

DOI: 10.5846/stxb201403030359

王艳萍, 王力, 韩雪, 杨文强. 黄土塬区不同土地利用方式土壤水分消耗与补给变化特征. 生态学报, 2015, 35(22): - .

Wang Y P, Wang L, Han X, Yang W Q. Dynamics of soil moisture depletion and replenishment in different land use types of the Loess Tableland. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22): - .

黄土塬区不同土地利用方式土壤水分消耗与补给变化特征

王艳萍^{1,2}, 王力^{1,2,*}, 韩雪¹, 杨文强¹

1 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

2 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

摘要:对黄土塬区不同土地利用方式下 2012 年 3—10 月 7 龄果园(挂果初期)、17 龄果园(盛果期)、小麦地、玉米地土壤水文状况进行分析,结果显示,0—600 cm 试验土层 7 龄果园土壤贮水量最高,其次为玉米地、小麦地,17 龄果园最低,且不同土地利用方式下贮水量随着降水量的变化而上下波动,但其变化滞后于降水。不同土地利用方式均表现为随土壤深度增加土壤含水量变异程度减弱的特征,且其土壤剖面的水分含量变化存在季节变异。农田和 7 龄果园中不存在土壤干燥化现象,而 17 龄果园土壤剖面存在较厚的干燥化土层,其分布深度为 320—600 cm。不同的土地利用方式的土壤水分的消耗和补充深度有较大差异,17 龄果园消耗深度为 500 cm,补充深度为 200 cm;7 龄果园、玉米地和小麦地消耗深度分别为 200 cm、300 cm 和 300 cm,且补充深度均超过了测定的土壤深度,大于 600 cm。

关键词:土壤含水量;土壤干层;消耗和补充深度;土地利用方式

Dynamics of Soil Moisture Depletion and Replenishment in Different Land Use Types of the Loess Tableland

WANG Yanping^{1,2}, WANG Li^{1,2,*}, HAN Xue¹, YANG Wenqiang¹

1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract: Soil moisture has large impacts on agricultural production and regional ecosystems. The Loess Tableland was selected as the study area, and the characteristics of soil moisture in different land use types were measured and analyzed from March to October 2012. The objectives of this study were to characterize the dynamic changes in soil water, determine the soil moisture depletion and replenishment depths, and compare the differences in water consumption under the different land uses. The results showed that; 1) Soil moisture content recorded in the 0—600 cm layer in a 7-year-old apple orchard was the highest, followed by that in a corn field, wheat field, and a 17-year-old apple orchard. Soil moisture contents in different land use types had the same variation trends as precipitation during the observation period, but their responses lagged changes in precipitation. 2) Soil moisture variation declined with increasing soil depth in different land use types. The variation in surface soil water content was greater than that of deep soil water content because the surface layer (0—100 cm) was influenced by multiple processes, including rainfall infiltration, soil evaporation, and plant root water uptake. Soil moisture was less affected by outside conditions as soil depth increased; therefore, soil moisture tended to be relatively stable. In addition, because of complicated functions of plant growth regulation and local phenological characteristics,

基金项目:国家自然科学基金项目(41390463, 51239009)

收稿日期:2014-03-03; 网络出版日期:2015-04-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangli5208@nwsuaf.edu.cn; wangli5208@163.com

seasonal variation was also observed in the soil water profile in each land use type. The shape of the average soil moisture profile for the 7-year-old apple orchard was an S-type curve, while the soil moisture profile for the 17-year-old apple orchard showed an initial decrease, followed by an increase and a final decrease. The deep soil moisture stabilized around 13.5%. The shapes of the soil moisture profile in wheat and corn fields were similar; they both increased at first and then decreased. 3) No soil desiccation occurred in farmland or in the 7-year-old apple orchard, while relatively deep desiccated soil layers existed in the 17-year-old apple orchard at depths of 320—600 cm. This was because the water consumption in the 17-year-old apple orchard was greater than water replenishment. In lower rainfall years, the precipitation was not enough to meet the demand from tree growth, so water stored in deep soil was used. Due to the limitation of rainfall infiltration depth, it was hard for water to be replenished once it was depleted. Thus, desiccated soil layers formed under continuous dry years. 4) There were some differences between the soil moisture depletion and replenishment in different land use types. The depths of soil water depletion in the 7-year-old apple orchard, corn field, and wheat field were 200 cm, 300 cm, and 300 cm, respectively, and their replenishment depths were beyond the measured depth of 600 cm. Their deep soil moisture conditions got compensation and improvement after the seasonal precipitation. The depth of soil water depletion in the 17-year-old apple orchard was 500 cm, while the replenishment depth was about 200 cm. As the replenishment depth was less than the consumption depth, the desiccated soil layers already present in the 17-year-old apple orchard will continue to exist for some time if there is no human intervention.

Key Words: soil water content; soil dry layer; soil moisture depletion and replenishment depth; land use type

土壤水分是土壤-植被-大气连续体的关键因子,是土壤系统中物质和能量循环的载体,对土壤特性、植被生长及其分布格局以及区域生态系统有着重要的影响^[1]。黄土高原地处半干旱、半湿润地区,其中位于黄土高原的渭北旱塬则属于雨养农业区,生产潜力比较大,素有“陕西第二粮仓”之称。随着该地区农业产业结构的调整,以苹果林为主的果园面积增大,农作物种植面积减少,传统农产品种植转变为人工经济苹果林缓解并改善了因退耕还林还草政策对当地百姓经济收入的影响,进而有效地推动了这一政策的实施。但土地利用方式的改变是影响土壤水分时空变异的重要因子,在不明确苹果林水分消耗和供给的状况下,大力推进耕地转为果园,可能会导致一系列不可预测的生态问题,同时也会对当地的粮食生产造成一定影响。樊军等^[2]通过对黄土旱塬不同农业生态系统土壤深层水分消耗与水分生态环境效应进行分析后指出,苹果树的大面积种植加快了土壤深层水分消耗,最终可能影响这一区域的陆地水循环。有研究表明,渭北旱塬 10 龄以上果园均有干层出现,且深层土壤干层表现出随果园年限增加而增强^[3]。果园中土壤干层的出现严重制约了苹果产业的可持续发展。

本研究以黄土高原沟壑区中的典型地区长武塬为研究区域,在基于长武塬面的几种主要土地利用方式土壤水分动态变化定点监测的基础上,系统分析了不同土地利用方式下土壤贮水量随降水量的动态变化过程,土壤水分垂直变化规律及其变异特征,分析深层土壤干燥化的成因以及土壤水分的补充和消耗深度,为黄土塬区农田、果园结构调整和土壤有限水资源的持续利用提供理论依据,以期促进黄土高原地区植被恢复重建的顺利进行。

1 研究区概况及研究方法

1.1 试验区概况

试验塬面位于陕西省长武县城以西 12 km 的陕甘交界处(107°40'30"—107°42'30" E, 35°12'16"—35°16'00" N)王东沟小流域,塬面地势平坦,土层深厚,海拔 1215—1226 m,属典型的黄土高原沟壑区,为旱作农业区。年均气温 9.1 ℃,无霜期 171 d。降水年际间变异大,最大年降水量为 813.2 mm,最小年降水量为 369.5 mm,多年平均降水量为 584.1 mm,且多集中在 7—9 月,占全年降水量的 54.9%。年平均蒸发量 1016.6 mm,

$\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温 $3029\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年日照时数为 2230 h , 日照率 51% , 年辐射总量为 4837 kJ/m^2 。试验区土壤类型为中壤质黑垆土, 总孔隙度 $47.5\%—56.0\%$ 。田间持水量为 23% ($3\times 10^4\text{ Pa}$ 时的含水量), 萎蔫系数 10.6% ($1.5\times 10^6\text{ Pa}$), 地下水埋深 $50—80\text{ m}$ 。

塬区土地利用现状格局以耕地、园地、林地和草地为主, 其中耕地 3.0 万 hm^2 , 且以山坡地为主, 田间种植的作物以小麦、玉米为主, 黄豆及杂粮为辅, 其中小麦在 9 月下旬播种, 次年 6 月中下旬收获, 大田产量多年平均值为 3198.2 kg/hm^2 ; 玉米在 4 月中旬播种, 9 月中旬收获, 大田产量多年平均值 6037.5 kg/hm^2 。长武塬区果园面积逐年增加, 截至 2012 年底, 全县果园面积已发展到 1.7 万 hm^2 , 产量达到 26 万 t , 已成为该区域经济发展的支柱产业。

1.2 试验方法

1.2.1 样地选择

农田选取小麦地、玉米地, 大田管理模式与当地传统耕作法相同。小麦为冬小麦, 于 2012 年 9 月 18 日播种, 次年 6 月 25 日收割。玉米为夏玉米, 于 2012 年 4 月 20 日播种, 9 月 20 日收获。

果园选取 7 年、17 年生红富士果园, 果园的营造和管理模式采用当地常规方法, 果园定期进行病虫害防治, 适时拉枝剪梢和套袋, 保墒追肥, 定期清除杂草, 管理措施相对一致。所选择的果园的基本情况见表 1。

表 1 研究果园的基本情况

Table 1 Characteristics of the studied apple orchard

果园年龄 Plantation age	树种 Species	果园面积 Orchards area / m^2	树高 Height /m	冠幅 Crown width /m	胸径 DBH /cm	株行距 Plant and row space /m \times m	林分密度 Tree density /株/ hm^2	郁闭度 Crown density
7a(初果期) 7 years (First fruit period)	红富士	26600	3.0	3.2	8	3.5 \times 4.0	720	0.63
17a(盛果期) 17 years (Full fruit period)	红富士	23400	3.5	4.4	14	3.5 \times 4.0	720	0.79

1.2.2 测定项目

(1) 土壤含水量

在小麦地、玉米地、7 龄果园、17 龄果园中各随机布置 6 个土壤水分监测点。利用 CNC503B(DR) 中子仪于 2011 年 7—9 月、2012 年 3—9 月每月 15 日和 30 日测定土壤水分。0—100 cm 阶段土层按 10 cm 记录读数一次, 100—600 cm 土层按每 20 cm 记录读数一次, 用 6 个测点数据的平均值作为该层土壤含水量值, 并用土钻法校准 0—40 cm 土层所测得数据。

(2) 各层次土壤容重采用环刀法测定。

(3) 降水量采用普通雨量计和自记雨量计相结合的方法测定。

1.2.3 计算方法

(1) 土壤贮水量(soil moisture storage)计算公式:

$$W_c = \theta_m \cdot \rho \cdot h \cdot 10$$

式中 W_c 为土壤贮水量(mm), θ_m 为土壤质量含水量, ρ 为土壤体积质量(g/cm^3), h 为土层深度。

(2) 变异系数(Coefficient of Variation, CV) = 标准差/平均值

1.2.4 数据处理

运用 Microsoft Excel、SPSS17.0 和 SigmaPlot12.0 统计分析软件对试验数据进行统计分析并作图。

2 结果与分析

2.1 土壤贮水量与降水量的动态特征

2012 年降水量为 480.8 mm , 低于多年平均降水量 584.1 mm ^[3] 约 17.7% , 属于旱年。大气降水是研究区土

壤水分的主要补给来源,各土地利用方式土壤动态变化受降水影响较大。2012 年研究期间降水随时间变化情况如图 1 所示,降水主要集中在 7、8、9 月,占全年降水量的 63.5%,并在 9 月出现峰值。研究区内小麦地、玉米地和果园的 0—600 cm 土壤贮水量随时间的变化趋势与降水随时间的变化趋势一致,但在时间上滞后于降水量(图 1)。

2012 年 3—9 月对长武塬面 7 龄果园(挂果初期)、17 龄果园(盛果期)、小麦地、玉米地 0—600 cm 土壤水分的监测表明(图 1),0—600 cm 土壤贮水量 7 龄果园土壤最高,其次为玉米地、小麦地,17 龄果园最低。在观测期内,受降水和蒸发蒸腾过程的影响,果园土壤贮水量有较大的起伏,3—4 月,果树刚刚生长,但由于上一年的降水补充,观测初期 3 月 18 日土壤贮水量最高,7 龄果园和 17 龄果园 0—600 cm 贮水量分别达到 193.7 cm、132.2 cm。4—6 月初,由于降水少,气温回升快,表层土壤蒸发潜力大,加之果树生长发育耗水强度逐渐增加,土壤水分消耗大于补给,贮水量逐渐减少;6—7 月,降水虽然增多,但果树生长消耗仍大于补给,土壤贮水量仍继续下降,8 月降水相对较多,但蒸发蒸腾剧烈,使得各样地在 8 月底,土壤贮水量达到最低值,7 龄果园和 17 龄果园 0—600 cm 土壤贮水量分别仅为 173.2 cm、116.8 cm。9 月初,降水增多,果树生长已进入生殖生长末期,耗水减少,因此 9 月份土壤贮水量又开始逐渐恢复。17 龄果园土壤贮水量低于 7 龄果园,这主要是由于盛果期果树由于蒸腾耗损量较大及果树生长所需吸收利用的水分较多而造成土壤水分含量较低。

从图 1 中可以看出,玉米地的土壤贮水量变化趋势为先减少后增加,但变化幅度相对平稳。在春季播种前,没有植株蒸腾,仅以地面蒸发为主,但由于该时期降水量较少,不能及时补充土壤蒸发造成的土壤水分消耗,因此土壤贮水量呈现下降趋势;玉米播种后到玉米抽穗期,随着玉米生长以及气温升高,玉米地的植株蒸腾和棵间蒸发均在迅速增加,使得玉米地耗水量迅速增加,但在此阶段分配不均的有效降水不同程度的补充了土壤贮水量,因而土壤贮水量并没有显著的变化;6—8 月同果园变化趋势一样,8 月底达到土壤贮水量最低值,0—600 cm 土层贮水量为 154.9 cm;9 月中旬玉米成熟收获后,玉米地的耗水迅速减少,由于集中的强有效降水使得土壤贮水量增加。

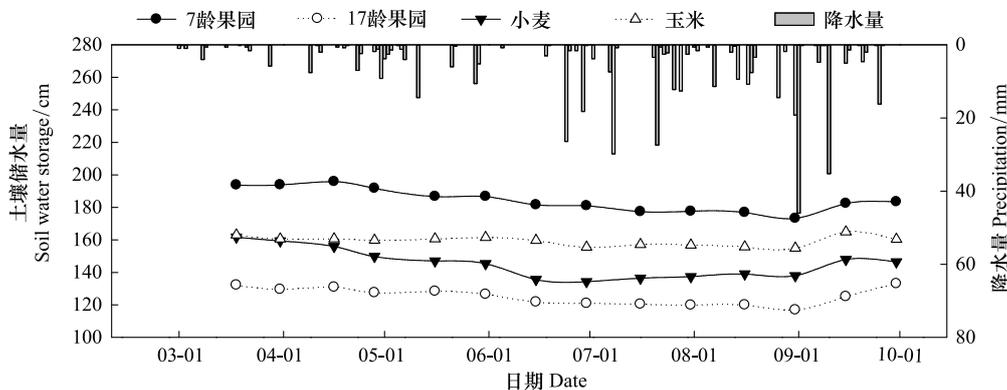


图 1 2012 年监测期不同土地利用方式 0—600 cm 土壤贮水量与降水量时间变化比较

Fig. 1 The comparison of 0—600 cm soil water storage temporal variation in different land use types and precipitation in 2012

冬小麦是秋播夏收,全生育期处于当年雨季后和翌年雨季前的旱季。3 月份,由于小麦处于返青期,耗水量并未达到最大,土壤含水量相对较高,进入 5 月份,小麦处于抽穗-扬花期,该时期正值耗水高峰,此时蒸腾量大大幅度增加,但降水偏少,土壤水分支出远高于收入;小麦在 6 月中旬进入收获期,由于小麦生育期内耗水多,降水补给不足,因此,6 月底小麦地土壤水分含量降到全年最低点,0—600 cm 土层贮水量为 134.3 cm。6 月 25 日小麦收割后,小麦地成为休闲农地,为承纳雨季中大量而集中的降水提供了条件,7—9 月为该地区的雨季,降水充足,雨季中接纳的降水补给地下水,又保存到来年春季供小麦生长利用。

本研究还发现,与 2011 年 9 月末期土壤贮水量相比,各土地利用方式土壤贮水量均呈现下降趋势,这是由于 2012 年为少水年,补给期 7—9 月降水 305.2 mm 与 2011 年同期降水 388.4 mm 相比偏少,使得 2012 年该

时期内由于降水土壤水分虽然相对回升,但补给始终低于消耗,出现负补给情况。

2.2 土壤水分垂直分布规律及其变异特征

由于土壤 0—200 cm 土层水分含量受降水的影响,变化剧烈,因此 200 cm 以下可以反映不同土地利用方式对土壤剖面水分含量的长期影响^[2]。图 2a 为各土地利用方式土壤含水量平均值的分布特征。从图中可以看出,200—600 cm 土壤含水量平均值 7 龄果园最高,玉米地、小麦地次之,17 龄果园最低。

土壤水分受降水、蒸散过程、地形和土地利用方式^[1,4-5]等综合因素的影响,在空间上具有高度的异质性。不同土地利用方式下的不同土层的土壤含水量变化幅度差异较大,变异系数 CV 可以反映这个特征。CV 值越大,则表示土壤含水量变化越剧烈,反之,则越稳定^[6]。7 龄果园、17 龄果园、小麦地、玉米地 0—600 cm 土体中不同土层土壤水分的 CV 值如图 2b 所示。结果表明,试验地块表层(0—100 cm)土壤含水量的变异程度均较大,这是由于该层受降水入渗、土壤蒸发及植物根系吸水等多重过程的影响;同时由于土壤孔隙多,因而土壤干湿变化剧烈,土壤水分变异系数大。而由图可知 7 龄果园、17 龄果园、小麦地、玉米地分别于 420 cm、180 cm、320 cm、140 cm 处以下 CV 值较小且变化不大,这是由于随着土层的加深,土壤水分受外界条件的影响变小,土壤水分变异程度减弱,土壤水分趋于相对稳定状态。

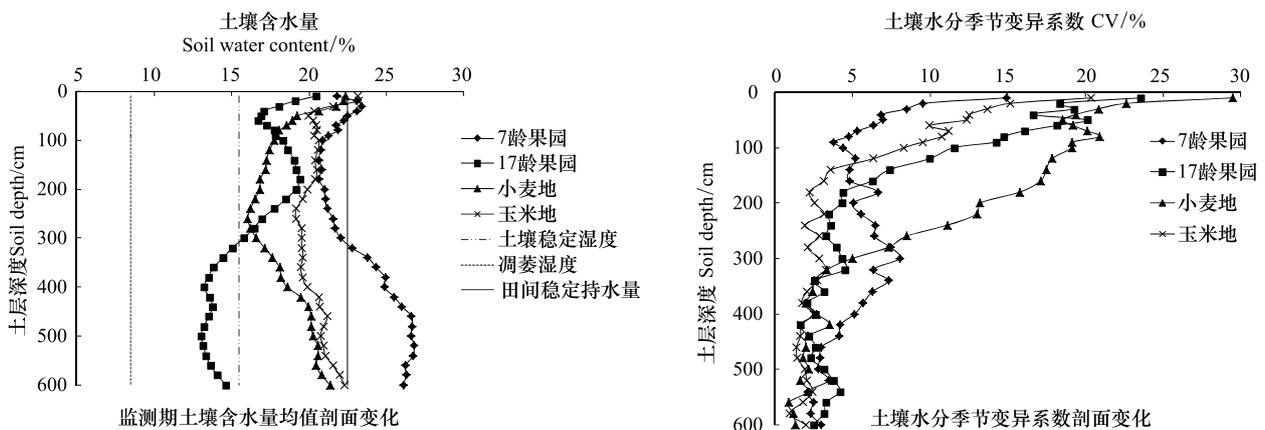


图 2 2012 年不同土地利用方式下土壤水分特征剖面变化

Fig. 2 The sectional change characteristics of soil moisture in different land use types in 2012

在不同月份间,不同土地利用方式下的土壤水分变化具有明显的季节特征,这是植物生长规律和当地物候特点共同作用的结果。如图 2b 和图 3 所示,各土地利用方式不同月份 0—600 cm 土壤剖面的水分含量变化存在差异。7 龄果园土壤水分平均值自上而下呈“S”分布。60—240 cm 之间土壤水分较低,240 cm 以下呈增加趋势。深层土壤含水量高于表层。17 龄果园土壤含水量垂直变化先减小,后增加再减少,深层稳定在 13.5% 左右。60—180 cm 土层含水量有一个上升的过程,即土壤水分有一个补充过程。这与王经民等^[7]关于黄土区土壤水分的研究结果类似,其主要可能是 0—60 cm 土层土壤水分消耗较大引起的。小麦地和玉米地是研究区内主要的两种农用地类型,它们的土壤含水量剖面变化趋势相似,均呈先减小后增加的变化,冬小麦是秋播夏收,全生育期处于当年雨季后和翌年雨季前的旱季。小麦地 0—300 cm 土层各月份土壤含水量变化较大,存在明显差异,这说明 0—300 cm 为小麦地降水入渗影响和根系吸水作用的主要层次,土壤湿度变化剧烈,干湿交替活跃。而在 300—600 cm,各月土壤含水量变化较小,且土壤含水量随土层加深而逐渐增加,说明该层位于小麦根系吸水深度以下。玉米各月份之间土壤含水量差异变化不大,土壤含水量垂直变化先减小后增加,0—300 cm 土壤含水量逐渐减小,300—600 cm 土壤含水量逐渐增加。

2.3 土壤干层

土壤干层是位于降水入渗补给深度以下,因林草植被过度消耗深层储水导致土壤水分负平衡而形成的长期存在的干燥化土层,是黄土高原地区半干旱和半湿润环境条件下出现的一种特殊的水文现象^[8-10],也是环

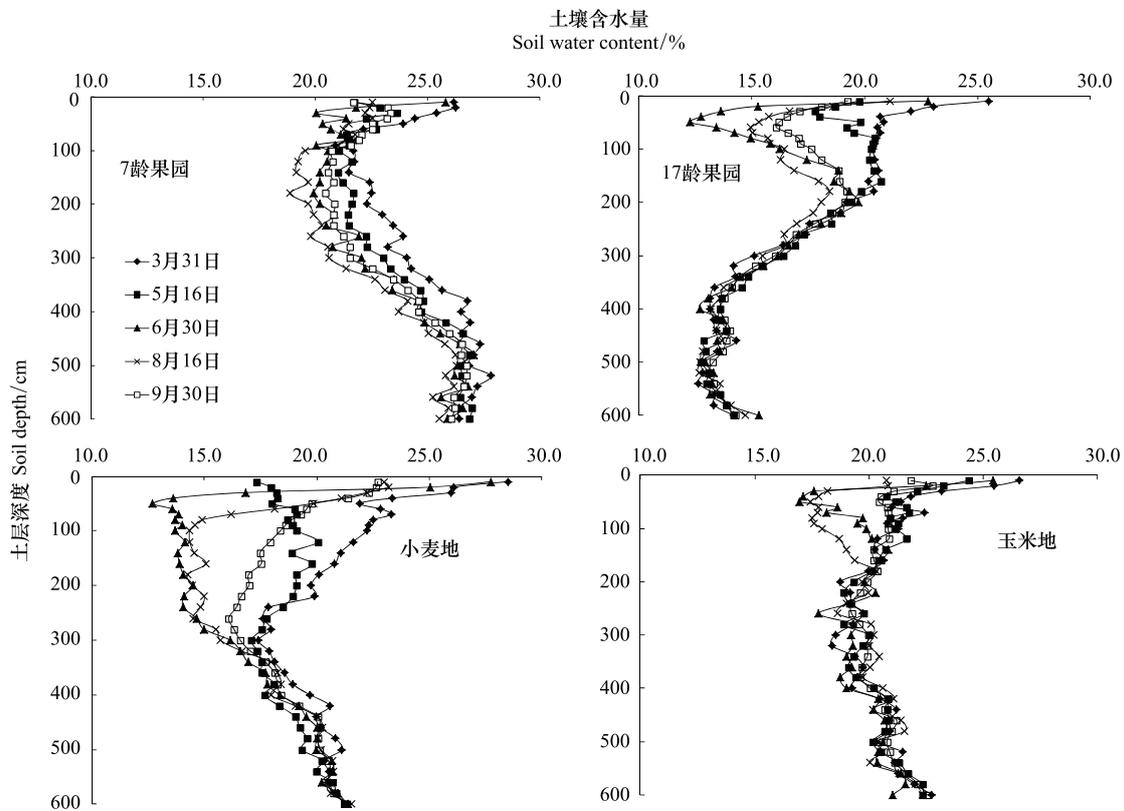


图3 2012年各土地利用方式下土壤水分垂直剖面季节变化特征

Fig. 3 The seasonal variation characteristics of soil moisture of different land use types in vertical section in 2012

境早化和土壤早化的一种表现。土壤干燥化程度的判别与评价方法不尽相同,大多研究者认为土壤干层湿度范围应以田间稳定持水量或土壤稳定湿度为上限,凋萎湿度为下限^[11-13]。由于田间稳定持水量物理意义不明确^[14],本研究以植物气孔开始关闭时的土壤含水量作为判断农田、果园土壤干燥化的上限指标,该值一般介于田间持水量的60%—70%之间,在同一土壤条件下对不同植物会略有差异^[15]。为了更为准确描述土壤干燥化强度,采用土壤干燥化指数 S_{di} (Soil desiccation index)来评级土壤干燥化强度,计算公式为:

$$S_{di} = \left(1 - \frac{\theta - S_w}{S^* - S_w} \right) \times 100\% = \frac{S^* - \theta}{S^* - S_w} \times 100\%$$

式中, S_{di} 为土壤干燥化指数,%; θ 为土壤含水率,%; S_w 为凋萎湿度,%; S^* 为植物气孔开始关闭时的土壤含水量^[16],%,相对应的土壤水势约为-0.01MPa。 S^* 值为植物开始受水分胁迫的临界值,以该值作为判别土壤干燥化强度的上限物理意义和生物学意义比以田间稳定持水量为标准更为明确^[17]。依据土壤干燥化指数 S_{di} 的大小,将土壤干燥化强度分为6级,1)若 $S_{di} < 0$,为无干燥化;2)若 $0 \leq S_{di} < 25\%$,为轻度干燥化;3)若 $25\% \leq S_{di} < 50\%$,为中度干燥化;4)若 $50\% \leq S_{di} < 75\%$,为严重干燥化;5)若 $75\% \leq S_{di} < 100\%$,为强烈干燥化;6)若 $S_{di} \geq 100\%$,为极度干燥化。

由图4和表2可知,小麦地、玉米地、7龄果园均未出现土壤干化现象,由此得知小麦、玉米以及苹果在幼龄期的生长主要消耗天然降水,土壤水库中水分利用的较少。而在17龄果园中300 cm以下开始出现土壤干化现象,以土壤干燥化指数为标准,300—360 cm土层和580—600 cm土层为轻度干燥化,380—560 cm土层为中度干燥化。

2.4 土壤水分的补充深度与消耗深度

土壤水分消耗深度和补充深度分别是指在特定的土地利用方式下,当年植物消耗土壤水分的剖面深度和当年降水所能入渗到的深度,是降水入渗补给与系统耗水共同作用的结果^[18]。

对 7 龄果园、17 龄果园、玉米地、小麦地 0—600 cm 土层贮水消耗和补充深度情况进行分析(图 3),从图中可以看出不同的土地利用方式显著影响土壤水分消耗和补给过程。各样地的土壤水分消耗和补充深度因受雨季初土壤水分含量、冠层截留、系统蒸散过程以及土地利用方式等的影响有较大差异。7 龄果园消耗深度在 200 cm 左右,降水入渗补充深度大于 600 cm,超过了测定的土壤深度。17 龄果园消耗深度在 500 cm 左右,而补充深度在 200 cm 左右,由于前期果树生长耗尽了水分,同时补充深度又不及耗水深度,因此 300—600 cm 土层已存在的干层,如果没有人工干预,土壤深层干燥化现象将在一段时期内持续存在。小麦地和玉米地的消耗深度均为 300 cm 左右,最大入渗深度均超过 600 cm。冬小麦收割后农田进入 7—9 月的夏季休闲期,此时段正是黄土高原降水充沛的季节,而小麦收割后农田进行翻耕,有利于深层土壤水分的恢复,小麦生长期强烈的蒸腾作用和棵间土壤蒸发所消耗的土壤水分可以得到部分或者全部恢复。

3 讨论

(1) 研究区内小麦地、玉米地和果园的土壤贮水量随时间的变化趋势与降水随时间的变化趋势一致,但在时间上滞后于降水量。有研究表明^[19-20],土壤水分补偿效果显现的时间比降水量最大值出现的时间滞后一个月左右,这主要是由于土壤水分的垂直输送具有滞后性以及作物和果树生长造成的,并说明土壤水分向下再分配可持续较长的时间。王景才等^[21]研究得出,入渗水量受季节降水、作物生长期蒸腾蒸散的影响显著;由于气温日趋升高日照增加,作物呈现出一定的长势,土壤蒸发和作物蒸散损耗增大从而导致可下渗水量减小;同时,深层由于水分输送距离较长以及深层土壤结构较紧致使水分输送阻力比较大,使得水分传输具有滞后效应。

本研究得出,7 龄果园 0—600 cm 土壤含水量显著高于 17 龄果园。王亚莉等^[22]测定了黄土高原半湿润偏旱区旱作果园 0—1000 cm 土壤含水量,研究表明,果园随着种植年限(0—12 龄)的增长,0—1000 cm 土壤含水量逐渐降低,此后土壤湿度逐渐趋于凋萎湿度直到 24 龄达到稳定,同时,土壤干燥化程度也由无干燥化逐渐加剧,至 24 龄以后形成稳定的强烈干燥化状态。甘卓亭^[3]对渭北旱塬不同龄果园土壤水分研究得出,20—21 龄果园的土壤水分显著高于 10—11 龄和 15—16 龄,呈现一定的恢复趋势,而这是因为人工林发育过程植物对水分的利用先由浅变深再由深变浅,最终依靠当年降水量维持正常的发育过程,而深层土壤水分得以逐渐恢复。

(2) 李军等^[23]在分析黄土高原不同降水类型农田土壤干燥化效应得出,黄土高原半湿润区旱作粮田干燥化指数为-8%,即不存在土壤干化现象。李玉山^[24]认为,受降水入渗影响明显,苹果园地土壤干层分布于 300—940 cm。张义等^[25]研究得出塬地果园干层主要分布于 400—800 cm。甘卓亭^[3]对渭北旱塬果园土壤干燥化情况调查研究得出,3—4 龄果园未出现土壤干层,而 10 龄以上果园均有干层出现,其中,深层土壤干层表现出随果园年限增加而增强,20—21 龄果园上层的土壤干层有减弱的趋势。本研究得出农田和 7 龄果园

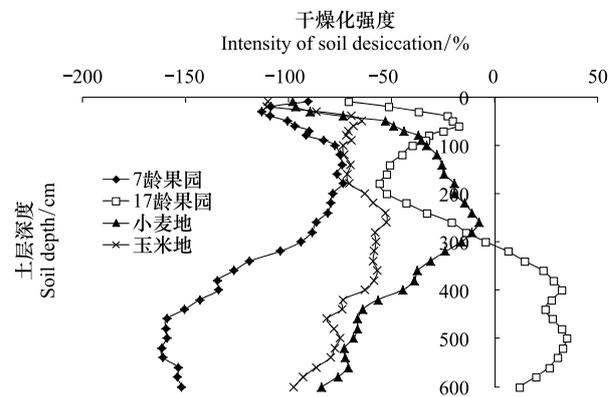


图 4 2012 年不同土地利用方式土壤干燥化强度
Fig. 4 Intensity of soil desiccation in different land use types in 2012

表 2 2012 年不同土地利用方式下耗水深度与补充深度比较
Table 2 Comparison of soil water consumption and compensation depths in different land use types in 2012

项目 Items	消耗深度/cm Depletion depth	补充深度/cm Replenishment depth
7 龄果园 7 years orchard	200	>600
17 龄果园 17 years orchard	500	200
小麦地 Wheat field	300	>600
玉米地 Corn field	300	>600

中不存在土壤干燥化现象,而 17 龄果园土壤剖面存在深厚的干燥化土层,其分布深度为 320—600 cm。这是由于 17 龄果园水分消耗量较大,在欠水年,当年降水不足以满足果树生长需求时,对深层的土壤水分进行了利用;由于受降水入渗深度的限制,深层土壤水分一旦被利用,很难得到有效补充,在连续干旱的条件下,便形成了土壤干层。

王亚莉等^[22]指出,旱作苹果园地土壤水分合理利用年限为 23—24 年。何福红等^[26]研究王东沟小流域退化果园还耕的生态水分效应得出,退化果园和退果还耕地的平均含水量和土壤贮水量均显著高于同期的盛果期果园。果园退化后废弃和退果还耕,土壤水分会得到部分恢复。Huang 等^[27]利用 SHAW 模型对黄土沟壑区果树砍伐后土壤水分的恢复状况进行分析,模拟出种植 30 年苹果树后约需 7.3 年才能使 0—3m 范围内果园土壤剖面的水分恢复成种植冬小麦的土壤水分状况。

(3)不同土地利用方式的土壤水分的消耗和补充深度有较大差异。本研究得出玉米地和小麦地消耗深度均为 300 cm,7 龄果园消耗深度为 200 cm,且补充深度均超过了测定的土壤深度,大于 600 cm,即其深层土壤水分状况可在季节性降水后得到补偿和改善。张义等^[19]得出长武塬面果园土壤水分下渗深度可达 260 cm 上下,本研究中得出 17 龄果园补充深度为 200 cm,但消耗深度为 500 cm,其补充深度不及消耗深度,因此在 17 龄果园中 300—600 cm 土层已存在的干层,如果没有人工干预,土壤深层干燥化现象将在一段时期内持续存在。樊军等^[28]研究表明,翻耕有利于 0—200 cm 土层土壤水分恢复,王志强等^[29]认为土壤水分恢复的深度和程度随翻耕年限的增加而增大。因此,应对果园尤其是已存在干层的盛果期果园进行适当的人为干预,如合理的抚育管理和复壮更新,果树有可能得到正常的生存和发展,出现衰退的果树亦有可能得到良好的恢复,否则,随着土壤干层不断加深,苹果园因土壤水分的严重亏缺而退化衰败,甚至成片干枯死亡。

4 结论

(1)对黄土塬区不同土地利用方式下 7 龄果园(挂果初期)、17 龄果园(盛果期)、小麦地、玉米地土壤水文状况进行分析,结果显示,0—600 cm 试验土层 7 龄果园土壤贮水量最高,其次为玉米地、小麦地,17 龄果园土壤贮水量最低。且不同土地利用方式下土层贮水量随降水量的变化而上下波动,但其变化滞后于降水。

(2)不同土地利用方式下的土层均表现为随土壤深度增加而土壤含水量变异程度减弱的特征。其土壤剖面的水分含量变化存在季节变异。

(3)农田和 7 龄果园中不存在土壤干燥化现象,而 17 龄果园土壤剖面存在深厚的干燥化土层,其分布深度为 320—600 cm。这是由于果树生长强烈耗水、降水相对不足和潜在蒸发量巨大等因素长期相互作用的结果。

(4)不同的土地利用方式显著影响土壤水分消耗和补给过程,17 龄果园消耗深度为 500 cm,补充深度为 200 cm;7 龄果园,玉米地和小麦地消耗深度分别为 200 cm、300 cm、300 cm,而补充深度均超过了测定的土壤深度,大于 600 cm。

参考文献(References):

- [1] Qiu Y, Fu B J, Wang J, Chen L D. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2001, 240(3-4): 243-263.
- [2] 樊军, 郝明德, 邵明安. 黄土旱塬农业生态系统土壤深层水分消耗与水分生态环境效应. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 61-64.
- [3] 甘卓亭. 渭北旱塬苹果园根系分布格局及其土壤水分生态特征研究 [D]. 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2007.
- [4] 王俊, 刘文兆, 胡梦珺. 黄土丘陵区小流域土壤水分时空变异. *应用生态学报*, 2008, 19(6): 1241-1247.
- [5] Gao J Q, Ouyang H, Lei G C, Xu X L, Zhang M X. Effects of temperature, soil moisture, soil type and their interactions on soil carbon mineralization in Zoigê alpine wetland, Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Geographical Science*, 2011, 21(1): 27-35.
- [6] 莫保儒, 蔡国军, 杨磊, 芦娟, 王子婷, 党宏忠, 王多锋, 戚建莉. 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征. *生态学报*, 2013, 33(13): 4011-4020.

- [7] 王经民,戴夏燕,韩冰. 黄土丘陵区土壤水分研究. 农业系统科学与综合研究, 2000, 16(1): 53-56.
- [8] 王力,邵明安,张青峰. 陕北黄土高原土壤干层的分布和分异特征. 应用生态学报, 2004, 15(3): 436-442.
- [9] 陈洪松,邵明安,王克林. 黄土区深层土壤干燥化与土壤水分循环特征. 生态学报, 2005, 25(10): 2491-2498.
- [10] 王力,邵明安,王全九,贾志宽,李军. 黄土区土壤干化研究进展. 农业工程学报, 2004, 20(5): 27-31.
- [11] 王力,邵明安,侯庆春. 土壤干层量化指标初探. 水土保持学报, 2000, 14(4): 87-90.
- [12] 刘沛松,贾志宽,李军,王俊鹏,李永平,刘世新. 宁南旱区紫花苜蓿土壤干层水分特征及时空动态. 自然资源学报, 2009, 24(4): 663-673.
- [13] 曹裕,李军,张社红,王亚丽,程科. 黄土高原苹果园深层土壤干燥化特征. 农业工程学报, 2012, 28(15): 72-79.
- [14] Wang L, Wang Q J, Wei S P, Shao M A, Li Y. Soil desiccation for Loess soils on natural and regrown areas. Forest Ecology and Management, 2008, 255(7): 2467-2477.
- [15] Laio F, Porporato A, Ridolfi L, Rodriguez-Iturbe I. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress II. Probabilistic soil moisture dynamics. Advances in Water Resources, 2001, 24(7): 707-723.
- [16] Sadras V O, Milroy S P. Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: A review. Field Crops Research, 1996, 47(2-3): 253-266.
- [17] Wang L, Wei S P, Horton R, Shao M A. Effects of vegetation and slope aspect on water budget in the hill and gully region of the Loess Plateau of China. Catena, 2011, 87(1): 90-100.
- [18] 高宇. 水蚀风蚀交错区植被-土壤水分作用深度与土壤呼吸影响因素[D]. 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2013.
- [19] 张义,谢永生. 不同覆盖措施下苹果园土壤水文差异. 草业学报, 2011, 20(2): 85-92.
- [20] 刘贤赵,康绍忠. 黄土区考虑滞后作用的坡地水量转化模型. 土壤学报, 2000, 37(1): 16-23.
- [21] 王景才,夏自强,彭兆然,陆志华. 淮北平原汉王实验站土壤水资源特征试验研究. 排灌机械工程学报, 2012, 30(3): 362-367.
- [22] 王亚莉,李军,王学春,张社红. 陇东旱塬旱作苹果园水分生产力与土壤干燥化效应模拟. 西北农林科技大学: 自然科学版, 2011, 39(8): 131-146.
- [23] 李军,陈兵,李小芳,赵玉娟,次仁央金,蒋斌,胡伟. 黄土高原不同降水类型区林地、草地与农田土壤干燥化效应比较. 土壤学报, 2008, 45(1): 40-49.
- [24] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究. 自然资源学报, 2001, 16(5): 427-432.
- [25] 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. 土壤, 2011, 43(2): 293-298.
- [26] 何福红,蒋卫国,黄明斌. 黄土高原沟壑区苹果基地退果还耕的生态水分效应. 地理研究, 2010, 29(10): 1863-1869.
- [27] Huang M B, Gallichand J. Use of the SHAW model to assess soil water recovery after apple trees in the gully region of the Loess Plateau, China. Agricultural Water Management, 2006, 85(1-2): 67-76.
- [28] 樊军,邵明安,王全九. 陕北水蚀风蚀交错区苜蓿地土壤水分过耗与恢复. 草地学报, 2006, 14(3): 261-264.
- [29] 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.