

黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分变化特征

唐敏^{1,2} 赵西宁^{1,3} 高晓东^{1,3} 张超^{1,2} 吴普特^{1,3*}

(¹西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100; ²西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; ³中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要 土壤水分是制约黄土丘陵区生态建设和土地可持续利用的关键因子,认识不同土地利用类型的土壤水分状况对该地区植被恢复和土地资源的有效利用具有重要的理论和实际意义.本研究采用 EC-5 土壤水分传感器,对黄土高原塬则沟流域坡耕地、梯田、枣园和草地生长季内(5—10月)0~160 cm 土壤剖面含水量进行连续监测,探讨这4种典型土地利用类型的土壤水分变化特征.结果表明:在降水常态年和干旱年,不同土地利用方式土壤水分的季节变化、蓄水特征及垂直分布均存在差异.在2015年干旱年,梯田表现出良好的蓄水保墒效果,0~60 cm土层生长季平均土壤含水量分别比坡耕地、枣园和草地高2.6%、4.2%、1.8% ($P<0.05$),0~160 cm土层储水量分别比坡耕地、枣园和草地高43.90、32.08、18.69 mm.在2014年常态年,枣园0~60 cm土层生长季平均土壤含水量分别比坡耕地、梯田和草地低2.9%、3.8%、4.5% ($P<0.05$);在干旱年,0~160 cm土层有效水储量仅占土壤总储水量的35.0%.不同土地利用方式下均是表层(0~20 cm)与中层(20~100 cm)土壤水分的灰色关联度较大,且土壤水分变化态势的相似程度表现为梯田>草地>坡耕地>枣园.对于试验区内的坡耕地,可考虑改造为梯田,以提高雨水资源的有效利用、促进生态农业建设;而针对黄土丘陵区旱作枣园土壤缺水严重的现象,需采取适当水分管理措施以降低枣树自身耗水和其他无效耗水,实现枣园可持续发展.

关键词 黄土丘陵区; 土地利用; 土壤水分; 蓄水特征; 垂直变化; 灰色关联分析

Characteristics of soil moisture variation in different land use types in the hilly region of the Loess Plateau, China. TANG Min^{1,2}, ZHAO Xi-ning^{1,3}, GAO Xiao-dong^{1,3}, ZHANG Chao^{1,2}, WU Pu-te^{1,3*} (¹Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ³Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China).

Abstract: Soil water availability is a key factor restricting the ecological construction and sustainable land use in the loess hilly region. It is of great theoretical and practical significance to understand the soil moisture status of different land use types for the vegetation restoration and the effective utilization of land resources in this area. In this study, EC-5 soil moisture sensors were used to continuously monitor the soil moisture content in the 0-160 cm soil profile in the slope cropland, terraced fields, jujube orchard, and grassland during the growing season (from May to October) in the Yuanzegou catchment on the Loess Plateau, to investigate soil moisture dynamics in these four typical land use types. The results showed that there were differences in seasonal variation, water storage characteristics, and vertical distribution of soil moisture under different land use types in both the normal precipitation (2014) and dry (2015) years. The terraced fields showed good water retention capacity in the dry year, with the average soil moisture content of 0-60

本文由“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0400204)和国家自然科学基金项目(41571506,41771316,51579212)资助 This work was supported by the National Key Research and Development Plan (2016YFC0400204) and the National Natural Science Foundation of China (41571506, 41771316, 51579212).

2017-07-11 Received, 2017-12-09 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

cm soil layer in the growing season being 2.6% , 4.2% , and 1.8% higher than that of the slope cropland , jujube orchard , and grassland (all $P < 0.05$) . The water storage of 0–160 cm soil profile was 43.90 , 32.08 , and 18.69 mm higher than that of slope cropland , jujube orchard , and grassland , respectively. In the normal precipitation year , the average soil moisture content of 0–60 cm soil layer in jujube orchard in the growing season was 2.9% , 3.8% , and 4.5% lower than that of slope cropland , terraced fields , and grassland , respectively (all $P < 0.05$) . In the dry year , the effective soil water storage of 0–160 cm soil profile in the jujube orchard accounted for 35.0% of the total soil water storage. The grey relational grade between the soil moisture in the surface layer (0–20 cm) and soil moisture in the middle layer (20–100 cm) under different land use types was large , and the trend for the similarity degree of soil moisture variation followed terraced fields > grassland > slope cropland > jujube orchard. The slope cropland in this area could be transformed into terraced fields to improve the utilization of precipitation and promote the construction of ecological agriculture. Aiming at resolving the severe water shortage in the rain-fed jujube orchard for the sustainable development of jujube orchard in the loess hilly region , appropriate water management measures should be taken to reduce the water consumption of jujube trees and other inefficient water consumption.

Key words: loess hilly region; land use; soil moisture; soil water storage characteristics; vertical variation; grey relational analysis.

土壤水分是土壤的重要组成物质之一,是土壤系统养分循环和流动的载体,同时也是流域水循环中最为活跃的部分^[1],影响着植物生长、生态环境建设以及水资源的合理分配与高效利用^[2].黄土丘陵区属于干旱半干旱地区^[3],植被稀疏^[4]、水土流失严重^[5]、生态环境脆弱,且区域植被恢复困难,土壤水分是植物生长和生态恢复的主要限制因子^[6],也是制约土地可持续利用的主导因子^[7].长期以来强烈的人口压力造成该区土地利用不合理,导致对土壤水分过度开发,形成土壤干层,难以持续利用^[8].自1999年国家实施退耕还林还草工程以来,黄土高原地区土地利用结构进行了相应调整,土地资源利用方式呈现多元化.充分认识各种土地利用方式的土壤水分状况及其变化规律是有效利用土地资源的前提,对该区的植被恢复、土地利用结构优化等具有重要指导意义.

近年来,关于黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分的效应、动态变化、影响等方面的问题,国内已进行了广泛研究^[9–12].兰志龙等^[13]于2014年8月下旬通过人工采集土样和烘干法测定土壤含水量,对陕北米脂人工经济林、神木退耕还林和榆林榆阳区防风固沙林具有代表性植被类型0~20 m土壤剖面水分特征的差异进行研究,分析黄土丘陵区不同土地利用模式对深层土壤剖面水分分布和储存特征的影响及生态环境效应.Wang等^[14]于2014年7—8月在黄土高原南北样带,用内径5 cm土钻在林地、灌木林地、草地和农田0~300 cm深度分层采

集土样,并用烘干法测定其质量含水量,研究了土地利用方式影响下的土壤水分空间变化.到目前为止,国内关于黄土高原不同土地利用类型对土壤水分影响的研究报道大多以短时段或个别事件作为一般规律归纳,并且已有研究中的土壤水分分析数据多来自烘干法、时域反射仪(TDR)和中子仪法等人工定时测定的土壤含水量,缺乏对土壤水分长期连续定位监测与跨年度季节变异规律的分析.本文以黄土丘陵区清涧县店则沟镇园则沟小流域坡耕地、梯田、枣园和草地4种典型土地利用类型为研究对象,系统分析了不同土地利用类型在降水常态年和干旱年的土壤水分变化规律及蓄水特征,在此基础上,提出了不同土地利用类型水分管理建议,以期为黄土丘陵区天然降雨资源的有效利用和土地利用方式的优化配置,以及生态恢复提供理论依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验区位于陕西省清涧县店则沟镇园则沟流域(37°14' N、110°21' E,图1),地处黄土高原中部偏北,流域面积0.58 km².该区为典型的丘陵沟壑地貌,地形破碎,坡地分布广泛,约70%的坡地坡度在17°~34°.该区属于温带大陆性季风气候,年均气温8.6℃,月均温度极值出现在1月和7月,分别为-6.5和22.8℃.年均降水量505 mm,降水年内分布不均,主要集中在7—9月,且多以暴雨形式出现,年际变化也很大.研究区土壤类型为黄土母质上发育

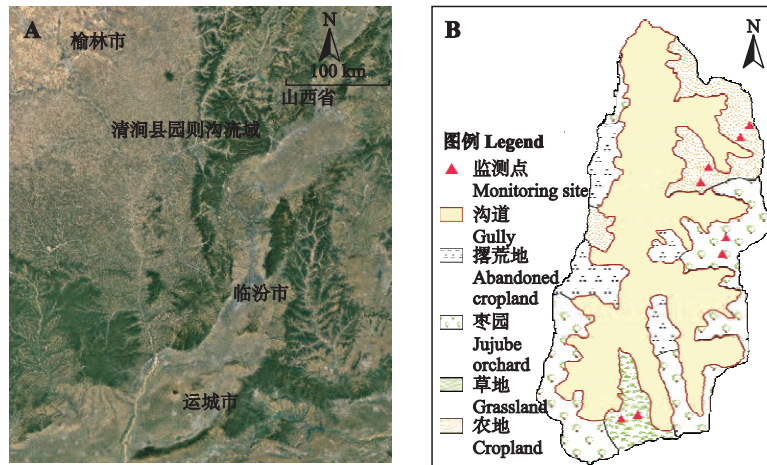


图 1 园则沟流域地理位置 (A) 和土地利用分布 (B)
 Fig.1 Geographical location of Yuanzegou catchment (A) and its land use distribution (B).

图 B 中农地包括坡耕地和梯田 The cropland in figure B included slope cropland and terraced fields.

而成的黄绵土,土质疏松,入渗能力较强,抗蚀抗冲性差.田间持水量和凋萎湿度分别为 25%、7%.由于土地利用强度较大,流域内自然植被破坏严重,垦殖指数较高,主要有坡耕地、梯田、枣园和草地等土地利用类型.2014 年生长季(5—10 月)降水量为 377.4 mm,属于常态(降雨量增减在平均降雨量的 10% 以内)^[15]; 2015 年生长季降水量仅有 289.2 mm,属于干旱年(降雨量比平时降雨量减少 10% 以上)^[15]. 2014—2015 年生长季降雨量、气温及日参考作物蒸发蒸腾量见图 2.

1.2 样地设置

在黄土丘陵坡地上选择 4 种具有代表性的土地利用类型(坡耕地、梯田、枣园和草地)作为试验样地.这 4 种土地利用类型的坡度均在 20°左右,且坡向基本一致.坡耕地耕种年限在 30 年以上,作物制度为一年一熟,主要种植大豆(*Glycine max*),于每年

4 月下旬播种,10 月上旬收获.梯田主要种植玉米(*Zea mays*),播种时间在 5 月,9 月下旬至 10 月上旬收获.枣树品种为 12 年生梨枣(*Ziziphus jujuba*),株行距为 2 m×3 m,枣树平均高度(2.25±0.28) m,平均冠幅(1.98±0.38) m.坡耕地、梯田和枣园的管理模式与当地传统耕作方法一致.草地为天然荒草地,主要植物包括铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、长茅草(*Stipa bungeana*)和达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)等.试验期间不灌溉,完全是在旱作条件下进行,降雨为唯一补充水源.

1.3 土壤水分及降雨气温监测

有研究表明,玉米根深可达 160 cm^[16].因此本文主要研究各土地利用类型 0~160 cm 植物根区的土壤水分.2014 年 4 月,分别在各样地的坡中位置同一等高线上安装两套土壤水分自动监测装置,间距约 10 m,土壤体积含水量由美国 Decagon 公司生产

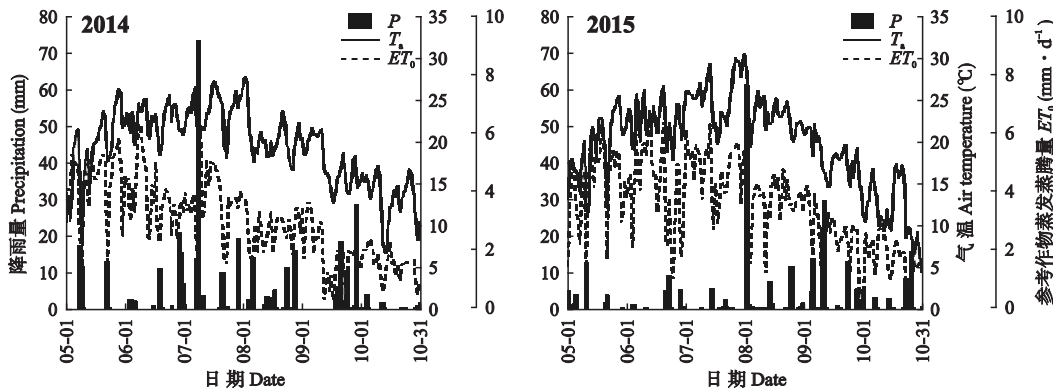


图 2 2014—2015 年生长季降雨量 (P)、气温 (Ta) 及日参考作物蒸发蒸腾量 (ET₀)

Fig.2 Rainfall (P), air temperature (Ta) and daily reference crop evapotranspiration (ET₀) during the growing season in 2014—2015.

的 EC-5 土壤水分传感器测定.坡耕地和梯田的监测探针埋设在作物行间,枣园的监测点距离枣树树干约 30 cm.土壤水分测定时间为 2014—2015 年生长季(5—10 月),测定频率为 10 min 一次,剖面测定深度为 10、20、60、100、160 cm.对各土地类型坡中 2 个监测点同一土层的水分数据求平均,以此表征该土地类型在该土层深度的土壤含水量.

距离试验地约 100 m 的空旷处安装有自动气象站(AR5 Automatic Weather Station),可长期监测研究区内降雨量、风速、气压、太阳辐射、空气湿度以及气温等气象要素.

1.4 计算方法

1.4.1 土壤储水量 土壤储水量(SWS, mm)为一定厚度土壤中所含的水量,计算公式如下^[17]:

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

式中: θ_i 为第 i 层(共 n 层)土壤的体积含水量($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); h_i 为该土层厚度(mm).

1.4.2 土壤水分亏缺量 土壤水分亏缺量(D , mm)计算公式为^[18]:

$$D = \sum_{i=1}^n (SWS_{FC} - SWS_i) \quad (2)$$

式中: FC 为田间持水量($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); SWS_{FC} 为田间持水量对应的土壤储水量(mm); SWS_i 为第 i 土层实际储水量(mm).

1.4.3 土壤有效储水量 当土壤含水量介于田间持水量与凋萎湿度之间时,才是有效含水量;土壤含水量低于凋萎湿度与高于田间持水量的部分,均为无效水.据此,土壤有效储水量(ESWS, mm)的表达式为^[19]:

$$ESWS_i = \begin{cases} SWS_i - SWS_{WM} & (\theta_i < FC) \\ SWS_{FC} - SWS_{WM} & (\theta_i \geq FC) \end{cases} \quad (3)$$

$$ESWS = \sum_{i=1}^n ESWS_i \quad (4)$$

式中: $ESWS_i$ 为第 i 土层有效储水量(mm); WM 为凋萎湿度($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); SWS_{WM} 为凋萎湿度对应的土壤储水量(mm).

1.4.4 灰色关联分析 灰色关联指事物之间的不确定关联,是系统因子之间、因子与主行为之间的不确定关联.灰色关联分析方法的基本原理是通过比较统计序列的几何关系来分清系统中多因素的紧密程度(灰色关联度),序列曲线的几何形状越接近,它们之间的灰色关联度就越大,反之则越小^[20].在对复杂系统进行系统分析时,以往大多采用经典统计

分析或其他分析方法,灰色关联分析方法相比前者的优势在于:灰色关联分析是按照因素的发展趋势做出分析,因此对样本量的多少没有太多要求,也不需要典型分布规律,并且计算量比较小,其结果与定性分析的结果比较吻合.因此,灰色关联分析是一种简单、可靠的分析方法^[21].

在进行灰关联分析前,必须先确定参考数列,然后比较其他数列与参考数列的接近程度,这样才能对其他数列进行比较,进一步做出合理判断.假设 $X_0 = \{X_0(k) | k=1, 2, \dots, n\}$ 为参考数列(又称母数列), $X_i = \{X_i(k) | k=1, 2, \dots, n\}$ ($i=1, 2, \dots, m$) 为比较数列(又称子数列),则 $X_i(k)$ 和 $X_0(k)$ 的关联系数为:

$$\varepsilon_i(k) = [\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|] / [|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|] \quad (5)$$

式中: ρ 为分辨系数, ρ 越小,分辨力越大.一般 ρ 的取值范围是 $[0, 1]$,通常取 $\rho=0.5$. $|x_0(k) - x_i(k)|$ 为 X_0 与 X_i 第 k 个指标的绝对差; $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 和 $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 分别为两级极小差和两级极大差.据此可求出 $X_i(k)$ 与对应的 $X_0(k)$ 的关联系数:

$$\varepsilon_i = \{\varepsilon_i(k) | k=1, 2, \dots, n\} \quad (6)$$

从关联系数的计算来看,得到的是各比较数列与参考数列在各点的关联系数值,结果较多,信息过于分散,不便于比较,因而有必要将每一比较数列各个点的关联系数集中体现在一个值上.这个数值就是比较数列对参考数列的灰关联度 $r(x_0, x_i)$,通常简记为 r_i .常用的计算灰关联度的方法为平均值法,公式如下:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k) \quad (7)$$

土壤水分灰色关联度是影响土壤水分各因素综合作用的体现.在本研究中,灰关联程度高的土壤水分,可作为不同地类土壤水分对比的参照,并为其他流域土壤水分比较提供选择依据.

1.5 数据处理

应用 Microsoft Excel 2013、Matlab R2015b 和 Origin 8.0 软件进行数据处理和绘图,采用 SPSS 18.0 软件进行统计分析.采用独立样本 t 检验比较不同土地利用类型 0~160 cm 土层土壤含水量的差异显著性,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$.

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型土壤水分的动态变化

大豆的根系绝大多数分布于 0~45 cm 土层范

围内,占总根系的 90%左右^[22];约 95%的玉米根系分布于 0~60 cm 土层中,80 cm 以下只有不足 2%的根系分布^[23];枣树大部分细根富集于 0~60 cm 土层内,在 60 cm 以下土层中枣树根长密度随土壤深度增加而递减^[24];黄土高原天然荒草地以铁杆蒿等为主的根系主要分布在 0~60 cm 土层^[25].综合考虑各土地利用类型的植被根系分布特征,本文将土壤剖面划分为 0~60 cm 根系密集层、60~160 cm 根系稀疏层.

由图 3 可以看出,各土地利用类型根系密集层土壤含水量受降雨、土壤蒸发以及植物根系吸水的综合影响而波动较大,属于季节性波动层.2014 年,各土地利用类型根系密集层土壤含水量在生长季内呈现明显的峰谷交替变化特征,其中枣园土壤含水量始终在较低水平波动,其生长季平均土壤含水量(11.2%)分别比坡耕地、梯田和草地低 2.9%、3.8%、4.5%,且与这 3 种土地利用类型存在显著性差异.2015 年,各土地利用类型根系密集层土壤含水量在生长季前期整体呈下降趋势,尤其是枣园由于雨水的补给量不足以供应土壤蒸散,使得土壤水分大量消耗,造成

盛果期根系密集层土壤含水量低于凋萎湿度,形成季节性低湿区,直到 2015 年 8 月初,各土地利用类型根系密集层土壤含水量在降雨补充下开始恢复,但恢复程度较低.2015 年生长季内,梯田根系密集层土壤含水量显著高于其他 3 种土地利用类型,其生长季平均土壤含水量(12.2%)分别比坡耕地、枣园和草地高 2.6%、4.2%、1.8%.根系稀疏层土壤水分受降雨影响相对较弱,土壤含水量变化较为平缓,其中,梯田土壤水分基本不随降雨或干旱发生明显变化.2014、2015 年研究区生长季总降雨量分别为 377.4 和 289.2 mm,降雨量大幅降低导致 2015 年各土地利用类型根系密集层和根系稀疏层土壤含水量均显著低于 2014 年相应土地利用类型同期土壤含水量.在 2015 年生长季,梯田根系稀疏层平均土壤含水量(13.0%)分别比坡耕地、枣园和草地高 2.3%、0.8%、1.0%.

2.2 不同土地利用类型的土壤储水与亏缺状况

2014 年生长季,草地 0~160 cm 土层储水量最大,高达 250 mm,梯田次之,枣园土壤储水量最低,约低于草地 44 mm.2015 年研究区为干旱年,各土地利用类型土壤储水量均有明显下降,其中,梯田 0~160 cm 土层储水量约 204 mm,分别比坡耕地、枣园和草地高 43.90、32.08、18.69 mm.各种土地利用类型均常年处于不同程度的土壤水分亏缺状态,其中,坡耕地和枣园较为严重,尤其在 2015 年干旱年,0~160 cm 土层有效水储量尚不足 60 mm,分别占土壤总储水量的 30.3%、35.0%.由于梯田具有良好的保水能力,其土壤水分亏缺相对较轻,即使在干旱年,土壤有效水储量占到总储水量的 45.2%(图 4).

2.3 不同土地利用类型的土壤剖面水分特征

综合分析 2014—2015 年生长季不同土地利用类型各土层的土壤含水量(图 5),结果表明,土地利用类型对 0~10 cm 土层土壤含水量影响显著,4 种土地利用类型表现为梯田(14.4%)>草地(12.1%)>坡耕地(11.1%)>枣园(9.0%).在 10~20 cm 土层,枣园土壤含水量显著低于其他 3 种土地利用类型.在 20~60 cm 土层,4 种土地利用类型土壤含水量差异显著,且草地和梯田高于坡耕地和枣园.在 60~100 cm 土层,枣园土壤含水量显著低于坡耕地和草地.在 100~160 cm 土层,坡耕地土壤含水量显著低于其他土地利用类型.对比不同土地利用类型土壤含水量峰值位置,两个生长季内,坡耕地土壤含水量均在 20 cm 土层达到峰值,枣园土壤含水量峰值则低至 160 cm;梯田和草地在 2014 年土壤含水量峰值分别出现在 10、60 cm 土层,在 2015 年峰值均降至

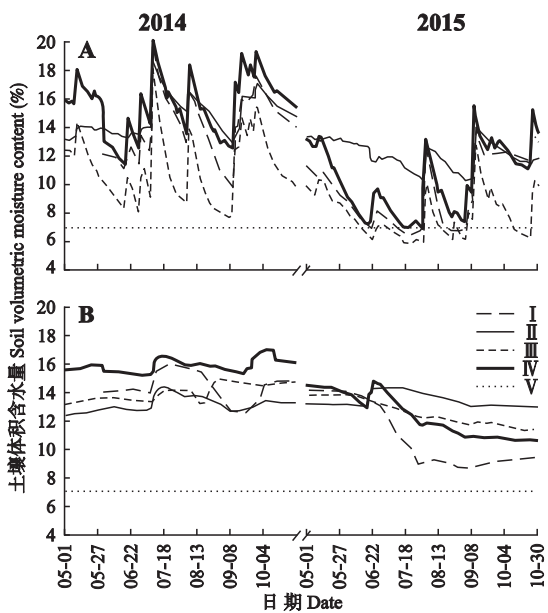


图 3 生长季不同土地利用类型 0~60 cm (A) 和 60~160 cm 土层(B) 日平均土壤含水量的变化

Fig.3 Changes of daily average soil moisture content in 0-60 cm (A) and 60-160 cm (B) soil layers in different land use types during the growing seasons.

I: 坡耕地 Slope cropland; II: 梯田 Terraced fields; III: 枣园 Jujube orchard; IV: 草地 Grassland; V: 凋萎系数 Wilting point. 下同 The same below. 各土地利用类型某一土层日平均土壤含水量是由 EC-5 土壤水分传感器在该土层一天内所采集的土壤水分数据求平均计算得到 For all land use types, the daily mean soil moisture content of a soil layer was obtained by averaging the soil moisture data collected by the EC-5 soil moisture sensor in the soil layer in one day.

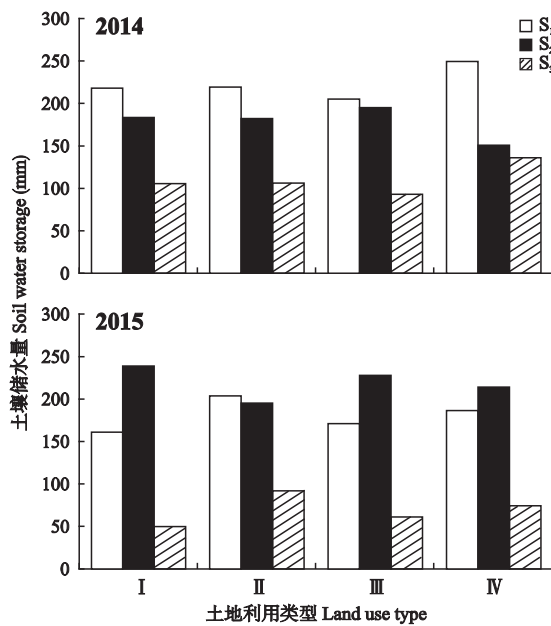


图4 2014和2015年生长季不同土地利用类型0~160 cm土层的平均土壤储水量(S_1)、土壤水亏缺量(S_2)和土壤有效储水量(S_3)

Fig. 4 Average soil water storage (S_1), soil water deficit (S_2), and effective soil water storage (S_3) in 0-160 cm soil layer of different land use types in the growing season in 2014 and 2015.

各土地利用类型土壤储水量、土壤水亏缺量和土壤有效储水量均是由计算土层在整个生长季的平均土壤含水量计算得到,生长季平均土壤含水量则是由计算土层在生长季内的逐日平均含水量求平均得到。The soil water storage, soil water deficit, and effective soil water storage of each land use type were calculated based on the average soil moisture content of the soil layer in the whole growing season, which was obtained by averaging the daily mean moisture content of the calculated soil layer during the growing season.

160 cm 土层:主要原因是土壤水分既受生长季降雨量的影响,又受植被盖度(影响土壤蒸发)和根系分布的影响,因而不同土地利用类型土壤含水量峰值位置有所差异。在降雨量多的年份,梯田和草地浅层土壤水分充足,土壤水分峰值位置靠上;反之,水分峰值位置则下降。2014—2015年,坡耕地和草地土壤含水量谷值位置均由160 cm土层上升至10 cm土层,坡耕地谷值分别为12.9%和8.7%,草地谷值分别为14.5%和9.7%。梯田土壤含水量谷值则由100 cm土层上升到20 cm土层,上升幅度较小,且谷值变化不大,均在11.5%左右。枣园土壤含水量谷值从表层10 cm(10.5%)下降至60 cm土层(7.5%),接近凋萎湿度(7%),表明在干旱年,浅层土壤水分难以满足枣树蒸腾耗水需求,枣树开始吸收更深层土壤水分,造成深层土壤水分接近凋萎湿度,形成中度干层(土壤含水量为6%~9%)^[26]。

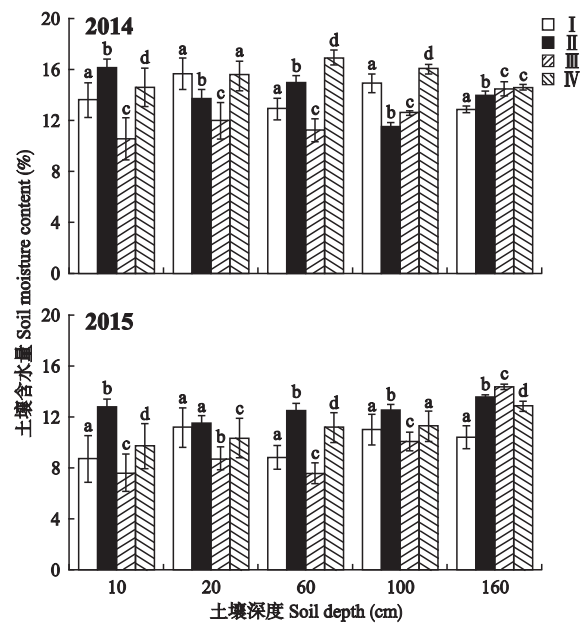


图5 2014和2015年生长季不同土地利用类型平均土壤含水量随土层深度的变化

Fig. 5 Vertical distribution of average soil moisture in different types of land use in the growing seasons of 2014 and 2015.

各土地利用类型土壤剖面含水量是某一土层在整个生长季的平均土壤含水量,其由计算土层在生长季内的逐日平均含水量求平均得到。The moisture content of each land use type in the soil profile was the average soil moisture content of a soil layer in the whole growing season, which was obtained by averaging the daily mean moisture content of the soil layer during the growing season. 不同小写字母表示同一土层深度不同土地类型之间差异显著($P < 0.05$)。Different lowercase letters indicated significant differences among different land types in the same soil depth at 0.05 level.

2.4 不同土地利用类型不同土层土壤水分灰色关联分析

为了深入了解研究区内不同土地利用方式下土壤水分的剖面特征,运用灰关联法分析不同土地利用类型和不同土层深度的土壤水分灰关联度。将土壤剖面划分为表层(0~20 cm)、中层(20~100 cm)和深层(100~160 cm)3个层次,各层5—10月平均土壤含水量数列分别设为 $X_1 = \{X_1(k) | k = 5, 6, \dots, 10\}$ 、 $X_2 = \{X_2(k) | k = 5, 6, \dots, 10\}$ 、 $X_3 = \{X_3(k) | k = 5, 6, \dots, 10\}$ 。分别以表层为参考数列、中层和深层为比较数列(分别记为 R_{12} 和 R_{13})以及中层为参考数列、深层为比较数列(记为 R_{23})。根据式(5)和(7)计算其灰色关联度。

由表1可以看出,坡耕地、梯田和枣园有相似规律,均是表层与中层土壤水分关系最为密切,与深层关联性次之,表明这3种土地利用方式中层土壤水分主要源自表层渗流,降水产生的表层渗流能够直接到达中层(100 cm),还有少部分可以到达深层(100 cm以下)。深层土壤含水量与中层含水量

表 1 生长季不同土地利用类型不同深度土壤水分灰色关联度

Table 1 Grey relational grade of soil moisture in different layers in different land use types during the growing season

年份 Year	灰色关联度 Grey relational grade	坡耕地 Slope cropland	梯田 Terraced fields	枣园 Jujube orchard	草地 Grassland
2014	R_{12}	0.68	0.77	0.67	0.75
	R_{13}	0.59	0.70	0.52	0.67
	R_{23}	0.64	0.75	0.59	0.67
2015	R_{12}	0.63	0.70	0.60	0.69
	R_{13}	0.57	0.68	0.46	0.62
	R_{23}	0.60	0.69	0.45	0.61

R_{12} : 以表层为参考数列、中层为比较数列的灰色关联度 Grey relational grade with the surface layer as the reference series and the middle layer as the comparison series; R_{13} : 以表层为参考数列、深层为比较数列的灰色关联度 Grey relational grade with the surface layer as the reference series and the deep layer as the comparison series; R_{23} : 以中层为参考数列、深层为比较数列的灰色关联度 Grey relational grade with the middle layer as the reference series and the deep layer as the comparison series.

关系密切,其关联性高于表层与深层,说明深层土壤水分主要来自中层土壤水分的二次渗流,部分来自表层土壤水,其消耗也要先经过中层。另外,表层与中层土壤关联性最好,说明一次渗流对土壤水的作用好于二次渗流。草地表层与深层、中层与深层土壤水分灰色关联度相差不大,说明在自然生草这种土地利用方式下,一次渗流和二次渗流对深层土壤水分的作用相当。在不同土地利用方式下,均是表层与中层土壤水分的变化态势最为接近,从横向比较来看,梯田的接近程度最好,草地次之,坡耕地和枣园较差,说明不同土地利用方式下表层渗流对中层土壤水分的补给程度不同。表层与深层、中层与深层的土壤水分变化态势的接近程度较表层与中层弱,但相对而言,梯田接近程度较好,枣园较差,说明与枣园相比,梯田这种土地利用模式对土壤水分的调控作用深度相对较深,土壤水分在垂直方向上的变化趋势较为缓和。由此可见,不同土地利用方式对不同层次土壤水分的变化发展态势会产生不同的影响。

3 讨 论

3.1 不同土地利用类型对土壤水分的影响

在干旱半干旱的黄土丘陵地区,降雨是影响土壤水分时空变化的主要因素。结合图 2 中降雨分布和图 3 土壤含水量随时间的动态变化可以发现,降雨强烈影响各土地利用类型 0~60 cm 浅层土壤含水量,有效降雨后,该层土壤含水量迅速升高,含水量变化较大。有研究表明,土地利用和植被覆盖变化通过改变下垫面性质及降雨的再分配过程而影响土

壤水分运动^[27],即土地利用类型是影响土壤水分分布格局的重要因子。这也在诸多研究中得到证实^[13, 28-30]。本研究发现,在相同气象条件下,不同土地利用方式土壤水分的时间动态变化、蓄水特征及垂直分布均存在差异。2015 年研究区为干旱年,梯田表现出良好的蓄水保墒效应,生长季内 0~60 cm 土层土壤含水量显著高于其他 3 种土地类型,其平均土壤含水量分别比坡耕地、枣园和草地高 2.6%、4.2%、1.8%,且 0~160 cm 土层储水量分别比坡耕地、枣园和草地高 43.90、32.08、18.69 mm。2014—2015 年生长季梯田各层土壤水分变化态势相似程度较高,表明梯田土壤水分垂直波动较小。这主要是由于梯田降低了地面坡度,改变了原有小地形,使田面变得平整,避免了径流的产生,并且通过截流作用达到蓄积雨水、增加入渗、改善土壤水分状况的目的^[31-34]。除地貌类型外,植被自身的属性也是影响土壤水分变化的重要因素。冠层截留作为影响降水进入土壤的第一个环节,影响着降水的再分配过程。相关研究表明,乔木冠层能够截留小的降水事件产生的降水,使乔木的土壤水分动态几乎不受小降水事件的作用^[35]。2014—2015 年生长季研究区 70%左右的降雨为无效降雨(降雨量<5 mm)^[36],容易被枣树树冠截留蒸发,无法补充到土壤中,且枣树株行距较大,地表裸露较多,土壤蒸发强烈,因此,2014 年枣园 0~60 cm 土层生长季平均土壤含水量分别比坡耕地、梯田和草地低 2.9%、3.8%、4.5%,且与这 3 种土地类型存在显著性差异($P<0.05$); 2015 年盛果期 0~60 cm 土层土壤含水量甚至低于凋萎湿度,形成季节性低湿区。干旱年枣园土壤水分亏缺尤为严重,0~160 cm 土层有效水储量尚不足 60 mm,仅占土壤总储水量的 35.0%。2014—2015 年生长季枣园各层土壤水分变化态势差异较大,表明枣园对土壤水分在垂直方向的调控作用较差。大豆和自然生草由于植株矮小,冠层的截留效应远远不及枣树明显,可以利用的坡面径流比枣树多,并且植被密集覆盖地表,减少了土壤蒸发,因此即使同为坡地且坡度相差不大,坡耕地和草地的土壤水分状况整体好于枣园。

以试验期间研究区内一场最大降雨为例,进一步探讨不同土地利用类型次降雨后土壤水分分布的差异。该场降雨从 2014 年 7 月 8 日持续至 7 月 11 日,总降雨量为 90.4 cm。此次降雨前 6 天(7 月 2—7 日)和降雨后 9 天(7 月 12—20 日)均无有效降雨。此次降雨 1 d 后,坡耕地、梯田、草地 0~100 cm 土层

水分增加量分别占总增加量的 99.9%、99.5%、99.6% 枣园 0~60 cm 土层水分增加量占总增加量的 99.3% ,说明本次降雨主要补充坡耕地、梯田、草地 0~100 cm 土层和枣园 0~60 cm 土层土壤水分,即在同等降雨条件下,枣园的降雨入渗深度小于坡耕地、梯田和草地,可能是由于枣树树冠、枝干对雨水的截留和缓冲作用,使得到达地表的降雨数量减少、速度降低,进而影响雨水入渗。此次降雨 5 d 后,枣园降雨入渗层土壤水分损失率高达 15.6% ,远远高于梯田土壤水分损失率(3.9%) ;坡耕地和草地的土壤水分损失率,分别为 8.7%、8.5%。此次降雨 9 d 后,坡耕地、梯田、枣园、草地的土壤水分损失率分别为 15.0%、6.9%、30.9%、14.5%。与降雨 5 d 后土壤水分损失率相比,梯田土壤水分损失率增长缓慢,而枣园土壤水分损失率大幅度增加。由此可见,在此次降雨后持续干旱条件下,梯田具有明显的保水效果,而枣园土壤水分则严重散失。这可能与枣园强烈的蒸散发有关。

3.2 不同土地利用类型的水管理建议

土壤水分是制约黄土丘陵区植被恢复与重建的主要限制因子,也是决定土地生产力的一个重要因素,如果对土地的资源配置缺乏科学指导,则会加剧土壤水分耗竭,造成土壤干燥化强度增大,最终影响生态环境恢复和土地资源的可持续利用。有研究表明,只有当枣林土壤含水量保持在田间持水量的 60% 以上时,枣树才能正常生长^[37]。如图 3 所示,2014—2015 年生长季枣树根系密集层(0~60 cm)土壤含水量除了在 2014 年 7 月 9—14 日和 2014 年 9 月 28—30 日两个时段由于强降雨的补充而高于 15% 外,其余时间该层土壤含水量均低于 15% ,未能满足枣树的水分需求;在 60~160 cm 土层,土壤水分在整个生育期始终低于 15% ,表明枣树从深层土壤中吸水也难以满足自身生长需求。如果任由土壤缺水持续存在,势必影响枣树生长发育,最终导致枣园退化衰败,甚至成片干枯死亡。因此,有必要将土壤水分管理措施引入旱作枣园,比如根据枣树的生理特性,结合当地生态和气候条件,对枣树树体进行节水型修剪,将树体规格控制在合理范围内,既能减小树冠截留,又能降低树体蒸腾,从而降低枣树对土壤水分的过度消耗^[38];另外,可以在枣园内布设水平沟^[39]或鱼鳞坑^[40]等水土保持措施,在降雨时汇集部分径流以增大土壤水分含量;还可引入秸秆覆盖^[41]、地膜覆盖^[42]以及修剪枣树枝就地覆盖^[43]等蓄水保墒措施,减少土壤蒸发的无效

耗水。

在干旱年,梯田根系密集层(0~60 cm)和根系稀疏层(60~160 cm)土壤含水量均显著高于坡耕地,主要原因是黄土丘陵区降雨多为高强度暴雨,坡耕地易产生较多的无效径流,而在相同的降雨历时和土质条件下,梯田比坡耕地蓄水多、入渗深度大,在同一降雨强度下,可能坡耕地产生了径流而梯田在整个过程中并没有产生径流^[44]。有学者根据黄土高原多地监测资料得出,次降雨量在 100~200 mm 的降雨几乎可以完全被梯田拦蓄,而不产生径流^[45];即使随着降雨强度增大而产生径流,径流经过梯田的坡面流速会降低,汇流历时延长,梯田通过层层拦截作用可增加雨水入渗,从而明显改善土壤水分环境。鉴于此,笔者认为,在考虑黄土丘陵沟壑区土地资源可持续利用与自然降水高效利用的共同目标下,实施坡耕地改梯田工程,拦蓄天然降水,减少地表径流,增加土壤入渗,提高降水利用率,对于指导坡耕地的治理开发、建设生态农业具有重要意义。

4 结 论

各土地利用类型 0~60 cm 土层为土壤水分季节性波动层,2014 年生长季土壤含水量呈现明显的峰谷交替变化特征,2015 年生长季则呈现前期下降后期恢复的变化趋势;60~160 cm 土层土壤水分变化较为平缓。2014 年枣园 0~60 cm 土层生长季平均土壤含水量分别比坡耕地、梯田和草地低 2.9%、3.8%、4.5% ,且在 2015 年盛果期形成季节性低湿区。2015 年梯田 0~60 cm 土层生长季平均土壤含水量分别比坡耕地、枣园和草地高 2.6%、4.2%、1.8% ,60~160 cm 土层土壤含水量也显著高于其他 3 种土地类型。

枣园土壤水分亏缺较为严重,干旱年 0~160 cm 土层有效水仅占土壤总储水量的 35.0% ;梯田具有良好的保水能力,在干旱年土壤储水量分别比坡耕地、枣园和草地高 43.90、32.08、18.69 mm。

不同土地利用类型各层土壤水分的变化态势不同。总体来说,表层(0~20 cm)与中层(20~100 cm)土壤水分变化态势的相似程度较高,不同地类的相似程度顺序为:梯田>草地>坡耕地>枣园。除草地外,其他土地利用方式下表层与深层(100~160 cm)土壤的灰关联度最小,土壤水分变化态势差异较大。

土地利用类型对土壤水分的季节动态变化和垂直剖面变化都会产生一定影响。旱作枣园土壤水分

状况较差,为了防止枣园退化衰败,需增加水分管理措施以降低枣树自身蒸腾耗水和其他无效耗水,实现黄土丘陵区旱作枣园可持续发展.本研究中,梯田的土壤水分环境明显优于坡耕地,因此,可考虑实施坡耕地改梯田工程,以提高雨水资源的高效利用,促进生态农业建设.

致谢 感谢西北农林科技大学张富仓教授对本文英文摘要的修改!

参考文献

- [1] Kerr YH, Waldteufel P, Wigneron JP, et al. Soil moisture retrieval from space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, **39**: 1729–1735
- [2] Robinson DA, Campbell CS, Hopmans JW, et al. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review. *Vadose Zone Journal*, 2008, **7**: 358–389
- [3] Huang J, Zhang W, Zuo J, et al. An overview of the semi-arid climate and environment research observatory over the Loess Plateau. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2008, **25**: 906–921
- [4] Fu BJ, Chen LD, Ma KM, et al. The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the Loess Plateau in northern Shaanxi, China. *Catena*, 2000, **39**: 69–78
- [5] Zhao GJ, Mu XM, Wen ZM, et al. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the loess plateau of China. *Land Degradation & Development*, 2013, **24**: 499–510
- [6] Wang GL, Liu GB, Xu MX. Above- and belowground dynamics of plant community succession following abandonment of farmland on the Loess Plateau, China. *Plant and Soil*, 2009, **316**: 227–239
- [7] Wang Z-Q (王志强), Liu B-Y (刘宝元), Wang X-Y (王旭艳), et al. Soil water restoration of different land use after artificial forest in the semi-arid area of Loess Plateau. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (农业工程学报)*, 2007, **23**(11): 77–83 (in Chinese)
- [8] Ding W-F (丁文峰), Ding D-S (丁登山). The fractal features of soil granule structure before and after vegetation destruction on Loess Plateau. *Geographical Research (地理研究)*, 2002, **21**(6): 700–706 (in Chinese)
- [9] Wang Y-Q (王云强), Shao M-A (邵明安), Liu Z-P (刘志鹏). Spatial variability of soil moisture at a regional scale in the Loess Plateau. *Advances in Water Science (水科学进展)*, 2012, **23**(3): 310–316 (in Chinese)
- [10] Jian SQ, Zhao CY, Fang SM, et al. Effects of different vegetation restoration on soil water storage and water balance in the Chinese Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, **206**: 85–96
- [11] Yu Y, Wei W, Chen LD, et al. Responses of vertical soil moisture to rainfall pulses and land uses in a typical loess hilly area, China. *Solid Earth*, 2015, **6**: 595–608
- [12] Suo L-Z (索立柱), Huang M-B (黄明斌), Duan L-X (段良霞), et al. Zonal pattern of soil moisture and its influencing factors under different land use types on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2017, **37**(6): 2045–2053 (in Chinese)
- [13] Lan Z-L (兰志龙), Pan X-L (潘小莲), Zhao Y (赵英), et al. Effects of land use types on deep soil water content in the loess hilly area of the north Shaanxi Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2017, **28**(3): 847–855 (in Chinese)
- [14] Wang C, Wang S, Fu BJ, et al. Soil moisture variations with land use along the precipitation gradient in the north-south transect of the Loess Plateau. *Land Degradation & Development*, 2017, **28**: 926–935
- [15] Hao M-D (郝明德), Wei X-R (魏孝荣), Dang T-H (党廷辉). Effect of long-term applying zinc fertilizer on wheat yield and content of zinc in dryland. *Plant Nutrition and Fertilizer Science (植物营养与肥料学报)*, 2003, **9**(3): 377–380 (in Chinese)
- [16] Teare ID, Peet MM. Crop-Water Relations. New York: Wiley Interscience Publication, 1982
- [17] Han X-Y (韩晓阳), Liu W-Z (刘文兆), Cheng L-P (程立平). Vertical distribution characteristics and temporal stability of soil water in deep profile on the Loess Tableland, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2017, **28**(2): 430–438 (in Chinese)
- [18] Yin M-H (银敏华), Li Y-N (李援农), Zhang T-L (张天乐), et al. Effects of different rainwater harvesting patterns on soil hydrothermal regimes and water use efficiency of summer maize. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery (农业机械学报)*, 2015, **46**(12): 194–203 (in Chinese)
- [19] Yang L (杨磊), Wei W (卫伟), Mo B-R (莫保儒), et al. Soil water deficit under different artificial vegetation restoration in the semi-arid hilly region of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2011, **31**(11): 3060–3068 (in Chinese)
- [20] Li C-C (李超超). Dam-break Numerical Simulation and Gray Correlation Analysis. Master Thesis. Ji'nan: Shandong University, 2013 (in Chinese)
- [21] Liu S-F (刘思峰), Dang Y-G (党耀国), Fang Z-G (方志耕), et al. Grey System Theory and Its Application. 5th Ed. Beijing: Science Press, 2010 (in Chinese)
- [22] Xu X-Y (许秀英), Huang C-J (黄操军), Yang Q-M (杨秋梦). Prediction of near-surface moisture based on GNN in Heilongjiang Province. *Research of Soil and Water Conservation (水土保持研究)*, 2013, **20**(1): 269–272 (in Chinese)
- [23] Li D-F (李丹凤). Study on the Spatial and Temporal Variability of Soil Physical Properties in the Middle Basin Oasis of the Heihe River. PhD Thesis. Yangling: Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 2014 (in Chinese)
- [24] Li L-S (李陆生), Zhao X-N (赵西宁), Gao X-D (高晓东), et al. Soil water dynamic of rain-fed jujube (*Ziziphus jujube*) with stand age on Loess Plateau.

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2016, **32**(14): 145–152 (in Chinese)
- [25] Li P (李鹏), Li Z-B (李占斌), Tan T-Z (澹台湛). Dynamic distribution characters of herbaceous vegetation root systems in abandoned grasslands of Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(5): 849–853 (in Chinese)
- [26] Wang L (王力), Shao M-A (邵明安), Hou Q-C (侯庆春). Preliminary research on measured indexes of dried soil layer. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2000, **14**(4): 87–90 (in Chinese)
- [27] Guo J-T (郭军庭), Zhang Z-Q (张志强), Wang S-P (王盛萍), et al. Features of baseflow and its influencing factors for small watersheds in loess hilly and gully region. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2011, **31**(1): 87–92 (in Chinese)
- [28] Gao XD, Wu PT, Zhao XN, et al. Effects of land use on soil moisture variations in a semi-arid catchment: Implications for land and agricultural water management. *Land Degradation & Development*, 2014, **25**: 163–172
- [29] Wang H, Li XB, Long HL, et al. Monitoring the effects of land use and cover type changes on soil moisture using remote-sensing data: A case study in China's Yongding River basin. *Catena*, 2010, **82**: 135–145
- [30] Xu F (徐飞), Lai X-M (赖晓明), Zhu Q (朱青), et al. The controlling factors of soil moisture distribution under two typical land-use hillslopes in a hilly region of Taihu Lake basin. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2016, **36**(3): 592–599 (in Chinese)
- [31] Meerkerk AL, Van Wesemael B, Bellin N. Application of connectivity theory to model the impact of terrace failure on runoff in semi-arid catchments. *Hydrological Processes*, 2009, **23**: 2792–2803
- [32] Widomski MK, Sobczuk H, Olszta W. Sand-filled drainage ditches for erosion control: Effects on infiltration efficiency. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, **74**: 213–220
- [33] Courtwright J, Findlay SE. Effects of microtopography on hydrology, physicochemistry, and vegetation in a tidal swamp of the Hudson River. *Wetlands*, 2011, **31**: 239–249
- [34] Zhang HD, Wei W, Chen LD, et al. Effects of terracing on soil water and canopy transpiration of *Pinus tabulaeformis* in the Loess Plateau of China. *Ecological Engineering*, 2017, **102**: 557–564
- [35] Loil ME, Breshears DD, Lauenroth WK, et al. A multi-scale perspective of water pulses in dryland ecosystems: Climatology and ecohydrology of the western USA. *Oecologia*, 2004, **141**: 269–281
- [36] Yan J-H (闫江鸿), Zhao Y-Z (赵元忠), Zheng Y (郑勇), et al. Study on the relationship between runoff and rainfall of city in Loess Plateau. *Journal of Water Resources & Water Engineering* (水资源与水工程学报), 2009, **20**(2): 79–82 (in Chinese)
- [37] Li X-B (李晓彬), Wang Y-K (汪有科), Zhao C-H (赵春红), et al. Effect of regulated irrigation on input-output benefits of pear jujube. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2011, **19**(4): 818–822 (in Chinese)
- [38] Wang Y-K (汪有科), Hui Q (惠倩), Wang X (汪星), et al. Growth and water use efficiency of water saving type pruning jujube tree in dry soil. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery* (农业机械学报), 2017, **48**(2): 247–254 (in Chinese)
- [39] Zhao XN, Wu PT, Feng H, et al. Towards development of eco-agriculture of rainwater-harvesting for supplemental irrigation in the semi-arid Loess Plateau of China. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2009, **195**: 399–407
- [40] Fu SH, Liu BY, Zhang GH, et al. Fish-scale pits reduce runoff and sediment. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2010, **53**: 157–162
- [41] Liu Y, Gao MS, Wu W, et al. The effects of conservation tillage practices on the soil water-holding capacity of a non-irrigated apple orchard in the Loess Plateau, China. *Soil and Tillage Research*, 2013, **130**: 7–12
- [42] Liu Y, Li SQ, Chen F, et al. Soil water dynamics and water use efficiency in spring maize (*Zea mays* L.) fields subjected to different water management practices on the Loess Plateau, China. *Agricultural Water Management*, 2010, **97**: 769–775
- [43] Tang M (唐敏), Zhao X-N (赵西宁), Wu P-T (吴普特), et al. Effects of different surface mulching on jujube stem sap flow characteristics. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2016, **34**(1): 120–126 (in Chinese)
- [44] Liu S-L (刘世梁), Dong Y-H (董玉红), Wang J (王军). Effects of land consolidation on long-term soil erosion based on WEPP model. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持科学), 2014, **28**(4): 18–22 (in Chinese)
- [45] Ran D-C (冉大川). Water and sediment variation and ecological protection measures in the middle reach of the Yellow River. *Resources Science* (资源科学), 2006, **28**(1): 93–100 (in Chinese)

作者简介 唐敏,女,1990年生,博士研究生.主要从事农业水土资源综合利用研究. E-mail: tangmin0511@126.com
责任编辑 杨弘

唐敏,赵西宁,高晓东,等.黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分变化特征.应用生态学报,2018,29(3):765–774
Tang M, Zhao X-N, Gao X-D, et al. Characteristics of soil moisture variation in different land use types in the hilly region of the Loess Plateau, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(3): 765–774 (in Chinese)