

长武塬区苹果园和农田相互转换 的深层土壤水环境效应

刘锦月^{1,2}, 韩晓阳¹, 朱元骏^{1,2,3}

(1. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:研究长武塬区苹果园和农田相互转换后 0~1 000 cm 土壤含水量特征, 分析了苹果园土壤干燥化和苹果园转换为农田后土壤水分的恢复效应。结果表明: 2、7、17、23、29 a 苹果园 200~1 000 cm 的平均土壤含水量分别为 22.8%、21.4%、16.8%、15.4%、14.9%。500~1 000 cm 土层中, 29 a 苹果园平均土壤含水量 (14.5%) 高于 23 a 的果园 (13.3%); 17~29 a 的苹果园均表现为轻度干燥化; 基于苹果园和农田转换后土壤水分变化情况估算, 苹果园最大种植年限为 21 a。苹果园转换为农田 1、5、10 a 后, 农田 200~1 000 cm 土层土壤含水量分别为: 15.3%、15.7% 和 16.2%, 恢复到土壤稳定湿度以上的土层厚度分别为 140 cm (1 a)、220 cm (5 a) 和 400 cm (10 a)。

关键词: 苹果园; 农田; 土地用途转换; 土壤水分; 土壤干燥化; 长武塬区

中图分类号: S152.7⁺5; S661.1 **文献标志码:** A

Deep soil water environmental effects after the mutual conversion between apple orchard and farmland in Changwu tableland region

LIU Jinyue^{1,2}, HAN Xiaoyang¹, ZHU Yuanjun^{1,2,3}

(1. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Chinese Academy of Sciences University, Beijing 100049, China;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: By quantifying the soil moisture characteristics of 0~1 000 cm layer after the mutual conversions between apple orchard and farmland in Changwu tableland region, soil water environment effects resulted from the mutual conversions between apple orchard and farmland were analyzed. The results showed that, the average soil moistures of 200~1 000 cm in the apple orchards of 2 a, 7 a, 17 a, 23 a, and 29 a were 22.8%, 21.4%, 16.8%, 15.4%, and 14.9%, respectively. In the 500~1000 cm soil layer, the average soil moisture (14.5%) of the 29 a apple orchard was higher than that of the 23 a apple orchard (13.3%), and the orchards of 17~29 a showed slight drying. Based on the change of soil moisture in apple orchards and farmlands after the conversions, the maximum planting years for apple orchard was 21 a. As the farmlands converted from apple orchards were cultivated for 1 a, 5 a, and 10 a, the soil moisture of their 200~1 000 cm layers were 15.3%, 15.7%, and 16.2%, respectively. The thicknesses of dried soil layers that could restore to the stable soil moisture were 140 cm (1 a), 220 cm (5 a), and 400 cm (10 a), respectively.

Keywords: apple orchard; farmland; land use conversion; soil moisture; soil drying; Changwu tableland

近年来, 苹果产业已经成为陕西农村经济发展的主导特色产业之一^[1]。2018 年陕西苹果种植面积 59.8 万 hm², 总产量 1008.7 万 t, 其中咸阳市苹果

产量 34.2 万 t^[2]。苹果园生物量高于农作物, 其耗水量也相应较高, 农田轮作为苹果园后加剧了土壤水分的供需矛盾, 苹果园土壤干燥化现象普遍发

生^[3-6]。且随着苹果树生长年限的延长,其对土壤水分的消耗巨大,因此,有必要对黄土高原苹果主产区苹果园和农田转换后的土壤水环境变化进行深入分析,为区域有限水资源条件下苹果产业的稳定和健康发展提供支持^[7-10]。

国内学者对黄土高原地区苹果园土壤水分状况^[11-14]和土壤干层分布特征^[15-18]进行了大量研究,揭示了苹果园深层土壤干燥化现象^[19-20]。例如,张社红等^[21]对渭北旱塬苹果园产量和深层土壤水分效应模拟的研究表明,随生长年限的延长,苹果园 0~1 000 cm 土层土壤含水量逐渐降低、土壤干层分布深度逐渐加大;在苹果种植年限达 14 a 时,土壤干层深度超过了 1 000 cm,20 a 以后 200~1 000 cm 土层形成稳定的土壤干层。彭星星^[22]分析了渭北旱地苹果园深层土壤干燥化形成机理及调控技术,认为以土壤贮水恢复量和土壤干层恢复厚度 2 个指标为基础,可以预估洛川、长武和白水 26、27 a 和 23 a 果园土壤水分恢复至当地农田水平所需的年限依次为 5、8 a 和 9 a。王延平等^[26]对陕西黄土高原苹果园土壤水分进行分析,发现陕西苹果园由南向北土壤贮水量逐渐降低,土壤水分亏缺加重;在干旱季节,北部丘陵沟壑区果园土壤水分亏缺度高达 18.5%~47.5%,黄土残塬区为 7.8%~20.3%,关中平原仅有 1.2%~6.3%。曹裕等^[16]测定了黄土高原半湿润黄土台塬区、半湿润易旱黄土旱塬区、半湿润偏旱和半干旱黄土丘陵区等不同气候和地貌类型区 32 块苹果园地 0~1 500 cm 土层土壤湿度,发现旱作果园土壤干燥化指数 (*SDI*) 分别为 32%、50%和 46%,各类型干层厚度分别达到或超过 790、1297 cm 和 910 cm。其他相关研究主要关注粮草轮作、冬小麦-夏玉米轮作和玉米-大豆轮作等的土壤水环境效应^[23-25],而对该地区苹果园转换为农田后土壤水环境变化的研究较少。苹果园转换为农田后,土壤水分会得到一定程度的恢复,但恢复

程度与年限的关系及其影响因素尚需进一步研究。本文通过对黄土高原长武塬区农田和苹果园转换后 0~1 000 cm 土层土壤水分进行观测和分析,以揭示这种土地利用变化对深层土壤水分的影响特征,为长武塬区苹果园可持续发展和土壤水资源可持续利用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原南部陕西省长武县王东沟流域(107°41'E,35°14'N),海拔 1 220 m,属于半干旱半湿润季风气候。该区年最大和最小降水量分别为 954 mm(2003 年)和 296 mm(1995 年),降水主要集中在 7—9 月,占年总量的 57%以上,无灌溉条件,属于典型的雨养农业区;年日照时数 2 226.5 h,多年平均无霜期 171 d,年平均气温 9.1℃,年辐射总量 4 837 kJ·m⁻²;地带性土壤为黑垆土,土层深厚,土质疏松,地下水埋深 50~80 m,不参与土壤水分循环;土壤的田间持水量 22.5%,稳定湿度 15.5%,凋萎湿度 8.5%^[16]。

1.2 试验设计

采用空间分布代替时间序列的方法,测定和比较不同生长年限农田和苹果园相互转换后的土壤水分状况。试验选择的苹果园生长年限为 2 a(幼树,CA1)、7 a(初果期,CA2)、17 a(盛果期,CA3)、23 a(衰老期,CA4)和 29 a(衰老后期,CA5),退果农田耕作年限为 1 a(CO2)、5 a(CO3)和 10 a(CO4),以未进行转换的农田作为对照(CO1)。所有采样点均分布在塬面上,样地基本信息见表 1(其中土壤含水量为 200~1 000 cm 土层土壤含水量值)。本研究中农田转换为苹果园前主要作物为小麦或者玉米,产量为当地平均水平,苹果园种植品种以红富士为主,种植密度为 3 m×4 m 或者 4 m×4 m;各样地的管理模式均采用当地常规方法,苹果园

表 1 样地基本情况
Table 1 Condition of study sites

样地编号 Site	土地类型 Land type	植物类型 Vegetation	生长年限 Growing year	土壤含水量 Soil water content/%			
				最大值 Max.	最小值 Min.	平均值 Mean	变异系数 CV
CO1	对照(农田)		一直 Always	19.4	12.8	16.2	11
CO2	Control(Farmland)	玉米	1	20.1	13.6	15.3	10
CO3	果园转换为农田	Maize	5	19.8	13.5	15.7	10
CO4	Farmland rotated from orchard		10	20.9	11.4	16.2	17
CA1			2	26.0	20.1	22.8	6
CA2			7	25.3	19.7	21.4	6
CA3	农田转换为果园	苹果树	17	22.0	12.1	16.8	16
CA4	Orchard rotated from farmland	Apple tree	23	22.2	11.1	15.4	19
CA5			29	17.5	12.7	14.9	8

按照季节的变化进行科学病虫害防治、保墒追肥、清除杂草、修剪树枝与套袋;砍伐果树后第一年施肥量较少,以后正常施肥,农田主要管理措施为病虫害防治、清除杂草和施肥。在 2018 年 8 月苹果树和玉米生长旺季,对样地 0~1 000 cm 土层进行取样,0~200 cm 深度土层的采样间隔为 10 cm,200~1 000 cm 深度土层的采样间隔为 20 cm。土壤水分测定采用烘干法。

1.3 数据处理

1.3.1 土壤含水量

$$SWC = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100\% \tag{1}$$

式中, SWC 为土壤质量含水量(%); W_1 为干燥铝盒的质量(g); W_2 为湿土加铝盒的质量(g); W_3 为烘干土加铝盒的质量(g)。

1.3.2 土壤干燥化指数 土壤干燥程度以土壤稳定含水量(15.5%)作为阈值,若某一层的土壤含水量低于这一值则判定该层发生了干燥化现象;如土壤含水量恢复到土壤稳定湿度值或之上时,则判定土壤干层内的土壤水分得到恢复。

以土壤干燥化指数(SDI)来评价土壤干层的干燥化程度,计算公式为:

$$SDI = \left(1 - \frac{SM - WM}{SSM - WM} \right) \times 100\% \\ = \left(\frac{SSM - SM}{SSM - WM} \right) \times 100\% \tag{2}$$

式中, SDI 为土壤干燥化指数(%); SM 为土壤含水量(%); WM 为凋萎湿度(%); SSM 为土壤稳定湿度(%)。

根据土壤干燥化指数 SDI 值的大小,果园土壤干燥化程度可划分为 6 级(表 2)。

表 2 SDI 值的范围及其对应的干燥化程度
Table 2 Range of SDI and its corresponding degree of dryness

SDI 范围 Range of SDI	干燥化程度 Degree of dryness
$\geq 100\%$	极度干燥化 Extreme desiccation
75%~100%	强烈干燥化 Intense desiccation
50%~75%	严重干燥化 Severe desiccation
25%~50%	中度干燥化 Moderate desiccation
0~25%	轻度干燥化 Mild desiccation
<0	无干燥化 No desiccation

1.3.3 土壤含水量距平值 土壤含水量距平值是指某一土层含水量与全层含水量平均值之差,用来指示土壤剖面上的低水分区域,从而分析随苹果树生长年限的延长土壤低含水量区域的变化情况,并预测不同生长年限苹果园土壤干层的发生情况。

2 结果与分析

2.1 农田转换为苹果园后土壤水分变化特征

图 1 为不同生长年限苹果园 0 ~ 1000 cm 土壤含水量分布特征。不同树龄苹果园 0 ~ 1000 cm 土层平均土壤含水量随生长年限的增加呈现先减小后增大的趋势,果园进入衰老后期后土壤含水量稍有恢复。2、7、17、23、29 a(CA1~CA5)苹果园 200~1 000 cm 平均土壤含水量分别为 22.8%、21.4%、16.8%、15.4% 和 14.9%(表 1),其中 23 a 和 29 a(CA4 和 CA5)平均土壤含水量低于土壤稳定湿度(15.5%)。根据土壤有关含水量分布特征,可将图 1 苹果园 0~1 000 cm 土层剖面分为 3 层:(1)土壤含水量无显著差异层,深度范围 0~200 cm,苹果园的平均土壤含水量在 18.8%~20.8%之间;(2)土壤含水量差异逐渐显现层,深度范围 200~500 cm,CA1~CA5 苹果园的平均土壤含水量分别为 22.4%、21.0%、19.7%、18.6% 和 15.4%;(3)土壤含水量显著差异层,深度范围 500~1 000 cm,CA1~CA5 苹果园的平均土壤含水量分别为 23.0%、21.5%、15.0%、13.3% 和 14.5%。7 a 以下的苹果园 200~1 000 cm 土层土壤含水量无明显变化,16 a 后 200~1 000 cm 土层土壤含水量呈现下降趋势。其中,CA3 和 CA4 苹果园 500~1 000 cm 和 CA5 苹果园 340~1 000 cm 的土壤含水量低于土壤稳定湿度;CA3~CA5 苹果园土壤干层分布深度超过 1 000 cm。

将不同年限的苹果园与对照农田(CO1)进行对比,发现在由农田转换为果园后,0~500 cm 土层的土壤含水量均下降;而 500~1 000 cm 土层土壤含水量则表现不同,由高到低依次为:CA1(23.0%)>CA2(21.5%)>CO1(17.1%)>CA3(15.0%)>CA5(14.5%)>CA4(13.3%)。CA3~CA5 苹果园的 500~1 000 cm 土壤含水量低于对照,表明当苹果园进入盛果期后根系对深层水分消耗较大。

由图 2 可见,土壤含水量距平值为负值的果园及其土壤深度范围表现为:CA1:0~300 cm;CA2:0~400 cm、540~560 cm 和 760~900 cm;CA3:480~1 000 cm;CA4:460~1 000 cm;CA5:260~1 000 cm。负距平值的分布特征说明幼果期(CA1)和盛果前期(CA2)苹果树根系分布较浅,主要吸收 0~500 cm 的土壤水分;随着苹果树生长年限的延长,苹果树根系吸水强度和深度逐渐增加,进入衰老期后根系吸水区域逐渐上移。

2.2 农田转换为苹果园后的土壤干燥化强度评价

由表 3 可知,CA1~CA5 苹果园 0~1 000 cm 土

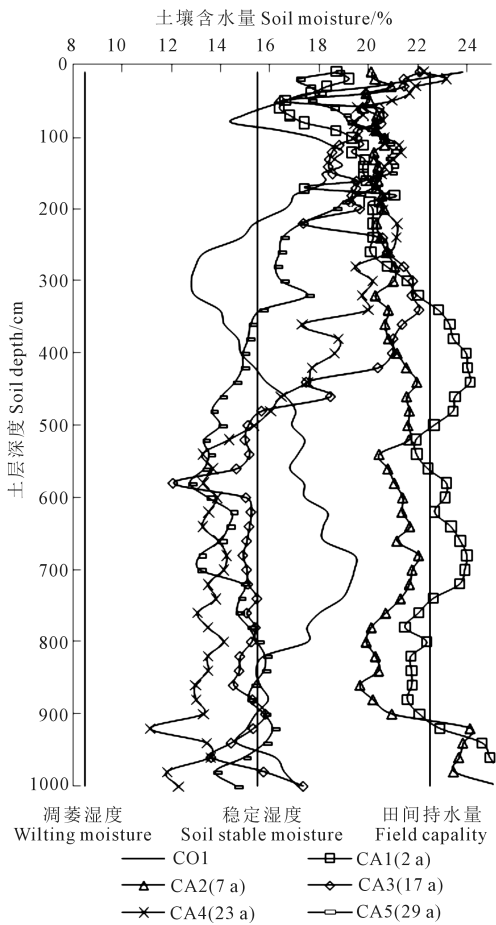


图 1 农田转换为苹果园后土壤含水量剖面分布

Fig.1 Vertical distribution of soil water content in the apple orchards rotated from farmland

层的土壤干燥化指数平均值分别为-23%、-19%、12%、17%和 25%,CA1 和 CA2 幼果期苹果园无土壤干燥化,CA3~CA5 均达到了轻度干燥化程度。CA1~CA5 苹果园均未出现强烈干燥土层和极度干燥土层,CA3 轻度干燥、中度干燥和严重干燥的土层厚度分别为 100、240、20 cm;CA4 分别为 60、90 cm 和 180 cm;CA5 为 130、260 cm 和 90 cm;CA3~CA5 苹果园轻度干燥层和中度干燥层均出现先减小后增加的趋势,严重干燥层出现先增加后减小的趋势。

2.3 苹果园转换为农田后的土壤水分恢复效应

苹果园转换为农田后,CO1~CO4 农田 0~200 cm 平均土壤含水量无明显差异,分别为 17.9%、20.5%、18.6%和 16.7%;200~500 cm 的平均土壤含水量较上层明显减小,分别为 14.7%、16.3%、17.0%和 18.9%,其中 CO2~CO4 土壤含水量都恢复到 15.5%以上(图 3)。在 500~1 000 cm 土层中,CO2~CO4 土壤含水量最低,分别为 14.7%、14.9%和 14.5%,说明苹果园转换为农田后,短期内深层土壤

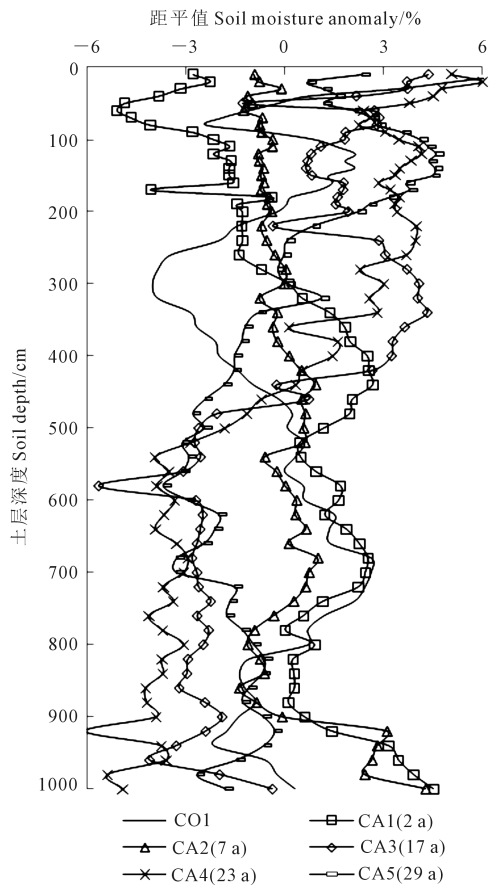


图 2 农田转换为苹果园后土壤含水量距平值变化

Fig.2 Variation of distanced average for soil water content in the apple orchards rotated from farmland

含水量还未能得到补给和恢复。

CA5 苹果园在 340~1 000 cm 土层形成了一个土壤含水量低于土壤稳定湿度的干燥层,随着苹果园轮作农田生长年限的延长,干燥层逐渐减小。1 a 农田(CO2)的干燥层范围缩小到 400~920 cm,5 a 农田(CO3)的干燥层范围缩小到 500~940 cm,10 a 农田(CO4)的干燥层范围缩小到 580~840 cm(图 3)。可见,土壤干层是由上部和下部土层向中间层逐渐恢复的。CO2~CO4 农田 0~1 000 cm 土层恢复到土壤稳定湿度值以上的土层厚度分别为 140、220 cm 和 400 cm,随着农田生长年限的延长,土壤干层厚度逐渐减小。

3 讨 论

由于国家政策和苹果种植带来的高收益,近年来长武塬区苹果园的面积占比逐年增大,农田种植面积逐年减小。与农作物相比,苹果是深根系、高生物量的植物,其对土壤水分的消耗也更大。此外,由于苹果树有自己的生命周期,在由盛转衰后,将其转化为农田,不仅可以恢复土壤水分,还可以增加

表 3 农田转换为苹果园后的土壤干燥化情况

Table 3 Soil dryness status in the apple orchards rotated from farmland

样地编号 Site	生长年限 Growing year	干燥化指数/% Soildryness index	土层厚度 Thickness of soil layer/cm					总干层厚度/cm Total thick ness of dry ness layer
			极度干燥 Extreme drying	强烈干燥 Intense drying	严重干燥 Severe drying	中度干燥 Moderate drying	轻度干燥 Mild drying	
CO1	一直 Always	21	0	0	40	200	300	540
CA1	2	-23	0	0	0	0	90	90
CA2	7	-19	0	0	0	0	0	0
CA3	17	12	0	0	20	240	100	360
CA4	23	17	0	0	180	90	60	330
CA5	29	25	0	0	90	260	130	480

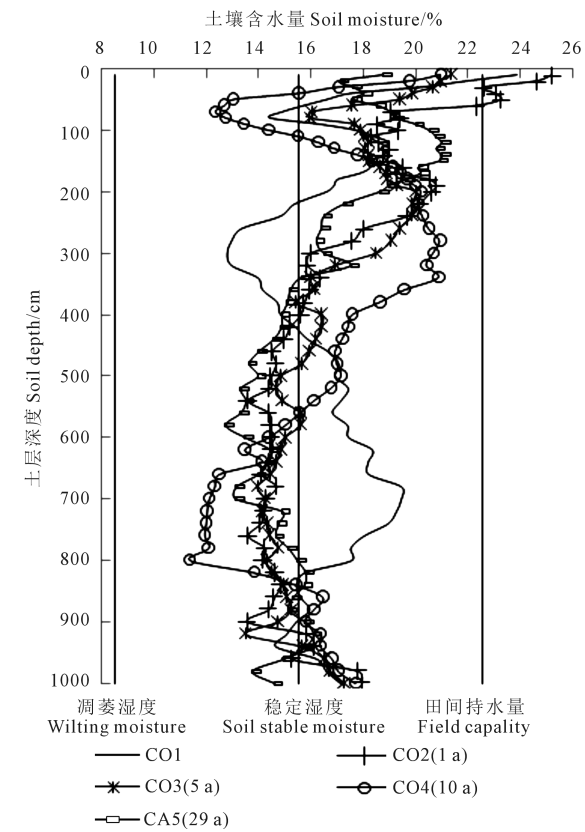


图 3 苹果园转换为农田后的土壤含水量垂直分布

Fig.3 Vertical distribution of soil water content in the farmland rotated from apple orchard

土地的经济效益。因此,研究农田和苹果园相互转换的土壤水环境效应,不仅有助于量化区域苹果大面积种植对土壤水环境的影响,还可以量化苹果园转化为农田后的土壤水分恢复情况,从而为苹果园的可持续发展和土壤水资源的保护提供科学依据。

长武塬区 2~29 a(CA1~CA5)的苹果园 0~1 000 cm 土层土壤含水量出现先减小后增大的趋势。当苹果园进入衰老后期,更高龄的苹果园(CA5)土壤含水量高于相对低龄的苹果园(CA4),

可能是由于衰老后期果树衰退,生产能力降低,对水分的需求也相应地减少,加之雨季上层土壤水分的补给,使总体土壤含水量略有增加,这与李青华等^[7]的研究结果一致。CA1~CA5 苹果园 500~1 000 cm 的土壤含水量低于土壤稳定湿度,这与 Liu 等^[26]研究结果一致。苹果种植作为一种特殊的退耕还林模式,在盛果后期和衰老期均存在很厚的土壤干层,表明种植苹果也会导致黄土高原土层的干燥化现象。低龄的苹果园(CA1 和 CA2)没有出现土壤干燥化,可能是由于幼果期和盛果前期果树主要耗水层为 0~200 cm,夏季降水能够补充,这与王延平等^[6]研究结果类似。通过对不同年限苹果园土壤水分状况的分析,我们拟合出农田轮作为果园后的土壤水分含量与生长年限的关系: $Y=0.0079X^2-0.5600X+24.2440$ ($R^2=0.98$, Y 为土壤质量含水量, X 为苹果园生长年限)。如果以土壤稳定温度和凋萎湿度分别作为土壤水分的上、下边界,我们可以计算出苹果园种植的适宜年限为 21 a(即不会导致严重的土壤干燥化),这与张社红等^[21]的研究结果相似。果园转换为农田后,土壤干层出现由上部和下部向中间层逐渐恢复的现象。以降水为主要水分补给来源的长武塬区,苹果园转换为农田后表层土壤水分恢复主要是由于降水入渗;深层土壤水分恢复可能是由于“土壤水库”的深层储水沿水势梯度向上补充的结果^[27-28],这一点与樊军等^[19]的结论一致。

4 结 论

苹果园转换为农田 1、5、10 a 后,200~1 000 cm 土层土壤含水量分别为:15.3%、15.7%和 16.1%。0~1 000 cm 土壤干层出现由上部和下部土层向中间层逐渐恢复的现象,恢复到土壤稳定湿度值以上的

土层厚度分别为 140、220 cm 和 400 cm。随着退果年限的增加,土壤干层厚度逐渐减小。以土壤稳定湿度和凋萎湿度为土壤水分的上、下边界,苹果园的最大适宜种植年限为 21 a(即不会导致严重的土壤干燥化),此后应转换为粮食作物,以缓解土壤干燥化、促进土壤水分恢复。

参 考 文 献:

[1] 李会科,张广军,赵政阳,等.渭北黄土高原旱地果园生草对土壤物理性质的影响[J].中国农业科学,2008,41(7):2070-2076.

[2] 陕西省统计局.陕西统计年鉴[J].北京:中国统计出版社,2019.

[3] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P, et al. Characteristics of dried soil layers under apple orchards of different ages and their applications in soil water managements on the Loess Plateau of China [J]. Pedosphere, 2015, 25(4):546-554.

[4] Li H J, Si B C, Wu P T, et al. Water mining from deep critical zone by apple trees growing on loess[J]. Hydrological Processes, 2019, 33(2):320-327.

[5] 高茂盛,廖允成,李侠,等.不同覆盖方式对渭北旱作苹果园土壤贮水的影响[J].中国农业科学,2010,43(10):2080-2087.

[6] 王延平,韩明玉,张林森,等.洛川苹果园土壤水分变化特征[J].应用生态学报,2012,23(3):731-738.

[7] 李青华,张静,王力,等.黄土丘陵沟壑区山地苹果林土壤干化及养分变异特征[J].土壤学报,2018,55(2):503-514.

[8] 殷淑燕,黄春长.黄土高原苹果基地土壤干燥化原因及其对策[J].干旱区资源与环境,2005,19(2):76-80.

[9] Song X L, Gao X D, Dyck M, et al. Soil water and root distribution of apple tree (*Malus pumila* Mill) stands in relation to stand age and rainwater collection and infiltration system (RWCI) in a hilly region of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2018, 170: 324-334.

[10] 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.土壤,2011,43(2):293-298.

[11] 赵刚,樊廷录,李尚中,等.黄土旱塬区苹果园土壤水分动态[J].应用生态学报,2015,26(4):1199-1204.

[12] Zhang Z Q, Li M, Si B C, et al. Deep rooted apple trees decrease groundwater recharge in the highland region of the Loess Plateau,

China[J]. Science of the Total Environment, 2017,622-623:587-593.

[13] 马鹏毅,赵家锐,何威明,等.黄土高原不同树龄苹果园土壤水分及硝态氮剖面特征[J].水土保持学报,2019,33(3):192-198,214.

[14] 曹裕,居玛汗·卡斯木,范鹏,等.陕西洛川旱塬苹果园地深层土壤水分和养分特征[J].应用生态学报,2013,24(2):388-396.

[15] 郑双科,司炳成,张志强,等.黄土塬区苹果园降雨入渗机制[J].应用生态学报,2017,(9):2870-2878.

[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,(15):72-79.

[17] 包睿,邹养军,马锋旺,等.种植年限及密度对渭北旱塬苹果园深层土壤干燥化的影响[J].农业工程学报,2016,(15):143-149.

[18] 赵志远,郑伟,刘杰,等.渭北旱塬苹果园不同水肥管理模式下的土壤水分差异[J].应用生态学报,2018,29(4):1249-1258.

[19] 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.

[20] 刘贤赵,黄明斌.渭北旱塬苹果园土壤水分环境效应[J].果树学报,2002,19(2):75-78.

[21] 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.

[22] 彭星星.渭北旱地苹果园深层土壤干燥化形成机理与调控技术研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2017.

[23] 王学春,李军,郝明德.长武旱塬草粮轮作田土壤水分可持续利用模式模拟[J].农业工程学报,2011,27(13):257-266.

[24] 王美艳,李军,孙剑,等.黄土高原半干旱区苜蓿草地土壤干燥化特征与粮草轮作土壤水分恢复效应[J].生态学报,2009,29(8):4526-4534.

[25] 郭金瑞,宋振伟,高洪军,等.玉米大豆长期轮作对土壤物理特性与水热特征的影响[J].大豆科学,2017,36(2):226-232.

[26] Liu M X, Xu X L, Sun A Y. New drought index indicates that land surface changes might have enhanced drying tendencies over the Loess Plateau[J]. Ecological Indicators, 2018, 89:716-724.

[27] 刘沛松,贾志宽,李军,等.宁南山区紫花苜蓿(*Medicago sativa*)土壤干层水分动态及草粮轮作恢复效应[J].生态学报,2008,28(1):183-191.

[28] Yang W Z, Shao M A, Peng X D, et al. Relationships between environmental desiccation and soil moisture in the Loess Plateau[J]. Science in China,Ser.D,1998,28(4):357-365.