

DOI: 10.5846/stxb201211141597

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. 生态学报, 2014, 34(8): 1975–1983.

Cheng L P, Liu W Z, Li Z. Soil water in deep layers under different land use patterns on the Loess Tableland. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(8): 1975–1983.

## 黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征

程立平<sup>1, 2, 4</sup>, 刘文兆<sup>1, \*</sup>, 李志<sup>3</sup>

(1. 中国科学院水利部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, 杨凌 712100;

2. 平顶山学院资源与环境科学学院, 平顶山 467000; 3. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100;

4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 利用长期定位监测数据, 对陕西省长武黄土塬区裸地、高产农田、苜蓿草地和苹果林地下 0—15 m 黄土剖面土壤水分环境进行了研究。结果表明, 不同土地利用方式下, 干湿交替层内土壤水分具有明显季节性波动变化特征, 但其深度范围有别。裸地、高产农田、苜蓿草地和苹果林地分别约为 0—5 m, 0—4 m, 0—2 m 和 0—3.5 m。干湿交替层以下深层土壤水分状况主要受土地利用方式的影响, 其影响大小依次为苜蓿草地>苹果林地>高产农田>裸地, 各土地利用方式下表现出不同的时间变化特征。黄土塬区土壤水量平衡计算中土层厚度大小的确定非常重要, 这不仅与土地利用方式相关, 也与林草植被的生长阶段相联。裸地和高产农田土层厚度选择不宜小于 5 m 和 4 m; 未形成深厚稳定土壤干层的苜蓿草地和苹果林地, 土层厚度选择不宜小于 15 m 和 10 m; 对于已经形成稳定土壤干层的林草地来说, 进行年尺度的水量平衡分析时, 其计算深度可取降水入渗深度。研究可从土壤水资源的保持及利用的角度上服务于黄土塬区旱作农业的持续发展和土地利用方式的优化配置。

**关键词:** 土壤湿度; 土地利用; 水量平衡; 黄土塬区

## Soil water in deep layers under different land use patterns on the Loess Tableland

CHENG Liping<sup>1, 2, 4</sup>, LIU Wenzhao<sup>1, \*</sup>, LI Zhi<sup>3</sup>

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

2 College of Resource and Environment Science, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, China

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

4 University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Soil water environment of 0—15 m loess profiles in bare land, high-yield farmland, alfalfa grassland and apple orchard on the Changwu Loess Tableland are investigated based on the data of long term experiments in situ. Results show that the seasonal variations of soil water were obvious in the layers of dry-wet alternation and the depths that the layers appeared were different under different land use patterns. The depths for bare land, high-yield farmland, alfalfa grassland and apple orchard were 0—5 m, 0—4 m, 0—2 m and 0—3.5 m, respectively. Soil water in deep soil layers below the layers of dry-wet alternation was mainly affected by land use patterns. In terms of the magnitudes of the effect, it showed in the order of alfalfa grassland>apple orchard>high-yield farmland>bare land. And the temporal variations of soil water in deep soil layers were different under the different land use patterns. The determination of soil thicknesses is very important to the calculation of soil water balance on the Loess Tableland, depending on the land uses and the growth stages of the

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171033, 51179161)

收稿日期: 2012-11-14; 修订日期: 2013-03-04

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wzliu@ms.iswc.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

vegetations. The calculated soil thicknesses should be 5 m and 4 m at least in bare land and high-yield farmland, respectively and be 15 and 10 m at least alfalfa grassland and apple orchard, respectively when the stable dry soil layer has not yet formed in soil profile. However, when the layer has formed in planted woodland and grassland, the calculated thickness can take the depth of precipitation infiltration in the analysis of soil water balance at annual scale. This study can improve the sustainable development of rain-fed agriculture and the optimal allocation of landuse patterns in the aspects of the conservation and utilization of soil water resources for the Loess Tableland.

**Key Words:** soil moisture; land use; water balance; Loess Tableland

土壤水资源作为水资源的重要组成部分,在植物生长过程中起着非常重要的作用。黄土高原地区属大陆性季风气候区,降水年际变化大,年内分布不均;而深厚的黄土层犹如土壤水库,具有保蓄和调节水分功能,能够对降水不足和时间空间分布不均所导致的旱情能够起到有效的缓解作用<sup>[1]</sup>。由于该区土壤的特殊性、降水资源的紧缺性,因而人们非常重视植被与土壤水资源的相互影响<sup>[2]</sup>,尤其是植被生长对土壤水分生态环境影响的研究<sup>[3-12]</sup>。人工林草的强烈蒸腾作用所导致的深层土壤干燥化问题,不仅对植被自身的生长造成不利影响,而且对陆地水文循环产生了一定的影响<sup>[7]</sup>,因而深层土壤水分环境问题越来越受到研究者的关注,如樊军等<sup>[11]</sup>对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进行了研究;Wang等研究黄土丘陵区不同植被类型对0—10 m黄土剖面水分含量的影响<sup>[12]</sup>,并通过荒草地对照确定了不同植被类型的耗水深度<sup>[13]</sup>;程立平等对长武塬区不同土地利用方式下0—20 m剖面土壤水分分布特征进行了研究<sup>[14]</sup>,并分析了其土壤水氢氧同位素的组成特征<sup>[15]</sup>;王云强等通过对黄土高原382个点上土壤水分的调查,研究了整个黄土高原0—10 m土层土壤水分空间分布特征及其影响因素<sup>[16]</sup>,并对比研究了山西中阳、陕西绥德、陕西神木、陕西吴起、宁夏固原、陕西长武6个典型区域0—21 m土层水分剖面分布规律<sup>[17]</sup>;李军等<sup>[10]</sup>通过对黄土高原半湿润区、半干旱区和半干旱偏旱区53类林地、草地和农田深层土壤湿度的观测,分析比较了各类型区各类林地、草地和农田土壤湿度、土壤水分过耗量、土壤干燥化指数、土壤干层厚度等土壤干燥化效应指标。但是由于深层土壤取样困难,黄土高原地区有关深层土壤水分的研究,存在以下局限:一是多为一次调查取样研究,缺少长期定位研究;二是多数研究未超过10 m深度。因此,

本文利用长武黄土高原农业生态试验站深剖面水分运动观测场长期定位监测数据研究了裸地、高产农田、苜蓿草地和苹果林地对深层土壤水分环境的影响,以期为黄土塬区土地利用方式的优化配置以及旱作农业的持续发展提供土壤水分依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

长武黄土高原农业生态试验站(N35°14', E107°40')位于陕西省长武县长武塬上,海拔1220m,属温带半湿润大陆性季风气候区,降水年际变化大,年内分布不均,多年平均降水578 mm,主要集中在7—9月,占全年降水总量的55%以上。年均气温9.1℃, >10℃积温3029℃,无霜期171 d。长武塬区为典型的雨养农业区,作物一年一熟。黄土堆积深厚,土壤为黑垆土,母质为中壤质马兰黄土,地下水埋深40—80 m。0—20 m黄土剖面田间持水率和凋萎湿度分别为(21.39±0.13)%和(8.06±0.45)%<sup>[14]</sup>,土壤容重在1.23—1.44 g/cm<sup>3</sup>之间<sup>[18]</sup>,容重变化主要在0—1 m土层内,1 m以下土层容重变化较小,平均值为1.3 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 研究方法

选定长武站深剖面水分运动观测场和邻近苹果林地测定土壤水分。深剖面水分观测场建于2005年(之前为农田),设3种土地利用方式样地,分别为苜蓿草地、高产农田和裸地,农田轮作方式为冬小麦-冬小麦-春玉米。苜蓿草地、高产农田和裸地3块样地面积均为10 m×10 m。苹果林地为1994年种植,面积约为2000 m<sup>2</sup>,目前处于盛果期。具体土壤水分测定样地见表1。土壤水分采用美国CPN公司生产的CNC503(DR)智能中子土壤水分仪测定,测定深度为15 m,0—1 m以10 cm为间隔测定1次,1—15 m以20 cm为间隔测定1次。每块样地在其

中心位置处理设一根中子仪管,根据长期监测实验设计,土壤水分于每月 19 号测定。其中苜蓿草地、高产农田和裸地土壤水分测定时段为 2009 年 4 月

至 2011 年 10 月,苹果林地土壤水分测定时段为 2009 年 11 月至 2011 年 10 月。

表 1 土壤水分测定样地基本情况

Table 1 General information on soil moisture plots

土地利用 Land use	说明 Information
裸地 Bare land	不种作物,定期清理杂草
高产农田 High-yield farmland	冬小麦-冬小麦-春玉米轮作,2009 年和 2010 年种植小麦,2011 年种植玉米
苜蓿草地 Alfalfa grassland	2005 年种植,不施肥,每年收割 3 次
苹果林地 Apple orchard	1994 年种植,盛产期,行距×株距为 4 m×3 m,测定点位于两行中线位置

旱地土壤水量平衡计算式一般为:

$$\Delta W = (P + U) - (R + D + ET) \quad (1)$$

式中, $\Delta W$  为土壤储水量的变化量, $P$  为降水量, $U$  为向上进入蒸散作用层的毛管水流量, $R$  为地面径流量, $D$  为向下排出蒸散作用层的水量, $ET$  为蒸散量,以上各量均以水的厚度(mm)表示。在黄土塬区,水量平衡计算公式一般被简化为下式:

$$ET = P - \Delta W \quad (2)$$

式中符号意义同上。

土壤储水量  $W$  计算公式为:

$$W = \sum_{i=1}^n \theta_i \times h_i \quad (3)$$

式中, $W$  为一定厚度土壤内的储水量(mm), $n$  为一定厚度土壤所划分的层次数, $\theta_i$  为第  $i$  层土壤的体积含水量, $h_i$  为第  $i$  层土壤的厚度(mm)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 0—15 m 土层土壤水分剖面特征

因数据量大,本文选择几个具有代表性的测定日数据绘制 0—15m 黄土剖面土壤水分垂直分布曲线,分别为 2009 年 6 月 19 日和 11 月 19 日,2010 年 6 月 19 日和 11 月 19 日,2011 年 6 月 19 日和 10 月 19 日(图 1)。之所以选择这几个测定日,是因为一年当中 6 月属雨季到来之前,土壤水分含量处于低值;而 11 月前后雨季已过,土壤水分在土体中的再分配过程基本完成,是一个相对稳定的时期。2009 年 6 月测定日有降雨,24h 累积降水量 2.8 mm,为无效降水;离测定水分时间最近的上一次降雨发生在 11d 前,降水量为 7.4 mm。2009 年 11 月测定日无降雨,离测定水分时间最近的上一次降雨发生在 3d 前,降水量为 3.6 mm。2010 年 6 月测定日无降雨,离测定水分时间最近的上一次降雨发生在 12d 前,

降水量为 26.2 mm。2010 年 11 月测定日无降雨,离测定水分时间最近的上一次降雨发生在 24d 前,降水量为 7.5 mm。2011 年 6 月测定日无降雨,离测定水分时间最近的上一次降雨发生在 2d 前,降水量为 5.1 mm。2011 年 10 月测定日无降雨,离测定水分时间最近的上一次降雨发生在 10d 前,降水量为 27.9 mm。

通过 0—15m 黄土剖面土壤水分垂直分布曲线可以看出,不同土地利用类型之间土壤水分剖面具有共同的特征,即剖面上部含水量随时间变化剧烈,下部含水量时间变化较小。在干湿季明显的季风条件下,黄土剖面上层土壤处于水分消耗、补充的交替过程之中,含水量波动剧烈,为干湿交替层<sup>[3]</sup>,不同土地利用方式干湿交替层深度范围不同。图 1 可知,裸地干湿交替层约在 0—5 m 土层,高产农田约在 0—4 m 土层,苹果林地约在 0—3.5 m 土层,苜蓿草地约在 0—2 m 土层。干湿交替层以下黄土剖面,土壤含水量变化较小,可称之为相对稳定层。土壤含水率在土壤剖面上的这种变化特征是由于降水量的年际差异(表 2)和降水入渗深度的不同所造成,降水入渗深度不同包括同一土地利用类型下不同年份之间和不同土地利用方式之间入渗深度的差异。从图 1 可以看出,苜蓿草地 2 m 以下土层土壤水分随苜蓿年限增加而逐年减少,尤其是在约 6—12m 土层范围内表现出了明显年际变化,与 Li 等<sup>[3]</sup>的研究结论相符。其原因在于苜蓿根系直接吸水层超过 10m 深度<sup>[19]</sup>,能够吸收利用深层土壤水分以满足生长所需,因而 2 m 以下深层土壤水分在苜蓿的强烈蒸腾耗水作用下逐年减少,但是其与干湿交替层水分变化相比,则相对稳定。

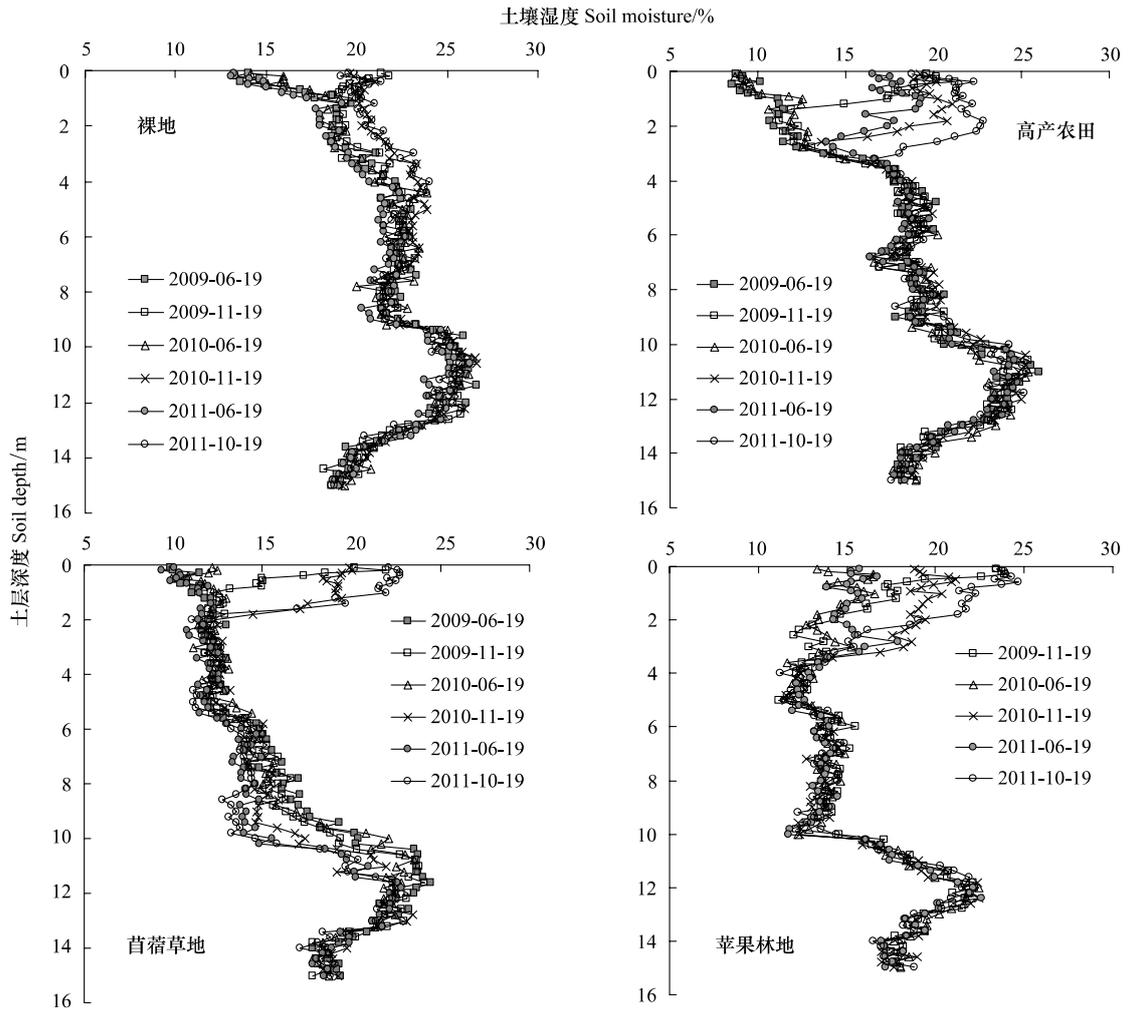


图 1 不同土地利用方式下土壤水分剖面

Fig. 1 Soil moisture profiles under different land use patterns

表 2 研究区 2007—2011 年降水量

Table 2 Annual precipitations from 2007 to 2011

年 Year	2007	2008	2009	2010	2011
降水量 Precipitation /mm	446	539	500	576	680

### 2.2 土壤水分动态变化

土壤水分由于受气候、土壤、利用方式等因素的影响,经常处于动态变化之中。干湿交替层因易受降水入渗补给、蒸散耗水的影响,其水分具有明显的季节性波动变化特征。黄土高原在 1a 之中,土壤储水量的变化可分为 2 个主要的时期,即雨季蓄水期(7—10 月)和失水期(10 月—翌年 6 月)<sup>[20]</sup>,蓄水期和失水期并无十分严格的时间界限,与雨季开始时间及持续时间长短有关。由图 2 可以看出,裸地、苜蓿草地和苹果林地干湿交替层内土壤储水量具有相似的季节变化:因强烈的蒸腾蒸发作用,每年 6 月到

7 月期间土壤储水量降至全年最低值,经过雨季降水补偿,至 10—11 月期间土壤储水量升至全年最高值。而高产农田干湿交替层土壤储水量的季节变化与种植作物类型有关。冬小麦生育期处于当年雨季后和翌年雨季来临之前的旱季,小麦种植后至 3 月底拔节前,土壤水分含量较高且稳定,3 月底以后,土壤湿度逐层降低,至小麦收获期,土壤储水量降至全年最低值;雨季开始后,土壤水分逐渐恢复,恢复度受雨季降雨量影响。春玉米主要生长期与雨季吻合,雨季降水能满足其生长发育的水分需求,因而干湿交替层内土壤储水量季节变化平缓。

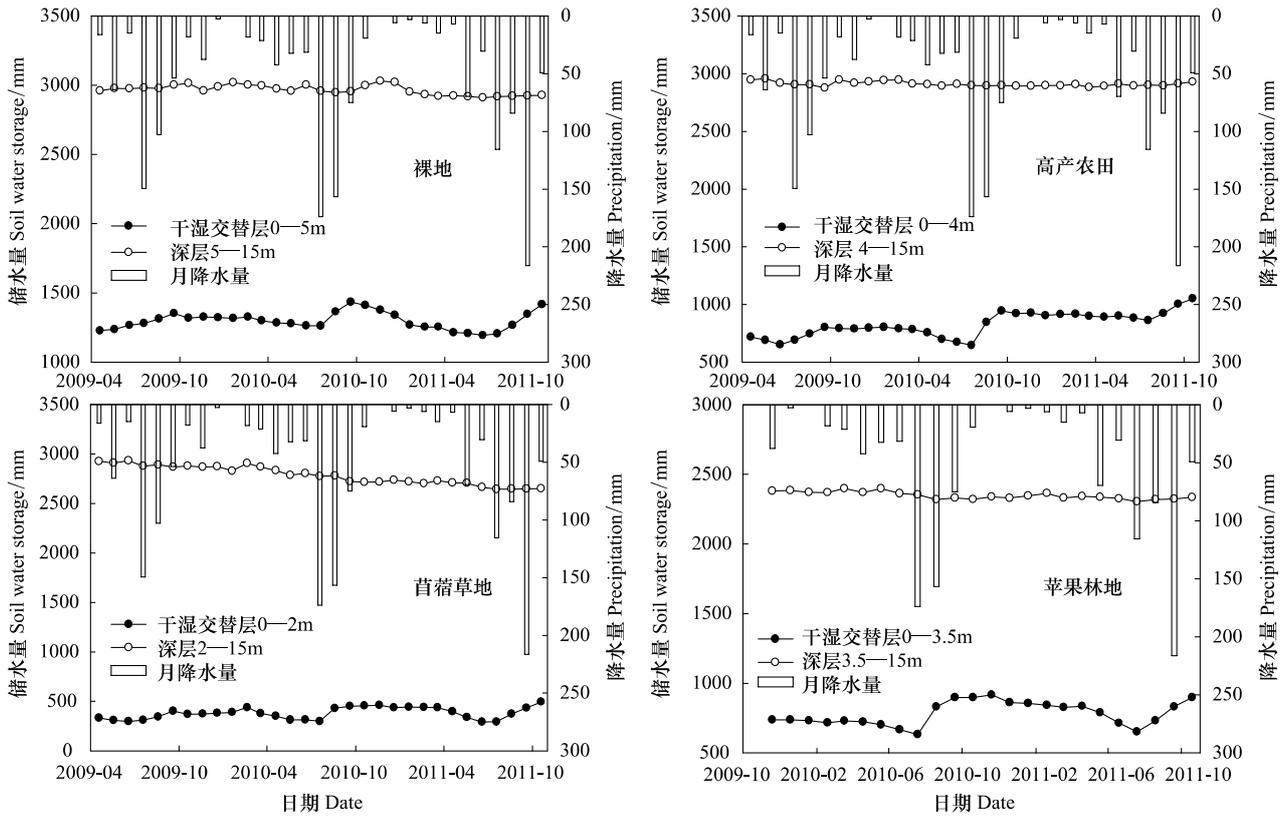


图2 不同土地利用方式下土壤储水量的动态变化

Fig. 2 Dynamics of soil water storage under different land use patterns

相对于干湿交替层,深层土层接受降水补给较少,其土壤水分状况主要受植物利用影响,因而土壤储水量动态变化较小,且不同土地利用方式下深层土壤水分有着不同的动态变化特征。裸地因整层土层湿润,因而其深层土壤水能够得到降水补给,但是这种补给往往是在雨季结束后土壤水分的再分配过程中发生的,且补给量有限;因而与干湿交替层相比,裸地深层土壤储水量的季节变化具有一定的滞后性(图2),且变化较小。高产农田深层土壤储水量则基本不随时间变化(图2),其原因有两点:一是农作物根系较浅,对深层土壤水利用有限;二是农田深层土壤水分接受降水补偿有限。相关研究表明长武高产农田条件下,年降水入渗深度至3m土层以下需要9.8a才能出现1次<sup>[21]</sup>,说明在绝大多数年份里高产农田深层土壤水分将不能得到降水补给。苜蓿具有极深的吸水根系,因而苜蓿能够吸收深层土壤储水以供生长之需。回归分析显示,苜蓿2—15m土层土壤储水量与时间序列具有极显著( $P = 0.01$ )的线性关系,其关系式为:

$$Y = -9.904 X + 2940.3 \quad (R^2 = 0.958) \quad (4)$$

式中, $Y$ 为2—15m土层土壤储水量(mm), $X$ 为时间(月)2009年4月为第1次测定,2011年10月为第32次测定。表明随着苜蓿生长年限延长,苜蓿草地深层土壤储水量在研究时段内表现出了直线下降的趋势(图3)。从图2可以看出,从2009年4月到2011年10月,苜蓿草地深层储水量由2925mm减少到2644mm,减少了281mm。同苜蓿一样,苹果树亦具有较深的根系,但是苹果林地在大约4—10m土

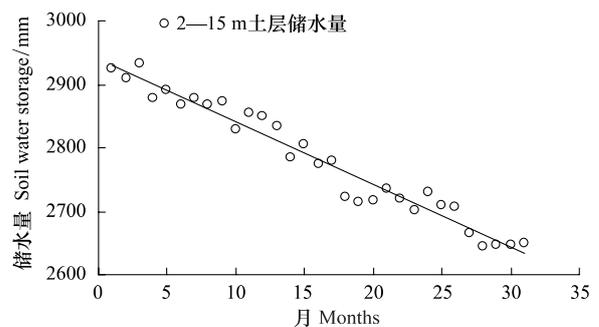


图3 苜蓿草地深层土壤储水量变化

Fig. 3 The variation of soil water storage in deep soil layer of alfalfa grassland

层已经形成了稳定的低湿层(图1),其深层储水量在研究时段内由 2380 mm 减少到 2323 mm,减少了 57 mm,时间变化较小(图2)。

### 2.3 土壤水分亏缺及土壤干层

在黄土地区,由于蒸发量大于降水量,地下水埋藏很深,致使土壤水分经常处于亏缺状态。土壤水分亏缺量是指土壤储水量与田间持水量之间的差额<sup>[22]</sup>。由图1可知,高产农田土壤水分亏缺主要发生在 10 m 以上土层,亏缺量为 309 mm,而苜蓿草地和苹果林地在测定土层范围内都发生了土壤水分亏缺,亏缺量分别为 1146 mm 和 1057 mm。可以看出,人工林草地土壤水分亏缺,不论在影响深度还是在亏缺程度上都远大于农田,这种亏缺是人工林草逐年吸取深层土壤水分以补充植被蒸散所需缺额造成。

高耗水人工林草的参与,使水分亏缺向深层土层发展,土壤水分处于负平衡之中,最终将在土体某一深度范围形成厚度不等的低湿层——土壤干层<sup>[20]</sup>。土壤干层具有以下特点:一是土壤干层湿度介于萎蔫湿度和土壤稳定湿度之间;二是位于土体某一深度范围内;三是干燥化程度因植物种类和生长年限而定<sup>[7,18]</sup>。研究区土壤稳定湿度为田间持水

量的 70%<sup>[23]</sup> 约为 15%。从图1可以看出,除裸地外,高产农田、苜蓿草地和苹果林地均有土壤干层存在,所不同的是,高产农田下土壤干层为暂时性干层,分布土层范围约为 1—3 m,在丰水年里,该层内土壤水分将得到恢复<sup>[21]</sup>。而苜蓿草地和苹果林地则已形成了持久性干层,具有较大的水分亏缺量和极深的干层厚度,因此即使在丰水年,此类干层也不能得到恢复。这种土壤干层,使深层土壤水库调蓄水分作用减弱甚至消失,可能会对林草自身的生长和区域水分循环造成一定的影响<sup>[7]</sup>。

### 2.4 不同土地利用方式对深层土壤水分环境的影响

黄土塬区,不同土地利用方式下土壤中水分的储量和分布,受植物耗水特征的影响而产生分异。从图1可以看出,经过雨季降水补给,各土地利用方式下干湿交替层内土壤水分得到一定程度的恢复,接近或达到田间持水量,然而其深层土壤湿度剖面有很大差异。图1中4类土地利用方式下土壤水分曲线可以分为3类:第1类为裸地,第2类为高产农田,第3类为苜蓿草地和苹果林地。以2011年10月为例,利用方差分析来比较不同土地利用方式下 0—15 m 土层含水量,结果见表3。

表3 2011年10月不同土地利用方式下土壤含水量(平均值±标准差)/%

Table 3 Soil water content under different land use patterns in October, 2011 (Mean ± Standard Deviation) /%

土层 Soil layer/m	裸地 Bare land	高产农田 High-yield farmland	苜蓿草地 Alfalfa grassland	苹果林地 Apple orchard
0—2	21.3±0.6abc	21.4±1.1abc	20.1±3.8b	22.6±1.5c
2—4	23.5±1.0a	18.8±1.9b	12.1±0.4c	14.6±2.1d
4—6	23.8±0.8a	19.0±0.4b	12.2±1.0c	12.8±0.9c
6—8	23.0±0.6a	18.7±0.9b	14.2±0.3c	13.9±0.6c
8—10	23.8±1.5a	20.4±1.8b	13.6±0.5c	13.4±0.6c
10—13	25.4±1.1a	24.1±0.9a	20.7±1.8c	19.7±2.0c
13—15	20.9±0.9a	20.0±0.9a	18.8±1.1c	17.8±0.8c

同行不同字母表示差异达到极显著水平( $P=0.01$ )

裸地因无植被蒸腾耗水而整层湿润,0—15 m 剖面内平均湿度为 23.1%。除 13 m 以下土层湿度稍低外,剖面其他部位均已达到或超过了田间持水量。因高产引起的高蒸散量,使得高产农田 2—10 m 土层土壤含水率极显著低于裸地,表明高产农田对土壤水分环境影响深度已达 10 m 深度。研究区,高产作物根系直接吸水层约为 0—3 m 土层<sup>[3]</sup>,而 3 m 以下土壤储水则是在土壤水势梯度差的作用下向上运

动,最终为农作物所消耗。高产农田 0—15 m 剖面内平均湿度为 20.6%。由于蒸散需水量超过年降水量,苜蓿草地和苹果林地引起了深层土层干燥化,干燥化土层已延至 10 m 以下深度。由表3可以看出,苜蓿草地和苹果林地在 2—15 m 土层范围内土壤含水率极显著低于裸地和高产农田,说明了它们对土壤水分环境所能影响的深度。有研究表明,23a 苜蓿草地干燥化土层已延伸至 20 m 以下土层<sup>[15]</sup>,因此

可以认为随着苜蓿年限的增加,其下干燥化土层将继续向更深土层发展。研究区 14a 苹果林地和 32 年苹果林地在 0—10 m 土层内土壤水分分布相差不大<sup>[9]</sup>,表明 14a 以上的苹果林地已形成了稳定的深层土壤干层,深层土壤水库调蓄水分作用减弱,果树蒸散所需水分主要依靠年度降水供应,其产量不可避免的随年际降水变化而波动。以上分析表明,不同土地利用方式对深层土壤水环境影响具有极显著的差异,其影响大小依次为苜蓿草地>苹果林地>高产农田>裸地。

## 2.5 不同土地利用方式下土壤水量平衡

水量平衡是说明生态系统功能和特征的重要指标之一。土壤水量平衡计算中,计算土体深度的选择至关重要,深度选择不当会给植物与水分关系研究带来失真的结论,以致给阐述二者的关系带来困难。以苜蓿草地为例,分别按 2 m 和 15 m 深度计算时,其在 2009 年 11 月至 2011 年 10 月间蒸散量分别为 1091 mm 和 1310 mm,与同期降水量(1212 mm)分别相差 121 mm 和 -98 mm,土壤水分收支状况分别为正补偿和负补偿。为此,本文选择了不同土体深度,利用公式 2 对不同土地利用方式下 2009 年 11 月至 2011 年 10 月的蒸散量进行了计算,结果如图 4 所示。

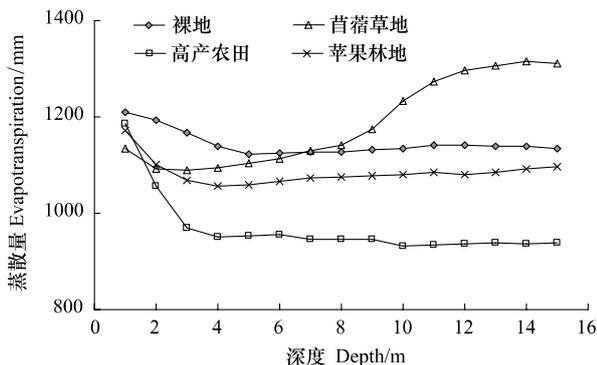


图 4 计算深度对蒸散量计算结果的影响

Fig. 4 Influence of calculated thickness on calculated result for evapotranspiration

各土地利用方式下按照不同土体深度计算所得蒸散量具有明显差异,原因在于各土地利用方式下蒸散作用层深度不同,其涉及到作物根系的吸水深度以及降水的入渗深度。通过对比一定时段内不同深度土壤水量平衡结果,则可初步确定水量平衡分析所需选择的土体深度。从图 4 可以看出,裸地和

高产麦田蒸散量计算结果随着计算深度增加而减小,所不同的是裸地至 5 m 深度后基本保持稳定,高产农田 4 m 深度后基本保持稳定。苜蓿草地和苹果林地蒸散量计算结果首先随着计算深度增加减小,在一定深度后又随着计算深度增加而增加,至 15 m 深度时最大。苜蓿草地蒸散量计算结果在 2 m 深度后随着计算深度增加而增加,其分别按 2、5、10 m 和 15 m 深度计算时,蒸散量分别为 1091、1103、1233 mm 和 1310 mm,变化较大。苹果林地蒸散量计算结果在 4 m 深度后随着计算深度增加而增加,其分别按 4、5、10 m 和 15 m 深度计算时,蒸散量分别为 1056、1059、1080 mm 和 1096 mm,变化不大。

可见,不同土地利用方式下进行水量平衡计算时选择的计算深度应不同。对于裸地和高产农田,计算深度分别不宜小于 5 和 4 m。而对于高耗水的苜蓿草地和苹果林地,不同的生长阶段所选计算深度也应不同。人工林草种植初期至旺盛期的一段时间,因土壤深处储水丰富,能够满足植物生长所需水分要求,此时苹果林地计算深度不宜小于 10 m,苜蓿草地计算深度不宜小于 15 m。随着深层土壤水分的消耗,林草地下最终将会形成深厚而稳定的土壤干层,土壤水库水分调节作用减弱,植物生长所需水分主要依靠年度降水供给,此时林草地计算深度可选取降水入渗深度为限。以 1994 年种植苹果林为例,其按 4 m 深度以 2a 为时间尺度计算所得蒸散量为按 15 m 深度计算所得结果的 96.3%,可见以降水入渗深度为计算深度对水量平衡分析结果影响不大。

## 3 结论

(1) 不同土地利用方式下干湿交替层深度范围有别,裸地、高产农田、苜蓿草地和苹果林地分别约为 0—5 m, 0—4 m, 0—2 m 和 0—3.5 m。受降水入渗补给、蒸散等因素影响,干湿交替层内土壤水分具有明显的季节性波动变化特征;而干湿交替层以下深层土壤水分主要受土地利用影响,各土地利用方式下表现出不同的动态变化特征:裸地深层土壤储水量的季节变化较干湿交替层具有一定的滞后性,且变化小;高产农田深层土壤储水量基本不随时间变化;苜蓿草地深层土壤储水量随苜蓿年限增加而具有直线下降特征;苹果林地因具有稳定的深层土壤干层,其深层土壤储水量随时间变化较小。

(2) 不同土地利用方式对深层土壤水环境影响具有极显著差异,与裸地相比较,其影响大小依次为苜蓿草地>苹果林地>高产农田。除裸地外,高产农田、苜蓿草地和苹果林地均发生了土壤水分亏缺,并形成了土壤干层,所不同的是高产农田下土壤干层为暂时性干层,分布土层范围约为1—3 m;而苜蓿草地和苹果林地因对深层土壤水分的过度消耗,已形成了持久性干层,且干层已延至10 m以下土层。

(3) 在黄土塬区进行水量平衡计算时,不同土地利用方式选择的计算深度应不同,处于不同生长阶段的高耗水林草所选计算深度也应不同。对于裸地和高产农田,计算深度不宜小于5和4 m。对于未形成深厚稳定土壤干层的苜蓿地和苹果地来说,其计算深度不宜小于15 m和10 m;而对于已经形成稳定土壤干层的苜蓿地和苹果地来说,进行年尺度的水量平衡分析时,其计算深度可取降水入渗深度。

处于不同生长阶段的林草地对深层土壤水环境影响程度不同,其进行水量平衡计算时所需选择深度亦不同,但是不同类型林草地形成深厚且稳定的土壤干层所需年限不同,土壤干层厚度亦不同,因而有关不同林草地下深层土壤干燥化发展过程是一个需要继续长期观测研究的科学问题。

致谢:感谢朱元俊老师对本文写作的帮助。

#### References:

- [1] Li Y S, Han S F, Wang Z H. Soil water properties and its zonation in the Loess Plateau. *Memoir of Northwest Institute of Soil and Water Conservation*, 1985(2): 1-17.
- [2] Mu X M, Xu X X, Wang W L, Wen Z M, Du F. Impact of artificial forest on soil moisture of the deep soil layer on loess plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(02): 210-217.
- [3] Li Y S. Productivity dynamic of alfalfa and its effects on water eco-environment. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(03): 404-411.
- [4] Li J, Chen B, Li X F, Zhao Y J, Ciren Y J, Jiang B, Hu W, Cheng J M, Shao M A. Effects of deep soil desiccation on artificial forestlands in different vegetation zones on the Loess Plateau of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1429-1445.
- [5] Chen L D, Huang Z L, Gong J, Fu B J, Huang Y L. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China. *Catena*, 2007, 70(2): 200-208.
- [6] Huang M B, Dang T H, Gallichand J, Goulet M. Effect of increased fertilizer applications to wheat crop on soil-water depletion in the Loess Plateau, China. *Agricultural Water Management*, 2003, 58(3): 267-278.
- [7] Li Y S. Effects of forest on water circle on the Loess Plateau. *Journey of Natural Resources*, 2001, 16(5): 427-432.
- [8] Li Y S. Fluctuation of yield on high-yield field and desiccation of the soil on dryland. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(03): 354-356.
- [9] Huang M B, Yang X M, Li Y S. Effect of apple base on regional water cycle in weibe upland of the Loess Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(01): 7-13.
- [10] Li J, Chen B, Li X F, Zhao Y J, Ciren Y J, Jiang B, Hu W. Soil desiccating effects of forestlands, grasslands and croplands in zones different in rainfall pattern on the loess plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(01): 40-49.
- [11] Fan J, Hao M D, Shao M A. Water consumption of deep soil layers and eco-environmental effects of agricultural ecosystem in the Loess Plateau. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(1): 61-64.
- [12] Wang Z Q, Liu B Y, Zhang Y. Soil moisture of different vegetation types on the Loess Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(6): 707-718.
- [13] Wang Z Q, Liu B Y, Liu G, Zhang Y X. Soil water depletion depth by planted vegetation on the Loess Plateau. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2009, 52(6): 835-842.
- [14] Cheng L P, Liu W Z. Characteristics of stable isotopes in soil water under several typical land use patterns on Loess Tableland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(3): 651-658.
- [15] Cheng L P, Liu W Z. Soil moisture distribution in deep layers and its response to different land use patterns on the Loess Tableland. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(9): 203-207.
- [16] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P, Warrington D N. Regional spatial pattern of deep soil water content and its influencing factors. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 2012, 57(2): 265-281.
- [17] Wang Y Q. Spatial Distribution and Influence Factors of Dried Soil Layers across the Loess Plateau [D]. Beijing: Graduate university of the Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [18] Wang R, Liu W Z, Li Z. Physical properties of soil along a 10m deep soil profile in Loess Tableland. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(3): 550-554.
- [19] Li Y S, Huang M B. Pasture yield and soil water depletion of continuous growing alfalfa in the Loess Plateau of China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 124(1/2): 24-32.
- [20] Yang W Z, Shao M A. Research on Soil Moisture on the Loess Plateau. Beijing, Science Press, 2000: 86-107.
- [21] Liu W Z, Zhang X C, Dang T H, Zhu O Y, Li Z, Wang J, Wang R, Gao C Q. Soil water dynamics and deep soil recharge in a

record wet year in the southern Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1133-1138.

- [22] Li Y S. The properties of water cycle in soil and their effect on water cycle for land in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 1983, 3(2): 91-101.
- [23] Yang W Z, Tian J L. Essential exploration of soil aridization in loess plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 1-6.

#### 参考文献:

- [1] 李玉山, 韩仕峰, 汪正华. 黄土高原土壤水分性质及其分区. *中国科学院西北水土保持研究所集刊*, 1985(2): 1-17.
- [2] 穆兴民, 徐学选, 王文龙, 温仲明, 杜峰. 黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响. *土壤学报*, 2003, 40(2): 210-217.
- [3] 李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应. *土壤学报*, 2002, 39(3): 404-411.
- [7] 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.
- [8] 李玉山. 旱作高产田产量波动性和土壤干燥化. *土壤学报*, 2001, 38(3): 354-356.
- [9] 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. *地理学报*, 2001, 56(1): 7-13.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [14] 程立平, 刘文兆, 黄土塬区几种典型土地利用类型的土壤水稳定同位素特征. *应用生态学报*, 2012, 23(3): 651-658.
- [15] 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. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 203-207.
- [17] 王云强, 黄土高原地区土壤干层的空间分布与影响因素[D]. 北京, 中国科学院研究生院, 2010.
- [18] 王锐, 刘文兆, 李志. 黄土塬区 10m 深剖面土壤物理性质研究. *土壤学报*, 2008, 45(3): 550-554.
- [20] 杨文治, 邵明安, 黄土高原土壤水分研究. 北京: 科学出版社, 2000: 86-107.
- [22] 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. *生态学报*, 1983, 3(2): 91-101.
- [23] 杨文治, 田均良. 黄土高原土壤干燥化问题探源. *土壤学报*, 2004, 41(1): 1-6.