

黄土高原雨水集聚深层入渗(RWCI)系统 下山地果园土壤水分时空变异特征

宋小林^{1,3} 赵西宁^{2,3,4} 高晓东^{2,3} 吴普特^{1,2,3*} 马文^{3,4} 姚杰⁵ 蒋小莉⁵ 张伟^{3,4}

(¹西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; ²西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ³西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100; ⁴西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; ⁵延安市宝塔区果业局, 陕西延安 716000)

摘要 水资源短缺是影响黄土高原雨养农业发展的关键性因素,雨水资源开发是缓解该地区水资源短缺的有效措施。本研究利用管式 TDR 系统监测 21 年红富士老果园 0~300 cm 土层土壤含水率变化,分析了雨水集聚深层入渗(RWCI)系统下黄土高原旱作山地果园土壤水分时空分布特征。结果表明:RWCI 系统能够显著增加果园土壤含水率,特别是 40~80 cm 土层(土壤含水率低值区)土壤含水率,在该区域,不同设计深度(40、60 和 80 cm)RWCI 处理(RWCI₄₀、RWCI₆₀和 RWCI₈₀)年均土壤含水率分别较鱼鳞坑(CK)处理提高 75.3%、85.4%和 62.4%,分别较裸露坡地(BS)处理提高 39.2%、47.2%和 29.1%。RWCI₄₀、RWCI₆₀和 RWCI₈₀处理土壤水分入渗最大深度分别为 80、120 和 180 cm,显著深于 CK 处理(60 cm),其中土壤水分变化幅度最大的土层分别主要发生在 0~60、0~100 和 0~120 cm。在果树整个生育期内,RWCI 处理土壤平均含水率(0~300 cm)以 RWCI₈₀处理最大,其次是 RWCI₄₀和 RWCI₆₀处理。总体来看,RWCI 系统是黄土高原实现雨水资源化和农业高效用水的有效措施。

关键词 黄土高原;山地果园;土壤水分;季节变化;垂直变化

Spatial heterogeneity of soil moisture of mountain apple orchards with rainwater collection and infiltration (RWCI) system in the Loess Plateau, China. SONG Xiao-lin^{1,3}, ZHAO Xi-ning^{2,3,4}, GAO Xiao-dong^{2,3}, WU Pu-te^{1,2,3*}, MA Wen^{3,4}, YAO Jie⁵, JIANG Xiao-li⁵, ZHANG Wei^{3,4} (¹College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ³Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China (IWSA), Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ⁴College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ⁵Baota District Fruit Bureau, Yan'an 716000, Shaanxi, China).

Abstract: Water scarcity is a critical factor influencing rain-fed agricultural production on the Loess Plateau, and the exploitation of rainwater is an effective avenue to alleviate water scarcity in this area. This study was conducted to investigate the spatial and temporal distribution of soil moisture in the 0-300 cm under a 21-year-old apple orchard with the rainwater collection and infiltration (RWCI) system by using a time domain reflectometer (TDR) probe on the Loess Plateau. The results showed that there was a low soil moisture zone in the 40-80 cm under the CK, and the RWCI system significantly increased soil moisture in this depth interval. Over this depth, the annual average soil moisture under RWCI₄₀, RWCI₆₀ and RWCI₈₀ was 39.2%, 47.2% and 29.1% higher than that of bare slope (BS) and 75.3%, 85.4% and 62.7% higher than that of CK, respectively. The maxi-

本文由国家自然科学基金项目(41401315, 41571506, 51579212)、中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-306)、国家重点研发计划项目(2016YFC0400204)和陕西省科技统筹创新工程计划项目(2015KTCL02-25, 2016KTZDNY-01-03)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41401315, 41571506, 51579212), the Key Development Foundation of the Chinese Academy of Sciences (KFZD-SW-306), the National Key Research and Development Plan (2016YFC0400204), and the Integrative Science-Technology Innovation Engineering Project of Shaanxi (2015KTCL02-25, 2016KTZDNY-01-03).

2016-12-01 Received, 2017-08-01 Accepted.

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

mum infiltration depth of water under RWCI₄₀, RWCI₆₀ and RWCI₈₀ was 80 cm, 120 cm and 180 cm, respectively, and the soil moisture in the 0–60, 0–100 and 0–120 cm was more affected by RWCI₄₀, RWCI₆₀ and RWCI₈₀, respectively. Over the whole growth period of apple tree, the maximum value of soil moisture content in the 0–300 cm existed in the RWCI₈₀ treatment, followed by the RWCI₄₀ and RWCI₆₀ treatments. Overall, the RWCI system is an effective meaning of transforming rainwater to available water resources and realizing efficient use of agricultural water on the Loess Plateau.

Key words: the Loess Plateau; mountain apple orchard; soil moisture; seasonal variation; vertical variation.

黄土高原区属于典型的干旱半干旱地区,水资源短缺且分配不均限制该地区旱作农业可持续发展的关键因子^[1-5].苹果产业是该地区农民主要的经济来源之一,并且是世界著名的优质苹果适生区.降水是该地区果树生长发育的主要水分来源,它既是水土流失的源动力,又是解决干旱缺水问题的重要途径^[6].但是该地区降雨时空分配极度不均,导致作物在年内的生长发育与降雨季节分配的时间点产生错位,从而使作物产生了突出的水分供需矛盾^[5,7-8].同时,由于旱地果园缺乏科学管理,雨水资源化利用效率低,从而造成苹果产量低且不稳定的情况.对当地降水资源的充分有效利用在很大程度上不仅可以解决当地缺水问题,而且可以实现暴雨径流资源化,并且在很大程度上可防止水土流失.因此,如何调控降雨径流,实现雨水的资源化,从而同步实现雨水资源的高效、安全与持续利用,是黄土高原旱作山地果业需解决的基本问题.所谓的雨水资源化是指雨水被开发、利用、转化为资源并产生其价值的一个过程,它包括资源的开发利用并产生效益等主要环节^[6].雨水资源化是黄土高原现代节水农业技术体系的重要内容之一,同时又是实现黄土高原农业高效用水和降低常规农业用水量的有效措施^[6].黄土高原雨水资源化实现的途径在于调控降雨径流,储蓄与高效利用水土资源^[9].基于雨水资源化理论,调控降雨径流技术包括降雨动力拦截技术、降雨就地入渗技术、降雨径流汇集技术、降雨径流蓄存技术、降雨径流利用技术等^[6,9].

针对我国北方旱作山地农业水资源短缺、水土流失严重的现象和如何实现旱区山地果园的雨水资源化的问题,西北农林科技大学吴普特研究员课题组在陕北旱地果园推广应用了一种具有蓄水、保水、保肥和水肥一体化等优点的雨水集聚深层入渗系统(rainwater collection and infiltration systems, RWCI)技术,并取得了一些成果,但是在理论研究方面还处于起步阶段,并且该技术的相关设计参数还有待进

一步完善.RWCI系统是一种复合技术体系,包括雨水集聚技术、雨水深层引流技术、引流防渗漏技术和保水保肥技术,不直接通过地表而是将雨水、灌溉水或肥液通过引流管直接作用于作物根区土壤以持续供作物吸收利用的中深层立体集雨灌溉系统.RWCI系统作为一种中深层立体集雨及灌溉方法,设计深度是其一个重要的技术参数,不同设计深度的RWCI系统下果树根际土壤水分时空变异特征对黄土高原旱作山地果园雨水资源化利用(无效水转化为有效水)、节水灌溉制度的制定和RWCI系统技术的推广起到关键作用.本文采取长期定位试验,以自然裸露坡地(BS)和鱼鳞坑处理(CK)为对照,在全年不进行灌水(自然降雨)的情况下,研究3种不同设计深度(40、60和80 cm深)RWCI系统下黄土高原旱作山地果园土壤水分时空分布规律及其时空变异特征,为进一步完善RWCI技术设计标准和黄土高原地区山地雨养果园水分管理提供技术支撑和理论依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

该研究区域属于典型的黄土高原丘陵沟壑区,位于陕西省延安市宝塔区河庄萍镇万庄村山地果园(36°11′—37°09′ N, 109°21′—110°03′ E),属于干旱半干旱气候带,年均降雨量在500 mm左右,年均气温为9.4℃,无霜期在170~186 d之间.该区域土壤类型为黄绵土,土质疏松,土层深厚.试验区土壤物理参数如表1所示.

1.2 雨水集聚深层入渗系统概述

雨水集聚深层入渗系统(RWCI)是一种中深层立体灌溉技术.该技术集雨口为正方形(规格为80 cm×80 cm);深度设置在40~80 cm范围,其田间布设如图1所示,具体的田间施工过程见宋小林等^[4]的介绍.该技术最大的特点就是节水灌溉、水肥一体化技术与水土保持有机结合在一起,与地面

表 1 试验土壤物理参数

Table 1 Physical parameters of experimental soil

土层深度 Depth (cm)	土壤容重 Soil bulk density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和含水率 Saturated water content (%)	田间持水率 Field moisture capacity (%)
0~40	1.13	29.2	16.9
40~80	1.25	28.8	17.7
80~120	1.26	28.3	17.8
120~160	1.33	28.9	18.2
160~200	1.23	29.4	18.9

灌溉相比,该方法具有节水、保水、保肥、促肥、减少氨挥发、减少水分蒸发损失、有效防止水土流失的作用。该技术的节水供肥机理表现在:①施肥、灌水不直接通过地表,而是通过集水管导入集水坑沿坑壁直接渗入作物根区土壤,是一种中深层立体灌溉方法;②坑上部覆盖集雨膜,一方面具有集雨的作用,另一方面能够防止水肥的蒸发损失,从而达到雨水资源化利用和肥料有效利用的作用;③保水原理在于:RWCI 技术中的有机填充物是一种多孔介质集合体(多孔有机营养基),具有疏松多孔的特性,其中有机质中的有机胶体能够吸附大量的阳离子和水分,所以它不仅具有保肥的作用,而且具有很好的保水作用;④有机填充物随时间逐渐腐熟,转化为有机肥,可以随水通过坑壁渗入作物根区,供作物吸收利用。

该技术的水土保持作用主要是通过拦蓄降雨径流实现的,其能够承蓄降雨径流,使雨水直接汇集到肥水坑中,直达根区,一定程度削减了降雨形成的地面径流损失,使水土流失量减小;在控制水土流失的同时,也提高了当地降雨雨水的利用率,对过量的降雨可以通过 RWCI 系统补给地下水。

1.3 试验设计

本试验于 2014 年 3 月选择黄土高原典型西向坡度(15°)旱地雨养苹果园进行研究,试验地占地 7 hm^2 。研究果树为 21 年生旱作山地红富士(*Malus pumila*) (砧木:八棱海棠),种植密度为 $5 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 。在试验地随机选取 16 株长势平均的果树作为试验用树。果树的树干直径约为 0.242 m ,平均树高约为 3.45 m ,平均冠幅直径约为 5.19 m 。采用随机区组试验设计,共设置 5 个处理,每处理 4 次重复。其中, RWCI 处理设置 3 个: RWCI₄₀ (设计深度 40 cm)、RWCI₆₀ (设计深度 60 cm)、RWCI₈₀ (设计深度 80 cm);对照处理设置 2 个:鱼鳞坑(CK)和试验果园内裸露坡地(BS)。RWCI 系统布设于 2014 年 11 月。在每个试验用树上坡位先进行平地,在以距每棵试验果树树干 130 cm 处点位为中心(即以引流管为中心)布设集雨坑,设计的 $80 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$ 坑口大小为当地果园普遍使用的标准,坑深设置为 $40 \sim 80 \text{ cm}$,系统布设过程中遇到较粗的大根时,都尽量

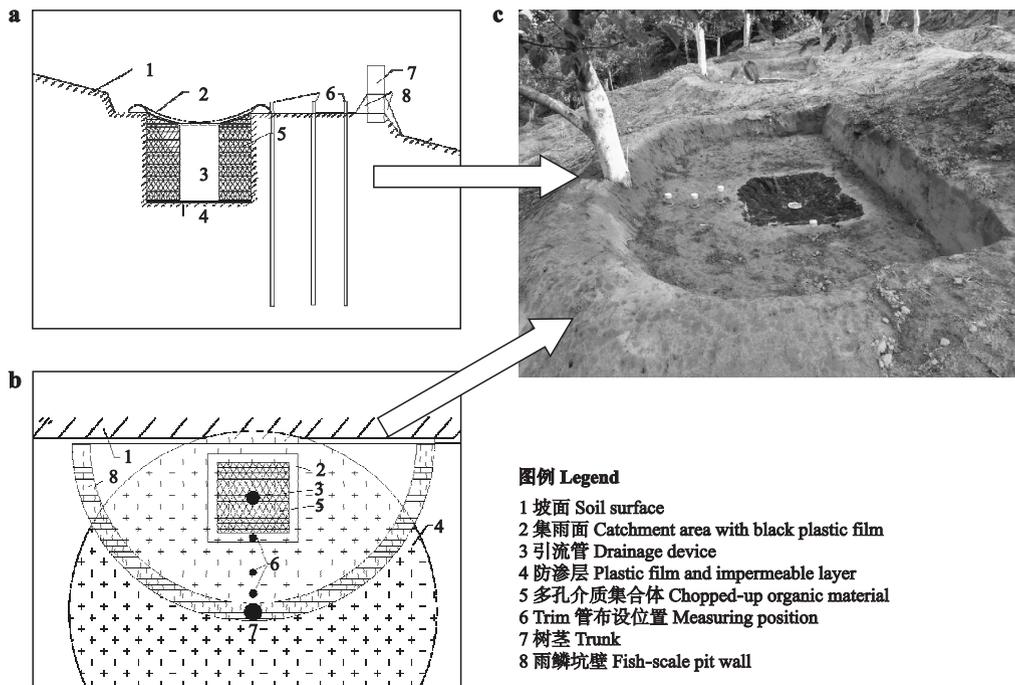


图 1 RWCI 系统田间工程图解

Fig. 1 Field engineering schematic diagram of rain collection and infiltration (RWCI) systems.

a) 剖面图 Cutaway view; b) 平面图 Vertical view; c) 实地效果图 Field engineering picture.

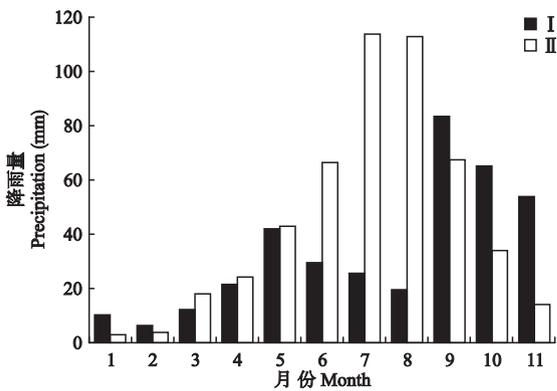


图2 延安试验地 2015 年降雨量

Fig.2 Precipitation in experimental field in Yan'an in 2015.

I: 2015 年月降雨量 Monthly precipitation in 2015; II: 常年月降雨量 Monthly precipitation in normal years.

不对其进行断根,具体布设效果如图 1 所示.为了最大限度减小 CK 与 RWCI 处理间由于挖掘集雨坑所引起的试验差异,在与 RWCI 处理相同的位置,挖掘口径大小相同的集雨坑,然后直接回填修复为原状作为 CK 处理.试验期间,果树全年在自然状态下进行生长,不进行灌溉.图 2 为试验地区 2015 年的降雨情况.

1.4 研究方法

土壤体积含水率:采用管式 TDR 系统 (TRIME-IPH, IMKO, 德国) 对果树生育期内 (2015 年 5—11 月) 土壤水分进行长期实时定位监测. TRIME 管的布设位置如图 1 所示,分别距 RWCI 坑壁 10、35 和 55 cm (距果树 30 cm),用 TRIME-T3 探针进行测量,每隔 20 cm 测定 1 次,每月于上、中、下旬各测定 1 次,每个处理最少测定 3 次,取平均值.

1.5 数据处理

采用 SPSS 18.0 软件对果园土壤含水率进行方差分析,并采用 Duncan 新复极差多重比较法进行差异显著性分析.采用 Origin 8.0 软件求相关系数并进行图形的绘制.经典统计学里通常用变异系数 (CV) 确定其变异程度,当 $CV \leq 10\%$ 时为弱变异性,当 $10\% < CV < 100\%$ 时为中等变异性,当 $CV \geq 100\%$ 时为强变异性.变异系数的计算公式为:

$$CV = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\%$$

式中: CV 为变异系数; S 为标准方差; \bar{x} 为变量均值.

2 结果与分析

2.1 土壤水分在果树生长季的动态变化特征

利用 2015 年 5—11 月期间试验果园不同 RWCI

措施下 0~300 cm 土壤水分的定位观测数据,绘制土壤水分随土层深度的变化曲线 (图 3). 鱼鳞坑处理 (CK) 下,在 40~80 cm 土层出现含水率低值区间,并且该层土壤含水率显著低于裸露坡地 (BS),产生这种现象的原因可能是果树根系在该层大量分布,对该土层水分大量吸收利用的结果,而 RWCI 措施显著增加了果园 40~80 cm 土层的土壤含水率.在 BS 和 CK 处理下果园 0~60 cm 土层土壤含水率随时间的变化很大,60~240 cm 土层土壤含水率变化相对较小,240 cm 以下变化更小,直至几乎无变化. BS 处理除 0~20 cm 土层外,其余土层土壤含水率绝大多数都处于 10% 以下.果园 CK 处理 0~60 cm 土层土壤含水率整体上高于 BS 处理,在 60 cm 以下土层土壤含水率的差异不显著,表明果园覆盖在一定程度上能够提高 0~60 cm 土层土壤含水率,具有一定的涵养水源作用.

在 RWCI 技术条件下, $RWCI_{40}$ 、 $RWCI_{60}$ 和 $RWCI_{80}$ 处理土壤含水率随时间变化最大的土层分别在 0~60、0~100 和 0~120 cm,土层深度随着 RWCI 设计深度的增加而增加,且整个试验土层土壤含水率显著高于 CK 和 BS 处理,但是对应的 60、100 和 120 cm 以下土层土壤含水率变化幅度小于 CK 和 BS 处理,原因可能是由于 RWCI 技术坑底铺设防渗层和填充了多孔有机营养基,防渗层能够在一定程度上短时间内阻碍水分向下渗漏,而多孔有机营养基能够最大限度集聚和保存水分从而持续通过防渗层边缘向四周和深层土壤供水,从而导致深层土壤含水率高于 CK 和 BS 处理,并且土壤含水率变化幅度小于 CK 和 BS 处理.从图 3 可以看出,各处理都存在一个临界土层,该临界土层以上土壤水分受到天气因素和 RWCI 系统的影响较大,在临界土层以下则受天气因素和 RWCI 系统的影响较小或者不受影响. BS、CK 和 $RWCI_{40}$ 处理的临界土层都在 60~80 cm 土层内, $RWCI_{60}$ 和 $RWCI_{80}$ 处理的临界土层分别为 100~120 cm 和 160~180 cm 土层内;各处理在临界土层以下土壤含水率随着时间的推移而减小,土壤水分的变化较为稳定,从而可以看出这些土层受到自然因素和 RWCI 措施的影响较小或者不受影响.各处理 5—7 月果园土壤含水率随着时间的推移而减小,之后 8—11 月土壤水分随着时间的推移而增大,并且在 8—11 月果园土壤含水率变化幅度和数值要显著高于裸露坡地,产生这种现象的原因可能是由于 5—7 月试验地降雨较少并且气温较高,导致土壤水分的耗损较大,8—11 月为降雨较多的季

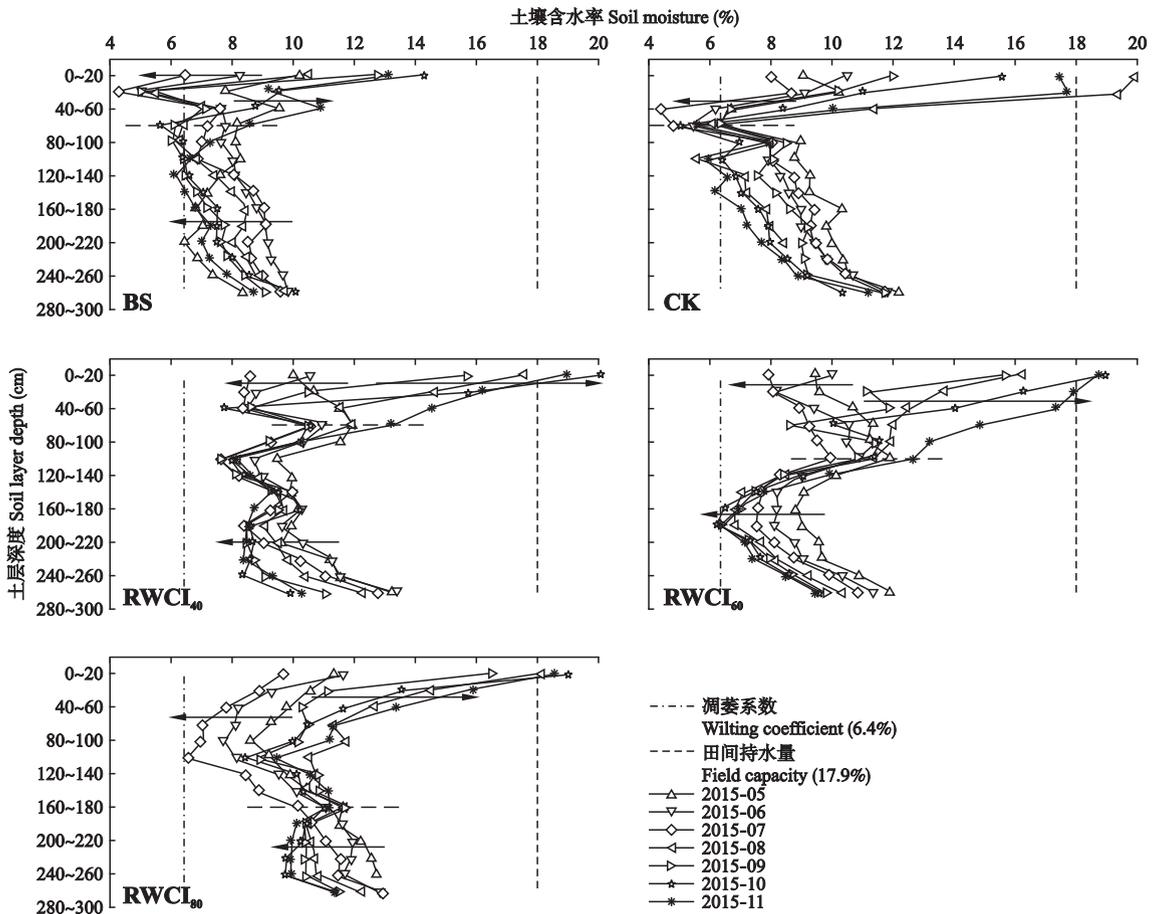


图3 果树生长季节土壤水分垂直变化特征

Fig.3 Vertical dynamic of soil moisture in fruit growing season.

CK: 鱼鳞坑处理 Fish-scale pit; BS: 裸露坡地 Bare slope; RWCI₄₀: RWCI 系统设计深度 40 cm The design depth was 40 cm in RWCI system; RWCI₆₀: RWCI 系统设计深度 60 cm The design depth was 60 cm in RWCI system; RWCI₈₀: RWCI 系统设计深度 80 cm The design depth was 80 cm in RWCI system. 下同 The same below.

节,期间 RWCI 系统收集并储蓄了天然降水,为果树根系提供了持续供应的水源,从而使土壤水分持续处于高水平。

从图4可以看出,5—7月各处理0~300 cm 土壤月平均含水率随时间呈下降趋势,说明该阶段正处于土壤水分强烈消耗阶段,此阶段降水较少,气温迅速回升,相对湿度低,土壤蒸发较大,同时果树开始生长,致使土壤水分耗损严重,从而导致土壤含水率在5—7月都随时间而减小,到7月达到最低值;7—9月降水变率大,同时此期间气温最高、植物生长最为旺盛而且土壤蒸发与植物蒸腾都很强烈,这就造成了该时期土壤含水率呈较大波动,并且以8月的土壤月平均含水率最大;9—11月气温低,蒸发量较小,土壤水分损失较少,土壤各层的含水率变幅小,降水能够缓慢渗入到土壤中,使土壤水分得以累积,从而使土壤含水率随时间的推移而增大。但是BS处理土壤含水率变化不遵循上述规律,而是随时

间的推移总体呈递减的趋势。RWCI 措施虽然增加了土壤含水率,但是并没有改变上述其随时间变化的规律。在果树整个生育期内,BS处理的土壤含水率

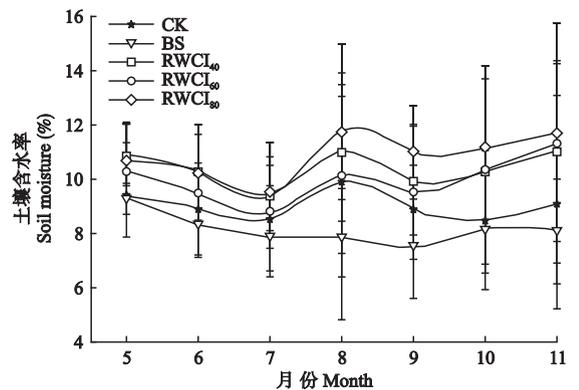


图4 不同深度 RWCI 系统下果树生长季节土壤含水率动态变化

Fig.4 Temporal variation of soil moisture in fruit growing season in RWCI system with different depths.

最低,显著低于果树种植区域;不同深度(40、60 和 80 cm)RWCI 处理的土壤含水率都显著高于 CK 处理,以 RWCI₈₀最大,其次是 RWCI₄₀和 RWCI₆₀。

2.2 果园土壤水分垂直和横向变化特征

不同深度(40、60 和 80 cm)RWCI 处理土壤水分垂直变化特征呈现出不同的变化规律。由表 2 可知,各处理表层土壤(0~20 cm)年均含水率显著高于其他土层。BS 处理在 20~40 cm 土层出现土壤含水率低值区间;鱼鳞坑处理(CK)土壤含水率低值区间出现在 40~80 cm 土层,含水率低值区间范围和深度都大于 BS 处理,原因可能是由于果树根系在该层集中分布,导致该层土壤水分的过度消耗,从而使该层土壤含水率低值区间的范围增大,深度相对 BS 处理深。在 RWCI 处理中,在 40~80 cm 土层没有出现如 BS 和 CK 处理的含水率低值区间,其含水率显著高于 BS 和 CK 处理;在该土层,RWCI₄₀、RWCI₆₀和 RWCI₈₀处理土壤平均含水率分别较 BS 处理增加 39.2%、47.2%和 29.1%,分别较 CK 处理增加 75.3%、85.4%和 62.7%。3 个 RWCI 处理各层土壤含水率都高于 BS 和 CK 处理;RWCI₄₀和 RWCI₆₀处理下,高土壤含水率范围分别处于 0~100 和 0~140 cm 土层,RWCI₈₀处理下高土壤含水率的范围更大、更深(0~280 cm),并且其对应土层土壤含水率显著高于 BS 和 CK 处理。在 0~100 cm 深土层内(果树根系集中分布层),RWCI₆₀处理土壤平均含水率显著高于 RWCI₄₀和 RWCI₈₀处理,分别高 2.4%和

6.8%。从整个试验土层(0~300 cm)来看,RWCI₄₀、RWCI₆₀和 RWCI₈₀处理年均土壤平均含水率分别比鱼鳞坑处理(CK)高 17.1%、12.2%和 22.3%,分别比裸露坡地处理(BS)高 27.9%、22.5%和 35.5%,并且鱼鳞坑处理(CK)年均土壤平均含水率比裸露坡地处理(BS)高 9.2%。

图 5 为不同 RWCI 处理下各土层土壤含水率距 RWCI 壁的水平变化情况。在整个 0~300 cm 试验土层,随着距 RWCI 壁的距离增加土壤含水率减小。在距 RWCI 壁 10 cm 处(图 5a),各 RWCI 系统在 0~100 cm 土层土壤含水率最大,其中该土层土壤含水率以 RWCI₆₀处理最大,RWCI₄₀和 RWCI₈₀处理其次;在 100~200 cm 土层内,土壤含水率随着 RWCI 系统设计深度的增加而增加;在 200~300 cm 土层内,预计土壤含水率随着 RWCI 系统设计深度的增加而增加,然而在该土层内 RWCI₄₀处理的土壤含水率反而达到最大,其原因可能是由于 RWCI₄₀系统底部铺设的防渗层效果不好,从而导致水分的向下渗漏损失;RWCI₆₀和 RWCI₈₀处理土壤含水率随土层深度的增加而减小。在距 RWCI 壁 35 cm 处(图 5b),RWCI₄₀处理在 200~300 cm 土层内土壤含水率最高,在 100~200 cm 土层内土壤含水率最低;RWCI₆₀处理下土壤含水率随土层深度的增加而减小,而 RWCI₈₀处理下土壤含水率呈现相反的变化趋势,即随土层深度的增加而增大。在距 RWCI 壁 55 cm 处(图 5c),各 RWCI 处理之间土壤含水率的差异不显著,说明

表 2 不同深度 RWCI 系统土壤含水率的垂直变化(2015 年 5—11 月)

Table 2 Vertical variation of soil moisture (%) in RWCI system with different depths (May–November, 2015)

土层深度 Soil layer depth (cm)	BS		CK		RWCI ₄₀		RWCI ₆₀		RWCI ₈₀	
	含水率 Soil moisture	CV								
0~20	10.6±1.1a	33.2	12.2±1.2a	35.5	14.6±1.8a	32.6	13.9±1.8a	33.4	15.0±1.5a	26.4
20~40	6.6±0.8d	28.2	10.9±0.9ab	29.7	12.3±1.3b	27.6	12.1±1.5ab	32.4	12.0±1.0b	22.6
40~60	8.4±0.5bc	16.4	7.1±0.5f	28.1	10.2±1.0bcd	24.8	12.1±1.1ab	23.9	10.5±0.8bcd	20.1
60~80	7.3±0.5cd	19.1	5.4±0.2g	13.0	11.6±0.4bc	9.0	11.0±0.8bc	18.7	9.7±0.6cd	17.0
80~100	7.1±0.5cd	16.9	8.2±0.3def	11.7	10.3±0.3bcd	6.7	11.4±0.4bc	10.2	9.5±0.7cd	18.5
100~120	7.2±0.4cd	15.5	7.4±0.3ef	15.7	8.3±0.3d	8.2	11.3±0.3bc	7.5	8.7±0.5d	14.2
120~140	7.4±0.5cd	16.2	8.0±0.3def	13.0	8.7±0.3d	7.8	9.1±0.3cde	7.9	10.0±0.3bcd	8.4
140~160	7.9±0.4cd	14.4	8.1±0.3def	13.6	9.8±0.1cd	3.0	7.8±0.3e	8.7	10.3±0.3bcd	7.1
160~180	8.2±0.4bcd	12.7	8.7±0.3cde	13.1	9.8±0.2cd	6.5	7.4±0.3e	11.4	11.2±0.2bc	4.8
180~200	8.4±0.3bc	10.6	8.8±0.2cde	10.2	9.0±0.2d	7.0	7.2±0.4e	14.4	10.7±0.2bcd	5.6
200~220	8.1±0.3bcd	10.5	9.0±0.2cd	9.9	9.2±0.3d	7.7	8.0±0.3e	11.0	10.9±0.3bc	7.9
220~240	8.4±0.3bc	9.0	9.4±0.2cd	8.5	9.8±0.5cd	12.6	8.4±0.3de	9.5	10.9±0.4bc	9.5
240~260	8.8±0.2bc	7.1	10.0±0.3bc	9.7	10.3±0.5bcd	12.6	9.5±0.4cde	9.7	10.9±0.4bc	9.7
260~280	9.6±0.2ab	5.3	11.4±0.2a	7.4	12.0±0.6bc	12.4	10.5±0.4bcd	8.9	12.0±0.3b	6.2

CK: 鱼鳞坑处理 Fish-scale pit; BS: 裸露坡地 Bare slope; RWCI₄₀: RWCI 系统设计深度 40 cm The design depth was 40 cm in RWCI system; RWCI₆₀: RWCI 系统设计深度 60 cm The design depth was 60 cm in RWCI system; RWCI₈₀: RWCI 系统设计深度 80 cm The design depth was 80 cm in RWCI system. 下同 The same below.

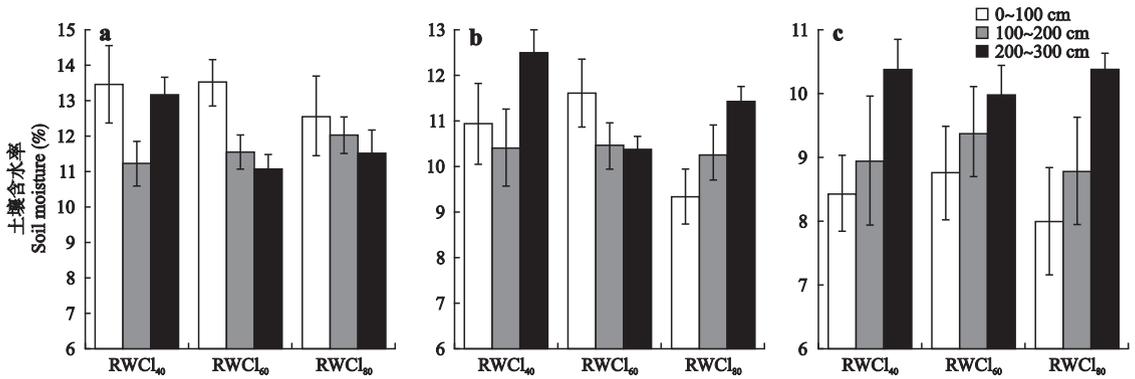


图5 不同深度 RWCI 系统和不同土层深度下土壤含水率的横向变化

Fig.5 Radial variation of soil moisture in RWCI systems with different depths in different soil layers.

a) 距 RWCI 壁距离 10 cm 10 cm away from the pit wall of RWCI; b) 距 RWCI 壁距离 35 cm 35 cm away from the pit wall of RWCI; c) 距 RWCI 壁距离 55 cm 55 cm away from the pit wall of RWCI.

RWCI 系统对该距离处土壤水分的影响较小或者没有影响。总体来看,距 RWCI 系统距离越大,土壤水分分布状况越接近于自然果园(CK),土壤含水率整体随着土层深度的增加呈增加的趋势。

土壤水分的垂直变化主要取决于降雨和蒸散过程的相互作用^[10]。一般用反映土壤水分变化程度的变异系数(CV)来研究各土层土壤水分的垂直变化程度^[11-12]。果树生长季内,CV 越大,土壤含水率变化越剧烈;CV 越小,土壤含水率越稳定。从表 2 可以看出,在自然条件下,BS 和 CK 处理剖面内土壤水分的年变异系数随土层深度的增加呈递减趋势,说明随着深度的增加,土壤水分趋于稳定^[11,13-14];BS 处理土壤含水率的变化主要发生在 220 cm 以上土层内,土壤含水率 CV 达 10.5%~33.1%;CK 处理土壤含水率的变化主要发生在 200 cm 以上土层,土壤含水率 CV 达 10.2%~35.5%,这可能是由于一方面该地区天气变幅大,另一方面土质都属于黄绵土,且土质疏松、雨水下渗深但散失快所致。然而由于 RWCI 措施的影响,RWCI 处理土壤水分的年变异系数随土层深度增加呈现先减小后增大的趋势(表 2),说明 RWCI 措施改变了深层土壤水分的稳定性。RWCI 处理深层土壤水分的变异系数要小于 BS 和 CK 处理,说明该处理深层水分的稳定性更好,原因可能是由于 RWCI 技术中的多孔有机营养基吸附了大量的阳离子和水分,具有很好的保水作用,能够缓慢持续地为深层土壤提供水分,从而使深层土壤水分含量变化幅度减小的缘故。RWCI₄₀ 处理土壤含水率变化主要发生在 0~60 cm 土层内,CV 变化范围为 24.8%~32.6%;RWCI₆₀ 处理土壤含水率变化主要发生在 0~100 cm 土层内,CV 变化范围为 10.2%~33.4%;RWCI₈₀ 处理土壤含水率变化主要发生在 0~

120 cm 土层内,CV 变化范围为 14.2%~26.4%;可以看出,土壤含水率变化的土层深度随 RWCI 设计深度的增加而增大。

2.3 土壤含水率与土层深度间的相关关系

表 3 显示了不同深度 RWCI 处理下各层土壤含水率与土层深度之间的相关关系。BS 和 CK 处理在 0~60 cm 土层内土壤含水率与土层深度呈负相关,即土壤含水率随土层深度的增加而减小;在 60 cm 以下土层,土壤含水率与土层深度呈正相关性,即土壤含水率随土层深度的增加而增加,BS 和 CK 处理分别在 120~260 cm 和 100~260 cm 土层土壤含水

表 3 不同深度 RWCI 系统各土层土壤含水率与土层深度的相关系数(2015 年 5—11 月)

Table 3 Correlation coefficients of soil moisture and soil layer depth in RWCI systems with different depths (May—November, 2015)

土层深度 Soil layer depth (cm)	BS	CK	RWCI ₄₀	RWCI ₆₀	RWCI ₈₀
0~20	-0.67	-0.84*	-0.86**	-0.89**	-0.84*
20~40	-0.49	-0.53	-0.76*	-0.87**	-0.77*
40~60	-0.54	-0.39	-0.24	-0.86**	-0.73
60~80	0.22	0.44	-0.29	-0.33	-0.68
80~100	0.66	0.62	0.36	-0.70	-0.68
100~120	0.70	0.83*	0.67	-0.39	-0.22
120~140	0.93**	0.95**	0.71	0.03	-0.54
140~160	0.89**	0.96**	0.87*	0.64	-0.47
160~180	0.91**	0.95**	0.71	0.89**	-0.05
180~200	0.82*	0.98**	0.78*	0.94**	0.88**
200~220	0.94**	0.98**	0.77*	0.93**	0.96**
220~240	0.98**	0.97**	0.96**	0.98**	0.97**
240~260	0.96**	0.95**	0.90**	0.97**	0.97**
260~280	0.77	0.60	0.95**	0.97**	0.94**
平均值 Average	0.20	0.59	-0.12	-0.53	-0.59

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

率增加幅度达到了显著或极显著水平. RWCI 处理正负相关性临界土层深度比 BS 和 CK 处理深, RWCI₄₀、RWCI₆₀ 和 RWCI₈₀ 处理土壤含水率与土层深度之间分别在 0~80、0~120 和 0~180 cm 土层内呈负相关, 并且分别在 0~40、0~60 和 0~40 cm 土层相关性达到了显著或极显著性水平; 分别在 80、120 和 180 cm 以下土层呈正相关关系, 并且分别在 140、160 和 180 cm 以下土层达到了显著或极显著水平. 从整个土层相关系数的均值可以看出, BS 和 CK 处理土壤含水率随土层深度的增加整体呈增加的趋势, CK 处理土壤含水率随土层深度增加幅度高于 BS 处理; 不同深度 RWCI 处理土壤含水率随土层深度的增加整体呈递减的趋势, 递减的幅度随着 RWCI 深度的增加而增大. 可见, RWCI 处理上层根际土壤中水分含量要高于深层土壤.

3 讨论与结论

有研究显示, 黄土丘陵沟壑区 20~40 cm 是土壤水分的主要消耗层, 鱼鳞坑的集雨效果主要表现在 40~60 cm 土层内^[15]. 而本研究显示, 陕北黄土丘陵区雨养果园内 40~80 cm 是土壤水分的主要消耗层, 特别是 60~80 cm 土层, 并且该土层土壤含水率显著低于裸露坡地 (BS), 原因可能是由于果树根系在该层集中分布, 导致该层土壤水分的过度消耗. 李萍等^[15]的研究显示, 鱼鳞坑条件下雨水的最大入渗深度为 60 cm, 本研究也得出相同的结论. 从前人研究可以看出, 鱼鳞坑具有一定的蓄水能力, 在雨季降水期间集雨效果较好, 然而, 黄土高原地区雨水资源分布极其不均, 雨后气温回升快, 土壤蒸发大^[16], 加上植物蒸腾耗水强烈, 短时间内鱼鳞坑集聚的水分就会蒸发和蒸腾损失掉, 因此, 一般降雨和上层土壤水分很难满足果树水分需求^[17].

雨水集聚深层入渗系统 (RWCI) 是基于雨水资源化理论, 通过拦蓄降雨径流, 将收集的天然降水或灌溉水直接导入并储蓄在果树根际区域, 从而影响土壤水分在果树根际区域的分布、能态、水汽运动状态. 该技术是实现黄土高原雨养果园雨水资源化利用的有效措施. 从本研究可以看出, RWCI 技术能够显著增加试验果园的土壤水分含量, 并且各 RWCI 处理土壤水分变化分别主要发生在 0~60 cm (RWCI₄₀)、0~100 cm (RWCI₆₀) 和 0~120 cm (RWCI₈₀) 土层内, 这与果树根系的主要分布区域 (0~100 cm) 基本一致^[16, 18-19], 说明土壤水分变化与果树根系分布具有密切的关系. 在 0~100 cm 土层内, RWCI₆₀ 处理

土壤水分含量要显著高于 RWCI₄₀ 和 RWCI₈₀ 处理, 说明 RWCI₆₀ 设计对果树根区土壤水分的贡献最大, 其土壤平均含水率较鱼鳞坑 (CK) 处理高 47.9%.

在果树不同生长阶段, RWCI 系统的集雨和储蓄效果不同, 陕北黄土高原地区 5—7 月降雨较少, 土壤水分总体处于消耗阶段, 因此各 RWCI 处理土壤水分都随时间的推移而减小, 但是土壤水分状况都要显著好于鱼鳞坑处理 (CK); 在 8—11 月, 特别是处于果树膨大期的 8 月 (降雨量大而且多为大到暴雨) 是果树用水关键期, 该时期降雨基本上都能形成径流, RWCI 系统对降雨的蓄积作用增大, 从而使果树根际区域土壤水分效果更优于 CK; 在 RWCI 技术下, 果园土壤水分入渗的最大深度可分别达 80 (RWCI₄₀)、120 (RWCI₆₀) 和 180 cm (RWCI₈₀), 显著深于鱼鳞坑处理 (60 cm), 其中土壤水分变化幅度最大的土层主要出现在 0~60 (RWCI₄₀)、0~100 (RWCI₆₀) 和 0~120 cm (RWCI₈₀). 从整个 0~300 cm 试验土层来看, 各 RWCI 处理果园土壤水分状况显著好于鱼鳞坑 (CK) 处理, 土壤含水率分别比 CK 高 17.1%、12.2% 和 22.3%. 可见, RWCI 系统在果园的应用能够基本满足果树在整个生育期内的水分需求.

RWCI 系统能够持续供应果树水分需求的关键在于该系统中填充了特定配比的多孔有机营养基, 从而大大增强了该系统对收集雨水或灌溉水的储蓄能力, 而且能够持续向果树根际土壤供给水分. 该系统中填充的多孔有机营养基的原材料都是就地取材, 如粉碎的果树枝条和玉米秸秆, 果树枝条 (往年大部分被随意扔掉) 的获取主要来源于每天的果树修剪, 玉米秸秆 (往年大部分被烧掉) 的获取来源也是当地种植的玉米, 这样既减少了填充原材料的运输成本, 又防止了资源的浪费, 而且实现了收集雨水的就地储蓄, 这对黄土高原雨养果园的经济效益和生态效益的同步提高具有一定的应用价值. RWCI 系统对雨养果园土壤水分的影响机制与果树生长过程、根系分布特征以及不同生长阶段耗水特征等因素密切相关, 尚需进行更深入的研究. RWCI 系统是一种中深层的立体集雨及灌溉一体技术, 设计深度是其中重要的参数, 对设计深度的探索研究, 将对黄土高原雨水资源化利用效果和质量评价以及 RWCI 系统的推广起到关键作用.

参考文献

- [1] Liu X-Z (刘贤赵), Li T (李涛). Spatial heteroge-

- neity of soil moisture of apple base in Weibei dry highland. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2005, **21** (suppl. 1): 33-38 (in Chinese)
- [2] Ruiz-Sanchez MC, Plana V, Fortuno MF, *et al.* Spatial root distribution of apricot trees in different soil tillage practices. *Plant and Soil*, 2005, **272**: 211-221
- [3] Fan J-S (樊金拴), Chen Y-G (陈原国). Soil moisture characteristics of walnut forest land in Weibei Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation* (中国水土保持科学), 2005, **3**(2): 76-80 (in Chinese)
- [4] Song X-L (宋小林), Wu P-T (吴普特), Zhao X-N (赵西宁), *et al.* Distribution characteristic of apple tree root and soil moisture with hole application of both water and fertilizer in the Loess Plateau. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2016, **32**(7): 121-128 (in Chinese)
- [5] Chen M (陈明). Study on Relationship between Water Consumption and Yield in Supplementary Irrigation Orchards on the Loess Plateau of Western Shanxi Province. Master Thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2006 (in Chinese)
- [6] Wu P-T (吴普特), Gao J-E (高建恩). Soil and water conservation and rainwater resource utilization in the Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation* (中国水土保持科学), 2008, **6**(1): 107-111 (in Chinese)
- [7] Jiang T-M (蒋太明). Moisture Dynamic in Yellow Soil and Its Environmental Factors in Karst Mountainous Area of Guizhou. PhD Thesis. Chongqing: Southwest University, 2007 (in Chinese)
- [8] Chen X-Y (陈锡云), Liu W-Z (刘文兆). Evapotranspiration from apple orchard in semi-arid loess hilly and gully region. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2000, **14**(3): 67-70 (in Chinese)
- [9] Wu P-T (吴普特), Gao J-E (高建恩). New Theory of Soil and Water Conservation in the Loess Plateau. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2006 (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] Chen H-S (陈洪松), Shao M-A (邵明安). Review on hill-slope soil water movement and transformation mechanism on the Loess Plateau. *Advances in Water Science* (水科学进展), 2003, **14**(4): 513-520 (in Chinese)
- [12] Huang M-B (黄明斌), Yang X-M (杨新民), Li Y-S (李玉山). Effect of apple base on regional water cycle in Weibei upland of the Loess Plateau. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2001, **56**(1): 7-13 (in Chinese)
- [13] Li H-J (李洪建), Wang M-B (王孟本), Chai B-F (柴宝峰). Spatial and temporal characteristics of soil moisture dynamics in Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(4): 515-519 (in Chinese)
- [14] Wang Y-P (王延平), Han M-Y (韩明玉), Zhang L-S (张林森), *et al.* Spatial characteristics of soil moisture of apple orchards in the Loess Plateau of Shaanxi Province. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2013, **49**(7): 16-25 (in Chinese)
- [15] Li P (李萍), Zhu Q-K (朱清科), Zhao L-L (赵磊磊), *et al.* Soil moisture of fish-scale pit during rainy season in loess hilly and gully region. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2011, **27**(7): 76-81 (in Chinese)
- [16] Wang J, Fu BJ. The impact of land use on spatial and temporal distribution of soil moisture on the Loess Plateau. *Geography Journal*, 2001, **55**: 84-91
- [17] Wang J (王建), Wu F-Q (吴发启), Meng Q-Q (孟秦倩). Analysis on soil moisture character of dry orchard on hilly and gully regions on the Loess Plateau. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2006, **21**(5): 65-68 (in Chinese)
- [18] Ma LH, Wu PT, Wang YK. Spatial distribution of roots in a dese jujube plantation in the semiarid hilly region of the Chinese Loess Plateau. *Plant and Soil*, 2012, **354**: 57-68
- [19] Jia Z-Q (贾志清), Song G-P (宋桂萍), Li Q-H (李清河), *et al.* Study on soil moisture dynamic variation law of typical watershed in the southern mountainous area of Ningxia Hui Autonomous Region. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 1997, **19**(3): 15-20 (in Chinese)

作者简介 宋小林,男,1984年生,博士.主要从事节水农业研究. E-mail: fenyng23@163.com

责任编辑 张凤丽
