

黄土丘陵区梯田果园土壤水分特征

肖列¹, 薛萇^{1,2}, 刘国彬^{1,2*}

(1 西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 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)

摘要: 在干旱半干旱地区, 土壤水分是影响作物生长和植被恢复的重要生态因子。采用土钻法对黄土丘陵区纸坊沟流域坡耕地、梯田和梯田果园 2003~2010 年雨季前后的土壤水分状况进行了连续测定, 旨在明确梯田种植果树后对土壤水分的长期动态效应, 为黄土丘陵区梯田果园的可持续发展提供指导意义。结果表明, 坡改梯措施可明显减小 0—300 cm 土层土壤储水量增量的年际变异, 提高土壤含水量, 减小土壤储水亏缺度, 增大降雨对 100—300 cm 土层土壤储水亏缺补偿度; 梯田果园化后 0—300 cm 土层土壤储水量增量的年际变异呈现较大幅度的波动, 200 cm 以下土壤含水量明显减小, 土壤储水亏缺度增大, 土壤储水亏缺补偿度由 20% 降为 -10%。由此可见, 梯田的蓄水保水量不足以供给果树的蒸腾耗水量, 梯田果园化后将导致土壤水分的持续减少, 可能导致土壤干层的形成。

关键词: 黄土丘陵区; 梯田果园; 土壤水分亏缺; 补偿与恢复

中图分类号: S606+.1; S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2013)04-0964-08

Soil water condition of terraced orchards in loess hilly and gully regions

XIAO Lie¹, XUE Sha^{1,2}, LIU Guo-bin^{1,2*}

(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau/Institute of Soil and Water Conservation,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese

Academy of Science and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Soil water is an important factor for affecting plant growth and development in the arid and semi-arid areas. In order to study inter-annual dynamics and the compensation characteristics of soil water deficit of terraced orchards, the present study investigated the soil water contents of slope croplands, terraced croplands and terraced orchards in later April and in later October from 2003 to 2010 in the loess hilly and gully regions. The results show that the terraced croplands can significantly decrease the inter-annual variation of soil water storages in the 0-300 cm soil layer, improve the soil water content, and decrease the water storage deficit. The soil water storages in the 0-300 cm soil layer of the terraced orchards are significantly fluctuated inter-annually, the soil water contents are decreased remarkably below 200 cm and the water deficit is raised, and the compensation of the water deficit is dropped from 20% to -10%. In conclusion, the water storage in the terraces can not offer enough water to balance the water consumption of plants for evaporation, and the terraced orchards can result in a reduction of soil water and finally lead to a soil dry layer.

Key words: loess hilly region; terraced orchard; soil water deficit; compensation and rehabilitation

黄土丘陵区地处内陆腹地, 光热资源丰富, 昼夜温差大, 雨热同季, 适宜果树栽培, 目前该区域普遍

建立了不同类型的山地果园, 这对促进区域经济发展、加快群众脱贫致富起到了巨大作用^[1-2]。然而

收稿日期: 2012-11-25 接受日期: 2013-04-02

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05060300); 西北农林科技大学基本科研业务费专项(ZD2013021); 陕西省科学技术研究发展计划项目(2011KJXX63)。

作者简介: 肖列(1987—), 男, 河北保定人, 博士研究生, 主要从事水土保持方面的研究工作。E-mail: xiaosha525@163.com

* 通信作者 E-mail: gbliu@ms.iswc.ac.cn

该区属于干旱半干旱地区,降水稀少、蒸发强烈、地下水埋藏很深,致使土壤水分经常处于亏缺状态^[3],因此,土壤水分成为影响该区果树生长发育的主要生态因子之一^[4-6]。

水土保持措施是黄土高原地区改造下垫面性质,改善土壤水分状况的主要人为活动因素之一。坡改梯是黄土丘陵区一项主要的水土保持坡面工程措施,其通过改变地形而缩短径流线、提高入渗和减小径流量等加强降水就地拦蓄和入渗,使土壤含水量显著提高^[7],具有明显的蓄水保水作用^[8],可显著改善土壤水分状况。目前,大量研究表明黄土丘陵区坡耕地修建梯田后显著改善了耕地的土壤水分状况^[9-14],增加了粮食产量,但农作物的经济效益仅为 3000 Yuan/hm²,而果园的经济效益为 15000 Yuan/hm²^[15],受经济利益驱动大量的梯田地转变为果园地。例如,安塞县果园地面积从 1999 年到 2005 年增长了 5565 hm²,园地增加的土地主要是由耕地转化而来^[16]。然而苹果树比农作物具有相对较长的生育期和较高的蒸腾耗水量,梯田的蓄水保水量能否满足苹果树的蒸腾耗水量,维持梯田果园的可持续发展是一个值得关注的问题。已有研究表明,苹果园经隔坡梯田整地措施后 0—400 cm 土层的土壤水分状况得到显著改善^[17],但是土壤水分的动态受降水、植被、地形、土壤和土地利用等多种因素的影响,降水的年际变化会显著影响梯田果园的土壤水分动态,因此对于梯田果园土壤水分的长期动态监测有助于更加深入准确地了解梯田果园土壤水分的亏缺与补给。本试验以安塞县纸坊沟流域的梯田果园为研究对象,对比分析了坡耕地、梯田和梯田果园地土壤储水量的年际动态变化以及土壤水分的亏缺与补给,探讨梯田果园化对土壤水分的长期效应,以期为黄土丘陵区梯田果园的发展提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

纸坊沟流域(36°51'30"N,109°19'30"E)位于陕西省安塞县,是延河支流杏子河下游的一级支流,属典型黄土丘陵沟壑区,包括纸坊沟、寺岷岷、瓦树塌 3 个自然村,流域面积 8.27 km²。研究区年均降水量 505.3 mm,降水年内分布不均,降雨主要集中在 7 月至 9 月,且多以暴雨形式出现,年际变化也很大,年均

蒸发量为 1463 mm。该区属暖温带半干旱气候,年日照时数为 2415 h,年辐射量为 493 kJ/cm²,多年平均气温 8.8℃,全年平均最低气温出现在一月,为 -6.9℃,平均最高气温出现在 7 月,为 22.6℃,≥0℃的积温 3733.5℃,土壤类型为黄绵土。

1.2 试验方法

试验选取坡度坡向和坡位基本一致的坡耕地,梯田和梯田果园各 3 块为研究对象(样地基本情况见表 1),采用土钻法定期采样测定土壤水分状况。因该区 4 月份到 10 月份的降水量可占到全年降水量的 90% 以上,所以我们定义 4 月份到 10 月份为雨季,11 月份到次年 3 月份为干季。从 2003 年至 2010 年,每年在雨季前后(3 月底 4 月初和 10 月底 11 月初)分层测定土壤水分,土壤含水量用烘干法(105℃)测定,其中坡耕地和梯田采样深度为 0—300 cm,梯田果园采样深度为 0—500 cm,0—100 cm 内每 10 cm 取一个样,100 cm 以下每 20 cm 取一个样,每个样地 3 次重复,每层土壤含水量取算术平均值。坡耕地和梯田采取随机取样的方法,梯田果园地在距离果树根系 120~150 cm 处取样。土壤容重采用环刀法测定,分层测定 0—100 cm 的土壤容重,每 10 cm 一层,每层 3 次重复,取平均值。降水量采用安塞野外观测站的气象监测数据,2003~2010 年试验区月降水量见表 2。

土壤储水量计算公式为^[18]:

$$W_i = M_i \times D_i \times h \times 10/100$$

式中: W_i —土壤储水量(mm); M_i —土壤含水量(重量百分比,%); D_i —土壤容重(g/cm^3); h —土层深度(cm); i —土层序列。

雨季末土壤储水增量为: $\Delta W = W_{cm} - W_{cc}$

式中: W_{cm} —雨季末土壤实际储水量(mm); W_{cc} —雨季初土壤实际储水量(mm)。

采用土壤储水亏缺度和土壤储水亏缺补偿度两个指标^[19]来分析降水对土壤储水亏缺的补偿和恢复情况。

土壤储水亏缺度:

$$DSW(\%) = Da/Fc \times 100$$

式中: Da —土壤储水亏缺量(mm); $Da = Fc - Wc$; Fc —土壤田间持水量,以黄绵土的田间持水量为 20% 来计算^[3](mm); Wc —土壤实际储水量(mm)。

表 1 样地基本状况

Table 1 General conditions of sampling plots

土地利用方式 Land use	海拔 Altitude (m)	坡度 Slope (°)	坡向 Slope aspect	土壤类型 Soil type	植被类型 Vegetation type	备注 Comment
坡耕地 Slope cropland	1287	22	w 40°s	黄绵土 Loess soil	糜子 <i>Panicum miliaceum</i>	密度 30 cm × 10 cm ,产量 1125 kg/hm ² Density of 30 cm × 10 cm ,yield 1125 kg/hm ²
水平梯田 Terrace	1310	0	—	黄绵土 Loess soil	谷子 <i>Setaria italica</i>	密度 30 cm × 10 cm ,产量 1875 kg/hm ² Density of 30 cm × 10 cm ,yield 1875 kg/hm ²
梯田果园 Terraced orchard	1220	0	—	黄绵土 Loess soil	苹果树 <i>Malus pumila mill</i>	密度 400 cm × 500 cm ,产量 22500 kg/hm ² . Density of 400 cm × 500 cm , yield 22500 kg/hm ²

表 2 纸坊沟流域月降水量(mm)

Table 2 Monthly precipitation in the Zhifanggou watershed

年份 Year	月份 Month												年降水 Precipitation
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2003	5.2	2.0	20.9	25.5	62.2	43.3	60.8	118.8	79.4	42.5	24.3	0.0	484.9
2004	0.0	0.0	0.0	10.5	20.8	65.9	133.1	164.9	41.3	3.5	2.8	3.5	446.3
2005	0.9	1.8	2.8	7.6	77.8	31.5	180.5	69.9	91.7	12.7	0.0	1.1	478.3
2006	13.7	4.3	0.0	6.3	77.7	51.2	119.4	66.0	63.2	10.2	15.8	1.8	429.6
2007	0.0	17.1	36.6	3.0	38.7	80.7	88.4	73.5	136.5	85.9	0.0	5.5	565.9
2008	30.5	5.2	15.6	18.3	5.6	72.8	51.8	65.6	111.3	11.2	0.0	0.0	387.9
2009	0.0	3.1	13.9	29.2	55.5	27.9	86.3	114.8	60.9	4.7	29.8	0.0	426.1
2010	0.0	11.9	3.9	53.7	33.8	31.9	52.7	178.4	45.0	12.3	0.0	0.0	423.6

土壤储水亏缺补偿度:

$$CSW(\%) = \Delta W/Dac \times 100$$

式中, Dac —雨季初土壤储水亏缺量(mm), $Dac = Fc - Wcc$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤储水量的年际动态

2003~2010年水平梯田雨季后0—300 cm 土层土壤储水量均明显大于坡耕地,而梯田果园0—300 cm 土层土壤储水量除2007年之外都明显小于水平梯田,与坡耕地的土壤储水量基本相同(图1)。3种土地利用方式下,2003~2010年雨季后0—300 cm 土层土壤储水量增量的年际变化与同期降

水量的变化趋势基本一致,尤其是2006~2010年(图2)。坡耕地和梯田的土壤储水量年际变化始终为盈余或者微量的亏缺,但梯田土壤储水量增量的年际变化明显小于坡耕地。梯田果园储水量的年际增量在2005年表现为较大的亏缺,亏缺量达201.26 mm,在2007年表现为较大幅度的盈余,盈余量为244.20 mm。梯田果园土壤储水量增量的年际变异明显大于梯田。

2.2 土壤剖面水分垂直分布

受降雨补给和蒸散作用的影响,3种土地利用方式下土壤含水量随土层深度的变化差异明显(图3)。降雨对坡耕地和梯田0—300 cm 土层均有明显的补给作用,且无论雨季后,梯田的土壤含水量都

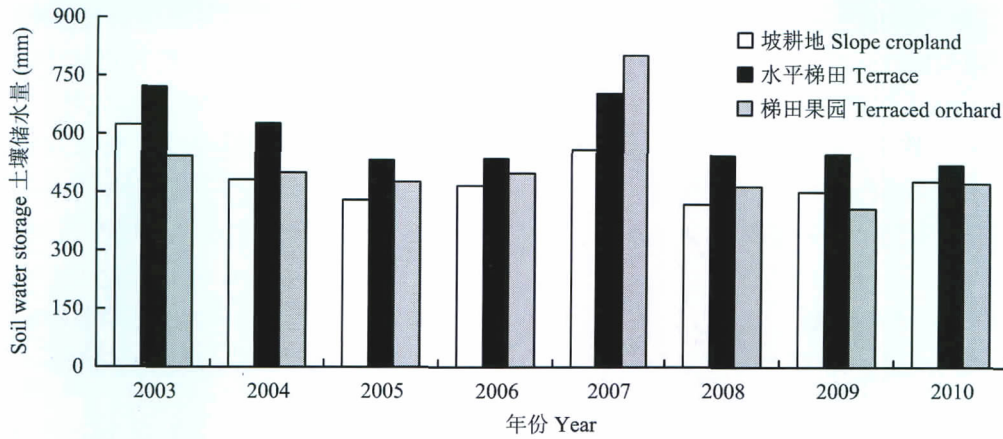


图1 不同土地利用方式下雨季后0—300 cm 土壤储水量年际动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of soil water storage in 0-300 cm layer after the rainy season under different land use types

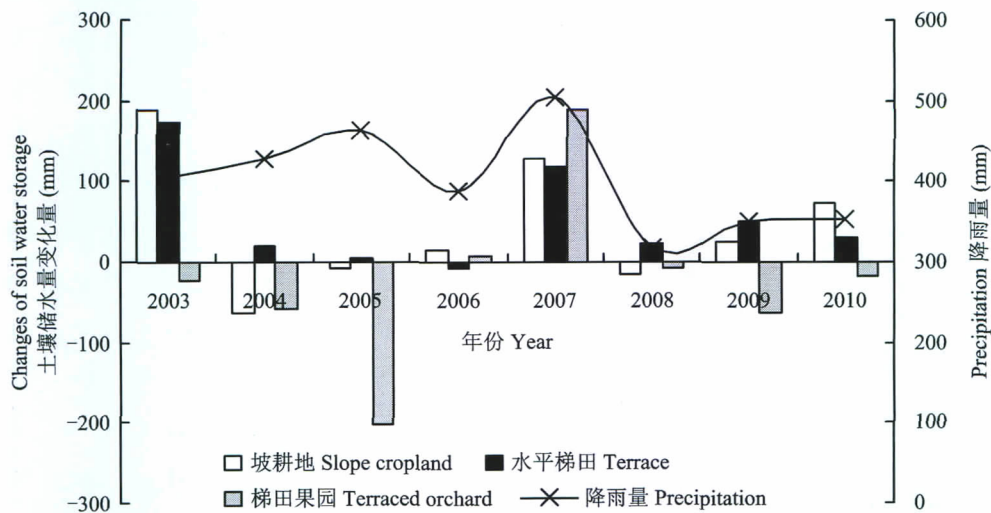


图2 不同土地利用方式下0—300 cm 土壤储水量增量与同期降水量动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of 0-300 cm soil water storage under different land use types

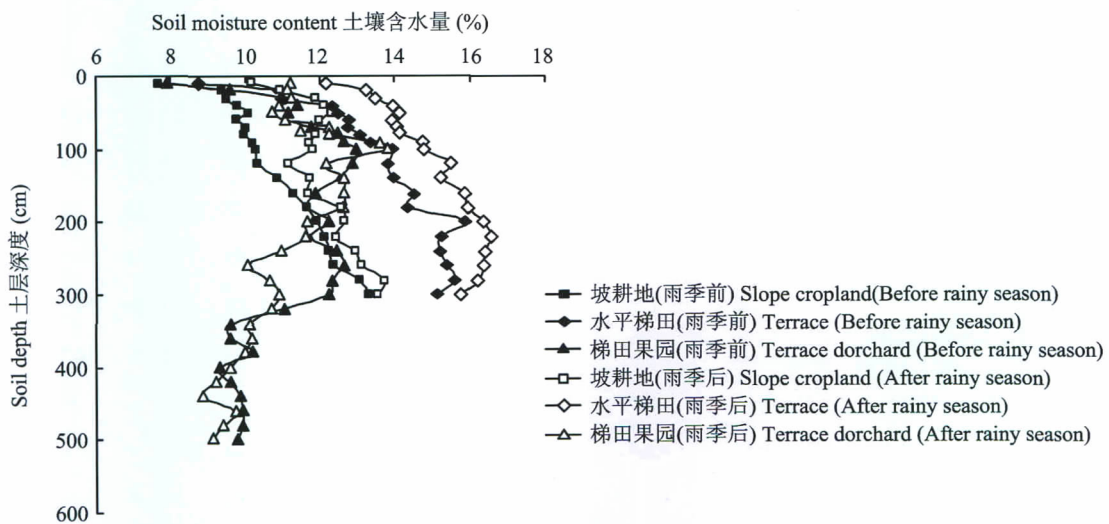


图3 不同土地利用方式土壤水分垂直剖面

Fig. 3 Soil water contents in profiles under different land use types

大于坡耕地,这种差异随土层深度的增加呈增大趋势。降雨对梯田果园 0—30 cm 土层补给作用明显,而 220—320 cm 土层土壤含水量反而减小,其余层次降雨的补给作用微弱。降雨前后,梯田果园整个剖面的土壤含水量都明显小于梯田,尤其是 200 cm 以下,土壤含水量随土层深度的增加呈逐渐减小趋势。

2.3 土壤水分的亏缺与恢复

2.3.1 3 种土地利用方式土壤水分亏缺度 3 种土

地利用方式雨季前后各土层土壤储水均处于亏缺状态(表 3)。降雨虽有一定的补偿作用,但仍未改变土壤储水亏缺状况。雨季前后,坡耕地和梯田的土壤储水亏缺度均随土层深度增加而减小,且梯田的土壤储水亏缺度明显小于坡耕地,尤其是雨季后,梯田 0—300 cm 土壤储水亏缺状况都得到明显改善。而梯田果园的土壤储水亏缺度在雨季前后都明显大于梯田,尤其是雨季后,梯田果园的土壤储水亏缺状况并未得到改善,甚至呈现增大趋势。

表 3 不同土地利用方式土壤储水亏缺度(%)

Table 3 Deficit of soil water storage under different land types

土地利用方式 Land use	时间 Time	土层深度(cm) Soil depth	年份 Years							
			2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
坡耕地 Slope cropland	雨季前 Before rainy season	0—30	59.22	49.43	54.37	55.51	54.28	58.70	56.45	57.78
		30—100	57.20	44.52	48.55	52.92	48.05	54.73	55.59	55.97
		100—200	56.95	43.60	46.91	52.87	46.46	52.96	55.01	53.98
		200—300	55.95	42.85	47.02	54.29	45.20	52.77	53.93	53.32
	雨季后 After rainy season	0—30	45.06	49.13	58.70	50.89	35.32	41.54	43.24	37.10
		30—100	25.18	43.47	52.89	43.70	25.93	52.47	49.34	28.83
		100—200	19.54	41.44	46.56	43.42	25.80	50.93	46.13	46.20
		200—300	15.22	33.05	37.53	35.45	33.46	41.01	35.70	41.68
水平梯田 Terrace	雨季前 Before rainy season	0—30	45.93	36.52	43.62	42.05	44.42	58.36	59.60	61.48
		30—100	37.60	30.70	42.79	30.48	36.03	51.82	57.06	57.96
		100—200	34.73	29.56	41.51	31.45	31.23	47.73	53.35	52.60
		200—300	29.80	25.24	39.91	32.69	26.70	44.06	50.53	49.14
	雨季后 After rainy season	0—30	20.86	37.49	45.61	44.30	24.11	40.14	32.17	37.09
		30—100	3.61	27.64	35.16	38.13	11.78	37.08	35.17	40.85
		100—200	3.29	14.89	30.30	27.33	0.31	28.67	28.40	33.59
		200—300	8.89	11.49	24.18	24.29	11.09	21.25	23.55	23.33
梯田果园 Terraced orchard	雨季前 Before rainy season	0—30	32.50	35.63	39.93	44.11	43.00	73.69	75.31	72.60
		30—100	30.14	13.72	31.13	51.16	27.38	49.24	52.92	55.82
		100—200	48.77	32.42	22.67	39.16	34.92	44.79	45.02	43.84
		200—300	29.07	58.58	15.83	45.86	44.48	39.56	37.36	33.23
	雨季后 After rainy season	300—500	57.21	60.08	30.41	57.98	50.64	52.76	47.76	48.59
		0—30	23.59	37.85	73.69	51.53	14.34	47.59	56.90	46.13
		30—100	16.92	37.73	48.87	51.58	-9.44	58.41	53.06	48.25
		100—200	40.74	45.69	44.79	41.79	0.93	36.20	45.90	46.68
200—300	55.65	47.57	39.56	38.57	30.33	50.65	61.15	43.84		
300—500	60.06	58.05	49.62	47.45	28.84	60.98	57.68	50.59		

2.3.2 3 种土地利用方式土壤储水亏缺的补偿与恢复 土地利用方式对土壤储水亏缺的补偿与恢复作用差异明显(图 4、图 5) ,坡耕地和梯田土壤储水增量在 0—300 cm 土层均为正值 ,梯田果园的土壤储水增量在 200—300 cm 和 400—500 cm 土层为负值 ,其余层次接近于 0。

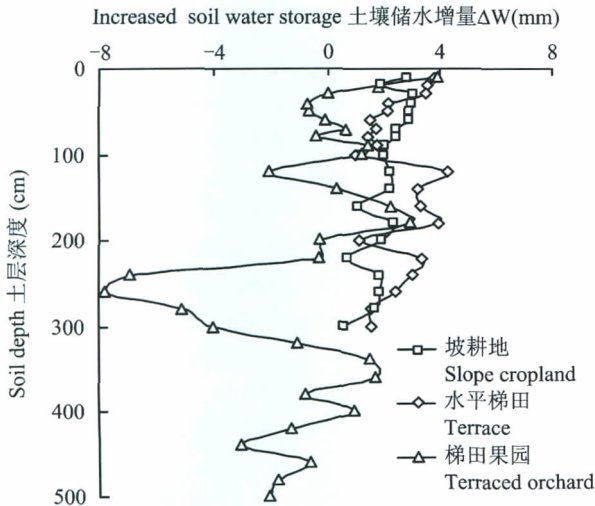


图 4 土壤储水增量随土层深度的变化
Fig. 4 Relationship between the increased soil water storage and soil depth

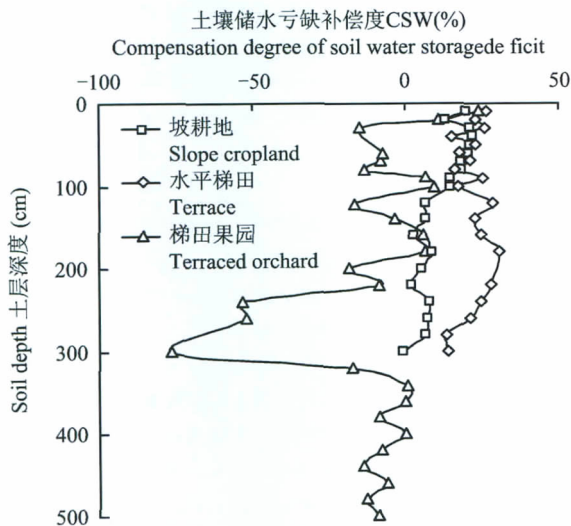


图 5 土壤储水亏缺补偿度随土层深度的变化
Fig. 5 Relationship between the compensation degree of soil water storage deficit and soil depth

坡耕地和梯田 0—100 cm 土层的土壤储水亏缺补偿度为 20% 左右 ,100 cm 以下 ,坡耕地的土壤储水亏缺补偿度迅速减少 ,接近于 0 ,至 300 cm 减少至 -0.8% ,而梯田的土壤储水亏缺补偿度缓慢增加

到 30% 然后又减少至 10% 左右。梯田果园的土壤储水补偿度随土层呈波动性变化 ,基本维持在 -10% 左右 ,在 200—300 cm 土层土壤储水补偿度降低至 -76.6% 。

3 讨论

3.1 土壤储水量的年际动态

黄土高原地区土层深厚 ,降水是土壤水分的唯一来源^[20] ,因此 ,年内降水量的多少会显著影响土壤储水量的变化 ,尤其是表层土壤。坡耕地和梯田的土壤储水量增量始终表现为盈余或者微量亏缺 ,这主要是由于农作物具有较小的生物量和较短的生育期 ,蒸腾耗水量一般小于乔灌木^[21]。以往研究表明 ,坡改梯可以显著改善土壤水分状况^[13] ,尤其是降水量较少的年份 ,梯田可以增强降水的入渗 ,使土壤储水量维持在一个恒定的范围 ,因此梯田地的土壤储水量增量的年际变化小于坡耕地。而梯田地果园化后 ,由于果树比农作物具有更大的生物量和较长的生育期 ,因此具有较高的蒸腾耗水量^[21] ,导致土壤水分的大量消耗 ,尤其是在降水量较少的年份(2008~2010 年) ,降水的补给量不足以供给果树的蒸腾耗水量 ,因此年际土壤储水量表现为亏缺。在降水量较大的年份(2003、2005 和 2007 年) ,果树的土壤储水量增量差异明显。2003 年和 2005 年最大降水量分别出现在 8 月(118.8 mm)和 7 月(180.5 mm) ,其余月份降水量较少 ,而苹果树在 6~9 月的需水量很大 ,9 月份较小的降水量不足以供给果树的蒸腾耗水量 ,因此果树大量消耗土壤中贮存的水分 ,导致土壤储水量的亏缺。2007 年最大降水量出现在 9 月(136.5 mm) ,且 6~8 月的降水量都在 73 mm 以上 ,降水足以供给果树的需水量 ,并且对土壤水分状况有一定的补给作用 ,导致土壤储水量的明显增大。这说明降水量的年际变异大和降水年内分配不均导致梯田果园土壤储水量增量的年际变化呈现较大的波动 ,但总体来说 ,研究期内梯田果园的土壤储水量呈现动态平衡。

3.2 土壤剖面水分垂直分布

土壤剖面水分的垂直分布可以反映不同植被类型土壤水分的利用特征。王志强^[22] 等认为黄土地区降水对农田土壤水分补给最大深度为 300 cm ,这与本试验结果相一致 ,坡耕地和梯田在雨季土壤水分与雨季前相比都表现为明显增大 ,且梯田在 0—300 cm 剖面土壤水分都明显大于坡耕地 ,说明坡改梯措施对改善 0—300 cm 土层土壤水分效果

明显。

果树具有较大的蒸腾耗水量^[21],因此梯田果园化后,整个土壤剖面的土壤含水量都明显小于梯田。武阿峰^[23]等对长武塬区果园地深剖面土壤水分分布特征的研究得出果园地土壤水分低湿层出现在 200—300 cm,在本研究中,梯田果园 220—320 cm 土层土壤含水量在雨季后减小。土壤水分的垂直分布特征与不同植被根系分布特征相一致^[24]。与果树相比,糜子和谷子根系分布较浅,根系主要吸收表层土壤水分,因此下层土壤水分逐渐增大,而果树的根系活跃层分布在 250—500 cm 之间,导致 200 cm 以下土壤水分的强烈消耗,以及降水无法补给^[25],使土壤含水量显著降低。

3.3 土壤水分的亏缺与恢复

在黄土高原地区,虽然降水对于土壤水分亏缺具有一定的改善作用,但是土壤水分始终表现为亏缺,这是黄土高原普遍存在的现象^[14]。同时,土壤水分循环是较为单纯的降水下行入渗和土壤水分上行蒸发过程^[3],因此上层的土壤水分亏缺度较大,且随土层深度的增加土壤储水亏缺度逐渐减小。梯田可以显著减少地表径流,增加降雨入渗^[13],导致土壤水分含量的增加,尤其是 100—300 cm 土层,因此在雨季后梯田地土壤储水亏缺状况得到明显改善,但梯田果园化后,雨季后降水不仅没有改善其土壤储水亏缺状况,反而呈现增大趋势,说明梯田的蓄水保水量并不足以供给果树的蒸腾耗水量。在 0—300 cm 土层,梯田地的土壤储水亏缺补偿度可达到 20% 左右,而梯田果园化后,土壤储水亏缺补偿度降为 -10%,说明梯田地种植果树后,土壤含水量呈逐渐减少的趋势,梯田果园的长期生长将导致土壤水库的减少,形成土壤干层。

4 结论

1) 坡改梯后 0—300 cm 土层的土壤储水量增量年际变异明显减小,但梯田果园化后,土壤储水量的增量受降水量和降水年内分配的影响显著,波动幅度较大。

2) 坡改梯措施可明显改善 0—300 cm 土层土壤的含水量,而梯田果园化导致剖面土壤含水量的降低,尤其是 200 cm 以下土层土壤含水量随土层深度增加而明显减小。

3) 坡改梯措施可明显减小 0—300 cm 土层土壤的储水亏缺度,增大 100—300 cm 土层土壤储水亏缺补偿度,土壤储水亏缺补偿度维持在 20% 左

右,而梯田果园化后土壤储水亏缺度在雨季后有增大趋势,土壤储水亏缺补偿度减小到 -10%。

4) 梯田果园化后,梯田的蓄水保水量并不足以供给果树的蒸腾耗水量,土壤含水量呈逐渐减小趋势,果树大量消耗土壤水分可能导致土壤干层的形成。

参考文献:

- [1] Wu F Q, Liu H B, Sun B S *et al.* Net primary production and nutrient cycling in an apple orchard-annual crop system in the Loess Plateau, China: a comparison of Qinguan apple, Fuji apple, corn and millet production subsystems [J]. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 2008, 81(1): 95-105.
- [2] 吴发启,周正立,刘海斌. 黄土高原南部农果复合型生态农业生产力特征[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(2): 262-266. Wu F Q, Zhou Z L, Liu H B. Productivity of crop-fruit ecological agriculture in middle-south Loess Plateau [J]. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2005, 16(2): 262-266.
- [3] 杨文治,邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 86-133. Yang W Z, Shao M A. Study on soil water of Loess Plateau [M]. Beijing: Science Press, 2000. 86-133.
- [4] 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. Li Y S. Effects of forest on water circle on the Loess Plateau [J]. *J. Nat. Resour.*, 2001, 16(5): 427-432.
- [5] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 433-438. Yang W Z. Soil water resources and forestation in Loess Plateau [J]. *J. Nat. Resour.*, 2001, 16(5): 433-438.
- [6] Zhu X M, Li Y S, Peng X L *et al.* Soil of the loess region in China [J]. *Geoderma*, 1983, 29(3): 237-255.
- [7] 穆兴民. 黄土高原土壤水分与水土保持措施相互作用[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(2): 41-45. Mu X M. Interaction of soil and water conservation measures with soil water in the Loess Plateau in China [J]. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, 2000, 16(2): 41-45.
- [8] 吴发启,张玉斌,余雕,等. 黄土高原南部梯田土壤水分环境效应研究[J]. *水土保持研究*, 2003, 10(4): 128-130. Wu F Q, Zhang Y B, She D *et al.* Preliminary study on soil water environmental effect of level terrace in southern Loess Plateau [J]. *Res. Soil Water Conserv.*, 2003, 10(4): 128-130.
- [9] 于峰,董立国,赵庆丰,等. 宁夏半干旱地区梯田土壤水分动态变化规律研究[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(1): 298-300, 304. Yu F, Dong L G, Zhao Q F *et al.* Soil moisture content change research for terraced fields in Ningxia semi-arid area [J]. *Res. Soil Water Conserv.*, 2007, 14(1): 298-300, 304.
- [10] 岳宏昌,王玉,李缠云,等. 黄土丘陵沟壑区土壤水分垂直分布研究[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(1): 66-69, 82. Yue H C, Wang Y, Li C Y *et al.* Vertical distribution of soil

- moisture in the Loess Hilly and Gully area[J]. *Bull. Soil Water Conserv.*, 2009, 29(1): 66-69, 82.
- [11] 杨封科. 半干旱黄土丘陵区梯田集水增产效应研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(5): 130-132, 161.
Yang F K. Research on rainwater harvesting and yield increasing effect of terrace in semiarid areas of Loess Hilly region[J]. *J. Soil Water Conserv.*, 2006, 20(5): 130-132, 161.
- [12] 张北赢, 徐学选, 刘文兆, 等. 黄土丘陵区不同土地利用的土壤水分灰色关联度[J]. *生态学报*, 2008, 28(1): 361-366.
Zhang B Y, Xu X X, Liu W Z *et al.* Grey relational analysis of soil moisture under different landuses in the Loess Hilly Region[J]. *Acta Ecol. Sin.*, 2008, 28(1): 361-366.
- [13] 张北赢, 徐学选, 刘文兆. 黄土丘陵沟壑区不同水土保持措施条件下土壤水分状况[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(4): 54-58.
Zhang B Y, Xu X X, Liu W Z. Soil water condition under different measures of soil and water conservation in loess hilly and gully region[J]. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, 2009, 25(4): 54-58.
- [14] 王国梁, 刘国彬, 党小虎. 黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤含水率的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(2): 31-35.
Wang G L, Liu G B, Dang X H. Effects of land use on soil moisture in loess hilly and gully region of China[J]. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, 2009, 25(2): 31-35.
- [15] 余新晓, 张晓明, 牛丽丽, 等. 黄土高原流域土地利用/覆被动态演变及驱动力分析[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7): 219-225.
Yu X X, Zhang X M, Niu L L *et al.* Dynamic evolution and driving force analysis of land use/cover change on loess plateau watershed[J]. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.*, 2009, 25(7): 219-225.
- [16] 胡明, 卢爱刚, 胡亚丽, 等. 县域土地利用结构变化与驱动力分析-以安塞县为例[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(25): 11030-11032, 11044.
Hu M, Lu A G, Hu Y L *et al.* Analysis on the changes of land use and the driving force[J]. *J. Anhui Agric. Sci.*, 2008, 36(25): 11030-11032, 11044.
- [17] 周萍, 刘国彬, 文安邦, 等. 黄土丘陵区不同林龄乔灌林地土壤水分及持水性能研究[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(1): 188-193.
Zhou P, Liu G B, Wen A B *et al.* Study on characters of soil water content and water conservation of arbor and shrub lands with different forest ages in the Loess Hilly-gullied Region[J]. *Res. Soil Water Conserv.*, 2010, 17(1): 188-193.
- [18] 鲁向晖, 隋艳艳, 王飞, 等. 秸秆覆盖对旱地玉米休闲田土壤水分状况影响研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(3): 156-159.
Lu X H, Sui Y Y, Wang F *et al.* Study on soil water status of maize's fallow under straw mulch in dry land[J]. *J. Arid Land Resour. Environ.*, 2008, 22(3): 156-159.
- [19] 王进鑫, 黄宝龙, 罗伟祥. 黄土高原人工林地水分亏缺的补偿与恢复特征[J]. *生态学报*, 2004, 24(11): 2395-2401.
Wang J X, Huang B L, Luo W X. Compensation and rehabilitation characteristics of soil water deficit at a planted forest site of the drought-prone loess plateau[J]. *Acta Ecol. Sin.*, 2004, 24(11): 2395-2401.
- [20] 胡梦璐, 刘文兆, 赵姚阳. 黄土高原农、林、草地水量平衡异同比较分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2003, 21(4): 113-116.
Hu M J, Liu W Z, Zhao Y Y. Similarities and differences of water balance among cropland, grassland, and woodland in the Loess Plateau[J]. *Agric. Res. Arid Areas*, 2003, 21(4): 113-116.
- [21] 黄奕龙, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵小流域生态用水试验研究——气候和土地利用变化的影响[J]. *水科学进展*, 2006, 17(1): 14-19.
Huang Y L, Chen L D, Fu B J *et al.* Experimental study on ecological water use in a gully catchment of the loess plateau: effects of climate and land use change[J]. *Adv. Water Sci.*, 2006, 17(1): 14-19.
- [22] Wang Z Q, Liu B Y, Zhang Y. Soil moisture of different vegetation types on the Loess Plateau[J]. *J. Geogr. Sci.*, 2009, 19(6): 707-718.
- [23] 武阿峰, 刘文兆. 长武塬区不同土地利用条件下土壤水分剖面分布特征比较[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(5): 133-136.
Wu A F, Liu W Z. A study of soil moisture under different models of land use in Changwu table land[J]. *Agric. Res. Arid Areas*, 2009, 27(5): 133-136.
- [24] 王兵, 刘文兆, 党廷辉, 等. 长期施肥条件下旱作农田土壤水分剖面分布特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(3): 411-416.
Wang B, Liu W Z, Dang T H *et al.* Distribution features of soil water content in the profile of rainfed cropland with long-term fertilization[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2007, 13(3): 411-416.
- [25] 冉伟, 谢永生, 郝明德. 黄土高原沟壑区不同种植年限果园土壤水分变化[J]. *西北农业学报*, 2008, 17(4): 229-233.
Ran W, Xie Y S, Hao M D. Study on change of soil water in orchards of different planting-life in gully region of Loess Plateau[J]. *Acta Agric. Bor.-occid. Sin.*, 2008, 17(4): 229-233.