

# 残塬沟壑区不同果农复合模式对土壤理化性质及水源涵养功能的影响

孟凡旭<sup>1</sup>, 王树森<sup>1</sup>, 秦富仓<sup>1</sup>, 马迎梅<sup>1</sup>, 罗于洋<sup>1</sup>, 王迪海<sup>2</sup>, 刘静<sup>1</sup>, 孙耀文<sup>1</sup>

(1.内蒙古农业大学沙漠治理学院,荒漠生态系统保护与修复国家林业局重点实验室,

内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室,呼和浩特 010018;2.西北农林科技大学林学院,陕西 杨凌 712100)

**摘要:**为研究残塬沟壑区苹果园不同果农复合模式下土壤理化性质和水源涵养功能并筛选出水源涵养功能主导因素。以陕西省马坊塬果—荒(M0)、果—草(M1)、果—蔬(M2)、果—粮(M3)4种果农复合经营模式苹果园为研究对象,对比4种果农复合模式土壤理化特征差异性,并评估果农复合模式对土壤水源涵养功能指数的影响。使用逐步回归分析和通径分析探讨影响土壤水源涵养功能的主导因素。结果表明:生草处理、果蔬间作、果农间作下果园土壤容重、孔隙度、持水能力、养分含量等理化性质优于人工除草样地。其中生草处理、果蔬间作、果农间作土壤容重比人工除草别降低了15.13%,11.84%,11.18%;有机质含量增加了143.76%,7.14%,120.46%。各果农复合模式下土壤水源涵养功能指数大小依次为M1(0.64)>M3(0.59)>M2(0.51)>M0(0.38)。逐步回归分析表明,总孔隙度、容重和有机质含量是影响土壤水源涵养功能的主要因子,3个土壤因子可解释土壤水源涵养功能指数变异量的95%。通径分析表明,总孔隙度是影响土壤水源涵养功能的主要决策因素,容重是影响土壤水源涵养功能的主要限制因子。研究结果可为残塬沟壑区苹果园可持续土壤管理的选择提供科学依据。

**关键词:**残塬沟壑区;果农复合模式;土壤理化性质;水源涵养功能;通径分析;主导因素

中图分类号:S714.7

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)05-0192-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.05.027

## Effect of Different Fruit-Crop Compounds on Soil Physiochemical Properties and Soil-water Conservation in Gully Region of Plateau

MENG Fanxu<sup>1</sup>, WANG Shusen<sup>1</sup>, QIN Fucang<sup>1</sup>, MA Yingmei<sup>1</sup>,

LUO Yuyang<sup>1</sup>, WANG Dihai<sup>2</sup>, LIU Jing<sup>1</sup>, SUN Yaowen<sup>1</sup>

(1.College of Desert Control Science and Engineering, Key Laboratory of Aeolian Physics and Desertification Engineering, Key Laboratory of Desert Ecosystem Conservation and Restoration, State Forest Administration of China, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018;

2.College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** In order to study the effect of different fruit-crop compound managements on soil physiochemical properties and soil-water conservation in apple orchard in the gully region of plateau, and to screen dominant factors for soil-water conservation, four fruit-crop compound managements including artificial weeding (M0), Malus-Trifolium (M1), Malus-Wild (M2) and Malus-Zea (M3) were set up as treatments in Mafang plateau, Shaanxi Province. The differences on soil physiochemical characteristics under the treatments of four fruit-crop compound managements were compared and the soil-water conservation function was evaluated. Stepwise regression analysis and path analysis were used to explore the dominant factors affecting soil-water conservation function. The results showed that the soil physiochemical properties, such as soil density, porosity, water-holding capacity, and nutrient content in M1, M2 and M3 were higher than those of the artificial weeding plots. Among them, the soil bulk density scores of M1, M2 and M3 were reduced by 15.13%, 11.84% and 11.18%, respectively, compared with the artificial weeding plot. The organic matter

收稿日期:2020-03-09

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0504605)

第一作者:孟凡旭(1995-),男,硕士研究生,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:351450024@qq.com

通信作者:王树森(1970-),男,教授,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:wsswtt@126.com

contents increased by 143.76%, 7.14% and 120.46%, respectively. Soil-water conservation function for four fruit-crop managements was ranked as M1 (0.64) > M3 (0.59) > M2 (0.51) > M0 (0.38). Stepwise regression analysis showed that total porosity, bulk density and organic matter content were the main factors affecting soil-water conservation function. Three soil factors could explain 95% of the variation of soil-water conservation function. Path analysis showed that total porosity was the main deciding factor, and bulk density was the main limiting factor of soil water conservation function. The results of this article could provide a scientific basis for the selection of sustainable soil management in apple orchards in the gully region of plateau.

**Keywords:** gully region of plateau; fruit-crop compound management models; soil physiochemical properties; soil-water conservation function; path analysis; dominant factor

残源沟壑区位于黄土高原南部,是我国北方旱作农业的重要发源地,也是我国优质苹果的适生区<sup>[1]</sup>。由于苹果园兼具生态效益和经济效益,自退耕还林政策实施以来,当地政府大力推广苹果产业的发展,该地区苹果园面积迅速增长<sup>[2]</sup>。与传统农作物相比,苹果树具有根系深、蒸腾耗水作用强的特点,其大面积的种植土壤会出现干燥化的现象<sup>[3]</sup>。加剧土壤水源涵养能力的退化。然而该区域苹果园面积仍在逐年增加<sup>[2]</sup>。该地区土壤水源涵养功能问题更加严峻。因此,探究残源沟壑区苹果园蓄水保水的可持续发展的果园管理方式极为重要。

长期以来,该区域果园管理制度普遍采用清耕制<sup>[4]</sup>,清耕法在短期内,能够改善土壤中的水分、空气和营养状况,便于果园管理。但是长期采用清耕法,会出现地表裸露,增加土壤水的无效蒸发,降低果树水分利用效率,土壤结构遭到破坏等现象,最终导致果品产量降低,品质变差<sup>[5]</sup>。因此人们开始对适宜该地区果园土壤管理方式进行了探索。李同川<sup>[6]</sup>对渭北生草果园土壤水分特征进行了研究提出,生草可以提高0—200 cm土层土壤水分变异程度,同时在冬季和初春具有良好的保墒能力。钱雅丽等<sup>[7]</sup>研究发现,果园种植白三叶可增加土壤真菌多样性。邢荔<sup>[8]</sup>研究发现,果园生草可增加叶片的光合速率。陈久红等<sup>[9]</sup>对新疆地区苹果园土壤理化性质的研究中发现,生草可降低果园土壤容重,提高土壤养分含量。然而关于不同果园管理措施对土壤水源涵养影响研究尚未见报道,果园内的管理方式变化如何调控土壤水源涵养依旧不清楚。因此,本研究设置4种不同的果园土壤管理方式,对比不同土壤管理方式下土壤水源涵养功能差异。并筛选出影响果园水源涵养功能的主导因子,以期对残源沟壑区苹果园土壤管理的选择提供指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验样地位于陕西省咸阳市永寿县马坊塬<sup>[2]</sup>,地理位置为34°29′—34°59′N,107°56′—108°20′E,该区位于渭北高原南缘,属暖温带大陆性气候。年平均气

温10.2℃,平均年降水量610.66 mm,无霜期210天,土壤母质为第四纪风积黄土,属于褐土土类,壤土亚类。地下水埋深20~120 m。属典型的旱作农业区,试验地周围无污染源。苹果(*Malus pumila*)经济林种植面积较大,果业收入占农民收入40%以上。该地区耕层土壤有机质含量为11.66 g/kg,碱解氮含量为26.69 mg/kg,速效磷含量为16.94 mg/kg,速效钾含量为100.59 mg/kg,pH为7.65,容重为1.30 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地选择 通过走访和实地调查,最后选定陕西永寿县同一塬面上的连片果园作为研究区域。调查内容包括果园种植面积、果树品种、果树树龄、种植密度、土壤类型、施肥种类、施肥数量、施肥时期和施肥方法、灌水情况以及果园管理措施等,用GPS记录果园的位置。

2019年7月,在实地调查的基础上,根据当地已有的苹果园类型,最终选取了果—荒(苹果+人工除草)、果—草(苹果+白三叶草(*Trifolium repens*))、果—蔬(苹果+甘蓝(*Brassica oleracea*))、果—粮(苹果+玉米(*Zea mays*))4种不同果农复合经营模式苹果园。每个类型果园选取3个面积为20 m×20 m的样地做重复。

各果园均在同一塬面,坐标34.776—34.781N;108.162—108.299E;海拔1 022~1 031 m,受环境差异性影响较小。果树品种均为“红富士”,栽植密度为625株/hm<sup>2</sup>(4 m×4 m),各果农复合模式样地均为同一年栽植,后经过一系列补植,林龄均在18~20年,4个样地管理年限均在9年以上。在苹果收获后各样地均按0.67,1.37,1.71 t/hm<sup>2</sup>施入尿素、碳铵、磷肥(陕西双菱化工股份有限公司)作为基肥,次年5月施用21菌聚糖多微膨大肥(西安科达农化有限责任公司)0.114 t/hm<sup>2</sup>,各样地具体情况见表1。

1.2.2 土壤理化特性的测定 每个样地选取3棵具有代表性的果树,在距离果树100 cm处挖掘土壤剖面进行取样调查,自上而下使用环刀按0—10,10—20,20—30,30—40,40—50 cm分5层取土样,用修

土刀削平环刀两端多余的土,加盖称重,做好标记并记录。用于土壤水分物理性质的测定,具体操作及各指标计算按照《森林土壤分析方法》<sup>[10]</sup>进行,各指标计算公式为:

$$BD = (m_2 - m_1) / V \quad (1)$$

$$WHC = (m_3 - m_2) / (m_2 - m_1) \times 100\% \quad (2)$$

$$MFC = (m_4 - m_2) / (m_2 - m_1) \times 100\% \quad (3)$$

$$CWH = (m_5 - m_2) / (m_2 - m_1) \times 100\% \quad (4)$$

$$NCP = (WHC - CWH) \times BD \quad (5)$$

$$CP = CWH \times BD \quad (6)$$

$$TP = NCP + CP \quad (7)$$

式中:BD 为容重(g/cm<sup>3</sup>);WHC 为最大持水量(%);MFC 为最小持水量(%);CWH 为毛管持水量(%);NCP 为非毛管孔隙度(%);CP 为毛管孔隙度(%);TP 为总孔隙度(%);m<sub>1</sub>为环刀重(g);m<sub>2</sub>为环刀干土重(g);V 为环刀容积(cm<sup>3</sup>);m<sub>3</sub>为环刀内土壤浸水 12 h 重(g);m<sub>4</sub>为置沙 48 h 重(g);m<sub>5</sub>为置沙 2 h 重(g)。

表 1 试验样地基本情况

样地 编号	经营 措施	地径/ cm	分枝 高度/m	株高/ m	冠幅 面积/m <sup>2</sup>	冠幅 体积/m <sup>3</sup>
M0	人工除草	20.02a	1.05a	3.74a	19.29a	72.14ab
M1	自然生草	18.09a	0.81a	4.14a	21.16a	87.60a
M2	间作蔬菜	18.38a	1.05a	3.82a	20.88a	79.76a
M3	间作玉米	18.06a	1.05a	3.85a	19.06a	73.38ab

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著( $p < 0.05$ )。

土壤饱和导水率用环刀法<sup>[11]</sup>测定,计算公式为:

$$K_t = \frac{Q \times h}{S \times t \times L} \quad (8)$$

式中: $K_t$ 为土壤饱和导水率(mm/min);S 为土壤环刀横截面积(cm<sup>2</sup>);Q 为渗透过截面积 S 的水量(mm);h 为土层厚度(cm);t 为渗透过水量 Q 时所需时间(min);L 为水层厚度(cm)。

土壤物理性质测定同时,用塑料袋采集土壤样品并风干用于 pH、有机质及速效养分的测定。测定方法参照文献<sup>[12]</sup>。

### 1.3 土壤水源涵养功能指数计算

在综合已有土壤水源涵养研究文献基础上,选取土壤含水率、最大持水量、最小持水量、毛管持水量以及土壤饱和导水率 5 个水分指标,通过均方差决策法综合评价土壤水源涵养功能。

首先,采用极差变换法进行无量纲标准化处理,经过标准化处理后所有指标都会满足[0,1]的范围,优化后最优结果趋近于 1,最差结果趋近于 0。具体计算公式为:

$$G_{ij} = \frac{B_i - B_{\min}}{B_{\max} - B_{\min}} \quad (9)$$

式中: $G_{ij}$ 为指标标准化后的值; $B_i$ 为第  $i$  项指标的测

定值; $B_{\max}$ 为该指标中的最大值; $B_{\min}$ 为该指标中的最小值。

采用均方差决策法对 4 种果农复合模式苹果园土壤水源涵养功能进行综合评价。用标准化后的值作为各评价指标随机变量的取值,计算出随机变量的均值、均方差,将这些均方差归一化,获得各指标的权重系数,最后使用权重系数和各优先流评价指标标准化后的值计算土壤水源涵养功能指数<sup>[13]</sup>。具体计算步骤为:

计算随机变量的均值  $E(G_j)$ :

$$E(G_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_{ij} \quad (10)$$

计算指标集  $G_j$  的均方差:

$$\sigma(G_j) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (G_{ij} - E(G_j))^2} \quad (11)$$

计算指标集  $G_j$  的权重系数:

$$W(G_j) = \frac{\sigma(G_j)}{\sum_{i=1}^m \sigma(G_j)} \quad (12)$$

计算土壤水源涵养功能指数 SWI:

$$SWI = \sum_{j=1}^m G_{ij} W(G_j) \quad (13)$$

## 1.4 数据统计与分析

使用 SPSS 20.0 对各果农复合模式土壤理化性质进行 ANOVA 方差分析、Person 相关分析。利用逐步回归分析和通径分析筛选出影响土壤水源涵养功能主导因子。采用 Origin 2018 软件进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同果农复合模式苹果园土壤容重及孔隙度变化

土壤容重指土壤在单位体积内排列松紧程度,表征土壤紧实度的一个重要指标。由表 2 可知,随着土层深度的增加,各果农复合模式土壤容重均显著增大,变化范围为 1.23~1.60 g/cm<sup>3</sup>。0—50 cm 平均土壤容重表现为 M0(1.52 g/cm<sup>3</sup>) > M3(1.35 g/cm<sup>3</sup>) > M2(1.34 g/cm<sup>3</sup>) > M1(1.29 g/cm<sup>3</sup>),M0 样地与其他 3 个样地差异显著。这主要是因为该样地长期使用免耕的土壤管理方式,且在苹果生长期中多次的人工除草过程中对土壤造成了踩踏,而另外 3 块样地生长了除苹果外的其他各类草本,草本植物根系的生长和腐烂均可显著的对果园土壤进行改善。因此 M0 样地土壤容重显著高于其他 3 个样地。

土壤孔隙度决定了土壤的通气性和透水性,由表 2 可知,不同土层间非毛管孔隙度、毛管孔隙度和总孔隙度变化不大,但均随土层深度增加呈现出减小的趋势。3 个指标变化范围分别为 4.09%~10.50%,32.10%~49.06%,38.09%~56.42%。0—50 cm 非毛管孔隙度平均值表现为 M1(6.98%) > M0(6.85%) > M3

(6.44%)>M2(5.81%),除 M0 和 M1 外各样地差异显著。毛管孔隙度平均值表现为 M1(43.06%)>M3(42.70%)>M2(40.32%)>M0(39.01%),M0 与 M1、M3

差异显著。总孔隙度平均值表现为 M1(50.04%)>M3(49.14%)>M2(46.13%)>M0(45.86%),除 M0 和 M2 外各样地差异显著。

表 2 不同果农复合模式土壤容重及孔隙度

土层深度/cm	样地编号	容重		非毛管孔隙度		毛管孔隙度		总孔隙度	
		数值/ (g·cm <sup>-3</sup> )	CV/%	数值/%	CV/%	数值/%	CV/%	数值/%	CV/%
0—10	M0	1.30a	2.34	10.50a	9.63	41.72c	4.74	52.22b	4.64
	M1	1.23b	2.39	7.36ab	2.66	49.06a	2.42	56.42a	2.34
	M2	1.29ab	2.70	5.21b	9.14	44.29bc	4.61	49.50b	4.63
	M3	1.27ab	2.95	4.73b	9.35	48.69ab	6.42	53.42ab	5.04
10—20	M0	1.38a	2.40	6.64ab	6.15	43.03a	4.59	49.66a	4.62
	M1	1.29b	1.41	6.13b	4.01	41.89a	3.55	48.03a	2.38
	M2	1.30b	2.23	5.36b	4.81	43.59a	5.10	48.95a	4.93
	M3	1.26b	2.41	8.87a	20.31	41.73a	4.71	50.60a	5.26
20—30	M0	1.40a	2.34	5.48bc	6.15	40.65ab	4.58	46.13a	4.60
	M1	1.33b	0.38	6.72ab	6.02	41.62ab	2.91	48.34a	3.26
	M2	1.33b	2.53	7.31a	6.36	39.89b	4.64	47.19a	4.60
	M3	1.36b	2.23	4.09c	7.71	44.52a	4.61	48.61a	5.31
30—40	M0	1.53a	2.22	5.65b	10.34	37.53b	4.80	43.18b	4.59
	M1	1.30c	0.72	8.95a	2.48	40.58ab	6.19	49.53a	2.50
	M2	1.37bc	2.42	6.07b	17.15	39.55b	5.81	45.63b	4.68
	M3	1.40b	2.39	7.11ab	4.91	44.24a	4.73	51.35a	4.75
40—50	M0	1.60a	2.24	5.99b	20.55	32.10b	4.61	38.09b	5.32
	M1	1.31c	0.35	5.74ab	8.86	42.14a	6.96	47.87b	5.28
	M2	1.41bc	2.36	5.10b	10.09	34.25b	4.90	39.36b	4.60
	M3	1.46b	2.25	7.40a	12.97	34.30b	4.64	41.70a	4.84
均值	M0	1.52a	5.23	6.85a	4.61	39.01b	4.60	45.86c	4.59
	M1	1.29b	1.11	6.98a	3.94	43.06a	2.63	50.04a	2.38
	M2	1.34b	2.34	5.81c	4.64	40.32ab	4.65	46.13c	4.63
	M3	1.35b	2.28	6.44b	5.05	42.70a	4.62	49.14b	4.63

注:相同土层不同样地中不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著( $P<0.05$ )。下同。

## 2.2 不同果农复合模式苹果园土壤持水能力

由表 3 可知,随着土层深度的增加,土壤含水率总体呈现出递减的趋势(表 3),变化范围在 5.60~10.87,0—50 cm 平均含水率大小表现为 M1(9.56%)>M3(9.43%)>M2(9.09%)>M0(8.17%),M0 与其他 3 个样地差异显著。

从垂直变化来看,土壤最大持水量、最小持水量、毛管持水量随土层深度增加均呈现减小的趋势,变化范围分别为 23.88%~46.51%,17.60%~34.49%和 20.13%~40.44%。0—50 cm 平均最大持水量表现为 M1(38.03%)>M3(36.60%)>M2(34.57%)>M0(32.16%)各样地差异显著。平均最小持水量表现为 M1(28.69%)>M3(28.00%)>M2(26.31%)>M0(24.22%),除 M1 和 M3 外各样地差异显著。毛管持水量变化规律与最小持水量相同,表现为 M1(33.61%)>

M3(30.23%)>M2(31.82%)>M0(27.32%)。

土壤饱和导水率随土层深度的增加呈现出降低的趋势,在 1.45~0.36 mm/min,均值为 0.85 mm/min,0—50 cm 土壤饱和导水率平均值排序为 M1(0.95 mm/min)>M3(0.90 mm/min)>M2(0.83 mm/min)>M0(0.72 mm/min)。

## 2.3 不同果农复合模式苹果园土壤 pH 及养分组成

由表 4 可知,4 个样地土壤表层 pH 均小于较深层次的土壤,但变化幅度不大,数值在 7.15~8.10,平均值 7.65。0—50 cm 土层 pH 均值大小依次为 M0(7.86)>M3(7.70)>M2(7.56)>M1(7.49),表明各果农复合模式土壤酸碱度以中性和弱碱性为主,符合我国西北干旱半干旱区土壤大多呈碱性的特征,其中,M1 样地表层 pH 显著小于其他 3 个样地,这可生草样地中草本植物较多,草本植物在秋冬分解过程中会产生或释放一



些有机酸等酸性物质;同时生草样地土壤动物和微生物活动频繁,土壤动物和微生物会产生些代谢物,进而使该样地表层 pH 要显著低于其他样地( $p < 0.05$ )。

土壤有机质是衡量土壤养分的标志,各样地土壤有机质含量均随土层深度的增加而降低,含量在 4.66~

18.39 g/kg,平均 10.09 g/kg。0—50 cm 土层有机质均值大小依次为 M1(14.65 g/kg) > M3(13.25 g/kg) > M2(6.44 g/kg) > M0(6.01 g/kg),果园内生草能够显著增加土壤有机质含量,M1 样地分别是 M3、M2、M0 的 1.11,2.27,2.44 倍。

表 3 不同果农复合模式土壤含水率及持水能力

土层深度/cm	样地编号	含水率		最大持水量		最小持水量		毛管持水量		饱和导水率	
		数值/	CV/	数值/	CV/	数值/	CV/	数值/	CV/	数值/	CV/
		%	%	%	%	%	%	%	%	(mm·min <sup>-1</sup> )	%
0—10	M0	9.38b	1.36	40.07c	2.30	28.94b	4.10	32.02b	2.83	1.21c	1.22
	M1	9.32b	0.70	46.51a	2.41	34.49a	2.30	40.44a	2.52	1.45a	0.42
	M2	10.87a	2.36	38.51c	2.44	30.64b	3.72	34.45b	2.89	1.31b	0.88
	M3	6.24c	5.04	42.04b	2.30	35.62a	5.81	38.35a	6.72	1.38a	1.72
10—20	M0	10.05a	1.51	35.83c	2.29	27.46b	2.44	31.05a	2.31	0.82c	3.58
	M1	9.49bc	0.84	37.27b	3.89	29.10ab	7.03	32.55a	6.96	1.21a	0.40
	M2	9.29c	4.96	37.63b	2.79	29.79a	2.30	33.51a	3.03	1.05b	2.88
	M3	9.94ab	2.92	40.02a	3.30	31.15a	2.37	33.01a	2.64	1.14a	0.43
20—30	M0	8.46b	5.41	32.84b	2.28	25.76b	2.45	28.94c	2.33	0.64b	0.86
	M1	10.51a	2.45	36.54a	6.94	27.28a	5.62	31.43ab	6.49	0.88a	2.11
	M2	9.51a	7.80	35.42ab	2.45	25.95b	3.91	29.94bc	2.86	0.83a	0.73
	M3	10.34a	5.16	35.70ab	3.71	27.99a	2.28	32.70a	2.30	0.82a	4.51
30—40	M0	7.38c	1.84	28.16c	2.29	21.37c	2.53	24.48b	2.79	0.55b	0.41
	M1	9.16b	5.30	38.17a	3.52	28.06a	4.64	31.27a	7.65	0.61a	0.41
	M2	9.30b	1.69	33.33b	2.75	24.59b	4.33	28.89a	4.84	0.54b	3.25
	M3	10.31a	3.31	36.71a	2.99	27.08a	2.33	31.63a	2.93	0.65a	0.69
40—50	M0	5.60d	7.10	23.88c	3.24	17.60c	2.42	20.13c	2.48	0.36b	1.54
	M1	9.33b	1.81	31.68a	5.43	24.45a	8.49	32.37a	11.40	0.62a	0.72
	M2	6.47c	7.48	27.95b	2.49	20.56b	5.49	24.33b	3.32	0.44b	0.37
	M3	10.30a	5.91	28.50b	2.55	18.14c	4.41	23.44b	2.56	0.49b	3.55
均值	M0	8.17b	1.88	32.16d	2.29	24.22c	2.44	27.32c	2.35	0.72c	1.74
	M1	9.56a	1.65	38.03a	3.27	28.69a	3.66	33.61a	2.43	0.95a	4.58
	M2	9.09a	3.96	34.57c	2.28	26.31b	2.66	30.23b	2.28	0.83b	1.72
	M3	9.43a	4.34	36.60b	2.42	28.00a	2.36	31.82a	2.37	0.90a	0.08

速效养分是指可被植物直接吸收利用的养分。碱解氮、有效钾、有效磷在土壤剖面变化规律与有机质相同,随土层深度的增加也呈现出降低的趋势,同时,表层土壤速效养分含量与底层数值相差极大,碱解氮、有效钾、有效磷分别为 7.98~33.52,71.84~151.38,1.51~39.52 mg/kg,均值为 18.46,107.96,11.50 mg/kg。0—50 cm 土层碱解氮均值大小依次为 M1(20.28 mg/kg) > M3(20.02 mg/kg) > M2(18.18 mg/kg) > M0(15.36 mg/kg);有效钾均值大小依次为 M3(119.57 mg/kg) > M0(106.67 mg/kg) > M1(105.20 mg/kg) > M2(100.40 mg/kg);有效磷均值大小依次为 M1(16.46 mg/kg) > M0(11.62 mg/kg) > M3(10.24 mg/kg) > M2(7.68 mg/kg)。

#### 2.4 不同果农复合模式苹果园土壤水源涵养能力

由图 1 可知,4 种果农复合模式下,土层深度与果农复合模式对土壤水源涵养功能指数均有着不同程度的影响,从土层深度上看,水源涵养功能指数随土层深度的增加而降低,数值在 0.10~0.92。0—50 cm 土层水源涵养功能指数平均值表现为 M1(0.64) > M3(0.59) > M2(0.51) > M0(0.38)。M0 样地水源涵养功能显著要低于其他 3 个样地,而果园内生草处理水源涵养功能最强。

#### 2.5 土壤水源涵养能力主导因素

通过对土壤水源涵养功能指数与土壤因子的相关性分析(表 5)可以看出,土壤水源涵养功能与除非毛管孔隙度和 pH 外的几个土壤因子均呈极显

著相关。表明土壤水源涵养功能受到土壤容重、土壤孔隙度和土壤养分组成的影响。其中土壤容重越大,水源涵养功能越弱,孔隙度和养分含量越大,土壤水源涵养功能越强。各土壤养分指标与土壤物理性质中的毛管孔隙度和总孔隙度正相关性较强均为极显著相关,与土壤容重呈极显著和显著负相关。

由表 5 可知,土壤水源涵养功能指数与土壤因子相关性显著,以土壤水源涵养功能指数为因变量,土

壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、孔隙度、pH、有机质含量、碱解氮含量、有效钾含量和有效磷含量 9 个土壤因子为自变量,进行逐步回归分析,筛选出土壤水源涵养功能的主要影响因子,经检验二者符合正态分布。所得到的回归方程为:

$$Y_1 = 0.568 - 0.022X_1 + 0.96X_2 - 0.002X_3$$

$$R^2 = 0.95, P < 0.001$$

式中: $X_1$ 为总孔隙度(%); $X_2$ 为容重( $g/cm^3$ ); $X_3$ 为有机质含量( $g/kg$ )。

表 4 不同果农复合模式土壤化学性质

土层深度/cm	样地编号	pH	有机质/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	碱解氮/ ( $mg \cdot kg^{-1}$ )	有效钾/ ( $mg \cdot kg^{-1}$ )	有效磷/ ( $mg \cdot kg^{-1}$ )
0-10	M0	7.65a	8.24c	33.52a	140.23b	35.00b
	M1	7.15b	15.23b	28.50b	134.74c	39.52a
	M2	7.50a	8.24c	17.44c	137.28c	20.87c
	M3	7.52a	18.39a	28.07b	151.38a	14.28d
10-20	M0	7.70a	5.66c	16.52b	120.07c	13.83b
	M1	7.24b	17.00a	22.92a	120.36c	23.02a
	M2	7.53a	7.01c	23.73a	126.31b	5.65c
	M3	7.59a	14.57b	18.31b	138.00a	12.55b
20-30	M0	8.10a	6.74c	10.69c	95.36c	3.46c
	M1	7.76b	15.84a	18.79b	103.61b	9.69a
	M2	7.57b	6.93c	22.64a	87.21d	3.79c
	M3	7.61b	10.94b	13.99c	116.28a	8.58b
30-40	M0	7.75a	4.77b	7.98c	95.48b	1.51d
	M1	7.50a	13.41a	16.57b	90.47b	6.98b
	M2	7.60a	5.33b	14.24b	71.84c	2.68c
	M3	7.67a	12.16a	25.61a	117.38a	8.35a
40-50	M0	8.09a	4.66b	8.10c	82.21a	4.31c
	M1	7.81b	11.75a	14.64a	76.82b	3.10c
	M2	7.61b	4.66b	12.83b	79.37ab	5.42b
	M3	8.10a	10.18a	14.10a	74.82b	7.45a
均值	M0	7.86a	6.01b	15.36c	106.67b	11.62b
	M1	7.49b	14.65a	20.28a	105.20b	16.46a
	M2	7.56b	6.44b	18.18b	100.40b	7.68c
	M3	7.70a	13.25a	20.02a	119.57a	10.24b

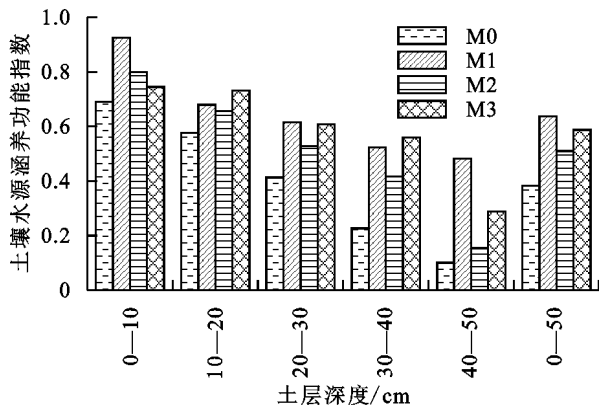


图 1 不同果农复合模式土壤水源涵养功能指数

3 个土壤因子可解释土壤水源涵养功能指数变异量的 95%,说明自变量与因变量之间存在显著性

差异,方程具有统计学意义。同时影响土壤水源涵养功能指数的主导因子是总孔隙度、容重和有机质含量。为了判断已筛选的因子分别对土壤水源涵养功能指数的影响程度,进一步进行通径分析。

由表 6 可知,水源涵养功能指数与相关土壤因子直接通径系数绝对值大小排序为总孔隙度(0.428)>容重(0.416)>有机质含量(0.235),总孔隙度和有机质含量对土壤水源涵养功能指数影响为正向的,容重对土壤水源涵养功能指数影响为负向的。各因子中总孔隙度的直接通径系数最大,对初始入渗速率的正效应最强。但其通过容重和有机质含量对初始入渗速率的影响的正效应应在各间接通径系数中相对较小(0.447)。总孔隙度是影响土壤水源涵养功能的主要

决策因素,容重是主要限制因子。

### 3 讨论

土壤理化性质受成土母质、气候、海拔高度、地形及人类活动等多种性因素综合影响。本研究中各果园均处于同一塬面土壤母质及气候条件均一致,而对于在同一母质上发育的地势平坦的土壤,土壤理化性质的差异主要受人为活动干扰而产生的<sup>[14]</sup>。不同果农复合模式苹果园林下作物及其根系分布对土壤粒度组成、孔隙度等物理性质有着较大的改善作用,林下作物不仅可以在一定程度上削减雨滴对土壤的打击力,还能够分解为土壤所需要的养分,改善土壤结构;较为发达的植物根系可以将有机质纳入土壤<sup>[15]</sup>,同样也能够改善土壤结构。

土壤容重和孔隙度能够在一定程度上表征土壤肥

表 5 土壤水源涵养功能指数与土壤因子相关系数

指标	SWI	BD	NCP	CP	TP	pH	OM	AN	APO
BD	-0.62**	1.00							
NCP	0.12	-0.20	1.00						
CP	0.68**	-0.76**	-0.05	1.00					
TP	0.69**	-0.79**	0.30	0.94**	1.00				
pH	-0.20	0.34	-0.07	-0.23	-0.36	1.00			
OM	0.82**	-0.63**	0.17	0.61**	0.63**	-0.46*	1.00		
AN	0.69**	-0.68**	0.42*	0.67**	0.78**	-0.60**	0.51*	1.00	
APO	0.56**	-0.54**	0.13	0.75**	0.76**	-0.50*	0.46*	0.69**	1.00
APH	0.77**	-0.51*	0.42*	0.52**	0.64**	-0.57**	0.41*	0.70**	0.68**

注:SWI为土壤水源涵养功能指数;BD为容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ );NCP为非毛管孔隙度(%);CP为毛管孔隙度(%);TP为总孔隙度(%);OM为有机质( $\text{g}/\text{kg}$ );AN为碱解氮( $\text{mg}/\text{kg}$ );APO为有效钾( $\text{mg}/\text{kg}$ );APH为有效磷( $\text{mg}/\text{kg}$ );\*\*表示在0.01水平(双侧)上显著相关;\*表示在0.05水平(双侧)上显著相关。下同。

表 6 土壤因子对土壤水源涵养功能指数的通径系数

因子	相关系数	直接通径系数	间接通径系数			合计	决定系数
			$X_1$	$X_2$	$X_3$		
$X_1$	0.69**	0.428**		0.329	0.148	0.477	0.407
$X_2$	-0.62**	-0.416**	-0.338		-0.148	-0.486	0.343
$X_3$	0.82**	0.235*	0.270	0.262		0.532	0.330

注: $X_1$ 为总孔隙度(%); $X_2$ 为容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ ); $X_3$ 为有机质含量( $\text{g}/\text{kg}$ )。

各类型果园内土壤含水率均较小,在5.60%~10.87%,表明苹果树在生长过程中耗水量较大。但果园内生草土壤含水率高于人工除草果园,果园生草后,改善了土壤团粒结构,提高了土壤孔隙度,增强土壤保水能力<sup>[18]</sup>。同时残源沟壑区蒸发量较大,地表草本的覆盖也可以在一定程度上降低土壤蒸发。戴海英<sup>[19]</sup>在研究中也发现,生草能够显著增加土壤表层水分含量,为果树根系的生长提供比较好的水分条件。

土壤酸碱度与土壤养分转化有着一定的关系。残源沟壑区苹果园 pH 在 7.6 左右,属于弱碱性,符合我国西北干旱地区土壤大多属碱性这一特征<sup>[20]</sup>。

力与土壤紧实度的高低。不同复合种植模式和有机肥施用量下 0—50 cm 评均土壤容重和孔隙度有着显著的差异。复合种植模式下生草样地土壤容重最低,人工除草样地容重最高,间作蔬菜与玉米样地容重数值在生草样地和除草样地中间。孔隙度则表现出相反的规律,这与孙文泰等<sup>[16]</sup>的研究结果一致。其原因主要是由于生草样地中草本植物的根系在其生长与枯萎的过程中均对土壤起到了改善的作用<sup>[17]</sup>,使其保持了较好的土壤性质。而人工除草样地在苹果生长季内均会进行数次除草工作,导致园内草本植物无法正常生长,同时在除草过程中,人为对果园土壤的践踏也会造成土壤质地变差,孔隙度降低。间作作物的 2 个样地同样在生长期受到人为干预较小,在作物收割后根茬还在留在土壤中,并参与了土壤内的物质循环。

生草样地 pH 要小于人工除草样地,其原因主要是生草样地中草本植物较多,草本植物在秋冬分解过程中会产生或释放一些有机酸等酸性物质<sup>[21]</sup>;同时生草样地土壤动物和微生物活动频繁<sup>[9]</sup>,土壤动物和微生物会生产些代谢物,进而使该样地表层 pH 要显著低于除草样地。

不同的果园管理方式引起土壤容重、孔隙度等物理性质发生改变,最终会影响到土壤养分的变化。本研究表明,果园生草能够改善土壤养分含量,这与秦秦等<sup>[22]</sup>研究结果一致。造成生草样地土壤养分含量增加主要原因可能是草本植物在生长季内迅速生长,在

生长过程中根系对土壤穿插能力逐渐增强,改善了土壤物理特征,进而对养分产生量改善作用。同时,在生长季后草本植物在土壤中死亡腐烂,也是土壤养分增加的一个重要原因。孙计平等<sup>[23]</sup>研究发现,果园生草有利于土壤中微生物及小型动物的生长,在小型动物及微生物代谢与死亡过程在同样会增加土壤养分。

果园生草后土壤水源涵养功能明显优于其他样地,各土壤因子中总孔隙度、容重和有机质含量是果园水源涵养功能主要决定性因子。其中总孔隙度是影响土壤水源涵养功能的主要决策因素,容重是主要限制因子。生草后果园土壤容重降低较为明显,草本植物根系腐烂后会对土壤孔隙起到一定的正向影响<sup>[24]</sup>。同时,草本植物及其根系生长期后经过分解会对土壤有机质起到补给。

## 4 结论

生草处理、果蔬间作、果农间作下果园土壤容重、孔隙度、持水能力、养分含量等理化性质优于人工除草样地。其中生草处理、果蔬间作、果农间作土壤容重分比人工除草别降低了 15.13%, 11.84%, 11.18%; 有机质含量增加了 143.76%, 7.14%, 120.46%。

各果农复合模式下土壤水源涵养功能指数大小依次为 M1 (0.64) > M3 (0.59) > M2 (0.51) > M0 (0.38)。土壤水源涵养功能指数与容重、毛管孔隙度、总孔隙度、有机质、碱解氮、有效钾、有效磷均呈极显著相关。其中土壤水源涵养功能指数与土壤容重呈负相关,与其他土壤因子呈正相关。

逐步回归分析表明,总孔隙度、容重和有机质含量是影响土壤水源涵养功能的主要因子,3个土壤因子可解释土壤水源涵养功能指数变异量的 95%。通径分析结果表明,总孔隙度是影响土壤水源涵养功能的主要决策因素,直接通径系数为 0.428;容重是影响土壤水源涵养功能的主要限制因子,直接通径系数为-0.416。

### 参考文献:

[1] 孟浩,王长新.渭北旱塬红富士苹果早果丰产管理技术[J].现代农业科技,2013(6):96-97.

[2] 吕俊林.陕西省残源沟壑区苹果经济林生物量及碳吸存研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.

[3] 包睿.渭北旱塬苹果园土壤干燥化及不同节水方式应用效果研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.

[4] 陈学森,苏桂林,姜远茂,等.可持续发展果园的经营与管理:再谈果园生草培肥地力及其配套技术[J].落叶果树,2013,45(1):1-3.

[5] 王艳廷,冀晓昊,吴玉森,等.我国果园生草的研究进展[J].应用生态学报,2015,26(6):1892-1900.

[6] 李同川.渭北黄土高原苹果园长期生草土壤水分变化特征[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2014.

[7] 钱雅丽,王先之,来兴发,等.多年生牧草种植对苹果园土壤真菌群落特征的影响[J].草业学报,2019,28(11):124-132.

[8] 邢荔.苹果园林间种草对果树光合蒸腾效率及水分利用效率的影响[J].林业科技通讯,2019(9):74-75.

[9] 陈久红,鲁晓燕,李永丰,等.生草对库尔勒香梨园土壤理化性质的影响[J].黑龙江农业科学,2019(7):71-79.

[10] 张万儒.森林土壤分析方法[M].北京:中国标准出版社,1999.

[11] 文志,赵赫,刘磊,等.套种益智对橡胶林土壤水源涵养功能的影响[J].生态学杂志,2018,37(11):3179-3185.

[12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.

[13] 易鹏涛,赵俊三,易鹏飞,等.基于均方差决策分析法的滇中城市群土地资源综合承载力评价研究[M].软件,2018,39(3):181-186.

[14] 李婕,杨学云,孙本华,等.不同土壤管理措施下壤土团聚体的大小分布及其稳定性[J].植物营养与肥料学报,2014,20(2):346-354.

[15] Prado E A F D, Vitorino A C T, Oliveira W H D, et al. Dispersion index of aggregates in a Rhodic Ferrasol cultivated with cane under stillage application[J].Semina: Ciências Agrárias,2014,35(4):2347-2356.

[16] 孙文泰,董铁,刘兴禄,等.覆盖处理苹果细根分布与土壤物理性状响应关系研究[J].干旱地区农业研究,2016,34(2):88-95.

[17] 庞群虎,宋丽华,王竞,等.生草当年对枣园土壤性状及红枣品质的影响[J].西北林学院学报,2019,34(1):124-129.

[18] 张振境.龙眼园生草栽培草种引种试种表现及对果园土壤的影响[D].南宁:广西大学,2018.

[19] 戴海英.果园生鼠茅草好处多[J].果树实用技术与信息,2017(11):20-22.

[20] 李学斌,陈林,樊瑞霞,等.围封条件下荒漠草原4种典型植物群落枯落物输入对土壤理化性质的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2015,41(1):101-110.

[21] 刘娜.三峡库区消落带典型植物淹水后降解动态与养分释放特征研究[D].重庆:西南大学,2016.

[22] 秦秦,宋科,孙丽娟,等.猕猴桃园行间生草对土壤养分的影响及有效性评价[J].果树学报,2020,37(1):68-76.

[23] 孙计平,张玉星,李英丽,等.生草对梨园土壤微生物、酶活性和腐殖质含量的影响[J].果树学报,2016,33(增刊1):129-135.

[24] Jiang X J, Liu W, Chen C, et al. Effects of three morphometric features of roots on soil water flow behavior in three sites in China[J].Geoderma,2018,320:161-171.