

黄土高原南部小流域土壤水分时程变化的 分层特征及其驱动机制

俱战省^{1,2,3}, 郑粉莉^{2,3}, 刘文兆^{2,3}

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 选取位于黄土高原南部的长武王东沟小流域为研究对象, 通过对典型样地 0~600 cm 土壤剖面水分的长期连续测定, 系统研究了王东沟小流域土壤水分年内、年际变化的分层特征以及驱动机制。结果表明, 土壤水分剖面的时程变化有分层特征, 与利用类型关系密切; 王东沟小流域 0~50 cm 土层土壤水分季节变化剧烈, 0~150 cm 土壤含水量在雨季前(6月)降到最低; 与雨季前相比, 小麦地 12 月土壤水分恢复深度可达到 460 cm, 而刺槐林地、苹果园和苜蓿地土壤水分恢复深度最大达到 260 cm 左右; 就同一测点比较, 2011 年刺槐林地和苹果园 300~600 cm 土壤含水量较 2003 年减少, 而 2011 年小麦地和荒草地 300~600 cm 土壤含水量较 2003 年有所增加。土地利用和地形地貌是驱动王东沟小流域土壤水分变化的主要因素, 但是土地利用对深层土壤水分的影响更加显著。

关键词: 土壤水分; 王东沟小流域; 时程变化; 驱动机制; 黄土高原

中图分类号: S152.7 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2013)05-0028-06

Layered characteristics and driving mechanisms of temporal soil moisture variation in a small watershed of the southern Loess Plateau

JU Zhan-sheng^{1,2,3}, ZHENG Fen-li^{2,3}, LIU Wen-zhao^{2,3}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu, Sichuan 610041, China;

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

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Wangdonggou watershed located in the southern Loess Plateau was selected as the study area in this paper. Layered characteristics and driving mechanisms of seasonal and interannual soil moisture variations in the small watershed were comprehensively studied through a long-term observation of soil moisture in 600 cm soil profiles of typical plots. Soil water content in the 0~50 cm layer changed intensively with season. Soil water content in the 0~150 cm soil layer decreased to the lowest before rainy season. In contrast to drought season, the depth of soil water recharged in December was as much as 460 cm for wheat land, while the maximum depths recharged were about 260 cm for *Robinia pseudoacacia* forestland, apple orchard and alfalfa field. Temporal variations of soil moisture in the profiles were characterized by a layered distribution and were closely related with landuse type. As for the same measuring point, soil water contents in the 300~600 cm layer of *Robinia pseudoacacia* forestland and apple orchard in 2011 were lower than those in 2003, while soil water contents in the same layer of wheat land and natural grassland in 2011 were higher than those in 2003. Both landuse type and topography are the main driving factors for soil moisture change and however, landuse type has more significant effect on soil moisture in deep layer.

Keywords: soil moisture; Wangdonggou watershed; temporal variation; driving mechanism; Loess Plateau

土壤水资源是黄土高原地区水资源的重要组成部分, 降水通常被认为是土壤水分的主要来源^[1-2],

收稿日期: 2012-10-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171033)

作者简介: 俱战省(1985—), 男, 陕西乾县人, 博士研究生, 研究方向为水土保持与生态水文。E-mail: zhansju@126.com

通信作者: 郑粉莉(1960—), 女, 陕西蓝田人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

土壤含水量受降水、地形、土壤与利用类型(农、林、草地及其生物量)等因素的影响^[3],随时间和空间而不断发生变化。近年来,关于黄土高塬沟壑区土壤水分研究已有多项工作,包括塬面不同土地利用条件下的土壤水分分布特征^[4-5],果园及小流域土壤水分特征^[6-8],不同种植系统条件下长期定位试验地土壤水分的时间变化特征^[9-10],此外黄土丘陵沟壑区小流域土壤水分的时空分布的研究也有不少^[11-12]。本研究通过选取黄土高塬沟壑区小流域——王东沟小流域作为研究对象,对土壤水分时程变化的分层特征及其驱动机制进行了分析,以期为黄土高原小流域综合治理与生态建设服务。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

王东沟小流域位于黄土高原南部陕甘交界处的长武县境内,流域面积为 6.3 km²,地貌类型分为塬面和沟壑两大单元,其中沟壑面积占流域土地面积的 65%;塬面海拔在 1 200 m 左右,沟口最低点 946 m,相对高程差为 280 m。多年平均降水量为 581.4

mm,属于暖温带半湿润大陆性季风气候,降水主要集中在 7~9 月,约占全年降水量的 55% 左右。塬面土壤类型是黑垆土,梁坡和沟道两侧土壤类型分别是黄绵土和红土。该区土地利用类型主要有农地、林地、果园和草地四种,塬面主要种植冬小麦和春玉米,梁坡变为梯田后主要分布的是苹果园和林地。塬面地下水位埋深 50~80 m,几乎不参与土壤水分循环,因此农业生产需要的水分主要来自天然降水,人工林(草)大多取代自然植被,主要有刺槐、沙棘、本氏针茅、茵陈蒿、白羊草等。

1.2 研究方法

在王东沟小流域,根据立地类型和土地利用类型选取 11 个具有代表性的地块(见表 1)。土壤含水量测定通过烘干法与中子仪法进行,中子仪法由烘干法结果取得标定方程,二者具有可比性。测定数据包括 2011 年所有偶月数据,以分析年内时程变化;以及 2003 年 5 月初(5 月 2 日)部分样地测定数据,以与 2011 年数据对比分析年际时程变化。土壤水分含量测定深度一般到 600 cm,0~100 cm 每 10 cm 取一个样,100~600 cm 每 20 cm 取一个样。

表 1 土壤水分采样地基本特征

Table 1 The basic characteristics for sample plots of soil moisture

样地 Sampling plot	样点位置(地形) Sample location(topography)	坡度 Slope/°	坡向 Aspect	采样时间 Sample time
16 龄苹果园地 Sixteen-year apple orchard	烧盘湾(梁坡) Shaoshongwan(Ridge slope)	30	西偏南 West by south	2011
刺槐林地 <i>Robinia pseudoacacia</i> forestland				2003, 2011
荒草地 Natural grassland				
苹果园地 Apple orchard				2003, 2011
6 年生苜蓿地 Six-year alfalfa field	双冢山(梁顶) Shuangzhongshan(Ridge top)	—	—	2011
小麦地 Wheat land				2003, 2011
小麦地 Wheat land				2011
16 龄苹果园地 Sixteen-year apple orchard	试验站附近(塬面) Vicinity of the station (tableland)	—	—	2011-12
小麦地 Wheat land	丈六村(梁坡梯田) Zhangliu village (Terrace on ridge slope)	5	西坡 West	2011-12
荒草地 Natural grassland	丈六村(梁顶) Zhangliu village (Ridge top)	—	—	2011-12
刺槐林地 <i>Robinia pseudoacacia</i> forestland	丈六村(梁坡) Zhangliu village(Ridge slope)	30	西坡 West	2003, 2011

烘干法和中子仪法通过公式(1)和(2)得到土壤重量含水量。2011 年长武王东沟小流域降水量是 674.8 mm,雨季(7—9 月)降水量为 417.7 mm,占全

年降水量的 61.9%。

烘干法:

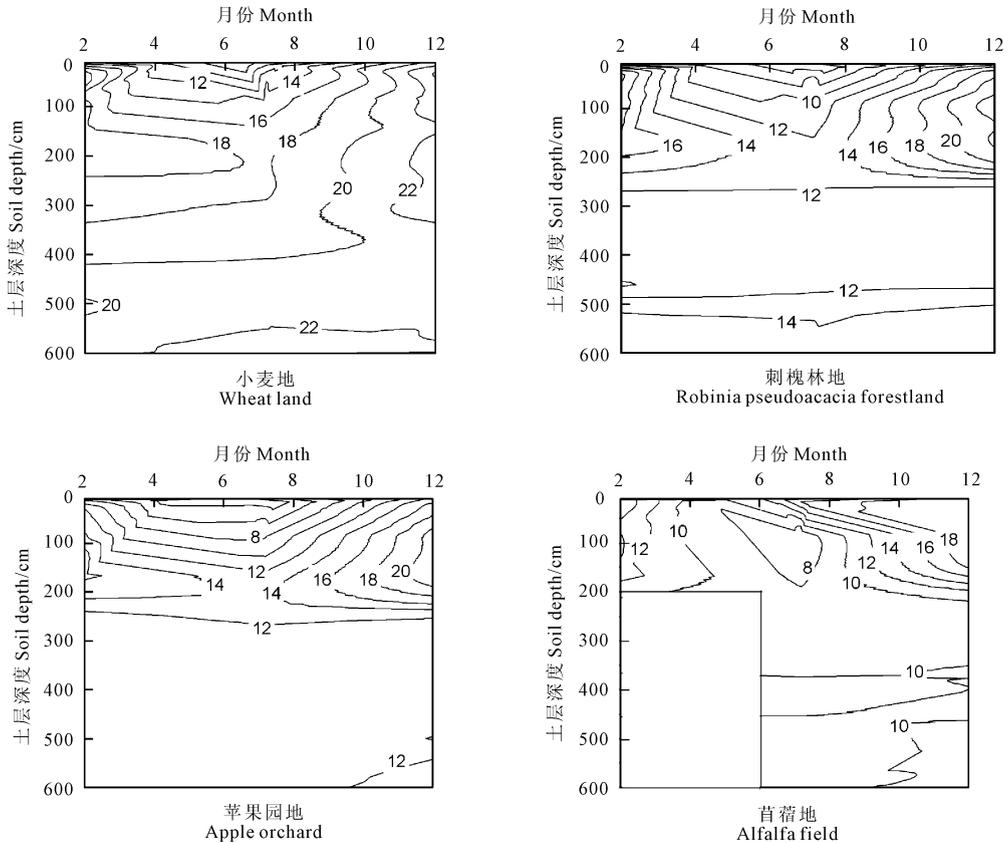
$$SWC = (m_1 - m_2) / (m_2 - m_0) \times 100\% \quad (1)$$

式中, SWC 为土壤重量含水量(%); m_1 为烘干前铝盒及土样质量; m_2 为烘干后铝盒及土样质量; m_0 为空铝盒质量。

中子仪:

$$\left. \begin{aligned} \text{PVC管: } Y &= 57.136x - 6.0034, R^2 = 0.9356 \\ \text{铝管: } Y &= 36.984x - 2.3122, R^2 = 0.9659 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, Y 为土壤重量含水量, 用重量百分比(%)表示, x 为测得的中子计数与标准计数的比值。



备注: 等值线中的数字表示土壤含水量(%), 苜蓿地等值线图中出现空白矩形表示所在时段与深度缺失土壤水分数据。

Note: The data in the contour lines indicate percentage of soil water content(%), the blank rectangle appeared in the contour map of alfalfa field shows the lack of soil water monitoring in that depth and period.

图 1 土壤水分随季节变化的等值线图

Fig.1 Seasonal variation of soil moisture contour map

2.1.1 上层土壤水分剖面季节动态变化特征 0~50 cm 土层含水量季节变化剧烈, 主要是因为季节降水量差异较大(图 2), 另外大气的蒸发需求与植物根层的水分吸收也有重要影响。而到 6 月份, 0~150 cm 土壤水分剖面均降至最低, 这个时候气温较高, 蒸发力大, 植被的土壤水分消耗量大, 而且 2011 年 6 月份降水量是多年同期平均降水量的 52.1%, 降水补充土壤水分较少。

2.1.2 深层土壤水分剖面季节动态变化特征 分析 200~600 cm 土壤水分剖面, 苜蓿地这个层次土壤干化最为严重, 土壤含水量在 10% 左右, 刺槐林

2 结果与分析

2.1 土壤水分剖面分布季节动态特征

王东沟小流域 2011 年试验站附近小麦地、烧畚湾刺槐林地、烧畚湾 16 龄苹果园地和双冢山 6 年生苜蓿地 0~600 cm 土壤剖面水分随季节变化的等值线如图 1 示。这里分别对上层(0~50 cm)和深层土壤水分剖面随时间变化的分层特征进行分析。

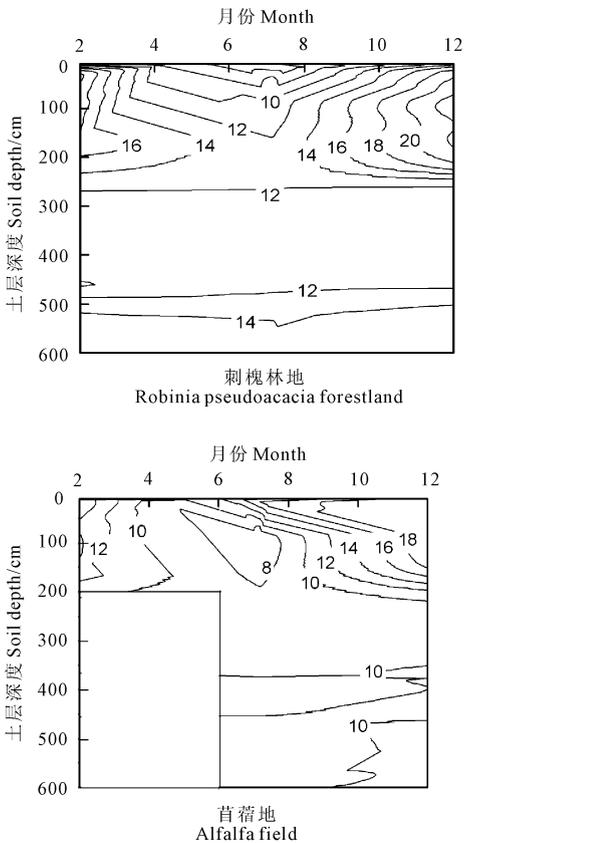


图 2 长武月降水量分布特征

Fig.2 The distribution characteristics of monthly rainfall in Changwu

地和苹果园地 300 ~ 500 cm 土层土壤含水量也较低,为 12%;而小麦地 200 ~ 600 cm 土层土壤含水量在 20%左右,不存在生物利用型干层。与雨季前(6月份)相比,小麦地雨季后(12月份)土壤水分恢复深度可达到 460 cm,而刺槐林地、苹果园地和苜蓿地土壤水分恢复深度依次是 260、240 cm 和 220 cm。因此无论雨季前后,刺槐林地、苹果园地和苜蓿地 200 ~ 600 cm 土壤水分剖面均存在生物利用型干层。多年生植被比一年生作物土壤水分恢复的深度浅,说明多年生植被土壤水分亏缺量大,主要是因为苹果园地和刺槐林地、苜蓿地降雨入渗深度一般难以到达其蒸发蒸腾作用层,深层土壤水分不断被消耗,但是却没有得到有效地恢复,因此土壤水分剖面出现严重干层;而测定小麦地产量平均约为 $2\ 250\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,居中低产水平,深层土壤水分没有得到消耗,降雨入渗有可能超过其蒸发蒸腾作用层,补给深层土壤水分。深层土壤水分含量比较稳定,不随季节而变化,其高低水平主要与土地利用类型相关。

2.2 土壤水分剖面分布年际动态变化特征

考虑到土壤水分监测中,在大部分测点的测定都为逢偶月进行,2003年5月布设监测,5月2日由烘干法取得土壤含水量数据,因此由2003年5月2日和2011年6月17日测定的土壤含水量数据比较

给出跨年度的年际变化特征分析。王东沟小流域2003年1—5月份和2011年1—6月份的降水量依次为 116 mm 和 132.6 mm,分别占全年降水量的 12%和 19%。

王东沟小流域双冢山小麦地、双冢山苹果园地、丈六村刺槐林地和烧盅湾荒草地依次在2003年和2011年雨季前测定的深层土壤水分剖面变化如图3所示。表2为2003和2011年双冢山小麦地、双冢山苹果园地、丈六村刺槐林地和烧盅湾荒草地的300 ~ 600 cm 土壤储水量变化情况。其中苹果园地和刺槐林地2011年的储水量较小,与2003年相比分别减少了 47.9 mm 和 127.2 mm;而荒草地和小麦地2011年土壤储水量较大,与2003年相比分别增加了 150 mm 和 88.8 mm。

苹果园地和刺槐林地属于多年生植被,其对土壤水分的消耗随着生长年限的增加而强化,降雨入渗深度难以补给到其蒸发蒸腾作用层,因此深层土壤水分处于负平衡,土壤干层愈加严重;荒草地和小麦地两者对土壤水分的消耗在雨季可以得到补偿,2003—2011年平均年降水量为 599.1 mm,与多年平均降水量(581.4 mm)大致持平;在特大丰水年,降雨入渗补给可以使 200 ~ 300 cm 的土壤干层消失或者减轻^[13]。

表2 2003年和2011年不同样地的土壤储水量

Table 2 Soil water storage under different sampling plots between 2003 and 2011

样地 Sampling plot	样点位置(地形) Sample location(topography)	土壤储水量/mm		变化/mm Change
		300 ~ 600 cm Soil water storage		
		2003 - 05 - 02	2011 - 06 - 17	
小麦地 Wheat land	双冢山(梁顶) Shuangzhongshan (Ridge top)	586.7	675.5	88.8
苹果园地 Apple orchard	双冢山(梁顶) Shuangzhongshan (Ridge top)	492.9	445.1	- 47.9
刺槐林地 <i>Robinia pseudoacacia</i> forestland	丈六村(梁坡) Zhangliu village(Ridge slope)	436.2	308.9	- 127.2
荒草地 Natural grassland	烧盅湾(梁坡) Shaozhongwan(Ridge slope)	707.3	857.3	150

2.3 土壤水分驱动因素分析

2.3.1 土地利用类型 不同土地利用条件下的 0 ~ 600 cm 土壤水分剖面变化如图4所示,测定时间均为2011年12月18日;双冢山苹果园地、双冢山苜蓿地和双冢山小麦地地形条件一致均位于梁顶。为了避免降雨对表层土壤水分的影响,充分地说明土地利用类型对土壤剖面水分变化的作用,现主要对苹果园地、小麦地和苜蓿地 200 ~ 600 cm 土壤剖

面水分变化进行分析。结果表明,小麦地土壤含水量明显高于苹果园地,苜蓿地最低。200 ~ 600 cm 土壤剖面平均含水量由大到小依次是小麦地(20.2%) > 苹果园地(14.5%) > 苜蓿地(9.9%);深层土壤水分难以得到降雨入渗的补给,苹果园地和苜蓿地分别在 300 cm 和 200 cm 土层以下土壤含水量均低于 14%,土壤干燥化严重,因此不同土地利用对深层土壤水分的影响差异明显。

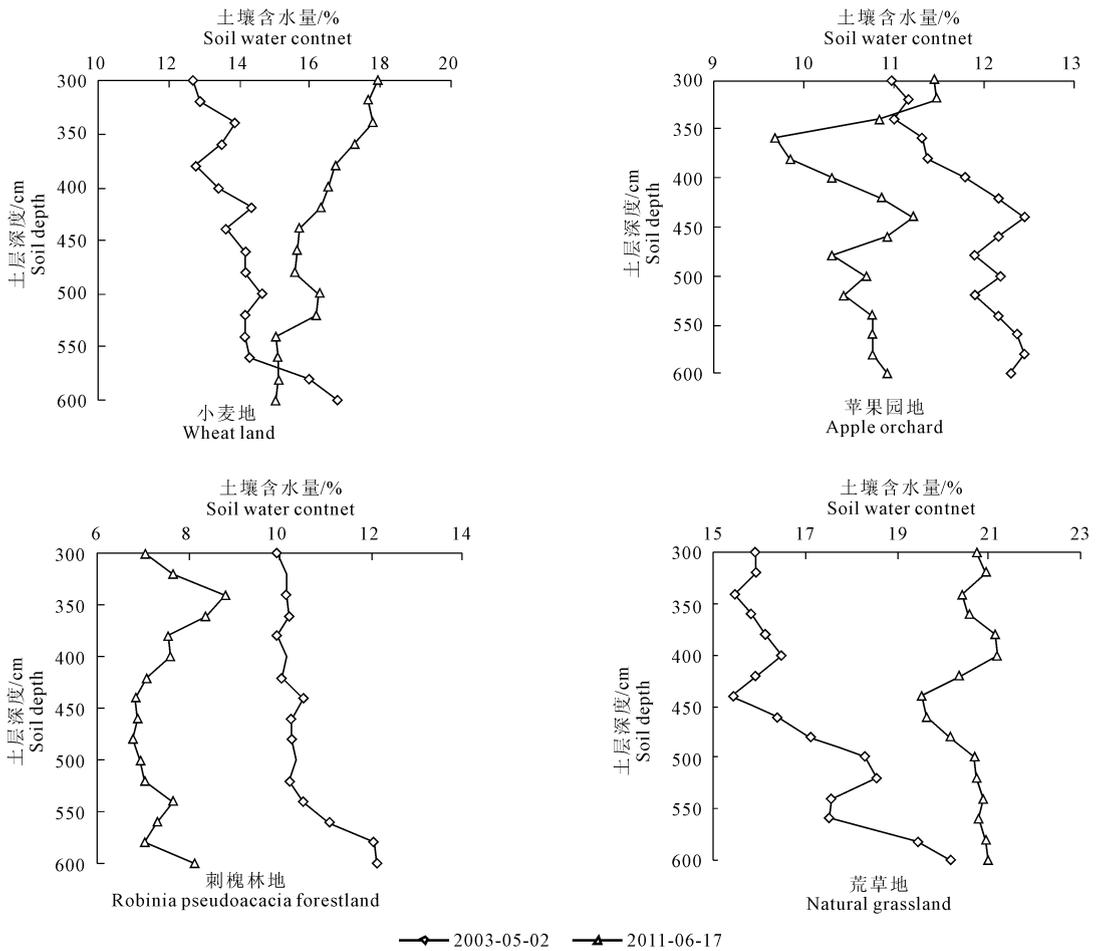


图 3 年际深层土壤水分剖面变化

Fig. 3 Changes in the deeper soil water profile between 2003 and 2011 year

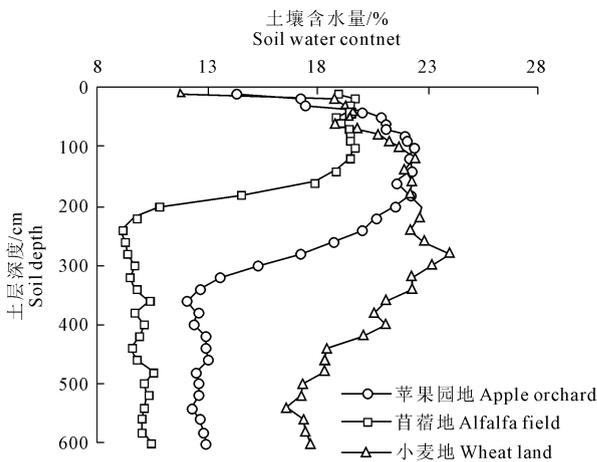


图 4 不同土地利用条件下的土壤水分剖面分布

Fig. 4 The distribution of soil moisture profile for different land use

土壤水分剖面分布情况(图 5),土壤水分测定时间是 2011 年 12 月中旬。其中苹果园地和小麦地的 0 ~ 600 cm 土壤储水量由高到低依次均是塬面 > 梁顶 > 梁坡梯田。说明雨季后,降雨入渗使得塬面土壤水分得到明显恢复,梁顶次之,梁坡土壤水分恢复能力最差。

3 讨论与结论

3.1 讨论

要说明地形、利用条件各自对土壤水分的影响,则其它条件需要尽可能地相同^[14]。图 4 中地形条件一致均是梁顶,但是 300 ~ 600 cm 土壤储水量小麦地比苜蓿地多 388.1 mm,图 5 中土地利用类型均是 16 龄苹果园地,300 ~ 600 cm 土壤储水量塬面比梁坡多 170.2 mm。从土壤储水量变化而言,土地利用类型较地形对深层土壤水分影响要大。黄土高原地区土地利用方式对土壤水分状况具有显著影响,主要与不同土地利用下植被的耗水特征、耕作管理制度以及水土保持措施有关^[15]。有研究指出长武

2.3.2 地形地貌 烧窑湾苹果园地、双冢山苹果园地、试验站附近苹果园地和双冢山小麦地、试验站附近小麦地、丈六村小麦地分别代表苹果园地和小麦地,在不同地形(塬面、梁顶和梁坡)条件下 0 ~ 600 cm

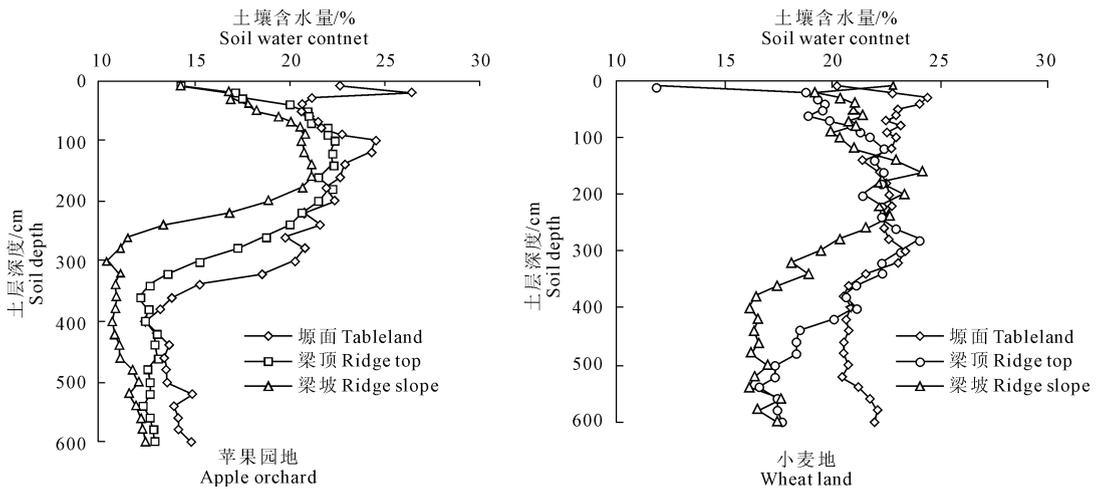


图5 不同地貌类型下的土壤水分剖面分布

Fig.5 The distribution of soil moisture profile for different topography

县塬面农地、果园地和苜蓿地 300 ~ 600 cm 土壤水分剖面平均含水量是农地大于果园, 果园大于苜蓿^[5], 充分地说明了同一地形条件下的不同植被耗水特征是引起土壤水分剖面变化的主要原因; 影响小流域 200 ~ 800 cm 土壤剖面水分空间变异的主要因素是土地利用方式^[16], 相对而言, 地形对深层土壤水分的影响较小。

3.2 结论

2011 年王东沟小流域上层(0 ~ 50 cm)土壤水分剖面季节变化剧烈。与雨季前(6 月份)相比, 小麦地 12 月份土壤水分恢复深度可达到 460 cm, 而刺槐林地、苹果园地和苜蓿地土壤水分恢复深度最大达到 260 cm, 农地和多年生林草地的土壤水分恢复深度不同, 主要是因为雨季前多年生林草地土壤剖面水分的亏缺量大于农地。刺槐林地、苹果园地和苜蓿地深层土壤水分几乎不受季节变化影响, 并均存在生物利用型干层, 主要和土地利用类型关系密切; 2011 年刺槐林地和苹果园地 300 ~ 600 cm 土壤含水量较 2003 年减少, 而 2011 年小麦地和荒草地 300 ~ 600 cm 土壤含水量较 2003 年有所增加; 驱动王东沟小流域土壤水分变化的主要因素是土地利用和地形地貌, 其中土地利用较地形对深层土壤水分的影响强烈。

参考文献:

[1] 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.
 [2] 胡梦, 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.

[3] 李玉山, 史竹叶, 张孝中, 等. 长武王东沟小流域土壤墒情影响因素与分布特征[J]. 水土保持通报, 1990, 10(6): 1-6.
 [4] 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.
 [5] 武阿锋, 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.
 [6] 车升国, 郭胜利, 高会议, 等. 黄土高原沟壑区果园还耕对土壤水分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 71-75.
 [7] 何福红, 黄明斌, 党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域综合治理的生态水文效应[J]. 水土保持研究, 2003, 10(2): 33-37.
 [8] 何福红, 黄明斌, 党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征[J]. 水土保持通报, 2002, 22(4): 6-9.
 [9] 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.
 [10] 宋孝玉, 康绍忠, 沈冰, 等. 黄土沟壑区不同种植条件下农田土壤水分动态规律研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 130-133, 140.
 [11] 王军, 傅伯杰. 黄土丘陵小流域土地利用结构对土壤水分时空分布的影响[J]. 地理学报, 2000, 55(1): 84-91.
 [12] 黄奕龙, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分空间格局及其影响因素[J]. 自然资源学报, 2005, 20(4): 483-492.
 [13] Liu W Z, Zhang X C, Dang Ting-hui, et al. Soil water dynamics and deep soil recharge in a record wet year in the southern Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1133-1138.
 [14] 刘文兆, 胡梦, 侯喜禄, 等. 半干旱黄土丘陵区小流域横断面土壤水分生态特征[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(4): 95-100.
 [15] 王云强, 邵明安, 刘志鹏. 黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性[J]. 水科学进展, 2012, 23(3): 310-316.
 [16] Yang L, Wei W, Chen L. Spatial variations of shallow and deep soil moisture in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(9): 3199-3217.