

洛川塬土壤水分特征及其对土地利用变化的响应

黄亚楠, 李晨曦, 林国伟, 李志

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 揭示洛川塬土壤水分特征及其对土地利用变化的响应, 为优化黄土高原土地利用结构和土壤水分管理提供科学依据。[方法] 测定农地、荒草地以及 8, 13, 15, 24, 28 和 30 a 果龄的苹果园 0—10 m 剖面的土壤水分, 对比分析各样地的土壤含水率、土壤储水量及土壤干燥化特征。[结果] ① 0—10 m 平均土壤水分含量: 荒草地 > 农地 ≈ 8 a 果园 > 13 a 果园 ≈ 15 a 果园 > 24 a 果园 ≈ 30 a 果园 > 28 a 果园; ≥ 24 a 果园土壤水分随深度增加逐渐减小, 而其他样地的土壤水分随深度增加逐渐接近田间持水量。② 以农地为参照, 不同果园 4—10 m 土壤水分减少量明显高于 0—4 m 减少量, 与农地的差异性随果龄增大而越发显著。③ 农地和荒草地转化为不同年限果园后出现水分亏缺现象, 亏缺量占田间持水量的 12%~46%。④ 24, 28 和 30 a 果园分别出现轻度、中度和轻度干燥化现象。[结论] 农地和荒草地转变成不同年限果园后, 出现不同程度水分亏缺, 并导致一定厚度的干层存在。

关键词: 土壤水分; 土地利用变化; 土壤干燥化; 洛川塬区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)06-0106-07

中图分类号: S157.2, F301

文献参数: 黄亚楠, 李晨曦, 林国伟, 等. 洛川塬土壤水分特征及其对土地利用变化的响应[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 106-112. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 06. 017; Huang Yanan, Li Chenxi, Lin Guowei, et al. Soil moisture characteristics and their responses to land use change on Luochuan loess tableland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 106-112. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 06. 017

Soil Moisture Characteristics and Their Responses to Land Use Change on Luochuan Loess Tableland

HUANG Yanan, LI Chenxi, LIN Guowei, LI Zhi

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Revealing the soil moisture characteristics and its response to land use change on Luochuan loess tableland, to provide scientific bases for optimizing land use structure and soil water management on the Loess Plateau. [Methods] Moisture contents in 0—10 m soil profiles under farmland, grassland, apple orchards with different ages (8, 11, 13, 15, 24, 28, and 30 years old) were measured, respectively. Then this paper contrasted and analyzed the characteristics of soil moisture content, soil moisture storage and the desiccation of deep soil layer in various sampling sites. [Results] ① The average soil water contents of different land use types in 0—10 m layer have an order as grassland > farmland ≈ 8-year-old apple orchard > 13-year-old apple orchard ≈ 15-year-old apple orchard > 24-year-old apple orchard ≈ 30-year-old apple orchard > 28-year-old apple orchard. Soil moisture decreased with the increase of soil depth under apple orchard with apple trees older than 24 years, while it increased with the increase of depth in other sampling sites. ② Compared with farmland, the decrease magnitudes of soil moisture within 4—10 m layer were greater than those in 0—4 m layer under apple orchards, and the differences between the two layers got increasing in older apple orchard. ③ The transformation of farmland and grassland into apple orchard can cause soil water storage gradually decreasing and hence worsen water deficit, which might account for 12%~46% of the field

收稿日期: 2017-04-13

修回日期: 2017-05-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于环境同位素的黄土高原沟壑区水循环机制研究”(51179161); 中央高校基本科研业务费(2452015105)

第一作者: 黄亚楠(1993—), 女(汉族), 河南省信阳市人, 硕士研究生, 研究方向为环境变化水文效应。E-mail: hyndyxa@163.com。

通讯作者: 李志(1978—), 男(汉族), 山东省沂水县人, 博士, 教授, 主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: lizhibox@nwfufu.edu.cn。

capacity. ④ 24-year, 28-year and 30-year orchards caused mild or moderate desiccation with different thickness. [Conclusion] After farmlands and grasslands were turned into apple orchards, the soil water deficit appeared to some degree, and resulted in different thickness of dry layer.

Keywords: soil moisture; land use change; soil desiccation; luochuan Loess tableland

黄土高原气候特殊、地形独特,是世界上水土流失最为严重和生态环境最为脆弱的地区之一^[1],恶劣的生态环境制约了该区生态—经济—社会“三大效益”的可持续性发展^[2-3]。建国初期中国便开始进行黄土高原水土保持的相关工作,尤其到 20 世纪 90 年代末实施了一系列“退耕还林、封山绿化”等生态保护措施,使黄土高原水土流失现象得到有效遏制,土地资源也得到了有效利用^[4],但同时也带来土地利用结构和植被类型的巨大变化。土地利用变化会对区域水文循环过程及水资源演变过程产生重要影响,如径流减少、蒸散加剧、地下水下降和土壤干层^[5-7]等水文现象。因此,土地利用变化的水文效应研究颇受关注。土壤水分是连接土壤—植物—大气连通体(soil-plant-atmosphere continuum, SPAC)不可或缺的关键因素,也是土壤中物质循环和能量流动系统的天然“搬运工”^[8],对调节水文循环和水资源演变过程具有十分重要的意义。黄土高原降雨量少且年内分配不均,植被蒸耗剧烈,人为扰动强度大,因而该区土壤水分负平衡现象频发^[9]。土地利用变化是影响土壤水分时空变异的重要因素^[10],如近年来大面积的传统农耕地转变成高耗水人工经济作物林,显著加剧了该区的土壤水分消耗。因此,深入揭示黄土高原土壤水分与土地利用变化之间的关系,对于规划土地利用结构和生态环境建设以及水资源合理配置与使用等都具有极其深远的意义。

位于渭北旱塬中部的洛川塬日照充足,是优质苹果生产核心地带,自 1985 年以来,该区大部分土地利用类型开始向苹果园转变,特别是近 10 a 苹果园面积占塬面比例已超过 3/4^[11-12]。这种土地利用结构的变化虽改善了当地经济状况,但也导致了一些不可预测的生态环境问题。相关研究发现,不同土地利用类型对土壤水分消耗和恢复的影响程度不同^[13],人工经济作物林可较大程度地消耗深层土壤水分,加速土壤干层的形成^[14-15],干层的存在会削弱降雨与地下水之间的转化能力,对区域水资源总量和水文演变过程的影响不容小觑,而土地利用变化到底如何影响区域水资源状况,对其影响的程度和深度多大,这些问题尚不清楚。在不明确水分消耗与补给关系的前提下,大力推进农耕地转人工经济作物林,不仅会破坏植被生长与水资源利用之间的平衡,同时也会对当

地的作物产量造成一定影响。因此,亟需研究该区土地利用变化导致的区域水文特征及干燥化效应。本研究通过测定洛川塬区农地、荒草地及不同年限苹果园 3 种土地利用方式下 0—10 m 土壤水分含量,定性分析各样地土壤水分分布差异,并定量描述土地利用变化对土壤水分的影响,以期优化黄土高原土地利用结构和土壤水分管理提供科学依据。

1 样品采集与数据分析

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省渭北旱塬中部的半湿润地区洛川塬区(35°21′—36°04′N, 109°18′—109°45′E),是中国著名优质苹果生产基地之一。平均海拔 1 100 m,属暖温带大陆性季风气候区,年均降雨量 622 mm,50%以上降雨多集中于 6—9 月。该区光照充足,年日照时数 2 552 h,日照率 56%,年总辐射量约 554.1 kJ/cm²,年均气温 9.2 °C,无霜期 167 d。该区土层深厚,地下水埋深大,土壤类型主要以黄绵土和黑垆土为主,土壤容重 1.3 g/cm³,田间持水量和凋萎湿度分别为 22%和 8%,田间稳定湿度(凋萎湿度与田间持水量的算术平均值)为 15%^[16-18]。

1.2 样品采集与测定

于 2015 年 8 月在洛川塬选取 8 个具有代表性的样地,即农地、荒草地和不同年限苹果园(分别为 8, 13, 15, 24, 28 和 30 a)。其中,果园样地的选取以相邻 4 棵生长状况相似的果树中心位置作为采样点。样地的选择应具有一定典型性和代表性。研究区土壤质地分布均一、气候条件相似,地形平坦且无人工灌溉,因而定量比较不同空间位置采样点的土壤水分状况,可以综合反映土地利用变化带来的土壤水文效应。为减少试验所耗时长,以空间代时间的方法,选取不同年龄的果园来表征土地利用变化引起的土壤水分迁移的时间变化。用人工打钻的方法分层采集上述 8 个样地 0—10 m 的土样,每 20 cm 收集土样 1 次。采样过程中,将土钻最下方的土样装于铝盒中,当天于 105 °C 恒温条件下烘干至恒重,计算各层土壤质量含水率;剔除土钻上方 1/3 的土样,剩余部分立即密封于聚乙烯密封袋中标记保存。

1.3 数据分析

为探讨洛川塬区土地利用变化带来的土壤水文

效应,从定性和定量 2 个角度展开分析。首先通过对不同土地利用方式下土壤水分剖面垂直分布特征,定性描述土地利用变化对土壤水分的可能影响;其次,通过计算不同土地利用方式下土壤储水量、土壤水分亏缺量和干燥化指数等指标,定量描述土壤水分对土地利用变化的响应程度,并用土壤干燥化指数进一步量化各利用方式下土壤干燥化强度和干旱胁迫程度。通常情况下,半湿润半干旱区常采用土壤稳定湿度值(田间持水量 WF 和凋萎湿度 WM 的算术平均值,介于 10%~16%)作为判断土壤干燥化现象的上限指标^[19-20]。

土壤储水量(SWS)、土壤有效储水量(ASW)、土壤水分亏缺量(WD)以及干燥化指数(SDI)的计算公式分别为:

$$SWS = SM \cdot SBD \cdot h \quad (1)$$

式中:SWS——土壤储水量(mm); SM——土壤质量含水率(%); SBD——土壤容重(g/cm³); h——土层深度(cm)。

$$ASW = (SM - WM) \cdot SBD \cdot h \quad (2)$$

式中:ASM——土壤有效储水量(mm); WM——凋萎湿度(%)。

$$WD = WF - SWS \quad (3)$$

式中:WD——土壤水分亏缺量(mm); WF——田间持水量(%)。

$$SDI = (SM - WM) / (SSM - WM) \times 100\% \quad (4)$$

式中:SSM——土壤稳定湿度(%); SDI——土壤干

燥化指数(%)。

根据 SDI 值的大小可将研究区干燥化程度分为 6 级:①若 $SDI < 0$,即极度干燥化②若 $0 \leq SDI < 25\%$,即强烈干燥化;③若 $25\% \leq SDI < 50\%$,即严重干燥化;④若 $50\% \leq SDI < 75\%$,即中度干燥化;⑤若 $75\% \leq SDI < 100\%$,即轻度干燥化;⑥若 $SDI \geq 100\%$,即无干燥化。其中无干燥化和极度干燥化是两种极端状态,分别代表土壤水分零亏缺和水分完全亏缺^[18,21]。

2 结果与分析

2.1 土壤水分总体特征

图 1 给出了 8 个样地 0—10 m 土壤水分垂直分布。由图 1 可知,由于植被蒸腾蒸发和降水入渗的影响强烈,浅层土壤水分 0—2 m 土壤水分存在较大的分异,没有一致的规律,但随土层深度增加,利用方式对土壤水分的影响随之加强。2 m 以下农地和荒草地、8~15 a 果园的土壤水分垂向分布规律一致,均随土层深度增加逐渐接近田间持水量;而 ≥ 24 a 果园土壤水分缓慢减小直至接近凋萎湿度。较农地、荒草地和 8~15 a 果园, ≥ 24 a 高龄果园在 3 m 开始水分含量开始降低;但 4 m 以下各样地土壤水分随深度的变化微弱,土地利用方式间的土壤水分形成稳定差异。尽管 8—10 m 土层水分含量都偏高,这主要是因为该层为古土壤,黏土化强,孔隙小,因而土壤持水性强而导水性差,对入渗的水分起滞留作用^[22,23]。

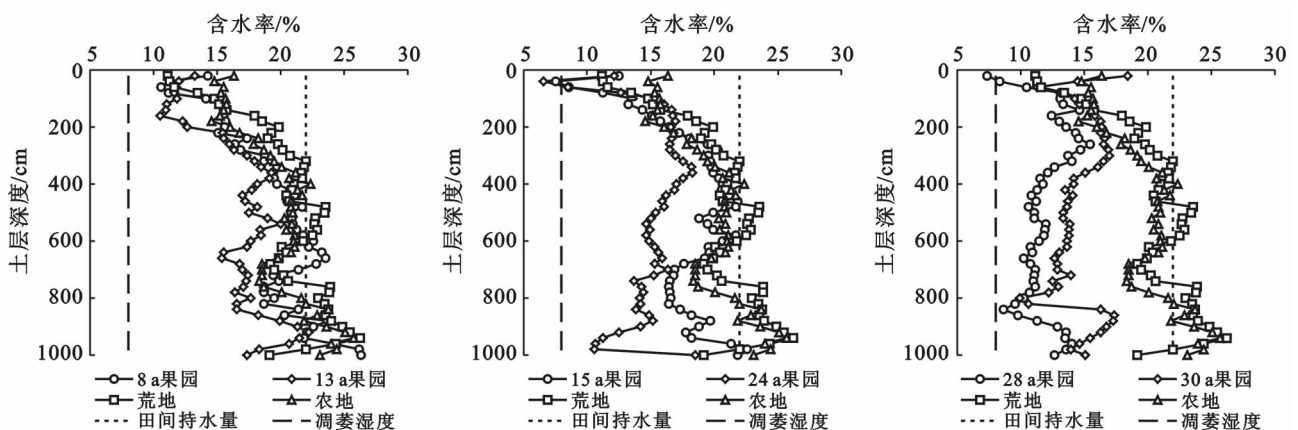


图 1 洛川不同土地利用方式下土壤含水率分布图

8 个样地 0~10 m 平均土壤水分含量表现为荒草地 > 农地 \approx 8 a 果园 > 13 a 果园 \approx 15 a 果园 > 24 a 果园 \approx 30 a 果园 > 28 a 果园,其大小依次为 20.5%, 19.8%, 19.4%, 16.7%, 17.9%, 14.9%, 14.5% 和 11.9%(表 1)。农地、荒草地、8~15 a 果园土壤水分条件较好,均占田间持水量 75% 以上水平, ≥ 24 a 果

园的土壤水分条件明显低于农地。进一步以 4 m 为界分析浅层和深层土壤水分的差异,发现荒草地、农地和 8~15 a 果园 4—10 m 的土壤水分含量均高于 0—4 m 土层,占田间持水量 80% 以上水平;而 ≥ 24 a 果树随深度增加土壤水分减少,仅占田间持水量 52%~67%。

表 1 不同土地利用方式下不同深度土壤水分统计特征

土地利用方式	0—4 m 土壤水分				4—10 m 土壤水分				0—10 m 土壤水分			
	最小值/%	最大值/%	平均值/%	Δ /%	最小值/%	最大值/%	平均值/%	Δ /%	最小值/%	最大值/%	平均值/%	Δ /%
农地	14.5	22.3	17.5 ^a	80	18.3	25.7	21.4 ^a	98	14.5	25.7	19.8 ^a	90
荒草地	11.1	22.0	17.8 ^a	81	19.1	26.2	22.3 ^a	101	11.2	26.2	20.5 ^a	93
8 a 苹果园	10.6	19.7	16.0 ^a	73	18.7	26.3	21.6 ^a	98	10.6	26.3	19.4 ^a	88
13 a 苹果园	10.5	19.3	14.6 ^b	66	15.4	22.2	18.1 ^b	82	10.5	22.2	16.7 ^b	76
15 a 苹果园	7.5	20.6	16.2 ^a	74	16.4	22.6	19.1 ^b	87	7.5	22.6	17.9 ^b	82
24 a 苹果园	6.6	18.3	15.5 ^b	71	10.6	18.5	14.7 ^c	67	6.6	18.5	14.9 ^c	68
28 a 苹果园	7.3	15.5	12.7 ^c	58	8.6	14.0	11.4 ^d	52	7.3	15.5	11.9 ^d	54
30 a 苹果园	11.3	18.4	15.5 ^b	71	9.9	17.3	13.9 ^c	63	9.9	18.4	14.5 ^c	66

注: Δ 不同样地土壤水分含量占田间持水量比例;不同字母表示在 0.05 水平差异显著。

2.2 土地利用变化对土壤水分的影响

土壤水分的剖面分布表明土地利用变化对土壤水分有影响(图 1 和表 1),为此,以农地和荒草地为参照与其他 6 个样地进行对比。以农地为参照,t 检验结果进一步表明荒草地、8 a 果园与农地的差异不显著($p=0.508$ 和 $p=0.289$),13 和 15 a 果园与农地的差异显著($p<0.05$),而其他 3 个高龄果树与农地的差异极显著($p<0.001$)。以农地为参照,量化其他 7 个样地 0—4 m,4—10 m 和 0—10 m 土层内土壤水分减少量。荒草地土壤水分盈余,8 a 果园减少量可忽略,13 a 果园分别减少 17%,15%和 16%,15 a 果园为 7%,11%和 10%,24 a 果园为 11%,31%和 25%,28 a 果园为 27%,47%和 40%,而 30 a 果园分别减少 7%,35%和 37%。尽管各土层都出现不同程度的水分减少,但 4—10 m 土壤水分减少量都明显高于 0—4 m 减少量,尤其是 ≥ 24 a 果园 4—10 m 土壤水分减少量占比达 31%~47%。可见,土地利用变化对土壤水

分影响显著,且高龄果树显著减少深层水分含量。

2.3 土地利用变化对土壤储水量的影响

为进一步量化土地利用变化对土壤水分的影响,分别计算了各样地的土壤储水量(SWS)及水分亏缺量(WD)(表 2)。整体而言,除 ≥ 24 a 果园外,其他几个样地土壤水分条件良好。0—4 m,农地、荒草地、8,15,24 和 30 a 果园 SWS 分别为 910,926,823,842,806,806 mm,占田间持水量 70%~81%;而 13 和 28 a 果园 SWS 较低,依次为 759,660 mm,占田间持水量的 58%~66%,土壤水分条件较差。4—10 m 土层,荒草地未发生亏缺;农地和 8 a 果园 SWS 占田间持水量 97%以上;13 和 15 a 果园 SWS 差异较小,分别占田间持水量 82%和 87%; ≥ 24 a 果园水分亏缺较为严重,SWS 仅占田间持水量的 52%~67%。由此可见,土地利用变化对 SWS 影响甚大,农地和荒草地转化为果园后会出现不同程度的水分亏缺,WD 介于 341~1 314 mm,占田间持水量的 12%~46%。

表 2 不同土地利用方式下土壤储水量状况

土地利用方式	0—4 m 土壤储水量			4—10 m 土壤储水量			0—10 m 土壤储水量		
	SWS/mm	WD/mm	ω /%	SWS/mm	WD/mm	ω /%	SWS/mm	WD/mm	ω /%
农地	910	234	80	1 672	44	97	2 575	285	90
荒草地	926	218	81	1 739	-23	101	2 665	195	93
8 a 苹果园	832	312	73	1 685	31	98	2 519	341	88
13 a 苹果园	759	385	66	1 412	304	82	2 166	694	76
15 a 苹果园	842	302	74	1 490	226	87	2 331	529	82
24 a 苹果园	806	338	70	1 147	569	67	1 942	918	68
28 a 苹果园	660	484	58	891	825	52	1 546	1 314	54
30 a 苹果园	806	338	70	1 084	632	63	1 889	971	66

注:SWS 为土壤储水量;WD 为土壤水分亏缺量; ω 为土壤储水量占田间持水量比例。

2.4 土地利用方式对土壤干燥化的影响

表 3 为洛川塬区 8 个土地利用方式下土壤干燥化特征。0—4 m 仅 13 和 28 a 果园分别出现轻度和

中度干燥化现象,SDI 分别为 94%和 62%;而其他样地无干燥化现象。4 m 以下,28 a 果园 SDI 为 49%,属严重干燥化;24 和 30 a 果园 SDI 分别 96%和

84%，均属轻度干燥化；其他样地均未见干燥化现象。对整个剖面而言，24 和 30 a 果园 SDI 分别为 99% 和 93%，属轻度干燥化，2 个样地分别在 5.4 和 3.8 m 处

形成干层，干层总厚度均为 4.4 m；28 a 果园 SDI 为 56%，属中度干燥化，在 2.8 m 处形成干层，干层总厚度为 7.2 m；其他样地无干燥化现象发生。

表 3 不同土地利用方式下土壤干燥化特征

土地利用方式	0—4 m		4—10 m		0—10 m		
	SDI/%	干燥化强度	SDI/%	干燥化强度	SDI/%	干燥化强度	干层厚度/m
农地	136	无	192	无	169	无	—
荒草地	140	无	204	无	179	无	—
8 a 苹果园	114	无	194	无	163	无	—
13 a 苹果园	94	轻度	144	无	124	无	—
15 a 苹果园	117	无	159	无	142	无	—
24 a 苹果园	107	无	96	轻度	99	轻度	4.4
28 a 苹果园	67	中度	49	严重	56	中度	7.2
30 a 苹果园	107	无	84	轻度	93	轻度	4.4

3 讨论

土壤水分是植被生长的直接水分来源，其含量变化通常取决于水分蓄积和水分消耗 2 个方面，其在土壤中的垂直分布受气候条件（如降雨强度、蒸发作用、光照、温度等）、植被状况（如生长年龄、根系分布状况、覆被类型等）、地形因素（如海拔、坡度、坡向等）及土壤类型（如土壤质地、导水率、孔隙大小等）等多种因素的综合影响^[24-25]。本研究中各样地具有相似甚至是相同的气候、地形和土壤等条件，因此，导致土壤水分差异的主要是植被状况。

农地、荒草地和 8 a 果园深层土壤水分状况基本一致，土壤水分条件良好，维持在田间持水量 98% 以上水平，这与向伟^[26]和樊军等^[27]在长武塬区的研究结果类似。13 和 15 a 果园土壤水分出现轻度亏缺，而 24、28 和 30 a 果园亏缺严重（ 590.6 ± 97.2 mm）。由于渭北旱塬苹果园具有高入渗性、低产流率、蒸腾作用强烈的特点^[14,20]，土壤水库调节降水的能力随土层剖面水分含量的降低逐渐减弱，干燥化发生几率随之增大，极易形成利用型干层^[28-29]。长武塬农地和 9 a 果园深层土壤未见干燥化现象，但 19 a 果园极度干燥化并出现了永久性干层^[30]；本研究中农地、荒草地和 8~15 a 果园均未出现干燥化，而 ≥ 24 a 果园出现不同程度土壤干燥化现象。可见，土壤水分亏缺量的差异与植被生长状况关系密切^[31]。为进一步解释二者关系，图 2 给出了果龄与 0—10 m 剖面土壤含水率（SM）和亏缺量（WD）的相关关系，可以看出，果龄与土壤水分亏缺量有非常显著的相关性，决定性系数 $R^2=0.81$ 。可见，高龄果树对深层土壤水分的利用程度较强，Zhang 等^[32]基于氘的水分来源划分表明 17 a 果树的苹果中 $40\% \pm 30\%$ 的水分来自 4—9 m

土层土壤水，认为植物根系可以利用移动性差的“老水”，与本研究的结果相呼应。因此，由农地向经济林的转变对黄土高原土壤干燥化的发生和发展影响甚大，为保障区域水资源的可持续利用，需要确定果树的最佳种植年限，以达到实现经济—生态—环境的可持续发展的目的。

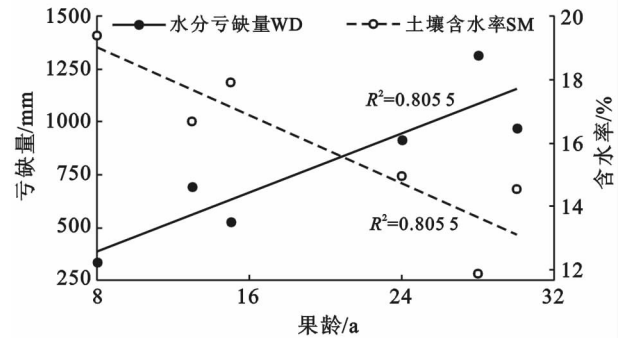


图 2 洛川塬区土壤含水率和水分亏缺量随果龄增长的变化趋势

土地利用变化除了影响土壤水分，还会进一步影响整个水循环过程，特别是会加强大气—土壤—植物之间的水分小循环，降低了降雨下渗转化为地下水的比例^[33-34]，从而减少地下水补给量。洛川塬区地下水大多埋藏于 45—100 m^[35]，降雨垂直入渗补给成为该区水分补给的主要形式。通常情况下，土壤水分下渗主要有两种机制：① 吸力作用下渗。只发生在水分含量低于田间持水量且上湿下干的均质土壤中，但干燥层剖面常存在负的水势梯度差，且吸力下渗移动的距离有限，通过该作用下渗而来的水，其给水度为零，对地下水补给无意义；② 重力作用下渗。出现在土壤含水量低于田间持水量的水分分布剖面情况下，重力下渗的移动距离长，需满足 2 个条件才能补给地下水，即降雨垂直入渗量超过土壤水分亏缺量、降雨垂

直入渗深度达到植物根系作用层深度以下^[14,20,28]。本研究8个样地中荒草地、农地、8 a 果园土壤水分与田间持水量持平,13 和 15 a 果园亏缺量与当地年降雨量相当,均满足重力水下渗条件,而 24,28 和 30 a 果园土壤水分亏缺量严重,难以依靠重力作用下渗,需补给 $1\ 116.0 \pm 198.3$ mm 的降水才能达到“重力水发生湿度”。属半湿润气候区的洛川塬年降雨量 622.0 mm,是典型的雨养农业区,由于气候类型决定降雨总量,所以不同气候区降雨入渗数量和深度也有所差异,通常表现为干旱气候区(0.2—0.7 m) < 半干旱气候区(0.6—1.4 m) < 半湿润气候区(1—2 m) < 湿润气候区(>2 m)^[36]。由此可知,研究区降水通常只能入渗到干湿交替层的下界,而遇到水分亏缺严重的干层,垂直入渗补给路径会直接被阻断,随着该过程的进一步持续,土壤干层分布范围和干化程度变大,而后对地下水的补给产生更严重影响。因此,在现有的降雨和补给条件下,难以满足深层土壤水分的补给。在此背景下,如何维持区域水资源合理利用、生态环境恢复和经济可持续发展之间的平衡,尚需进一步探讨。

4 结论

洛川塬区8个样地0—10 m 平均土壤水分含量表现为荒草地 > 农地 \approx 8 a 果园 > 13 a 果园 \approx 15 a 果园 > 24 a 果园 \approx 30 a 果园 > 28 a 果园。以农地为参照,随着果龄增大,果园土壤水分与农地的差异逐渐显著,并且在4 m 以下形成稳定差异。随着土层深度的增加,各样地4—10 m 土壤水分减少量都明显高于0—4 m 减少量,尤其是 ≥ 24 a 果园4—10 m 土壤水分减少量占达 31%~47%。

农地和荒草地转化为不同年限果园后出现不同程度水分亏缺,水分亏缺量介于 341~1 314 mm,其中 24,28 和 30 a 果园分别出现轻度、中度和轻度干燥化,3 个样地分别形成干层总厚度为 4.4,7.2 和 4.4 m 的土壤干层。

洛川塬农地大面积向果园转变加剧了对深层土壤水分的利用程度,使该区土壤水分常处于负平衡状态,极易形成土壤干层,进而削弱了重力水下渗能力,影响“三水”循环过程。因此在综合考虑土地利用变化的水文效应前提下,调整该区植被种植方式,确定合适果树种植年限显得尤为重要。

[参 考 文 献]

[1] 邵明安,贾小旭,王云强,等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望[J]. 地球科学进展,2016,31(1):14-22.

[2] Yasuda H, Berndtsson R, Hinokidani O, et al. The impact of plant water uptake and recharge on groundwater level at a site in the Loess Plateau of China[J]. *Hydrology Research*, 2013,44(1):106-116.

[3] 李志,刘文兆,杨勤科,等. 黄土高原沟壑区小流域土地利用变化及其生态效应分析[J]. *应用生态学报*,2007,18(6):1299-1304.

[4] 韩承鼎. 甘肃省白银市水土保持可持续发展探讨[J]. *亚热带水土保持*,2011,23(1):39-41.

[5] 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.

[6] 程立平,刘文兆,李志,等. 长武黄土塬区土地利用变化对潜水补给的影响[J]. *水科学进展*,2016,27(5):670-678.

[7] 汤青,徐勇,刘毅. 黄土高原地区土地利用动态变化的空间差异分析[J]. *干旱区资源与环境*,2010,24(8):15-21.

[8] 张瑞,曹华,王云强,等. 黄土丘陵沟壑区小流域土壤水分空间变异性及其影响因素[J]. *水土保持研究*,2012,19(5):52-58.

[9] 邹俊亮,邵明安,龚时慧. 不同植被和土壤类型下土壤水分剖面的分异[J]. *水土保持研究*,2011,18(6):12-17.

[10] 王艳萍,王力,韩雪,等. 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[J]. *生态学报*,2015,35(22):7571-7579.

[11] 张建军,李慧敏,徐佳佳. 黄土高原水土保持林对土壤水分的影响[J]. *生态学报*,2011,31(23):7056-7066.

[12] Wang Shuai, Fu Bojie, Gao Guangyao, et al. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a revegetation catchment area of the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2013,101(3):122-128.

[13] 李巍,郝明德,王学春. 黄土高原沟壑区不同种植系统土壤水分消耗和恢复[J]. *农业工程学报*,2010,26(3):99-105.

[14] 黄明斌,杨新民,李玉山. 黄土区渭北旱塬苹果基地对区域水循环的影响[J]. *地理学报*,2001,56(1):7-13.

[15] 李世荣,张卫强,贺康宁. 黄土半干旱区不同密度刺槐林地的土壤水分动态[J]. *中国水土保持科学*,2003,1(2):28-32.

[16] 阎太白,王德潜. 洛川塬黄土潜水的补给机制及黄土含水特征[J]. *地质论评*,1983,29(5):418-427.

[17] 王锐,刘文兆,李志. 黄土塬区 10 m 深剖面土壤物理性质研究[J]. *土壤学报*,2008,45(3):550-554.

[18] 曹裕,李军,张社红,等. 黄土高原苹果园深层土壤干燥化特征[J]. *农业工程学报*,2012,28(15):72-79.

[19] 杨文治,田均良. 黄土高原土壤干燥化问题探源[J]. *土壤学报*,2004,41(1):1-6.

[20] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究

- [J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 427-432.
- [21] 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.
- [22] 阎太白, 王潜德. 洛川塬黄土潜水的补给机制及黄土含水特征[J]. 地质评论, 1983, 29(5): 418-427.
- [23] 程立平, 刘文兆. 黄土塬区土壤水分分布特征及其对不同土地利用方式的响应[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 203-207.
- [24] 王延平, 韩明玉, 张林森, 等. 洛川苹果园土壤水分变化特征[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 731-738.
- [25] 李志, 刘文兆, 王秋贤. 黄土塬区不同地形部位和土地利用方式对土壤物理性质的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1303-1308.
- [26] 向伟, 林雪青, 张志强, 等. 黄土塬区土地利用变化对深剖面土壤水分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4): 12-17.
- [27] 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[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 61-64.
- [28] 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): 3-13.
- [29] 孙长忠, 黄宝龙. 黄土高原“林分自创性”有效水分供给体系的研究[J]. 生态学报, 1999, 19(5): 614-621.
- [30] 王石言. 黄土塬区苹果园土壤水文特征及蒸散规律[D]. 陕西 杨凌: 教育部水土保持与生态环境研究中心, 2016.
- [31] Wang Yunqiang, Shao Mingan, Liu Zhipeng, et al. Characteristics of dried soil layers under apple orchards of different ages and their applications in soil water managements on the Loess Plateau of China[J]. Pedosphere, 2015, 25(4): 546-554.
- [32] Zhang Zhiqiang, Evaristo Javime, Li Zhi, et al. Tritium analysis shows apple trees may be transpiring water several decades old[J]. Hydrol Process, 2017, 31(5): 1196-1201.
- [33] 黄明斌, 康绍忠, 李玉山. 黄土高原沟壑区小流域水分环境演变研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(4): 411-414.
- [34] 刘贤赵, 黄明斌. 渭北旱塬苹果园土壤水分环境效应[J]. 果树学报, 2002, 19(2): 75-78.
- [35] 阎太白. 洛川黄土地区区域地下水资源及计算方法探讨[J]. 水文地质工程地质, 1981, 13(5): 43-46.
- [36] 方德彪, 邓振镛, 仇化民, 等. 甘肃东部旱作区土壤水分补给量的研究[J]. 干旱地区农业研究, 1996, 14(3): 5-9.

(上接第 105 页)

- [12] 刘高峰. 有机营养对烤烟生理代谢与品质影响的研究[D]. 福建 福州: 福建农林大学, 2006.
- [13] 井大炜. 不同栽培措施对欧美 I-107 杨的增长效应及作用机理研究[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2013.
- [14] Wang Xiaoping, Zabowski D. Nutrient composition of Douglas-fir rhizosphere and bulk soil solutions [J]. Plant Soil, 1998, 200(1): 13-20.
- [15] 罗永清, 赵学勇, 王涛, 等. 植物根系分解及其对生物和非生物因素的响应机理研究进展[J]. 草业学报, 2017, 26(2): 197-207.
- [16] 井大炜, 邢尚军, 刘方春, 等. 保水剂施用方式对侧柏根际微生态环境的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 146-154.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 井大炜, 王明友, 马海林, 等. 畦灌与保水剂配施对杨树根际土壤微环境特征及生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 62-70.
- [19] 徐宪斌. 蚯蚓粪配施化肥对玉米根际土壤生物学特征的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 78-82.
- [20] 井大炜, 邢尚军, 刘方春, 等. 保水剂—尿素凝胶对侧柏裸根苗细根生长和氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1046-1052.
- [21] 李雅, 刘梅, 曾全超, 等. 基于文献计量的土壤有机碳与土壤微生物多样性研究前沿态势分析[J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 745-756.
- [22] 程万莉, 刘星, 高怡安, 等. 有机肥替代部分化肥对马铃薯根际土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(6): 1459-1465.