

# 黄土塬区深剖面土壤水分垂直分布特征及其时间稳定性

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

(<sup>1</sup>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, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; <sup>3</sup>西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; <sup>4</sup>平顶山学院, 河南平顶山 467000)

**摘要** 研究土地利用方式对深剖面土壤水分时空动态的影响, 对于了解区域水循环在变化环境下的表现特征具有重要意义. 本研究基于长期定位监测数据, 对2012年9月至2015年12月黄土塬区4种土地利用方式0~15 m剖面土壤水分状况进行分析. 结果表明: 苜蓿草地(>7年)、休闲地、高产农田和低产农田平均土壤含水量分别为15.1%、22.0%、19.6%和21.1%(0~15 m、年度平均值); 干湿交替层季节性失水和蓄水分别出现在3—6月和7—10月, 其深度范围分别为0~2、0~4.6、0~3和0~4.2 m. 深层土壤水分具有较好的时间稳定性, 其垂直分布受土地利用方式的影响. 观测年份内苜蓿产量和耗水量均呈逐年增加趋势, 造成深层土壤的干燥化程度加大, 2~10 m土层形成稳定土壤干层, 阻断了降水补给地下水的途径. 对于其他3种土地利用方式下的土壤水分平衡, 冬小麦生长季农田与休闲地均表现为负平衡; 玉米生长季高产农田表现为负平衡, 而低产农田与休闲地表现为正平衡; 在作物休闲期, 农田与休闲地均表现为正平衡. 通过施肥处理所形成的高产农田的作物水分利用效率是低产农田的3倍以上.

**关键词** 土地利用方式; 土壤水分; 时空变化; 土壤干层; 黄土塬区

**Vertical distribution characteristics and temporal stability of soil water in deep profile on the Loess Tableland, Northwest China.** HAN Xiao-yang<sup>1,2</sup>, LIU Wen-zhao<sup>1,3\*</sup>, CHENG Li-ping<sup>4</sup>  
(<sup>1</sup>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 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup>State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; <sup>3</sup>Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>4</sup>Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, Henan, China).

**Abstract:** Study of impacts of land uses on spatiotemporal dynamics of soil water content (SWC) is of great significance for understanding the performance characteristics of regional water cycling under changing environment. Based on long-term located field observations, this paper explored the temporal dynamics of soil water in 0–15 m soil profile under four land use types on the Loess Tableland from September 2012 to December 2015. Results showed that the annually averaged SWCs over the 0–15 m soil profile for alfalfa field, fallow field, fertilized cropland and unfertilized cropland were 15.1%, 22.0%, 19.6% and 21.1%, respectively. Soil water contents along the shallow soil profile exhibited seasonal and annual wetting and drying cycle from March to June and July to October, and the profile depths were 0–2, 0–4.6, 0–3 and 0–4.2 m, respectively. Soil water contents along the deep soil profiles had better temporal stability and were influenced by land-use types. During the observation years, the yield and water consumption in alfalfa field increased, which caused the increase of deep soil desiccation, the 2–10 m soil profile had become stable dry layer, blocking

本文由国家自然科学基金项目(41571036/41401015)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41571036, 41401015).

2016-07-06 Received, 2016-11-16 Accepted.

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

the way of precipitation recharge. As for the soil water balance in other three land use types, it was negative in cropland and fallow field during winter wheat growing season, however, during spring maize growing season, it was negative in fertilized cropland but positive in unfertilized cropland and fallow field. During the fallow period, it was positive in the three land use types. The crop water use efficiency in the fertilized cropland was increased by more than 3 times than the unfertilized cropland.

**Key words:** land use type; soil water; spatiotemporal variation; soil dry layer; Loess Tableland.

在旱地农田生态系统水平衡与水循环中,土壤水分状况起着表现、影响乃至主导的作用.土壤水资源是陆地水资源的重要组成部分,黄土高原深厚的黄土覆盖为雨水转化为土壤水创造了得天独厚的条件,因而具有类似水库的功能,可蓄积降水、长期保存、调节洪枯、持续供应植物<sup>[1]</sup>.近年来,随着农业生产、植被恢复与生态建设的不断推进,黄土高原土壤水分的限制作用日益突出<sup>[2]</sup>,农田和林草地均出现土壤干燥化现象,水分循环过程受到影响<sup>[3-9]</sup>.因此,深层土壤水分动态及土壤干燥化研究已成为当前黄土高原土壤水分研究的热点问题<sup>[10-14]</sup>.

土壤水分在接受降水补充的同时,还受大气蒸发力的影响,以土壤蒸发和作物蒸腾的形式回到大气中,引起土壤水分的时空变化.杨文治等<sup>[15]</sup>把关中西部旱塬土壤水分划分为冬春上层土壤缓慢蒸发期、晚春初夏土壤干湿交替期、雨季水分恢复和下淋期、秋末冬初水分上移蒸发消耗期 4 个时期;陈洪松等<sup>[16]</sup>研究表明,黄土区荒草地和裸地土壤水分动态变化的季节性可分为 3 个主要时期:春季失墒期、夏秋增失交替期和冬季相对稳定期;程立平<sup>[17]</sup>将黄土塬区内土壤储水量变化分为 3 个阶段:土壤水分消耗期(3—7 月)、土壤水分恢复期(7—10 月)和土壤水分相对稳定期(10 月至翌年 3 月).在土壤垂直剖面上,受干湿季的影响,0~2 m 土层处于水分消耗和降雨补充的干湿交替过程中,这种影响随着深度的增加而减弱,2 m 以下土层含水量的变化幅度较小<sup>[18]</sup>.土壤水分剖面可分为土壤水分交换活跃层、土壤水分双向补偿层和土壤水分相对稳定层 3 个层次<sup>[19]</sup>.处于生长期的植物根系对土壤水分的垂直分布也有重要影响,导致不同土地利用方式的土壤垂直剖面的水分差异巨大.樊军等<sup>[20]</sup>研究了渭北旱塬不同土地利用方式下深层土壤含水率的变化特征,认为苹果树的大面积种植加快了土壤深层水分消耗.李玉山<sup>[18]</sup>研究认为,黄土高原 1 年生高产作物利用水分的深度达到 5 m,13 年苜蓿根系直接吸水层已达 10 m 以下;Wang 等<sup>[21]</sup>在黄土丘陵区的研究表明,7 年生苜蓿、23 龄人工柠条和油松的耗水深

度分别达 15.5、22.4 和 21.5 m,多年连续种植会对陆地水分循环产生影响.

Vachaud 等<sup>[22]</sup>发现,土壤水分的空间分布随时间的变化很小,且某一监测点的土壤水分可以代表研究区的平均状况.随后,这一现象被定义为土壤水分的空间分布在时间上的稳定性<sup>[23]</sup>,并得到广泛应用<sup>[24-27]</sup>.基于长武试验站塬面水热运动观测场数据,对于深剖面土壤水分和土壤温度的时空变异研究也取得了重要进展<sup>[14, 28-29]</sup>,但对该区不同土地利用条件下深剖面土壤水分的垂直分布及其时间稳定性还需进一步研究.因此,本文针对 2012 年 9 月至 2015 年 12 月深剖面土壤水分的时空变化过程,通过时间稳定性分析确定了各土地利用方式土壤水分的代表性深度,并对产量与耗水量的关系进行分析,以期阐明该区典型土地利用方式下土壤水分平衡及其运动特征,为区域土地利用方式变更对水循环的可能影响提供试验依据.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原南部塬区的中国科学院长武农业生态试验站(35.14° N, 107.41° E, 海拔 1220 m).该区属暖温带半湿润大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨.1 月平均气温 -5.1 °C, 7 月平均气温 22.4 °C, 年均气温 9.1 °C,  $\geq 10$  °C 年积温 2994 °C, 年日照时数 2218 h, 无霜期 171 d, 年均降水量 584 mm, 年均潜在蒸散 949 mm<sup>[30]</sup>.该区土层深厚,地带性土壤为粘黑垆土,母质为马兰黄土,在黄土高原土壤质地带中,属中壤带<sup>[31]</sup>;深厚土层和良好物理性质给植物根系生长提供了有利的生态条件,一年生小麦、玉米根系可伸至 2 m 以下;0~10 m 剖面田间持水量和凋萎湿度分别为 21.9% 和 8.1% (质量含水量)<sup>[32]</sup>,土壤容重在 1.2~1.4 g·cm<sup>-3</sup><sup>[33]</sup>.2012—2015 年 7—9 月降水量分别为 305.2、392.2、345.1 和 234.6 mm(图 1).

### 1.2 研究方法

观测地点为长武农业生态试验站塬地深剖面土

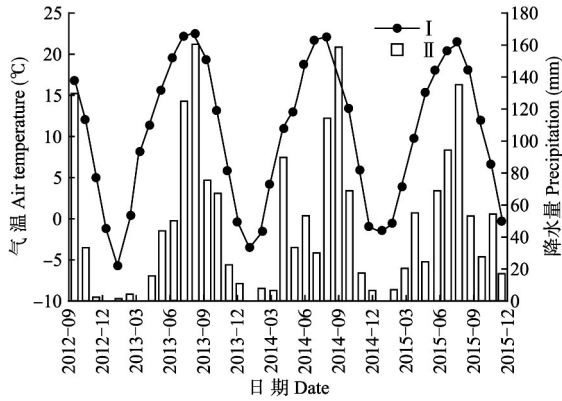


图1 观测时段内气温和降水的季节分布

Fig.1 Seasonal distribution of air temperature and precipitation during the study period.

I: 气温 Air temperature; II: 降水量 Precipitation.

壤水热运动观测场,该观测场建成于2005年,共设4种土地利用方式,分别为苜蓿草地、休闲地、高产农田和低产农田(不施肥处理),小区面积 $100\text{ m}^2$  ( $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ ),小区之间用薄钢板镶嵌隔开以阻断土壤水分和养分水平交换,嵌入深度为 $10\text{ m}$ .农田小区为冬小麦-冬小麦-春玉米轮作,其中,2013和2015年种植冬小麦,2014年种植春玉米,紫花苜蓿种植于2005年,4个小区的基本情况见表1.

在4个小区各自中央分别安装1根 $15\text{ m}$ 长的中子管,由CNC503DR型中子仪测定土壤含水量, $0\sim 1\text{ m}$ 内每 $10\text{ cm}$ 测定一次, $1\sim 15\text{ m}$ 每 $20\text{ cm}$ 测定一次.观测时段为2012年9月至2015年12月,每月测定一次,共测定40次.中子仪测定前需采用烘干法进行标定.

### 1.3 数据处理

本文应用的统计学分析主要通过Excel 2013和SPSS 19.0软件实现.

#### 1.3.1 土壤储水量计算 土壤储水量(SWS)为一定

表1 4种土地利用方式的基本情况

Table 1 General information of the four land use types

土地利用方式 Land use type	土壤容重 Soil bulk density ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	管理方式 Management type
苜蓿草地 Alfalfa field	1.34	一年3次刈割,计总生物量
休闲地 Fallow field	1.29	定期除草,无植物生长
高产农田 Fertilized cropland	1.24	氮肥和磷肥分别为 $120$ 和 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
低产农田 Unfertilized cropland	1.25	播种方式与高产田相同,不施肥

土壤容重为 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层数据 Soil bulk density was the data at  $0\sim 20\text{ cm}$  soil layer.

厚度( $h$ )土壤中所含的水量,计算公式为:

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

式中: SWS为土壤储水量( $\text{mm}$ );  $\theta_i$ 为第 $i$ 层(共 $n$ 层)土壤体积含水量( $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ );  $h_i$ 为该土层厚度( $\text{mm}$ ).

#### 1.3.2 蒸散量计算 土壤水量平衡计算的一般形式为:

$$\Delta W = (P+I+U) - (R+D+E+T) \quad (2)$$

式中:  $\Delta W$ 为观测时段蒸散作用层内土壤贮水量的变化( $\text{mm}$ );  $P$ 为降水量( $\text{mm}$ );  $I$ 为灌溉量( $\text{mm}$ );  $U$ 为毛管上升到蒸散作用层内的水量( $\text{mm}$ );  $R$ 为地面径流流出量( $\text{mm}$ );  $D$ 为向下排出蒸散作用层的水量( $\text{mm}$ );  $E$ 为土壤蒸发量( $\text{mm}$ );  $T$ 为植物蒸腾量( $\text{mm}$ ).其中,土壤蒸发和植物蒸腾之和即为蒸散量( $ET$ ),也称为耗水量.本试验观测场水量平衡计算公式可简化为:

$$ET = P - \Delta W \quad (3)$$

#### 1.3.3 土壤水分时间稳定性分析 采用相对差分(relative difference, RD)分析不同土地利用方式剖面土壤含水量(SWC)的时间稳定性<sup>[22, 27]</sup>.第 $i$ 土层在 $j$ 时间的相对差分( $RD_{ij}$ )的计算公式为:

$$RD_{ij} = \frac{SWC_{ij} - \overline{SWC_j}}{\overline{SWC_j}} \quad (4)$$

以 $20\text{ cm}$ 为一层, $0\sim 15\text{ m}$ 剖面共75层.其中:  $SWC_{ij}$ 为第 $i$ 层在 $j$ 时间的土壤含水量值;  $\overline{SWC_j}$ 为土壤剖面( $n$ 层,  $n=75$ )含水量在 $j$ 时间的平均值.

$$\overline{SWC_j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n SWC_{ij} \quad (5)$$

土壤水分相对差分(RD)在时间上的平均值(mean relative difference, MRD)及其对应的标准差(standard deviation of relative difference, SDRD)计算公式分别为:

$$MRD_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m RD_{ij} \quad (6)$$

$$SDRD_i = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (RD_{ij} - MRD_i)^2} \quad (7)$$

式中:  $m$ 为测定次数.

相对差分分析可用来判断剖面土壤水分随时间的变异程度.如果某一土层土壤水分在观测时段内的MRD越接近0且SDRD也较小,该土层的土壤水分数据与剖面平均水平差异较小,即为限定剖面土壤水分含量的代表性土层.理论上,垂直剖面各土层

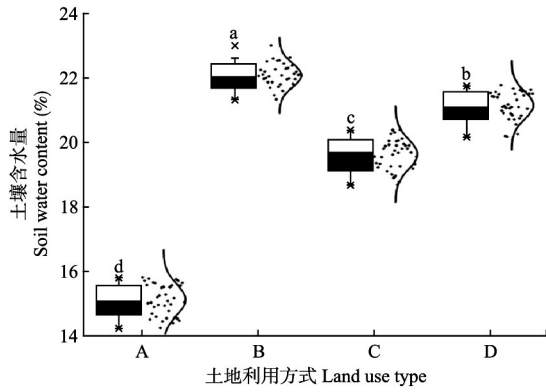


图 2 4 种土地利用方式剖面平均土壤含水量概况  
**Fig.2** General situation of average SWC of four land use types.  
 A: 苜蓿草地 Alfalfa field; B: 休闲地 Fallow field; C: 高产农田 Fertilized cropland; D: 低产农田 Unfertilized cropland. 下同 The same below. 点、线表示土壤含水量及其正态分布 Dots and line besides the box represented the SWC and their normal distribution. 不同小写字母表示不同土地利用方式间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different small letters represented significant difference among different land use types at 0.05 level.

土壤含水量的时间变化愈向下愈稳定,但由于利用方式的差别,代表性土层的位置及各土层含水量时间变化特征也有不同.

## 2 结果与分析

### 2.1 4 种土地利用方式 15 m 剖面土壤水分概况

从图 2 可以看出,2012 年 9 月—2015 年 12 月,研究区苜蓿草地、休闲地、高产农田和低产农田 0~15 m 剖面平均土壤含水量分别为  $(15.1 \pm 0.5)\%$ 、 $(22.0 \pm 0.4)\%$ 、 $(19.6 \pm 0.5)\%$  和  $(21.1 \pm 0.4)\%$ ,变化范围分别为  $14.2\% \sim 15.8\%$ 、 $21.3\% \sim 23.0\%$ 、 $18.7\% \sim 20.4\%$  和  $20.2\% \sim 21.7\%$ .4 种土地利用方式土壤含水量差异达显著水平 ( $P < 0.05$ ).长期休闲地剖面平

均土壤含水量基本维持在田间持水量水平,低产农田土壤含水量则略低于田间持水量.苜蓿草地 ( $>7$  年)剖面平均土壤含水量显著低于其他 3 种利用方式,且土壤水分随时间变异程度最大.

### 2.2 深剖面土壤水分及其时间变异的垂直分布特征

不同土地利用方式下剖面各土层间土壤水分的数值分布和时间变化具有明显的垂直分异.由于降水的季节性分布和植物根系的作用,浅层土壤水分呈现出季节和年际间的变异,这种变异随深度的增加而减小,深层土壤水分的变异性相对较小.

土壤水分变化较为剧烈的土层即为干湿交替层<sup>[17]</sup>.由图 3 中土壤水分的标准差及变异系数可以看出,不同土地利用方式干湿交替层的深度不同.苜蓿草地、休闲地、高产农田和低产农田干湿交替层分别为 0~2.0~4.6、0~3 和 0~4.2 m,且土壤水分时间变异顺序为苜蓿草地>高产农田>低产农田>休闲地.剖面平均变异系数分别为 6.4%、5.4%、4.5%和 4.0%.干湿交替层以下土壤水分变化较小,为相对稳定层<sup>[17]</sup>.苜蓿草地和高产农田的相对稳定层土壤水分的变异程度大于休闲地和低产农田,表明耕作及植物季节性生长增大了土壤水分的离散程度和时间变异性.

### 2.3 深剖面土壤水分的季节和年际变化

干湿交替层土壤水分受降水和蒸散的影响而具有明显的季节和年际动态,相对稳定层土壤水分波动较小.剖面土壤水分的波动规律因土地利用方式的不同而呈现差异.由图 4 可以看出,3—6 月苜蓿逐渐旺盛生长,而对应时段降水补充不足,苜蓿草

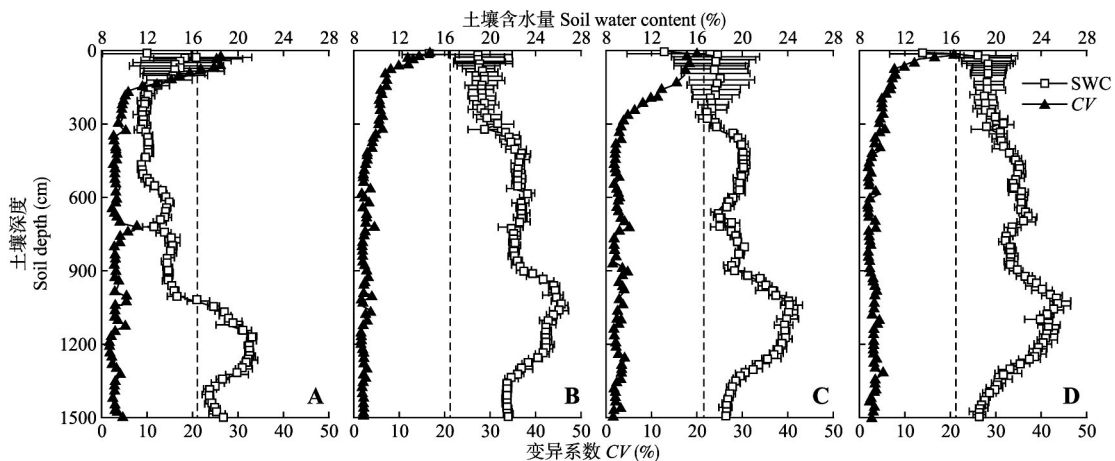


图 3 4 种土地利用方式土壤水分 (SWC) 及其变异系数 (CV) 的垂直分布  
**Fig.3** Vertical distribution of SWC and CV of the four land use types.  
 虚线表示 75% 田间持水量 Dotted line represented 75% of the field water-holding capacity.



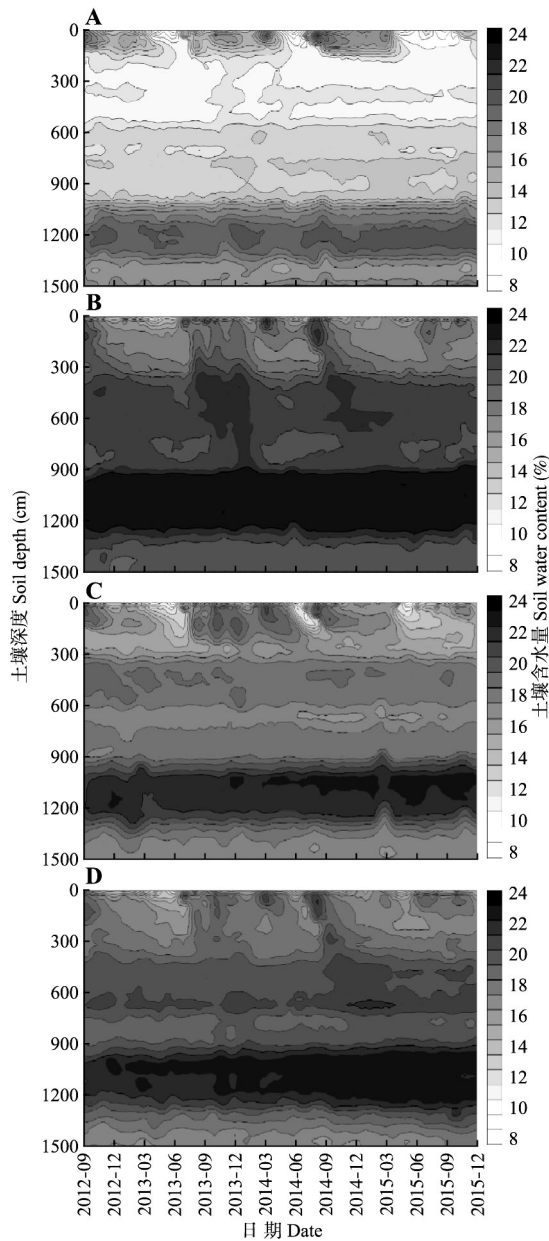


图4 苜蓿草地、休闲地、高产农田和低产农田的土壤水分时空动态

Fig.4 Spatiotemporal dynamics of SWC in alfalfa field, fallow field, fertilized cropland and unfertilized cropland.

地土壤剖面出现严重干燥化,该阶段为其失水期。7月进入雨季,入渗的雨水多于根系耗水,浅层土壤干燥化现象逐渐消失,0~2 m土层中水分得到恢复,因此7—10月为蓄水期,10月至次年3月为土壤水分相对稳定期。苜蓿草地失水期持续时间长短与当年降水量和产量密切相关,2012、2013、2014年雨季降水入渗深度分别为1.6、1.8和2 m,2015年雨季降水较少,入渗深度仅为40 cm。2~10 m土层平均含水量为12.9%,远低于田间稳定湿度,且季节和年际间的变化幅度极小,表明该土层已形成稳定的、短期

不能恢复的土壤干层。11~13 m土层之间的水分随时间推进而出现了明显波动,表明7~10年生苜蓿根系耗水深度已超过11 m。苜蓿草地土壤剖面形成的稳定性干层阻断了降水入渗,从而改变了水循环路径,长期种植将显著影响降水补给地下水过程。

休闲地失水期和蓄水期出现的时段与苜蓿草地相似,其干湿交替层含水量季节和年际间的变异性较大,且存在上移蒸发的趋势,土壤物理蒸发影响深度可达3 m。2013年7月前降水稀少,强烈的土壤蒸发使得0~60 cm平均土壤含水量一度低于14%,雨季过后土壤水分迅速得到补充,且能通过某些途径直接补给深层土壤水分。4.6 m以下土层含水量一直维持在较高水平,某些时段高于田间持水量,其随时间的波动较小。

农田土壤含水量的季节和年际趋势与作物类型关系密切,且因作物生长状况不同而表现出较大差异。2012—2013和2014—2015年高产农田冬小麦生长季0~3 m土壤含水量呈迅速减少趋势,4—6月冬小麦生长旺盛阶段的0~1 m土层土壤含水量接近12%,形成暂时性干层,雨季过后干层消失。2014年玉米生长季的7—10月,0~2 m土层出现暂时性干层。冬小麦生长季处于旱季,而春玉米生长季则与雨季重合,因此冬小麦生长主要靠土壤供水,其根系耗水深度大于春玉米。低产农田干湿交替层失水和蓄水阶段出现的时间与高产农田相同,但降水入渗深度大于高产农田,且由于作物生长受肥料因素限制,土壤水分的利用率较低,根系耗水深度较小。

高产农田和低产农田3.2~9和4.4~9 m平均土壤含水量分别为19.2%和21.9%,较休闲地相比土层含水量分别低3.2%和0.8%。高产农田6~7 m深度还存在土壤含水量在18%左右的“稳定湿度层”。经过近10年的冬小麦—冬小麦—春玉米轮作后,高产农田剖面土壤含水量显著低于长期休闲地,而低产农田剖面土壤水分状况则与长期休闲地相近。

#### 2.4 15 m剖面土壤水分的时间稳定性

由图5可以看出,研究区苜蓿草地、休闲地、高产农田和低产农田剖面各土层间土壤含水量平均相对差分(MRD)的波动范围分别为-25.1%~39.7%、-15.3%~17.9%、-16.0%~22.3%和-15.0%~20.2%,苜蓿草地土壤含水量MRD的变化幅度最大,休闲地土壤含水量MRD的变化幅度最小,平均相对差分的标准差(SDRD)均值分别为5.0%、3.2%、4.5%和3.5%,表明苜蓿草地土壤含水量随时

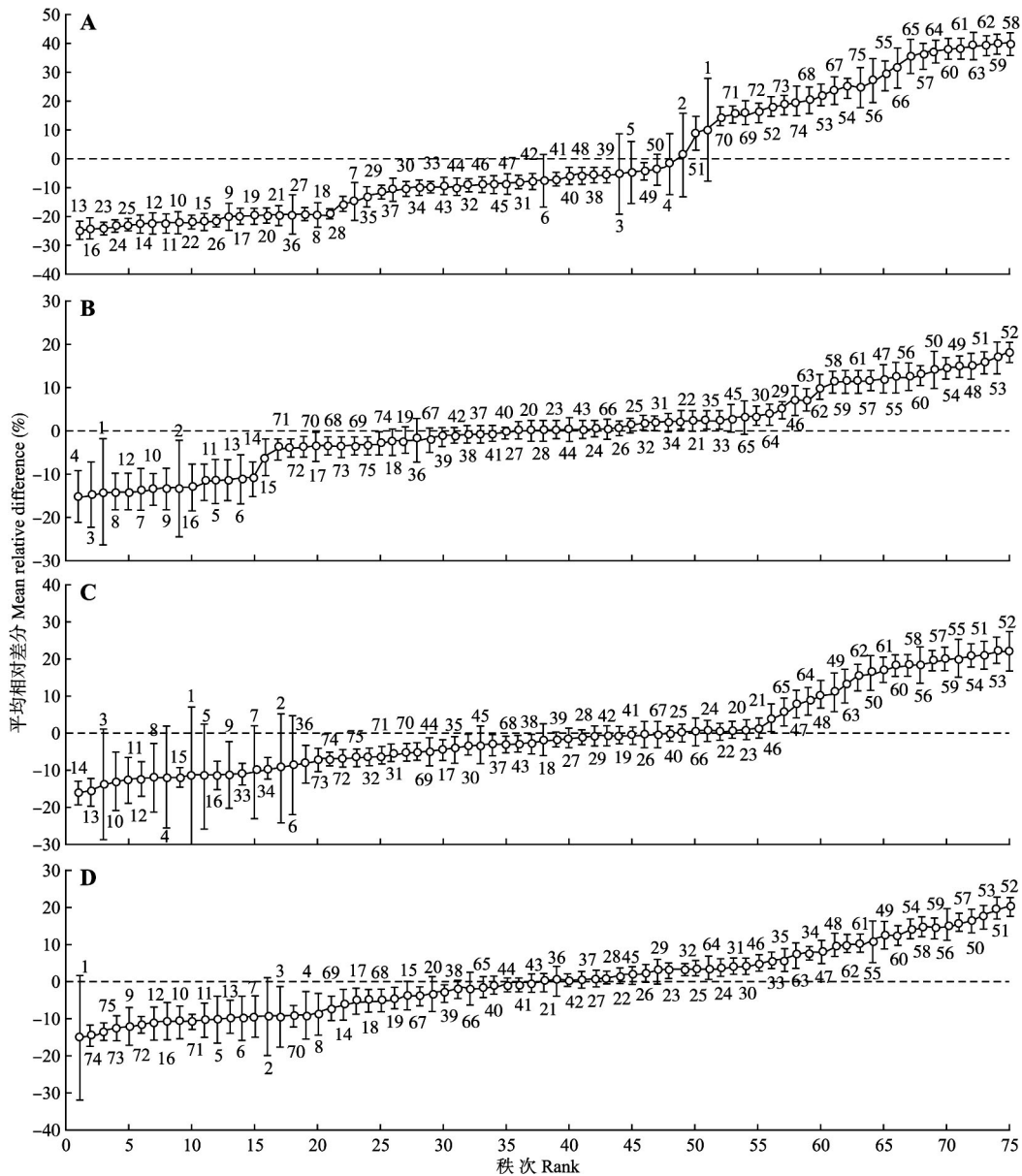


图 5 4 种土地利用方式 1~15 m 土层含水量平均相对差分由小到大的秩次

Fig.5 Ranked mean relative differences ( MRD) of SWC in the 1-15 m soil profile for the four land use types.

误差线为相对偏差对应的标准差,数字为土层编号 Error bars represented the SDRD, and the numbers were the soil layer numbers.

间波动较大,高产农田次之,而休闲地和低产农田土壤含水量具有较好的时间稳定性。

MRD 的标准差与土壤含水量的标准差均随土层深度的增加而降低,表明浅层土壤水分受气候、植被和耕作的影响较为明显,深层土壤水分的时间稳定性强于浅层。根据时间稳定性的判断标准,苜蓿草地、休闲地、高产农田和低产农田 0~15 m 剖面土壤含水量代表性深度分别位于 9.8、4.6、8.0 和 8.4 m 深处,该层土壤含水量分别为 14.5%、22.3%、19.8% 和 21.3%,与各自剖面平均土壤含水量的差值分别为 0.6%、-0.3%、-0.2% 和 -0.2%。

## 2.5 不同土地利用方式的水量平衡特征及水分利用效率

由前述不同土地利用方式剖面土壤含水量的时空分布可知,苜蓿草地已形成稳定的土壤干层,蒸散所需水分主要依靠年度降水,2013、2014 和 2015 年降水对苜蓿草地蒸散的贡献率分别为 94.9%、100.4% 和 75.6%。其中,2015 年苜蓿生长季降水较 2014 年少 138.1 mm,而耗水量较 2014 年略有增加,导致土壤供水量增加,0~2 m 土层含水量呈现干燥化趋势。2013、2015 年高产农田冬小麦生长季降水量贡献率分别为 45.5% 和 68.8%;低产农田冬小麦生

表 2 休闲地和农田土壤水量平衡特征

Table 2 Soil water balance characteristics in the fallow field and cropland

土地利用方式 Land use type	2012—2013 生长季 Growing season		2013—2014 休闲期 Fallow season		2014 生长季 Growing season		2014—2015 生长季 Growing season		2015 休闲期 Fallow season	
	<i>P</i> (mm)	$\Delta W$ (mm)	<i>P</i> (mm)	$\Delta W$ (mm)	<i>P</i> (mm)	$\Delta W$ (mm)	<i>P</i> (mm)	$\Delta W$ (mm)	<i>P</i> (mm)	$\Delta W$ (mm)
休闲地 Fallow field		-159.5		94.5		58.6		-118.5		21.3
高产农田 Fertilized cropland	151.7	-181.6	568.0	214.4	388.3	-85.3	269.4	-122.2	283.0	54.6
低产农田 Unfertilized cropland		-146.1		120		53		-130.2		50.5

*P*: 降水量 Precipitation;  $\Delta W$ : 土壤储水量变化量 Change of SWS.

表 3 苜蓿草地和农田产量、耗水量和水分利用效率

Table 3 Yield, water consumption and water use efficiency in the alfalfa field and cropland

土地利用方式 Land use type	产量 Yield ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )			耗水量 Water consumption (mm)			水分利用效率 WUE ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ )		
	2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015
苜蓿草地 Alfalfa field	7655.1	9458.7	12527.3	492.9	557.0	606.8	15.5	17.0	20.6
高产农田 Fertilized cropland	3210.8	12937.9	4572.6	333.3	473.6	391.6	9.6	27.3	11.7
低产农田 Unfertilized cropland	893.8	2621.3	939.8	297.8	335.3	399.6	3.0	7.8	2.4

长季降水量贡献率分别为 50.9% 和 67.4%, 其余所需水分来自土壤供水, 导致土壤水量均为负平衡。春玉米生育期与雨季重合, 其耗水量除作物自身需求情况外, 还取决于生育期降水。2014 年高产玉米田与低产玉米田生长季降水贡献率分别为 82.0% 和 115.8%; 高产玉米田土壤储水量出现负平衡, 低产玉米田土壤储水量则为正平衡(表 2)。

值得注意的是 2013 年 7 月至 2014 年 4 月的农田轮作休闲期内, 高产农田和低产农田蒸散量分别为 353.6 和 448 mm, 分别比休闲地土壤蒸发量低 119.9 和 25.5 mm; 2015 年 7—9 月农田休闲期, 高产农田和低产农田蒸散量较同时期休闲地蒸发量分别低 33.3 和 29.2 mm。出现上述差别的原因在于, 冬小麦生长季土壤供水导致土壤水分负平衡, 高产农田甚至出现暂时性土壤干化层, 较低的土壤含水量导致了较少的蒸发损失; 休闲地土壤含水量一直处于较高水平, 土壤蒸发损失较大。3 种土地利用方式中, 高产农田土壤储水量的增量最大。

由表 3 可以看出, 2013—2015 年, 苜蓿产量呈上升趋势, 生长期(3—10 月)耗水量由 2013 年的 492.9 mm 增长到 2015 年的 606.8 mm, 但产量与耗水量增长的比例有所差异, 2015 年苜蓿产量为 12527.3  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 其水分利用效率为 2014 年的 1.2 倍。苜蓿草地耗水量的增长造成深层土壤的严重干燥化(图 4), 因此苜蓿草地生产应以适度产量为目标, 以减缓下伏干化层的发展<sup>[18]</sup>。

与 2013 年相比, 2015 年高产农田、低产农田冬小麦产量和耗水量均有所增加。2015 年高产农田冬小麦产量为 2013 年的 1.4 倍, 耗水量之比为 1.2, 水分利用效率分别为 11.7 和 9.6  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。2015 年低产冬小麦产量较 2013 年增加 5%, 而耗水量增加 34.2%, 水分利用效率明显降低。2014 年高产农田和低产农田玉米产量分别为 12937.9 和 2621.3  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 水分利用效率之比为 3.5 : 1。

### 3 结 论

研究区苜蓿草地(>7 年)、休闲地、高产农田和低产农田土壤含水量差异显著( $P < 0.05$ )。浅层土壤水分呈现出季节和年际间干湿交替现象, 失水期和蓄水期分别为 3—6 月和 7—10 月, 土壤水分时间变异性顺序为苜蓿草地>高产农田>休闲地>低产农田。深层土壤水分具有较好的时间稳定性, 苜蓿草地 2~10 m 土层已形成稳定性土壤干层, 阻断了降水入渗途径, 长期种植将显著影响降水补给地下水过程; 经过近 10 年的冬小麦-冬小麦-春玉米轮作后, 高产农田剖面土壤含水量显著低于长期休闲地, 低产农田剖面土壤水分状况则与休闲地相近。

深剖面土壤水分时间稳定性的垂直分布受土地利用方式的影响而呈现较大差异, 苜蓿草地、休闲地、高产农田和低产农田 0~15 m 剖面土壤水分代表性深度分别在 9.8、4.6、8.0 和 8.4 m 深处, 该层土壤含水量接近剖面平均值。

2013—2015 年,苜蓿产量逐年提高,生长季耗水量也相应增加,造成深层土壤的干燥化程度加大。就其他 3 种土地利用方式下的土壤水分平衡而言,在冬小麦生长季,农田与休闲地均表现为负平衡;在玉米生长季,高产农田表现为负平衡,而低产农田与休闲地为正平衡;在作物休闲期,3 种土地利用方式都表现为正平衡。通过施肥处理所形成的高产农田作物水分利用效率明显提高,为低产农田的 3 倍以上。

#### 参考文献

- [1] Li Y-S (李玉山). Function and role of soil reservoir. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 1983, **5**(1): 27-30 (in Chinese)
- [2] Chen LD, Wei W, Fu BJ, et al. Soil and water conservation on the Loess Plateau in China: Review and perspective. *Progress in Physical Geography*, 2007, **31**: 389-403
- [3] Guo Z-S (郭忠升). Soil water resource use limit in semi-arid loess hilly area. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(12): 3029-3035 (in Chinese)
- [4] Li J (李军), Chen B (陈兵), Li X-F (李小芳), et al. Effects of deep soil desiccations on alfalfa grasslands in different rainfall areas of the Loess Plateau of China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(1): 75-89 (in Chinese)
- [5] Yang W-Z (杨文治), Tian J-L (田均良). Essential exploration of soil aridization in Loess Plateau. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2004, **41**(1): 1-6 (in Chinese)
- [6] Zhang C-C (张晨成), Shao M-A (邵明安), Wang Y-Q (王云强). Spatial distribution of dried soil layers under different vegetation types at slope scale in loess region. *Transactions of the Chinese Society Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2012, **28**(17): 102-108 (in Chinese)
- [7] Huang M-B (黄明斌), Dang T-H (党廷辉), Li Y-S (李玉山). Effect of advanced productivity in dryland farming of the Loess Plateau on soil water cycle. *Transactions of the Chinese Society Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2002, **18**(6): 50-54 (in Chinese)
- [8] Li Y-S (李玉山). Effects of forest on water cycle on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2001, **16**(5): 427-432 (in Chinese)
- [9] Soil Water Group of Northwest Soil and Water Conservation Institute (西北水土保持生物研究所土壤水分组). Soil water survey of dryland farm in Eastern Shaanxi Province. *Soils* (土壤), 1975, **6**(1): 279-285 (in Chinese)
- [10] Wang YQ, Shao MA, Liu ZP. Large-scale spatial variability of dried soil layers and related factors across the entire Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2010, **159**: 99-108
- [11] Wang YQ, Shao MA, Shao HB. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 2010, **381**: 9-17
- [12] Wang YQ, Shao MA, Zhu YJ, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, **151**: 437-448
- [13] Wang Y-Q (王云强). Spatial Distribution and Influence Factors of Dried Soil Layers across the Loess Plateau. PhD Thesis. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010 (in Chinese)
- [14] Cheng LP, Liu WZ. Long term effects of farming system on soil water content and dry soil layer in deep loess profile of Loess Tableland in China. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, **13**: 1382-1392
- [15] Yang W-Z (杨文治), Zhao P-L (赵沛伦), Zhang Q-Y (张启元). Evaporation and movement of soil water under different soil moisture condition. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 1981, **18**(1): 24-37 (in Chinese)
- [16] Chen H-S (陈洪松), Shao M-A (邵明安), Wang K-L (王克林). Water cycling characteristics of grassland and bare land soils on Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(10): 1853-1857 (in Chinese)
- [17] Cheng L-P (程立平). The Characteristics of Soil Water in Deep Loess Profile and the Process of Groundwater Recharge on the Loess Tableland. PhD Thesis. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences 2013 (in Chinese)
- [18] Li Y-S (李玉山). Productivity dynamic of alfalfa and its effects on water eco-environment. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2002, **39**(3): 404-411 (in Chinese)
- [19] Yang W-Z (杨文治), Shao M-A (邵明安). Soil Moisture in the Loess Plateau. Beijing: Science Press, 2000 (in Chinese)
- [20] Fan J (樊军), Hao M-D (郝明德), Shao M-A (邵明安). 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* (农业工程学报), 2004, **20**(1): 61-64 (in Chinese)
- [21] Wang ZQ, Liu BY, Liu G, et al. Soil water depletion depth by planted vegetation on the Loess Plateau. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, **52**: 835-842
- [22] Vachaud G, Passerat De Silans A, Balabanis P, et al. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, **49**: 822-828
- [23] Kachanoski RG, de Jong E. Scale dependence and the temporal stability of spatial patterns of soil water storage. *Water Resource Research*, 1988, **24**: 85-91



- [24] Gao L, Shao MA. Temporal stability of soil water storage in diverse soil layers. *Catena*, 2012, **95**: 24–32
- [25] Hu W, Shao M, Wang Q, *et al.* Time stability of soil water storage measured by neutron probe and the effects of calibration procedures in a small watershed. *Catena*, 2009, **79**: 72–82
- [26] Jia XX, Shao MA, Wei XR, *et al.* Hillslope scale temporal stability of soil water storage in diverse soil layers. *Journal of Hydrology*, 2013, **498**: 254–264
- [27] Wang YQ, Hu W, Zhu YJ, *et al.* Vertical distribution and temporal stability of soil water in 21-m profiles under different land uses on the Loess Plateau in China. *Journal of Hydrology*, 2015, **527**: 543–554
- [28] Cheng L-P (程立平), Liu W-Z (刘文兆), Li Z (李志). Soil water in deep layers under different land use patterns on the Loess Tableland. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2014, **34**(8): 1975–1983 (in Chinese)
- [29] He H-H (何汇虹), Liu W-Z (刘文兆). Study on characteristics of soil temperature changes in arable land on the Loess Tableland. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2013, **20**(5): 124–128 (in Chinese)
- [30] Han XY, Liu WZ, Lin W. Spatiotemporal analysis of potential evapotranspiration in the Changwu tableland from 1957 to 2012. *Meteorological Applications*, 2015, **22**: 586–591
- [31] Li Y-S (李玉山), Han S-F (韩仕峰), Wang Z-H (汪正华). Soil water properties and its zonation in the Loess Plateau. *Memoir of Northwestern Institute of Soil and Water Conservation* (中国科学院西北水土保持研究所集刊), 1985, **10**(2): 1–17 (in Chinese)
- [32] Cheng L-P (程立平), Liu W-Z (刘文兆). Soil moisture distribution in deep layers and its response to different land use patterns on Loess Tableland. *Transactions of the Chinese Society Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2011, **27**(9): 203–207 (in Chinese)
- [33] Wang R (王锐), Liu W-Z (刘文兆), Li Z (李志). Physical properties of soils along a 10 m deep soil profile in Loess Tableland. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2008, **45**(3): 550–554 (in Chinese)

---

作者简介 韩晓阳,男,1987年生,博士.主要从事农田生态水文过程研究. E-mail: xyhan@rcees.ac.cn

责任编辑 杨弘

---



---

韩晓阳,刘文兆,程立平.黄土塬区深剖面土壤水分垂直分布特征及其时间稳定性.应用生态学报,2017,**28**(2):430–438  
 Han X-Y, Liu W-Z, Cheng L-P. Vertical distribution characteristics and temporal stability of soil water in deep profile on the Loess Tableland, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(2): 430–438 (in Chinese)