 203–207 (in Chinese)
- [27] Zhang Y (张 义), Xie Y-S (谢永生), Hao M-D (郝明德). Study on characteristics of apple orchard soil moisture in gully region of Loess Plateau. *Soils* (土壤), 2011, **43**(2): 293–298 (in Chinese)
- [28] Yue H-C (岳宏昌), Wang Y (王 玉), Li C-Y (李缠云), *et al.* Vertical distribution of soil moisture in the loess hilly and gully area. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2009, **29**(1): 66–69 (in Chinese)
- [29] Yuan W-P (袁文平), Zhou G-S (周广胜). Theoretical study and research prospect on drought indices. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), 2004, **19**(6): 982–990 (in Chinese)
- [30] Wang J-S (王劲松), Guo J-Y (郭江勇), Zhou Y-W (周跃武). Progress and prospect on drought indices research. *Arid Land Geography* (干旱区地理), 2007, **30**(1): 60–65 (in Chinese)
- [31] Wang Y-P (王延平), Shao M-A (邵明安), Zhang X-C (张兴昌). Soil moisture ecological environment of artificial vegetation on steep slope of loess region in North Shaanxi Province, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(8): 3769–3778 (in Chinese)
- [32] Zhou Q (周 旗), Yu Y-C (郁耀闯), Zhao J-B (赵景波). Contrast research of the soil moisture content below artificial forestland in Xianyang and Hu County of Shaanxi. *Ecological Economy* (生态经济), 2007(1): 32–35 (in Chinese)
- [33] Li Y-S (李玉山). Effects of forest on water circle on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2001, **16**(5): 427–432 (in Chinese)

作者简介 王延平,男,1968年生,博士,副教授.主要从事植被与土壤水分生态研究. E-mail: ylwangyp@163.com

责任编辑 杨 弘