

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

樊军, 郝明德, 邵明安

(黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 研究了渭北旱塬不同土地利用方式下大田土壤深层剖面含水率的变化特征, 并与长期田间定位试验结果进行比较。结果发现, 不同土地利用方式能显著影响土壤深层含水率状况, 各种方式对土壤深层水消耗能力的排序是 15 龄苹果园 > 15 龄人工苜蓿 > 10 龄苹果园 > 刺槐幼林 > 高产农田 > 20 年撂荒地 > 5 龄苹果园 > 裸地。10 龄苹果园剖面剩余含水率分布接近高产农田, 而 15 龄苹果园土壤剩余含水率低于高产农田, 说明 10 龄到 15 龄苹果树耗水量显著增大, 超过高产农田作物消耗的水分, 导致土壤深层水分进一步消耗。由于塬面大部分耕地是 10 龄到 15 龄苹果园, 土壤深层含水率普遍处于较低水平。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。

关键词: 旱地; 农业生态系统; 土壤干燥化; 生态环境效应

中图分类号: S152.7; S274.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)01-0061-04

0 引言

黄土高原地区土壤水分运动规律与寻求发挥有限降水资源的利用途径研究, 一直受到研究者的关注, 并取得显著成效。研究发现“土壤干层”是本区的一个特殊的水文现象。据梁一民等研究, 黄土高原半干旱区种植沙打旺, 由于土壤储水的不断消耗, 沙打旺自 8~9 年开始衰败^[1]。在半湿润区人工植被的高密度粗放经营造成土壤水分长期亏缺, 导致土壤干化, 森林植被失去涵养水源的生态功能^[2]; 黄土高原地区“小老树”形成的主导因子是缺水、缺肥、热量不足^[3]。在林草植被过渡耗水情况下, 土壤含水量处于极度亏缺状态, 经过雨季可以部分得到补偿, 但是降雨的入渗补偿深度有限, 得不到补偿的土层土壤含水量长期处于较低水平, 形成土壤干层^[4]。

在 20 世纪 70 年代以前, 人们普遍认为干旱是限制黄土高原南部地区农业生产的主要因素, 经过多年的科学试验与生产实践, 这一观点发生了变化, 认为该区产量的首要限制因素是肥力而不是水分, 这一地区农田水分条件尚具有很大的增产潜力, 肯定了土壤水库在旱作条件下作物供水调节中不可替代的作用^[5,6]。然而随着近年农田肥料投入量的大幅度增加, 配比趋于合理, 持续的高投入高产生产以及大面积苹果树的种植, 致使这一地区的农田土壤水分状况不断恶化, 为此, 本文利用渭北旱塬的长期定位试验点, 结合大田调查对不同土地利用方式下土壤深层水分状况进行研究, 旨在为本区的农业生产提供理论依据。

1 研究区环境状况及研究方法

试验区位于陕西省长武县, 属渭北旱塬, 无灌溉条

件, 海拔 1 200 m。年均气温 9.3℃, 无霜期 171 d, 多年平均降水量 584 mm, 大于 10℃活动积温 3 029℃, 年日照时数为 2 230 h, 日照率 51%, 年辐射总量为 4 837 J/cm², 属暖温带半湿润易旱气候区。土壤为黄盖黑垆土, 质地为轻壤—中壤质, 垒结疏松, 剖面平均 pH 为 8.3, 小于 0.001 mm 的粘粒含量 18%, 小于 0.01 mm 的物理性粘粒含量 46%。根据实测水分特征曲线得出的水分常数分别是: 田间持水量 23% (3 × 10⁴ Pa 时的含水率), 初始凋萎湿度 12.7% (6 × 10⁵ Pa), 萎蔫系数 10.6% (1.5 × 10⁶ Pa)。

本区主要的农业种植方式为小麦 (*Triticum aestivum* L.)—小麦—小麦—糜子 (*Panicum miliaceum* L.) 或豆科作物—玉米 (*Zea mays* L.) 或西瓜 (*Citrullus vulgaris* Schrad.) 或洋芋 (*Solanum tuberosum* L.) 轮作, 施肥主要以化肥为主, 年施肥量在 N 150~170 kg/hm², P₂O₅ 150~180 kg/hm² 水平, 并施用一定量粪肥。农作物产量水平: 冬小麦 4500~7500 kg/hm², 玉米 7500~12000 kg/hm²。除传统农业外, 也种植经济作物, 如烤烟 (*Nicotiana tabacum* L.) 与苹果 (*Malus pumila* Mill.)。近年苹果树种植发展很快, 试验区所在的陕西省长武县农业耕地总面积 25 532 hm², 2002 年初苹果面积已发展到 5 100 hm², 占耕地的 20% 左右。

本次大田调查研究于 2002 年 7 月上旬进行, 在塬面上选择典型高产农田、苹果园 (不同树龄)、撂荒草地、刺槐林 (*Robinia pseudoacacia* L., 7 龄左右幼林) 及长期定位试验苜蓿连作地与裸地处理为研究对象。定位试验与调查区位于同一塬面上, 相距 5 km。长期定位试验开始于 1984 年, 苜蓿连作处理种植紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.), 不施肥; 裸地不种作物并定期清除杂草, 目前该长期试验仍在进行。采用人工打土钻的方法, 土壤 0~1 m 每 10 cm 为一层, 1 m 以下每 20 cm 为一层, 最大测定深度 7~12 m, 烘干法测定土壤含水率。

2 土壤剖面水分分布特征

完全雨养农业生产条件下, 降水是造成作物农田土

收稿日期: 2003-03-10 修订日期: 2003-07-28

基金项目: 中国科学院知识创新方向性项目 (KZCX2-413-6); 国家自然科学基金重大研究计划 (90102012)

作者简介: 樊军 (1974-), 男, 博士生, 主要研究土壤水分、养分利用及其在土壤中的运移。陕西杨凌 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100

壤储水利用程度及土壤水分补充的主要原因,而不同的作物对土壤水的消耗也不同^[7]。在黄土高原地区,降水入渗并储存于土壤水库,使降水和植物需水在时间上的不一致得以调节,土壤水库中水分的储量和分布,受植物用水特征的强烈影响,例如,多年连续种植苜蓿会导致生物性土壤下伏干层的形成^[8]。高产农田作物耗水量

大,从而导致土壤相对干燥化,致使作物产量随降水量大小而波动^[9]。由于土壤 0~2 m 土层水分含量受降水的影响,变化激烈。因此,2 m 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,图 1a、b 为该区域土壤剖面水分含量的分布特征。

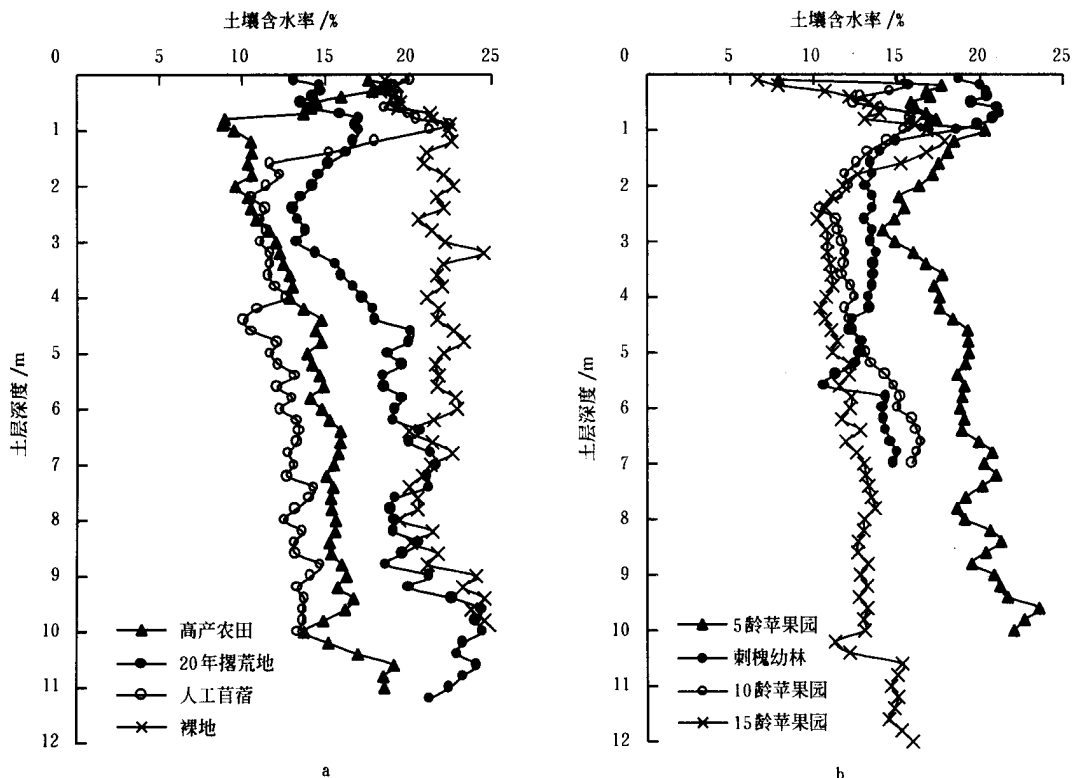


图 1 不同土地利用条件下土壤剖面含水率分布

Fig. 1 Distribution of soil water content in the soil profile of different land use patterns

从图中可以看出,裸地土壤剖面含水率从表层到深层有增加趋势,但在 1~8 m 之间较稳定,整个剖面平均含水率 21.98%,已接近或达到田间持水量。据调查,5 龄苹果园地之前种植了 10 年左右的烤烟,可能是烤烟耗水量较少,同时种植苹果树后,幼树需水量少,土壤储水得到一定程度恢复。因此,尽管 5 龄苹果园土壤剖面 1~6.4 m 土层含水率低于裸地,而 6.4 m 以下与裸地接近。20 年撂荒地剖面含水率分布与 5 龄苹果园基本一致。因为撂荒地 20 年前是农田,20 年前撂荒后,地上生长杂草。由于杂草的生物量小,耗水有限,土壤深层水分没有被大量消耗。但是从 0~6.4 m 与裸地的差异也反映出,杂草的长期生长仍然可以显著影响 0~6 m 剖面水分状况。大田高产冬小麦地土壤剖面含水率明显低于 20 年撂荒地,水分利用已深达 10 m,其 2~7 m 含水率与 10 龄苹果园相近,而 15 龄苹果园剖面 2~10 m 含水率与 15 龄人工苜蓿草地含水率接近,含水率低于大田冬小麦地。

李玉山研究认为,高产农田土壤干燥化是引起产量波动的直接原因,高产农田降雨入渗深度在 0.7~1.6 m,入渗深度变浅,将削弱土壤水库的供水调节能力,增加高产区产量的不稳定性^[5]。也就是说土壤深层可利用的储水量降低,高产农田更加依赖于当季降水多少及其

分配。本试验中高产农田 2 m 以下土壤平均含水率为 14.33%,高于萎蔫含水率,仍然有可以被作物利用的水分,但是在 0~2 m,冬小麦收获时,土壤湿度往往达到萎蔫湿度。由于存在降水量少与农民产量水平需求量高的矛盾,导致农田土壤深层干燥化,降低了土壤对干旱的调节能力,产量受降水量影响十分明显。

近年来,本区苹果种植面积迅速增加,由于经济效益高于种粮食作物,农民将农田改为苹果园,并且肥料投入量很大,远超过高产农田。根据本次测定结果,苹果园建在 5 龄苹果园地,由于土壤水分条件好,深层水分含量高,这有利于苹果树的生长。然而随着树龄的增长,耗水量增加,土壤深层储水不断消耗,例如,10 龄苹果园土壤剖面水分分布与高产农田接近,但是 15 龄苹果园土壤剖面水分低于高产农田。由于塬面大部分耕地是高产农田与苹果园,林草地与撂荒地很少,土壤深层含水率普遍处于较低水平,苹果的大面积种植加快了土壤深层水分的消耗,最终将可能影响这一区域的陆地水循环。

3 农业生产与土壤深层水分消耗

土壤 0~2 m 土层处在水分消耗、补充的不断交替过程中,不能反映长时段土壤水分环境的变化趋势^[4],

而 2 m 以下土壤水分很难得到降水入渗补充, 可以反映农业生产对土壤水分生态环境的深刻影响, 因此计算了土壤 2 m 以下土壤的储水量状况(表 1)。表 1 表明, 裸地剖面储水量最高, 这是因为定位试验中裸地处理控制杂草的生长, 农田水分支出只有土面蒸发一项, 降水可以充分入渗并在土壤剖面储存。20 年撂荒地与 5 龄苹果园地的剖面储水量相近, 这可能是因为 5 龄苹果园与荒草的耗水量小, 其 2~ 10 m 剖面储水量分别为裸地的 85.7% 和 86.3%。一般高产农田、刺槐幼林、10 龄苹果园 2~ 7 m 土壤储水量接近, 低于撂荒地与 5 龄苹果园地, 分别占裸地的 60.6%、61.1%、62.2%。而人工

种植的苜蓿经过 15 a 的生产后, 土壤 2~ 10 m 剖面储水量仅比同期苹果园高 53.1 mm, 占裸地的 57.1%。以上分析表明在渭北旱塬不同土地利用方式显著影响土壤深层含水率状况, 其对土壤深层水消耗量的大小为: 15 龄苹果园 > 15 龄苜蓿 > 10 龄苹果园 > 刺槐幼林 > 高产农田 > 20 年撂荒地 > 5 龄苹果园 > 裸地。苜蓿作为一种有益的牧草耗水量很大, 人工连续种植会导致土壤深层干燥化, 应当采取适度生产力等措施, 减缓或避免其继续发展^[4], 而苹果园随种植年限的增加, 耗水量增加, 也导致了深层土壤干燥化。

表 1 不同土地利用方式土壤储水量的差异

Table 1 Soil water use under the different land use patterns

项 目	15 龄苹果园	人工苜蓿	10 龄苹果园	刺槐幼林	高产农田	撂荒地	5 龄苹果园	裸地
2~ 7 m 储水量/mm	741.9	778.7	865.0	871.1	887.4	1143.8	1161.9	1426.4
占裸地/%	52.0	54.6	60.6	61.1	62.2	80.2	81.5	100.0
2~ 10 m 储水量/mm	1253.1	1306.2	—	—	1490.4	1959.2	1973.3	2285.9
占裸地/%	54.8	57.1	—	—	65.2	85.7	86.3	100.0
每米平均储水量(2 m 以下)/mm	148.4	155.7	173.0	174.2	177.5	228.8	232.4	285.3
平均含水率(2 m 以下)/%	12.1	12.6	13.3	13.4	14.3	18.8	19.0	22.0

为进一步分析不同土地利用方式对土壤剖面含水率的影响, 我们将剖面 0~ 10 m 划分为 5 个层次, 每层 2 m, 分析其影响机理(表 2)。方差分析表明不同土地利用方式 2~ 10 m 土层储水量之间存在极显著的差异 ($F = 25.73$), 可以分为低储水量(15 龄苹果园与人工草地)、较低储水量(10 龄苹果园、刺槐幼林与高产农田)、较高储水量(撂荒地与 5 龄苹果园)与高储水量(裸地) 4 组, 反映了不同土地利用方式下植物对土壤深层水分消耗量的差异。除裸地外, 其它处理 0~ 2 m 剩余储水量高于 2~ 4 m 土层, 这是因为采样测定之前的 5 月与 6 月份共降雨 237.1 mm, 降水使剖面水分有部分恢复。表 2 也显示, 15 龄苹果园、人工草地、高产农田、撂荒地与 5 龄苹果园土壤 2~ 10 m 4 个层次储水量向下为增加趋势, 说明地上植物对土壤深层水分利用强度

随土层深度增加而减小。一般随着土层深度的增加, 植物根系分布的数量减少, 水分距离主根区越远, 利用难度增加。不同的植物根系在土体中分布的数量与深度不同, 因此对剖面不同层次水分利用量不同。4 个层次剩余储水量向下的平均增加率分别是: 15 龄苹果园 5.3%、人工草地 5.8%、高产农田 8.2%、5 龄苹果园 9.2% 与撂荒地 11.4%, 反映了地表不同植物对土壤深层不同层次水分的利用强度也不同。例如高产农田 0~ 4 m 土层储水量高于人工草地与 15 龄苹果园, 但是 4~ 10 m 却相反, 人工苜蓿与 15 龄苹果比粮食作物用水深度深。多年生苜蓿、苹果树与刺槐等植物根系发达, 土壤水分循环的强度与深度较一年生农作物强烈, 而且处于根区以下的土壤水分在水势梯度的作用下向根层上移而被利用, 因此造成土体更深层水分的消耗。

表 2 不同土地利用方式下土壤各层次储水量差异

Table 2 Soil water in different land uses of up land

mm

土层/m	15 龄苹果园	人工苜蓿	10 龄苹果园	刺槐幼林	高产农田	撂荒地	5 龄苹果园	裸地
0~ 2	354.19	437.84	359.30	440.47	316.01	396.66	438.60	546.78
2~ 4	281.30	300.04	302.92	351.13	308.96	382.40	414.64	570.44
4~ 6	299.03	307.32	351.93	329.62	374.85	494.46	489.71	578.24
6~ 8	335.30	344.76	—	—	403.10	525.45	512.38	540.80
8~ 10	337.47	354.12	—	—	403.50	556.88	556.53	596.44

4 不同土地利用方式的水分生态环境效应

20 年撂荒地以前是高产农田, 撂荒后生长杂草, 尽管生物量低, 但是对水分的影响仍然可以达到 6 m 深, 由于杂草对降水入渗的阻碍及土壤水的消耗, 5 m 以上水分条件比裸地差。但是下层土壤水分显著高于高产农田, 其对土壤水分环境不会产生深刻影响。而苹果地被人工深翻、挖坑施肥等处理, 土壤入渗性能远高于撂荒

地、高产农田、苜蓿草地, 基本上可以接纳降水就地入渗, 用以补充剖面水分亏缺。据黄明斌等研究, 塬面农田可以产生较小径流, 而苹果地一般无径流产生^[10]。随着本区苹果园面积的不断增多, 塬面产流量减少, 势必影响本区内河川径流量。农田生产力的提高, 土壤水分消耗量增加, 一般情况旱地土壤剖面剩余含水率与产量呈显著的负相关关系^[11], 作物收获后干燥的土壤剖面, 只有在降水量较大时才可能恢复。由于黄土土层深厚, 土

壤深层的干燥化,降水很难下渗到地下水,仅在暴雨时少量产流进入河川。因此,旱塬土壤深层干燥化不仅引起产量的波动,也可能对区域水循环产生影响。

5 讨论与建议

本区高产农田除进行轮作倒茬外,仍然采用传统的耕作方式,塑料薄膜覆盖仅用于作物的保苗。由于农业生产的不断发展,特别是施肥量的增加,配比更加合理,作物品种改良等使农田土壤水分消耗更加严重,长期发展必然不利于旱作农业生产力的进一步提高。而秸秆覆盖、少耕、免耕等技术措施可以有效防止土壤水分无效蒸发,应当积极推广,阻止农田土壤深层干燥化。对黄土高原人工草地则根据草地适度生产力的原则采取相应措施^[8]。旱作果园深沟施肥有改土、增肥、蓄水、促根等综合作用,应积极推广。另外塬面硬地面(村庄、道路)降雨集水,可利用水源浇灌等可以显著改善果园的水分状况,我们调查的22龄与34龄果园,干旱时期进行了一定量的补充灌溉,2~7m土层储水达到888.87mm与880.37mm,接近高产农田,高于15龄苹果园,显著改善了果园的水分状况。

本次田间测定土壤湿度时发现,在塬面土壤深层7~10m以下存在一个容重高于上层土壤的红胶土层,两土层过度区出现一个低湿层,底层的红胶土层湿度较高,有一个迅速增加的现象,这一层次的存在是否会影

响本区农田水分循环尚有待于进一步深入研究。

[参 考 文 献]

- [1] 梁一民,李代,从心海.沙打旺草地产量动态及水分利用研究[J].水土保持学报,1990,4(3):29-35
- [2] 孙长忠,黄宝龙,陈海滨,等.黄土高原人工植被与其水分环境相互作用关系研究[J].北京林业大学学报,1998,20(3):7-14
- [3] 韩蕊莲,候庆春.黄土高原人工林小老树成因分析[J].干旱地区农业研究,14(4):104-108
- [4] 杨文治,余存祖.黄土高原区域治理与评价[M].北京:科学出版社,1992
- [5] 陕西省土壤学会.渭北旱塬土壤培肥的途径和措施[J].陕西农业科学,1983,3:1-4
- [6] 李玉山,张孝中,郭明航.黄土高原南部作物水肥产量效应的田间研究[J].土壤学报,1990,27(1):1-7
- [7] 李锋瑞,高崇岳.陇东黄土旱塬区几种作物田间耗水量及土壤水分亏缺分异特征[J].应用与环境生物学报,1996,2(3):259-267
- [8] 李玉山.苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应[J].土壤学报,2002,39(3):404-411
- [9] 李玉山.旱作高产田产量波动性和土壤干燥化[J].土壤学报,2001,38(3):353-356
- [10] 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):7-12
- [11] 樊军,郝明德,党廷辉.旱地长期定位施肥对冬小麦水分利用的影响研究[J].土壤,2000,(6):318-318

Water consumption of deep soil layers and eco-environmental effects of agricultural ecosystem in the Loess Plateau

Fan Jun, Hao Mingde, Shao Ming'an

(State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, the Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract Weibei upland in southern part of the Loess Plateau is a rainfed farming area where the soil water controls the water application of plants. Different plants cultivated successively for a long term may affect water contents of deep soil layers. But constant increase of agricultural productions and continual growth apple tree can lead to soil drought and form a desiccative layer below the soil surface layer, which could affect the water cycle of return into soil. This paper reported that effects of different cultivated land use patterns on deep soil water contents in the upland of the Loess Plateau and compared to the results of a long-term experiment. The main results were as following: The soil water content of bare land was highest in soil profiles, and its mean water content was 21.98%. Then, the water contents of uncultivated land and tobacco land were smaller than that in the bare land. Young acacia and ten-year apple tree consumed as same water as that of high-yield field, furthermore, fifteen-year apple tree and artificial alfalfa used much more water than that of high-yield crops. The apple tree consumed a great quantity of water from the deeper soil layers, which could lead to the desiccation of soil. Because most fields are high-yield field and apple orchard on the Weibei upland, their average soil water content of deep layers were 12%~14%. That a large number of apple tree planted will result in the desiccation of field soils on the upland, which will affect the water cycle in this area.

Key words: dry land ecological environment; agricultural ecosystem; soil desiccation; eco-environmental effects