

黄土塬区土地利用变化对深剖面 土壤水分的影响

向伟¹ 林雪青¹ 张志强¹ 李志^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 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)

摘要: 在长武塬区的6个地点分别采集农地、10年果园和20年果园10 m深剖面的土样, 通过测定和分析不同样地的土壤水分, 定量揭示其对土地利用变化的响应。结果表明: 农地和10年果园土壤水分具有相似的垂向分布, 随深度增加土壤水分含量增大, 而20年果园随深度增加呈减小趋势, 但6 m以下3种样地土壤水分随深度增加基本不发生变化; 农地、10年和20年果园在0~6 m、6~10 m和0~10 m土层平均土壤水分含量分别为17.8%、17.5%和15.8%、20.4%、20.6%和14.8%、18.8%、18.7%和15.4%, 与农地相比, 20年果园0~6 m、6~10 m和0~10 m土层减少的土壤水分分别占农地的11%、27%和18%; 农地6~10 m土壤储水量为1 063 mm, 而转化为果园后随果龄增大而减小, 其中10年果园无明显差异, 但20年果园减少了291 mm, 在该土层形成稳定的低湿层。20年果园6 m以下稳定的低湿层可能减少水分的深层渗漏进而降低地下水补给量, 伴随着大面积的农地转化为人工林草, 可能会对区域水循环造成影响。

关键词: 土壤水分; 土地利用变化; 苹果园; 深剖面; 黄土高原

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A

The effects of land-use change on soil moisture in deep soil profile at Changwu loess tableland

XIANG Wei¹, LIN Xue-qing¹, ZHANG Zhi-qiang¹, LI Zhi^{1,2}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 10 m soil profiles were sampled from three representative land-use types (farmland, apple orchard about 10 years old and 20 years old) at six sites on the Changwu loess tableland. In this study, soil water content was measured and a quantified analysis was conducted to evaluate the effect of farmland that had been converted to apple orchard for 10 years and for 20 years. Results showed that there was an increasing trend in soil water content with the increase of depth in farmlands and apple orchards about 10 years old, but the trend was remarkably different in apple orchard about 20 years old. In 6~10 m layer, soil water contents in three land-use types were similarly stable with depth increase. The average soil water content in 0~6 m, 6~10 m and 0~10 m layers in three land-use types were 17.8%, 17.5% and 15.8% (farmland), 20.4%, 20.6% and 14.8% (10 years old orchard), and 18.8%, 18.7% and 15.4% (20 years old orchard), respectively. Compared with farmlands, the average soil water contents at 0~6 m, 6~10 m and 0~10 m layers in apple orchard about 20 years old were decreased by 11%, 27% and 18%, respectively. The average soil water storage at 6~10 m layer in farmlands was 1 063 mm, but the conversion to apple orchards for 20 years reduced soil water storage by 291 mm. Land-use change had a significant impact on deep soil water, which probably reduced the deep percolation of water and further affected groundwater recharge. Conversion of farmland to grasslands and forests is one of the main types of land-use changes on the Loess Plateau, which may further alter regional hydrologic cycle.

Keywords: soil moisture; land-use change; apple orchard; deep profile; the Loess plateau

收稿日期: 2015-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(51179161); 陕西省科学技术研究发展计划(2013KJXX-18); 中央高校基本科研业务费(2452015105)

作者简介: 向伟(1992—), 男, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源。E-mail: xiangwei2016@126.com。

通信作者: 李志(1978—), 男, 山东沂水人, 副教授, 博士, 主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: lizhibox@126.com。

黄土高原生态脆弱,水土流失严重,大规模的水土保持措施导致土地利用发生显著的变化^[1-4]。同时,黄土高原近年来水循环状况发生了明显的变化,如河流径流减少^[5-6]和地下水位下降^[7-8]等。土地利用变化与水文变化间存在一定的联系^[9-10],而土壤水分是水循环中水分的重要来源,可以联系降水和地下水并能影响地表径流的产生^[11]。因此,研究黄土高原土地利用变化对土壤水分的影响具有极其深远的意义。

渭北旱塬由于独特的气候条件成为苹果的优生区,因此,近年来大量农地转化为果园,成为该区域主要的土地利用变化方式之一^[12]。根据相关研究,人工林草显著减少土壤水分,可能进而影响区域水循环状况^[13-14]。该区域大面积的农地转化为果园,土壤水分势必会受到影响。因此,研究该区域农地转化为果园后的土壤水分状况十分必要。

为此,本研究在长武塬的6个样点,每个样点采集农地、10年和20年果园,采样深度10m,对比分析土壤水分差异性,定量研究土地利用变化对深剖面土壤水分的影响,以为黄土高原土地利用和水资源管理提供参考依据。

1 样品采集与数据分析

1.1 研究区域概况

研究区域选择位于黄土高原中南部陕甘交界处的长武塬面,是农地大幅转为果园的典型地带。平均海拔1200m,属温带半湿润大陆性季风气候区。降水年内年际变化较大,多年平均降水量584mm。光照条件充足,年日照时数2230h,日照率51%,年均辐射量为 $4837\text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-2}$,无霜期171d,年均气温 9.1°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温 3029°C 。无灌溉条件,属典型的雨养农业区。土层深厚,母质为马兰黄土,土壤多为中壤质黑垆土,0~1m和2~10m土层平均容重分别为 1.34 、 1.28 、 $1.30\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,凋萎湿度和田间持水量分别为 $7.46\% \pm 0.65\%$ 和 $21.16\% \pm 0.86\%$ ^[15],田间稳定湿度(凋萎湿度与田间持水量的算术平均值)为 14.31% ^[16]。

1.2 样品采集与测定

2014年8月在长武塬区选择具有代表性的6个样点,各样点分别选取邻近(两两间距离不超过50m)的3种样地进行土样采集,分别为农地(典型的冬小麦-春玉米轮作地)、8~12年生和18~24年生苹果地(以下简称10年果园和20年果园)。通过人工打钻采集10m深度的土样,取样间隔20cm,用烘干法测定土壤水分,计算各层土壤含水率。

样点选择遵循典型性和代表性原则。长武塬面呈东南低西北高的地貌特征,6个样点从东南到西北呈均匀分布,尽可能代表塬区情况,各样点远离道路干线和居民区,同时靠近塬中心区域,各种类型样地在所有样点间尽可能保持一致性,样点分布见图1。

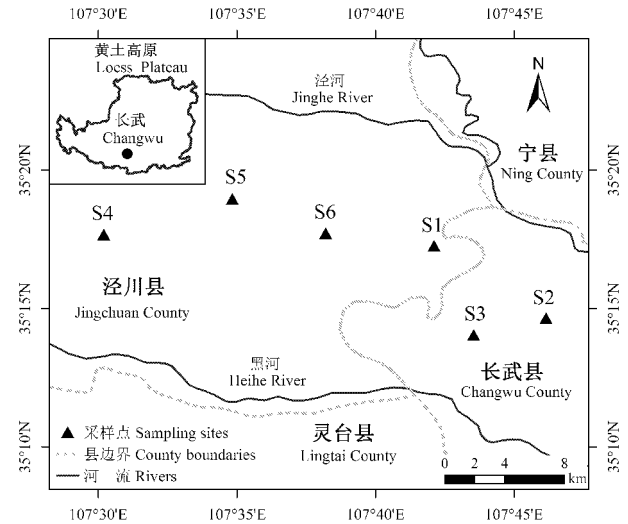


图1 采样点分布示意图

Fig. 1 Position of sampling sites

1.3 数据分析

首先分析土壤含水量的剖面分布规律,定性描述3种样地下土壤水分的差异;其次通过土壤储水量分析剖面土壤的水文状况;以农地为对照,通过计算不同果龄果园的土壤储水量,定量研究土地利用变化随时间对土壤水分的影响。

土壤储水量(SWS , mm)、土壤有效储水量(ASW , mm)和土壤水分亏缺量(WD , mm)^[16-17]计算公式如下:

$$SWS = SM \times SBD \times h \quad (1)$$

$$ASW = (SM - WM) \times SBD \times h \quad (2)$$

$$W_D = W_F - SWS \quad (3)$$

式中, SWS 、 ASW 、 W_D 和 W_F 分别为土壤储水量、土壤有效储水量、土壤水分亏缺量和田间持水量,单位均为mm; SM 为土壤含水率,%; WM 为土壤凋萎湿度,%; SBD 为土壤容重 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$; h 为土层厚度,mm。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下的土壤水分剖面分布

3种样地在6个样点的土壤水分垂向分布相似(图2)。由于受蒸发和降水入渗影响比较强烈,0~2m土壤水分的差异没有一致的规律。但随土层深度增加,土地利用方式对土壤水分的影响加强。2m以下农地与10年果园的土壤水分缓慢增加,而

20 年果园的土壤水分缓慢减小。整体而言 3 种样地的土壤水分分布在 4 m 以下具有显著的分异性。在 6~10 m 土层,农地与 10 年果园土壤水分随深度的增加无明显增加趋势,20 年果园减小趋势亦不明显。3 种样地土壤水分的波动性可能与土壤质地有关^[18]。土壤水分垂直分布中,农地和 10 年果园比

较相似,其含量在多数层次明显高于 20 年果园,两种垂直分布模式说明 10 年果园对于土壤水分没有较大影响,甚至由于根系作用使部分层次水分含量高于农地;但 20 年果园显著降低土壤水分特别是 4 m 以下土层的水分含量。

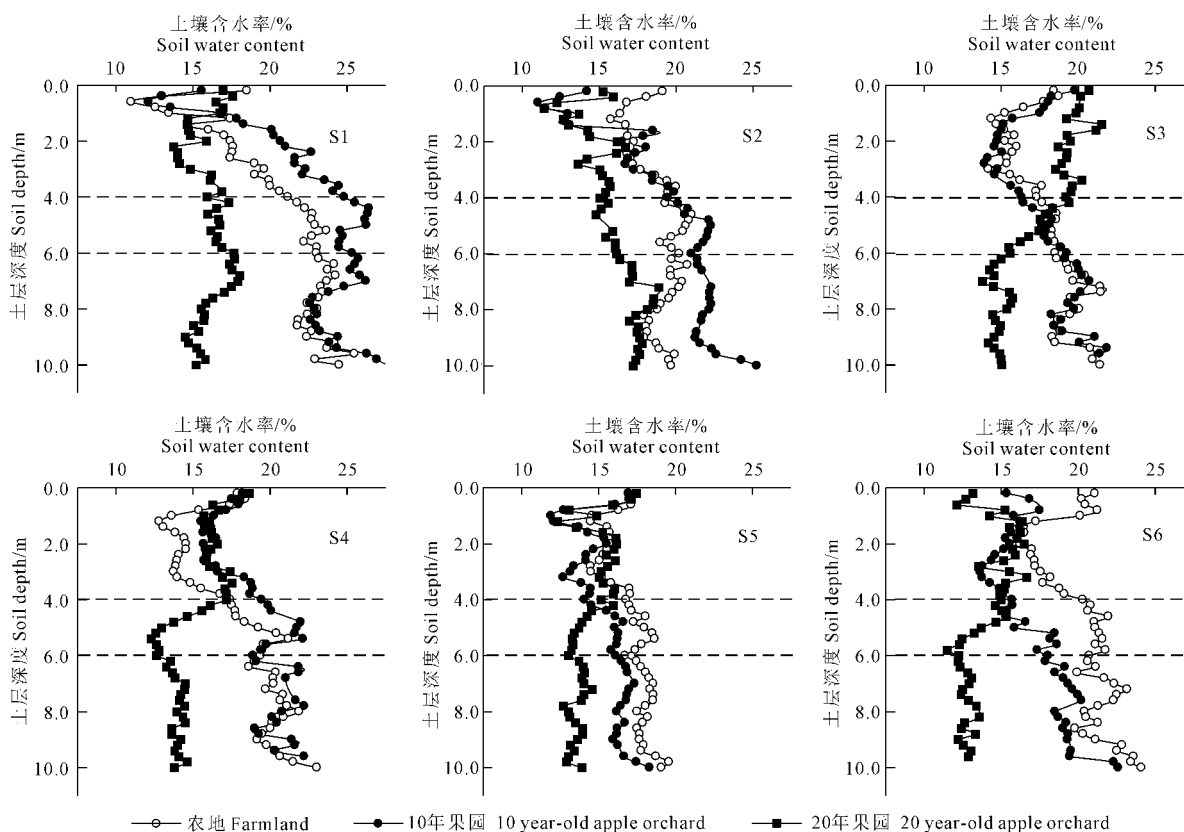


图 2 各样地不同土地利用方式下土壤含水率分布

Fig. 2 Soil water content distribution under different land use types in investigated sites

2.2 土地利用变化对土壤水分的影响

为进一步量化 3 种样地下土壤水分的差异,根据图 2 确定形成稳定差异的深度为 6 m,分层次统计了不同深度内(0~6 m 和 6~10 m)的土壤水分含量。整个剖面以及两个土层的土壤水分都存在农地≈10 年果园>20 年果园的特征(表 1)。整个剖面 3 种样地的平均土壤水分含量分别为 18.8%、18.7%和 15.4%;0~6 m 的相应值分别为 17.8%、17.5%和 15.8%,而 6~10 m 的相应值分别为 20.4%、20.6%和 14.8%。*t* 检验结果进一步表明 20 年果园与农地和 10 年果园间的差异均达到极显著水平($P < 0.001$),而农地与 10 年果园间差异不显著($P = 0.195$)。

农地和 10 年果园 0~6 m 土壤水分含量均低于 6~10 m,而 20 年果园的情况则相反,这主要是植物根系的耗水差异导致的。土壤水分最低值出现的土

层一般是植物集中耗水的层次^[19]。小麦耗水通常在干湿交替层内,10 年果树因树小根浅耗水量小而集中在干湿交替层,均对深层土壤水分影响较小;而 20 年果树树大根深且耗水量大,耗水层位逐渐向深层土壤移动,因此深层土壤水分曲线明显向左偏移,出现显著性的差异。

以农地为对照,计算 20 年果园对土壤水分的影响,发现 0~10 m、0~6 m 和 6~10 m 土层内 20 年果园减少的土壤水分分别占农地的 18%、11%和 27%。可见 20 年果园对于土壤水分干燥化有重要的影响,可能进而影响塬区局部地区的降水-土壤水-地下水的转换关系,而近年来长武塬区的地下水位不断下降^[20],可能也与土地利用变化有着重要的关系。

2.3 土地利用变化对土壤储水量的影响

深层土壤水分被形象地称为“土壤水库”,是干

旱半干旱区植物生长耗水的重要来源之一,对水资源时空分布不均具有缓解作用,其储量状况反映了这种调节能力的大小。为分析不同利用方式下深层

土壤水分状况,分别计算各样地 6~10 m 土壤储水量(表 2)。

表 1 3 种土地利用方式下不同深度土壤水分含量/%
Table 1 Soil moisture in at different depths layers under three land-use types

采样点 Sampling sites	0~10 m			0~6 m			6~10 m		
	F	A10	A20	F	A10	A20	F	A10	A20
S1	18.0	19.1	15.0	16.4	18.2	15.6	20.4	20.9	14.0
S2	17.1	15.5	14.4	16.4	14.8	14.9	18.2	16.8	13.6
S3	20.3	17.3	13.9	19.3	15.8	14.5	21.7	19.5	12.8
S4	20.7	22.8	16.0	19.0	21.7	15.9	23.3	24.5	16.2
S5	18.9	19.5	15.9	18.6	17.9	14.9	19.2	22.2	17.5
S6	17.9	17.8	17.2	16.9	16.6	18.8	19.7	19.9	14.8
均值 Average	18.8	18.7	15.4	17.8	17.5	15.8	20.4	20.6	14.8

注: F—农地; A10—10 年果园; A20—20 年果园。

Note: F—Farmland; A10—10-year-old apple orchard; A20—20-year-old apple orchard.

表 2 各样地 6~10 m 土层储水量状况
Table 2 Soil water storage under all study plots in 6~10 m soil layer

项目 Item	采样点 Sampling sites						均值 Mean
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	
农地 Farmland/mm	1060	945	1131	1212	999	1028	1063a
占 FC 比例 Percentage of FC/%	96	86	103	110	90	93	97
10 年果园 10-year-old apple orchard/mm	1093	869	1017	1276	1150	1044	1075a
占 FC 比例 Percentage of FC/%	99	79	92	116	105	95	98
20 年果园 20-year-old apple orchard/mm	729	709	666	840	915	769	771 b
占 FC 比例 Percentage of FC/%	66	64	60	76	83	70	70
Δ /mm	-331	-236	-465	-372	-84	-259	-291
W_D /mm	-371	-391	-434	-260	-185	-331	-329

注: FC—田间持水量; W_D —20 年果园土壤水分亏缺量; Δ —20 年果园与农地水分差值; 不同字母表示在 0.05 水平下差异显著。

Note: FC—field capacity; W_D —the soil moisture deficit of 20-year-old apple orchard; Δ —the difference value between 20-year-old apple orchard and farmland; different letters mean significant difference at 0.05 level.

农地和 10 年果园深层土壤储水量差异较小,分别为 945~1 212 mm 和 869~1 276 mm,均值为 1 063 mm 和 1 075 mm,占田间最大持水量的 97% 和 98%,基本维持在田间持水量水平,甚至部分农地和 10 年果园土壤储水量略高于田间持水量,这可能与降雨入渗补给有关。通常情况下,深层土壤水分较干湿交替层具有一定的时间滞后性^[21],在这些样地下,采样前一段时间的降水,还没有完全发生重力下移。20 年果园土壤储水量变化范围为 666~915 mm,均值为 771 mm,占田间最大持水量的 70%,土壤水分条件相对较差,按照曹裕等^[16]对土壤干燥化的评价标准,深层土壤属轻度干燥化。 T 检验表明农地和 10 年果园深层土壤储水量无显著差异($P=0.195$),但两者均与 20 年果园存在极显著差异($P<0.001$)。深层土壤水分状况与土地利用方式^[13]

和种植年限^[22]有关,上述差异显然是由农地转化为果园后随时间变化造成的。

农地转化为 20 年果园后,6~10 m 储水量减少 84~465 mm,均值为 291 mm,占农地储水量的 8%~41%。土地利用变化前后储水量变化值(Δ , mm)表征了 20 年果园深层土壤水分多年累积的亏缺量,各样地间存在一定差异,这可能与地上生物量^[23]和产量^[24]差异有关。除 S4 样地(农地)和 10 年果园的深层土壤储水量略高于田间持水量外,大部分样地深层土壤水分处于亏缺状态,说明深层土壤水分难以得到降水补给,导致深层土壤水分长期处于负补偿而发生水分亏缺,20 年果园亏缺量达 185~434 mm,均值为 329 mm,约占田间持水量的 30%。

3 讨 论

水资源是黄土高原发展的限制因子之一。土壤水分作为地表水和地下水之外的一种潜性水资源,具有相当可观的生态价值和利用价值;同时,土壤水分也是土壤-植物-大气连续体水分的重要来源,是实现地表水与地下水转换的关键环节。长武塬区无可用的河流,且暴雨季节形成的地表径流不易存储利用。此外,地下水大多埋藏于 40~100 m^[20],加上降雨多集中在 6—9 月,年内年际变化较大,因此,土壤水分资源对于当地农业发展及生态建设十分重要。

黄土高原土壤水分条件逐渐替代肥力成为作物产量的限制因素^[25]。农田产量与土壤水分条件有关,但导致了一定厚度的季节性生物利用干层^[26]。长武塬区是典型的雨养农业区,种植高耗水作物苹果后,随种植年限的增加耗水量增大,耗水深度逐渐向土壤深层发展,深层土壤出现干燥化^[17]。本研究中 10 年果园深层土壤水分未发生明显的亏缺,基本维持在 98% 田间最大持水量,还有相当的可利用量,与樊军等^[25]的研究结论基本一致。而 20 年果园深层土壤水分普遍亏缺,亏缺量为 329 mm ± 84 mm。张社红等^[22]分析了洛川地区苹果种植年限与深层土壤水分的关系,发现 20 年后土壤深层将形成稳定干层,本结论与之印证。苹果树随着种植年限的增加,生长耗水由初期的降雨转化为深层土壤水分,深层土壤发生明显的干燥化后,果树转而更加依赖年内降水^[16]。20 年果园深层土壤发生稳定干燥化,土壤水库调节能力减弱,果园产量转而依靠年内降水,势必会出现一定的年际波动。因此,需要在水资源管理与果园产量之间找到平衡,确定苹果树种植的最适年限。

土地利用变化导致土壤水分变化进而影响降水-土壤水-地下水的区域循环过程,李玉山^[27-28]认为在土壤干层存在条件下,重力水难以向下移动,土壤中液态水只发生大气-土壤循环。本研究中农地和 10 年果园深层土壤水分在“重力水发生湿度”^[28]附近波动,具有重力水下渗的条件,在这些区域可能存在降水-土壤水-地下水循环过程;而 20 年果园深层土壤水分基本维持在 70% “重力水发生湿度”,需要补给 1 137~1 424 mm 降水才可能发生重力水下移。此外,该区域年均降雨 584 mm,水分入渗通常只发生在干湿交替层,因此,在现有的降雨和土壤入渗条件下,深层土壤水分难以得到降雨入渗补给。伴随着大面积的农地转化为人工经济林,局部地区

的重力水下渗通道被阻断,可能是该区地下水位下降的重要原因。

4 结 论

通过采集长武黄土塬 6 个地点下 3 种利用方式 10 m 深的土壤样品,即农地、10 年果园和 20 年果园,测定了土壤水分并定量揭示了其对土地利用变化的响应。得到如下结果:

1) 3 种样地下土壤水分垂直分布不同,农地与 10 年果园类似,土壤水分随深度增加而增大,而 20 年果园土壤水分随深度增加呈减小趋势。6 m 以下 3 种利用方式下土壤水分形成稳定差异,这为不同利用方式下土壤水分的监测深度提供了重要的参考依据。

2) 土壤水分在不同深度(0~6 m 和 6~10 m)以及整个剖面(0~10 m)内均具有农地≈10 年果园>20 年果园的特征。植物耗水层位因土地利用方式和种植年限差异而不一致。农地和 10 年果园集中耗水在 0~6 m 土层内,而 20 年果园集中耗水层位向深层移动。以农地为对照,20 年果园在 6~10 m 土层水分减少明显,减少量达农地土壤水分含量的 27%。

3) 农地转化为果园,深层(6~10 m)土壤储水量随果龄增大变化显著。10 年果园储水量变化不明显,基本保持在田间持水量;而 20 年果园储水量显著减小,水分亏缺量达 329 mm,约占田间持水量的 30%,土壤出现轻度干燥化。

伴随着大面积的农地转化为人工经济林草,深层土壤水分随着林木耗水而不断减少,形成稳定的低湿层。局部地区的低湿层阻断了重力水下渗通道,可能会对降水-土壤水-地下水区域循环造成一定影响,因此,这也可能是该区域地下水位下降的重要原因。

参 考 文 献:

- [1] 李小英,段争虎.黄土高原土壤水分与植被相互作用研究进展[J].土壤通报,2012,43(6):1508-1514.
- [2] 张建军,李慧敏,徐佳佳.黄土高原水土保持林对土壤水分的影响[J].生态学报,2011,31(23):7056-7066.
- [3] 汤青,徐勇,刘毅.黄土高原地区土地利用动态变化的空间差异分析[J].干旱区资源与环境,2010,24(8):15-21.
- [4] Shuai Wang, Bojie Fu, Guangyao Gao, et al. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2013, 101: 122-128.
- [5] 高娃,于澎涛,张淑兰,等.退耕还林还草对泾河水系东川流域径流水资源的影响[J].内蒙古农业大学学报(自然科学

- 版) 2010 31(4):90-95.
- [6] 穆兴民,高鹏,巴桑赤烈,等.应用流量历时曲线分析黄土高原水利水保措施对河川径流的影响[J].地球科学进展,2008,23(4):382-389.
- [7] Tianming Huang, Zhonghe Pang. Groundwater recharge and dynamics in northern China: implications for sustainable utilization of groundwater[J]. Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Water-Rock Interaction, Wri 14, 2013 7: 369-372.
- [8] Changbin Li, Jianguo Qi, Shuaibing Wang, et al. A Holistic system approach to understanding underground water dynamics in the loess tableland: a case study of the dongzhi loess tableland in northwest China [J]. Water Resources Management, 2014, 28(10):2937-2951.
- [9] Gutierrez-Lopez J, Asbjomsen H, Helmers M, et al. Regulation of soil moisture dynamics in agricultural fields using strips of native prairie vegetation[J]. Geoderma, 2014 226: 238-249.
- [10] Huihui Feng, Yuanbo Liu. Trajectory based detection of forest-change impacts on surface soil moisture at a basin scale [Poyang Lake Basin, China] [J]. Journal of Hydrology, 2014 514: 337-346.
- [11] 段争虎.土壤水研究在流域生态—水文过程中的作用、现状与方向[J].地球科学进展,2008,23(7):682-684.
- [12] 唐笑天.陕西苹果产业发展存在问题及对策建议[J].山西果树,2015(1):30-31.
- [13] Lei Yang, Wei Wei, Liding Chen, et al. Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2012 475: 111-122.
- [14] 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[J].生态学报,2014,34(8):1975-1983.
- [15] 王锐,刘文兆,李志.黄土塬区10m深剖面土壤物理性质研究[J].土壤学报,2008,45(3):550-554.
- [16] 曹裕,李军,张社红,等.黄土高原苹果园深层土壤干燥化特征[J].农业工程学报,2012,28(15):72-79.
- [17] 张义,谢永生,郝明德.黄土高原沟壑区塬面苹果园土壤水分特征分析[J].土壤,2011,43(2):293-298.
- [18] 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.
- [19] 王永东,徐新文,雷加强,等.塔里木沙漠公路防护林带土壤水分动态研究[J].科学通报,2008,53(增刊2):89-95.
- [20] 张盼,刘文兆.应用时间序列模型分析长武塬区地下水水位的变化特征[J].水土保持研究,2010,17(3):22-27.
- [21] Liping Cheng, Wenzhao Liu, Zhi Li, et al. Study of Soil water movement and groundwater recharge for the Loess Tableland using environmental tracers [J]. Transactions of the Asabe, 2014 57(1):23-30.
- [22] 张社红,李军,王学春,等.渭北旱塬苹果园地产量和深层土壤水分效应模拟[J].生态学报,2011,31(13):3767-3777.
- [23] 王国梁,刘国彬,党小虎.黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤含水率的影响[J].农业工程学报,2009,25(2):31-35.
- [24] 王延平,韩明玉,张林森,等.陕西黄土高原苹果园土壤水分分异特征[J].林业科学,2013,49(7):16-25.
- [25] 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[J].农业工程学报,2004,20(1):61-64.
- [26] 李玉山.旱作高产田产量波动性和土壤干燥化[J].土壤学报,2001,38(3):353-356.
- [27] 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[J].生态学报,1983,3(2):91-101.
- [28] 李玉山.黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J].自然资源学报,2001,16(5):427-432.

(上接第11页)

- [6] 魏群,费良军.地表滴灌点源入渗土壤水分运动的模拟研究[J].广东水利水电,2012(1):7-10,15.
- [7] 傅琳,董文楚,郑耀泉.微灌工程技术指南[M].北京:水利电力出版社,1988:96-100.
- [8] Keller J, Karmeli D. Trickle irrigation design parameters [J]. Transaction of the ASAE, 1974, 17(4):678-684.
- [9] 雷廷武,郑耀泉,聂光镛.滴灌湿润比的有理设计方法及应用[J].农业工程学报,1992,8(1):23-34.
- [10] 雷廷武.滴灌湿润比的解析设计[J].水利学报,1994(1):1-9.
- [11] 晏清洪,王伟,任德新,等.滴灌湿润比对成龄库尔勒香梨生长及耗水规律的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(1):7-13.
- [12] 李光永,郑耀泉,曾德超,等.地理点源非饱和土壤水运动的数值模拟[J].水利学报,1996,27(11):47-56.
- [13] 张林,吴普特,范兴科.多源滴灌条件下土壤水分运动的数值模拟[J].农业工程学报,2010,26(9):40-45.
- [14] 李久生,张建君,饶敏杰.滴灌施肥灌溉的水氮运移数学模拟及试验验证[J].水利学报,2005,36(8):932-938.
- [15] Liping Pang, Murray E Close, James P. C Watt, et al. Simulation of picloram, atrazine, and simazine leaching through two New Zealand soils and into ground water using HYDRUS-2D [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2000 44(1):19-46.
- [16] Prit Pal Singh Lubana, N. K. Narda. Soil water dynamics model for trickle irrigated tomatoes [J]. Agricultural Water Management, 1998 37(2):145-161.
- [17] 李明思,康绍忠,孙海燕.点源滴灌滴头流量与湿润体关系研究[J].农业工程学报,2006,22(4):32-35.