

# 种植年限对渭北旱塬苹果园土壤 孔隙结构及水力特征的影响

杨昊晟<sup>1</sup>,马永胜<sup>2</sup>,胡笑涛<sup>1</sup>,唐文政<sup>1</sup>,  
陈滇豫<sup>1</sup>,王文娥<sup>1</sup>,周始威<sup>1</sup>,杜敬斌<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100;2. 延安市果业研究发展中心,陕西 洛川 727400)

**摘要:**为研究不同种植年限对苹果园土壤孔隙结构及其土壤水力特性的影响,采用时空转换的方法,选取渭北旱塬2 a、13 a及33 a苹果园开展土壤结构与水力特征测定,利用压汞法获取原状土壤孔隙结构特征。以20 cm及40 cm为界将果园0~100 cm土壤划分为耕作表土扰动层、潜在犁底层与心土层。结果表明:渭北旱塬苹果园20~40 cm土壤容重较高、导水能力差且水分对作物有效性较低,有形成犁底层的可能,且随植果年龄增加果园土壤容重呈增加趋势;同一果园中大孔隙(>75 μm)与中孔隙(30~75 μm)土壤百分含量最大值出现在表土层,占比分别为7.63%~10.32%及10.94%~13.14%;微孔隙(5~30 μm)土壤最大百分含量出现在心土层,占比为30.60%~47.85%;极微孔隙(0.1~5 μm)与超微孔隙(<0.1 μm)土壤含量最高值出现在潜在犁底层,占比分别达37.36%~52.55%及13.15%~19.08%。在频繁受到耕作扰动的表土层,2 a、13 a及33 a果园土壤之间各级孔隙占比非常接近;在不易受到耕作扰动的心土层,大孔隙与中孔隙土壤都表现出随耕作种植年限的增加而增加的趋势。土壤容重与其大孔隙含量呈显著负相关,与超微、极微孔隙土壤含量呈正相关,饱和导水率与容重呈显著负相关;5~30 μm微孔在土壤的导水及持水方面均有重要作用,其比表面积与田间持水量呈显著正相关,其孔体积分数与饱和导水率呈显著正相关;VG模型参数n与土壤大孔隙及中孔隙含量呈显著负相关。随耕作种植年限增加,果园土壤有机质含量每5 a降低0.425 g·kg<sup>-1</sup>,田间持水量每5 a降低0.8% cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>。研究建立的土壤水力参数回归预测模型可为苹果园高效用水提供参考。

**关键词:**苹果园;种植年限;土壤孔隙结构;土壤水力特征;渭北旱塬

**中图分类号:**S661.1;S152 **文献标志码:**A

## Effects of different planting years on soil pore structure and hydraulic characteristics of apple orchards in the Arid Area of Northern Weihe River Basin

YANG Haosheng<sup>1</sup>, MA Yongsheng<sup>2</sup>, HU Xiaotao<sup>1</sup>, TANG Wenzheng<sup>1</sup>,  
CHEN Dianyu<sup>1</sup>, WANG Wen'e<sup>1</sup>, ZHOU Shiwei<sup>1</sup>, DU Jingbin<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Yan'an Fruit Industry Research and Development Center, Luochuan, Shaanxi 727400, China)

**Abstract:** Spatial time-exchange method was used in this study to determine soil pore structure and hydraulic characteristics in 2 a, 13 a, and 33 a orchards in the Arid Area of Northern Weihe River Basin. Mercury intrusion method was used to obtain the characteristics of soil situ pore structure. The 0~100 cm soil profiles was divided into surface soil layer, potential plough layer and subsoil layer at the boundary of 20 cm and 40 cm. In potential plough layer, the soil bulk density was higher, the water conductivity was poorer, and the water availability to crops decreased, which was possible to form plow bottom. The bulk density increased with the increase of planting years. In

收稿日期:2021-11-15

修回日期:2022-06-13

基金项目:国家重点研发计划(2017YFD0201508)

作者简介:杨昊晟(1998-),男,内蒙古自治区乌兰察布人,硕士研究生,研究方向为土壤物理与农业高 eff 用水。E-mail:haoshengY@nwfau.edu.cn

通信作者:胡笑涛(1972-),男,河南南阳人,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:huxiaotao11@nwsuaf.edu.cn

the same orchard: the percentage of macropore ( $>75 \mu\text{m}$ ) and mesopore ( $30\sim 75 \mu\text{m}$ ) were highest in surface soil layer, accounting for 7.63%~10.32% and 10.94%~13.14% respectively; the percentage of micropore ( $5\sim 30 \mu\text{m}$ ) was highest in subsoil layer, accounting for 30.60%~47.85%; and the percentage of ultramicropore ( $0.1\sim 5 \mu\text{m}$ ) and cryptopore ( $<0.1 \mu\text{m}$ ) were highest in potential plough layer, accounting for 37.36%~52.55% and 13.15%~19.08% respectively. In the surface soil layer, which was disturbed frequently by tillage, the ratio of pores in different size was very close among 2 a, 13 a and 33 a orchard. In the subsoil layer, which was not easy to be disturbed by tillage, both macropores and mesopores showed a trend of increasing with the increase of tillage years. Soil bulk density was negatively correlated with macropore content and positively correlated with ultramicropore and cryptopore. Saturated conductivity was negatively correlated with soil bulk density. Micropores ( $5\sim 30 \mu\text{m}$ ) played an important role in both soil water conduction and holding, which specific surface area was significantly positively correlated with field capacity, and pore volume fraction was significantly positively correlated with saturated water conductivity. VG model parameter  $n$  was significantly negatively correlated with macropore and mesopore content. With the increase in planting years, soil organic matter content decreased by  $0.425 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  every 5 years, and field capacity decreased by  $0.8\% \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  every 5 years. The regression prediction of soil water conservancy parameters established in this study can provide a reference for efficient water use in apple orchards.

**Keywords:** apple orchard; planting years; soil pore structure; soil hydraulic characteristics; Arid Area of Northern Weihe River Basin

渭北旱塬地区具有适宜苹果生长的气候条件,苹果产业逐渐成为当地经济支柱产业<sup>[1]</sup>。然而与良好气候条件形成鲜明对比的是当地土壤条件差,其有机质含量低、水稳性差,近年来随着果园植果年限增加,部分地区土壤物理条件进一步退化<sup>[2]</sup>。良好的土壤物理状况有利于根系的发育延伸以及水分、养分的存储与供应<sup>[3-4]</sup>,并具有适宜的通气状况。土壤结构是影响土壤物理及水力特性的重要因素<sup>[5]</sup>,长期耕作以及作物根系穿插生长会改变农田土壤结构<sup>[6]</sup>,从而影响土壤的水分存储、运移等过程,进而影响作物的生长发育甚至区域生态环境。随着技术的进步,土壤孔隙结构的研究在当前土壤物理及农业工程领域逐渐受到重视<sup>[7-8]</sup>,不同孔径的土壤孔隙有着不同的持水能力且孔隙的形状与连通性显著影响着土壤水分运移过程,土壤孔隙结构与功能之间的关系是一项亟待解决的科学问题<sup>[9]</sup>。

土壤孔隙结构是反映土壤结构的重要因素,土壤孔隙分布影响着土壤水分的运移与保持,从而可能对降雨或灌溉水的入渗产生影响。目前对渭北旱塬果园中土壤孔隙结构的研究还相对比较少,对此,本研究通过空间换时间的研究方法<sup>[10]</sup>,探究渭北旱塬苹果园种植年限对土壤孔隙结构的影响,探究土壤水力特征在不同土壤孔隙结构下的响应规律,以期对果园的灌溉与降水入渗过程提供参数支持,研究结果对果园农业高用水及土壤物理状况变化预测具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验在陕西省延安市洛川县的延安市果业研究发展中心进行,地处北纬  $35^{\circ}48'$ ,东经  $109^{\circ}36'$ ,属渭北旱塬。该区为暖温带半湿润大陆性季风气候,平均海拔  $1\ 087.5 \text{ m}$ ,平均年降水量  $620 \text{ mm}$ ,年均气温  $9.2^{\circ}\text{C}$ ,日照时数  $2\ 525 \text{ h}$ ,日照率达  $58\%$ ,年总辐射量为  $55.41 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温为  $3\ 040^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.2 试验设计与样品采集

选取延安市果业研究发展中心内 2018、2007 年及 1987 年建园果园,2020 年取样时树龄分别为 2 a、13 a 及 33 a。试验区土壤基本理化性质见表 1,供试不同树龄果园立地条件基本一致,符合空间换时间试验布置的基本要求。

表 1 不同种植年限苹果园 0~1 m 土壤粒度组成  
Table 1 Soil particle distribution of 0~1 m profile in apple orchards under different planting years

树龄 Tree age	粘粒/% Clay	粉粒/% Silt	总砂粒/% Total sand	质地(美国制) Texture (USDA classification)
2 a	9.42±0.53	79.75±0.38	10.83±0.50	粉壤土 Silt loam
13 a	8.71±0.42	78.46±1.11	12.84±1.10	粉壤土 Silt loam
33 a	9.41±0.48	79.61±0.43	10.98±0.58	粉壤土 Silt loam

注:表中数据为平均值加减标准误,下同。

Note: Data in the table are mean value  $\pm$ SE, the same below.

供试果园中果树品种为‘长富 12’ (传统晚熟富士), 基础为新疆野苹果, 2 a 果园株行距为 2 m×4 m, 13 a 及 33 a 果园株行距为 4 m×5 m。果园有专人负责管理, 果树长势均匀。统一在春季对除树干附近外的土壤旋耕至 15~20 cm。有研究表明常规耕作对土壤的扰动主要集中在 0~25 cm 土层<sup>[11]</sup>, 也有研究表明渭北果园土层以 20 cm 为界土壤具有明显的“上松下实”变异特征<sup>[12]</sup>, 故本研究中分析时选取 0~20 cm 深度土壤作为表土扰动层, 20~40 cm 深度土壤作为潜在犁底层, 40~100 cm 深度土壤作为心土层。

在果园中沿着东西方向挑选 3 处长势均匀有代表性的 5 行 5 列果树, 在挑选区域中心的果树树冠投影东南方向的 1/3~2/3 处开挖土体成台阶面, 每个试验果园重复 3 次, 台阶深度分别为 0~20、20~40、40~60、60~80 cm 及 80~100 cm, 每个台阶面的面积约为 70 cm×30 cm, 以能满足取样量及人员取样所需活动空间为宜。利用环刀分别以深度间隔 20 cm 和 10 cm 取样, 前者用于测定土壤容重、田间持水量、土壤饱和导水率及土壤水分特征曲线, 后者用于测定土壤有机质含量、土壤粒度组成及土壤孔隙结构, 以上各土样均取 3 次重复。

### 1.3 测定方法

土壤水分特征曲线采用离心机法 (CR21G, 日本), 将离心力与对应体积含水率数据输入 RETC 软件中进行土壤水分特征曲线 VG 模型的参数拟合; 土壤田间持水量的测定采用室内环刀法<sup>[13]</sup>; 土壤饱和导水率采用定水头法测定; 有机质含量采用浓硫酸-重铬酸钾外加热法测定, 粒度组成采用激光粒度仪 (MS3000, 英国) 进行湿法测定。

孔径分布是利用压汞仪对风干原状土样进行测定, 原理是依据汞对大多数物体不浸润, 汞不会通过毛管力而只有通过外部施加压力的情况下才能进入孔隙, 压力与孔径之间符合 Washburn 方程<sup>[14]</sup>。具体样品处理方法为: 土样风干后 (先自然条件风干, 测样前烘箱 40℃ 烘至恒重), 按照自然裂缝剥开, 采用混合样的方式利用压汞仪 (PoreMaster 33, 奥地利) 进行测定, 设定最高进汞压力为 20 000 Psi, 此压力下测量孔径最小可达约 10 nm。

### 1.4 数据处理

对于某一给定的样品, 注汞或排汞的孔半径是其压力的函数, 符合 Washburn 方程<sup>[12]</sup>:

$$P \times r = -2\gamma \cos \theta \quad (1)$$

式中,  $P$  为压力,  $\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $r$  为孔隙半径,  $\mu\text{m}$ ;  $\gamma$  为汞的表面张力,  $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $\theta$  为汞和样品间的接触角,  $^\circ$ 。

当模拟流体在多孔介质中的扩散时, 实测扩散率  $D_{\text{eff}}$  因与理论扩散率  $D_b$  之间相差一个与孔隙结构有关的因子, 孔曲率  $\tau$ , 如下式:

$$D_{\text{eff}} = \frac{D_b \theta_c}{\tau} \quad (2)$$

式中,  $\theta_c$  为孔体积分数,  $\tau$  为孔曲率, 孔曲率  $\tau$  集中考量了所有偏离理论直线扩散的偏差, 可以反映孔隙的规则程度。Carniglia<sup>[15]</sup> 进一步推导出如下表达式:

$$\tau = 2.23 - 1.13 V_{\text{co}} \rho_{\text{Hg}} \quad (3)$$

式中,  $V_{\text{co}}$  为总孔比容 (可由最大试验压力下压入汞体积  $V_c$  估算得到),  $\rho_{\text{Hg}}$  为固体材料密度。

实际固体的比表面积应正比于  $R^D$ , 分形维数  $D$  在 2 (平面) 与接近 3 (极其粗糙的表面) 之间变化<sup>[14]</sup>, 可按照式 (4) 计算:

$$\log \frac{dV}{dP} = \log(k_2) + (D - 4) \log(P) \quad (4)$$

式中,  $k_2$  为比例常数,  $r$  为孔半径,  $P$  为施加的压力,  $D$  为分形维数。从  $\log \frac{dV}{dP}$  对  $\log(P)$  作出的曲线斜率即可得到  $D$  值, 光滑表面 ( $D=2$ ) 的曲线斜率接近于 -2, 而粗糙表面 ( $D$  接近于 3) 的曲线斜率接近于 -1<sup>[16]</sup>。

土壤水分特征曲线的测定方面, 高速离心机转速与土壤水吸力在平衡后之间的关系为:

$$s = 111810^{-8} r m^2 \quad (5)$$

式中,  $s$  为平衡时土壤吸力,  $\text{cm}$ ;  $m$  为离心机转速,  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $r = 9.8 \text{ cm}$ 。

使用 Excel 2019 进行实测数据录入与导入、异常值剔除 (拉伊达法<sup>[17]</sup>) 并进行初步计算, 孔隙结构统计特征值的计算采用软件 Poremaster 8.11, 利用 IBM SPSS Statistics 24 进行数据的统计分析, 包括方差齐性分析、LSD 检验、Pearson 相关性分析及逐步回归分析, 使用 Origin 2021 学习版进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同种植年限苹果园土壤容重及有机质含量

不同耕作种植年限苹果园剖面土壤容重变化规律如图 1 所示, 同一果园中容重呈现随深度增加先增加后减小的趋势, 表土层 (0~20 cm) 容重最小, 其中 2 a 与 33 a 果园表土层容重分别为  $1.38 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  与  $1.44 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 均与各自果园潜在犁底层存在显著差异, 13 a 果园表层容重最小为  $1.27 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 显著小于 2 a 与 33 a 果园表土层, 同时也是本研究中唯一满足根系适宜容重  $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ <sup>[18]</sup> 的测点。2 a 与 33 a 果园土层的潜在犁底层 (20~40 cm)



容重取得局部最大值,均达  $1.56 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,有出现犁底层的可能,13 a 果园的潜在犁底层容重为  $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,显著小于 2 a 与 33 a 果园同土层处容重,仍然可以保持相对较好的导水透气度。2 a 果园在心土层(40~100 cm)容重仍然比较大,可能因为栽植 2 a 为新果园,是将原果园中的果树机械挖出,再将土壤深翻耕 1m,由于机械作业使得容重 2 a 果园出现另一个峰值。

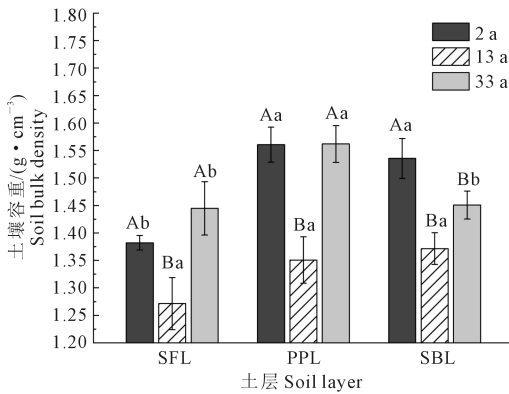
果园土壤有机质含量剖面变化规律见图 2。有机质含量整体处于较低水平,随土层深度增加有机质含量减小。同一果园中表土层有机质含量最高,大

小关系为  $13 \text{ a} > 2 \text{ a} > 33 \text{ a}$ ,其中 33 a 果园表土层与 2 a 及 13 a 果园达到显著差异( $P < 0.05$ )。不同栽培年限的果园潜在犁底层有机质含量差异没有达到显著性水平,在受常规耕作扰动较小的心土层中,13 a 与 33 a 果园的土壤有机质含量无显著差异,均显著低于 2 a 果园的心土层土壤有机质含量。

## 2.2 不同种植年限苹果园土壤孔隙结构特征

学界对于土壤孔隙依照形态与功能有多种不同的划分方式<sup>[19]</sup>,本研究中采用 Brewer<sup>[20]</sup>划分方式:将土壤孔隙划分为大孔隙(Macropore,  $> 75 \mu\text{m}$ )、中孔隙(Mesopore,  $30 \sim 75 \mu\text{m}$ )、微孔隙(Micropore,  $5 \sim 30 \mu\text{m}$ )、极微孔隙(Ultramicropore,  $0.1 \sim 5 \mu\text{m}$ )与超微孔隙(Cryptopore,  $< 0.1 \mu\text{m}$ ),其中大于  $75 \mu\text{m}$  孔隙几乎没有毛管力,水分在重力作用下会自由排出,小于  $0.1 \mu\text{m}$  孔隙中水分受到土壤基质的强烈吸引,对作物几乎不可用。

图 3 为不同土层各级孔隙土壤体积占比情况。由图 3 可知,不同树龄果园都表现出大孔隙与中孔隙土壤百分含量最高值出现在表土层,占比为 7.63%~10.32%及 10.94%~13.14%;不同树龄果园微孔隙土壤最大百分含量出现在心土层,占比为 30.60%~47.85%;极微孔隙与超微孔隙土壤含量最高值均出现在潜在犁底层,达到 37.36%~52.55%及 13.15%~19.08%。表明从表土层向下,孔隙空间受到压缩,表土层受耕作扰动可以维持较大的大孔隙与中孔隙土壤比例,极微小孔隙与超微孔隙土壤主要集中在受到机械耕作直接影响的潜在犁底层,而心土层受到上层土壤的固有重力,无法像表土层一样持有较大孔隙,同时又没有受到耕作直接的压实作用,与其他层相比表现为微孔隙土壤含量较高。同一果园中  $0.1 \sim 30 \mu\text{m}$  孔隙土壤体积占总孔隙体积 50%以上,其中 2 a 与 33 a 果园中各层以  $0.1 \sim 5 \mu\text{m}$  极微孔隙土壤为主,13 a 果园中以  $5 \sim 30 \mu\text{m}$  微孔隙土壤为主。在频繁受到耕作扰动的表土层,2 a、13 a 及 33 a 果园土壤之间大孔隙与中孔隙土壤占比非常接近;在潜在犁底层,13 a 果园大孔隙土壤含量大于 2 a 及 33 a 果园,超微与极微小孔隙土壤含量小于 2 a 及 33 a 果园,说明 13 a 果园出现犁底层可能性较小,2 a 比 33 a 果园更有可能出现犁底层,因为 2 a 比 33 a 果园有着更高的超微与极微孔隙土壤含量;在不易受到耕作扰动的心土层,大孔隙与中孔隙土壤都表现出随耕作种植年限的增加而增加的趋势,微孔隙土壤含量最大值出现在 13 a 果园。不同树龄表土水力特征的相似可能是由于孔隙结构相似的原因;潜在犁底层极微小孔隙随耕



注:图中不同大写字母表示同一土层不同年限果园数据间差异显著( $P < 0.05$ ),不同小写字母表示同一年限果园不同土层数据间差异显著( $P < 0.05$ )。SFL、PPL 与 SBL 分别表示表土扰动层(0~20 cm)、潜在犁底层(20~40 cm)与心土层(4~100 cm)。下同。

Note: Different capital letters indicate significant differences among different tree ages, and different lowercase letters indicate significant differences among different layers. SFL, PPL and SBL represent the surface disturbance layer (0~20 cm), the potential plough layer (20~40 cm), and the subsoil layer (40~100 cm), respectively. The same below.

图 1 不同种植年限苹果园剖面土壤容重变化

Fig.1 Changes of soil bulk density in apple orchard profile under different planting years

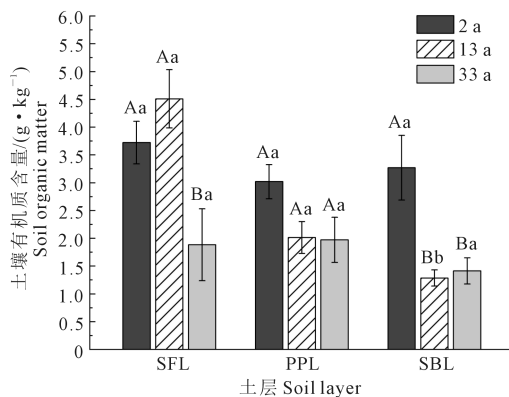


图 2 不同种植年限苹果园剖面有机质含量变化规律

Fig.2 Changes of soil organic matter content in apple orchard profile under different planting years

作种植年限先降低后升高,表明潜在犁底层导水能力与土壤水对作物有效性随耕作种植年限先降低后升高,容重或紧实度先升高后降低;心土层土壤导水能力随耕作种植年限增加而增加,持水能力先增加后减少。

表 2 为不同土层土壤孔隙的统计特征值,由表 2 可知,虽然极微孔隙与超微孔隙的土壤体积含量约

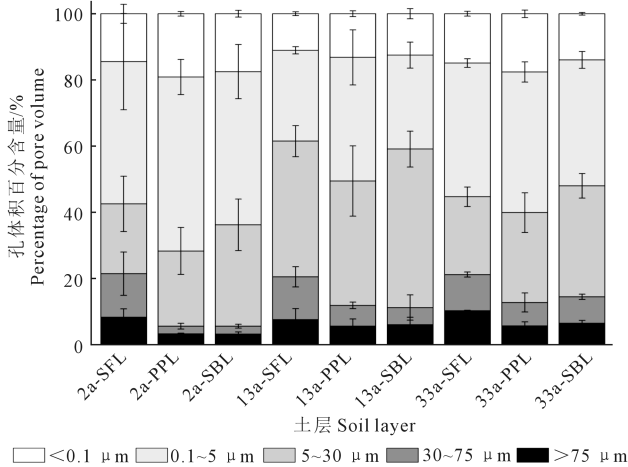


图 3 不同土层不同孔径土壤孔隙体积占比百分含量

Fig.3 Pore volume percentage of different pore sizes in different soil layers

表 2 不同土层土壤孔径统计特征值

Table 2 Statistical characteristic values of soil pore size in different soil layers

土层 Soil Layer	孔曲率 Tortuosity	分形维数 Fractal dimension	孔体积中位直径 Median diameter/nm	总比表面积 Total specific surface area/( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	0.1~5 $\mu\text{m}$ 孔比表面积占比 Surface area percentage/% (0.1~5 $\mu\text{m}$ )	<0.1 $\mu\text{m}$ 孔比表面积占比 Specific surface area percentage/% (<0.1 $\mu\text{m}$ )
2a-SFL	1.73±0.02	2.69±0.09	10040±680	5.88±0.47	16.3±1.2	83.2±0.9
2a-PPL	1.79±0.01	2.69±0.05	1636±86	6.22±0.12	15.0±0.9	84.6±1.0
2a-SBL	1.83±0.04	2.79±0.01	1744±374	5.98±0.29	16.0±0.9	83.5±0.9
13a-SFL	1.74±0.01	2.76±0.13	9651±2079	5.00±0.04	14.1±1.6	84.9±1.5
13a-PPL	1.72±0.03	2.77±0.12	4763±1296	5.82±0.04	14.1±2.1	85.1±1.9
13a-SBL	1.69±0.02	2.73±0.12	6687±766	6.07±0.45	13.4±1.0	85.5±1.0
33a-SFL	1.77±0.02	2.80±0.08	3220±836	5.51±0.41	15.9±0.1	83.6±0.3
33a-PPL	1.79±0.04	2.66±0.15	2056±340	5.67±0.16	15.4±1.6	84.1±1.5
33a-SBL	1.76±0.01	2.60±0.17	3523±645	5.14±0.22	16.7±0.5	82.6±0.5

注: SFL/PPL 与 SBL 分别表示表土扰动层(0~20 cm)、潜在犁底层(20~40 cm)与心土层(4~100 cm)。下同。

Note: SFL, PPL and SBL represent the surface disturbance layer (0~20 cm), the potential plough layer (20~40 cm), and the subsoil layer (40~100 cm), respectively. The same below.

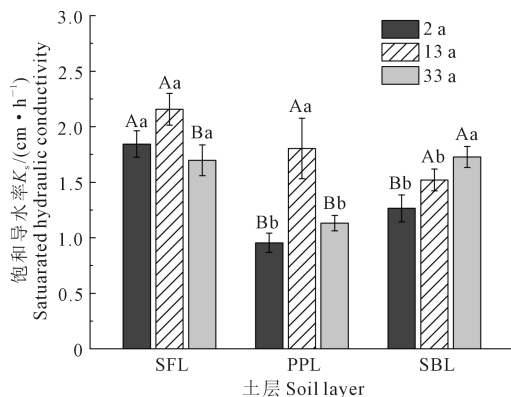


图 4 不同年限苹果园不同深度土层土壤饱和导水率

Fig.4 Saturated hydraulic conductivity in different soil depths of apple orchard in different planting years

占到 50%,但是其比表面积占到了将近总孔隙面积的 95%,其中,超微孔隙更是以不到 10%的土壤孔隙体积含量占据了土壤比表面积的 85%左右。同一果园中土壤孔隙总比表面积最大值均出现在潜在犁底层,可能与潜在犁底层较高的超微与极微孔隙含量有关。不同果园孔隙体积中位直径表现为 13 a>33 a>2 a,随耕作种植年限增加先增加后降低,同一果园中孔隙体积中位直径最小值总出现在潜在犁底层。本研究中土壤孔径孔曲率范围在 1.69~1.83,孔隙分形维数在 2.60~2.80 之间。

### 2.3 不同种植年限苹果园土壤水力特征

不同耕作种植年限苹果园土壤饱和导水率如图 4,不同栽植年限果园均在表土层饱和导水率  $K_s$  最高,大小关系为 13 a>2 a>33 a,分别为 2.16、1.84、1.70  $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ ;2 a 与 33 a 饱和导水率均在潜在犁底层出现极小值,相较表层分别降低了 0.89  $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$  及 0.57  $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,差异达到显著水平;在不易受到常规耕作影响的心土层,饱和导水率随果园种植年限的升高而增大。

不同耕作种植年限苹果园土壤田间持水量如图 5 所示,同一种植年限下,2 a 与 13 a 果园各土层

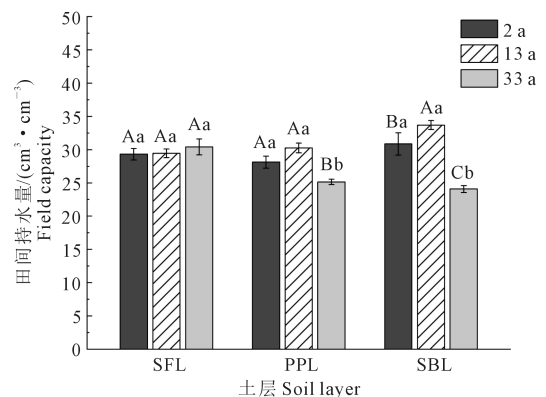


图 5 不同年限苹果园不同深度土层土壤田间持水量

Fig.5 Field capacity in different soil depths of apple orchard in different planting years

田间持水量无显著性差异, 33 a 果园表土层田间持水量高于潜在犁底层与心土层, 且差异达到显著水平。不同栽植年限果园在频繁受到扰动的表土层上田间持水量值非常接近, 其值在 29.32%~30.42% 且无显著性差异; 潜在犁底层中耕作种植年限最长的 33 a 果园土壤田间持水量最低, 与 2 a 及 13 a 果园差异达到显著水平; 在不易受到耕作扰动的心土层, 田间持水量 13 a>2 a>33 a 果园, 且三者之间差异互相达到显著性水平, 最大值(13 a)为 33.70%, 最小值(33 a)为 24.08%。

采用 VG 模型拟合土壤水分特征曲线, 相关系数均在 0.9 以上, 且 VG 模型可以很好模拟出土壤存在的进气吸力, 如图 6 所示。为方便比较, 每张图中加入了 Rosetta 中同质地的粉质壤土(美国制)的

土壤水分特征曲线作为对比<sup>[21]</sup>。

由图 6 可知, 2 a 新翻果园分层特征最为明显, 同一含水率下心土层土壤吸力值总低于其他两层。含水率降低到 30% ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) 以下时, 不同栽植年限果园中同一含水率下潜在犁底层土壤吸力总是高于其他两层, 表明潜在犁底层水分对作物有效性低于耕作扰动层及心土层。由于进气值的存在以及饱和含水率的差异, 土壤水分特征曲线在低吸力段呈现出较大的变异性, 同一果园不同土层或不同果园同一土层土壤水分特征曲线高吸力段比较接近。表土层高吸力段 2 a 与 33 a 果园十分接近, 同一含水率下土壤吸力值略高于 13 a 果园; 不同栽植年限果园潜在犁底层高吸力段都比较接近; 心土层 2 a 与 13 a 及 33 a 果园存在较大差异。VG

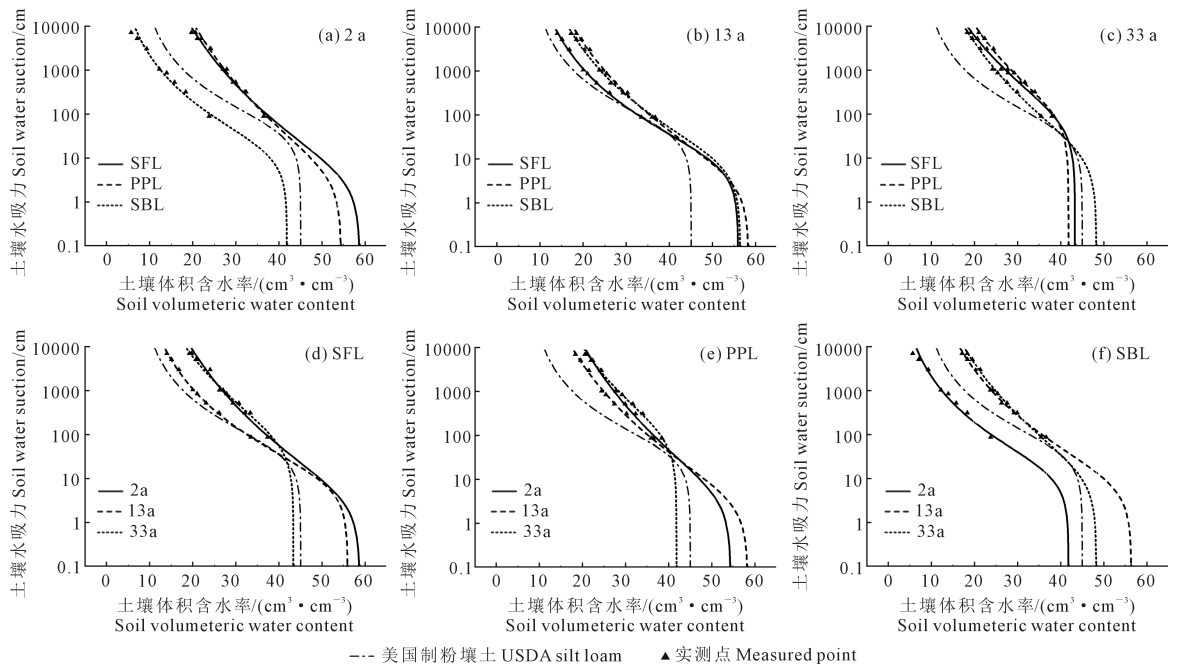


图 6 不同种植年限及土层苹果园土壤水分特征曲线 VG 模型

Fig.6 VG model of soil moisture characteristic curve of apple orchard in different planting years and soil layers

模型具体参数值见表 3。VG 模型中的参数  $\alpha$  是与进气值相关的参数,  $\alpha$  越小, 持水能力越强; 参数  $n$  的取值影响拟合水分特征曲线的弯曲程度,  $n$  值越小, 曲线越平缓<sup>[22]</sup>。本研究中  $n$  值范围在 1.1265~1.2913,  $\alpha$  范围在 0.0088~0.2643。

### 2.4 土壤水力特征与其他土壤指标间的相关关系

土壤孔隙结构特征、土壤粒度组成以及容重及有机质与土壤水力特征之间的 Pearson 相关关系见图 7。土壤容重与土壤粘粒含量呈显著正相关, 与土壤砂粒、总孔隙度呈显著负相关。微孔隙、超微孔隙与极微孔隙能够与土壤粒度组成的粘粒与砂粒之间存在显著相关关系, 表现为相对较大的微孔

表 3 土壤水分特征曲线 VG 模型参数拟合结果

Table 3 Fitting results of VG model parameters of soil water characteristic curve

土层 Soil layer	残余含水率 $\theta_r$ / $(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	饱和含水率 $\theta_s$ / $(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	$n$
2a-SFL	0.0000	0.5867	0.2593	1.1398
2a-PPL	0.0000	0.5437	0.2212	1.1265
2a-SBL	0.0000	0.4181	0.0626	1.2913
13a-SFL	0.0407	0.5591	0.1058	1.2473
13a-PPL	0.0000	0.5833	0.2643	1.1516
13a-SBL	0.0379	0.5638	0.1125	1.2015
33a-SFL	0.0000	0.4332	0.0135	1.1754
33a-PPL	0.0626	0.4183	0.0088	1.2089
33a-SBL	0.0000	0.4828	0.0771	1.1519

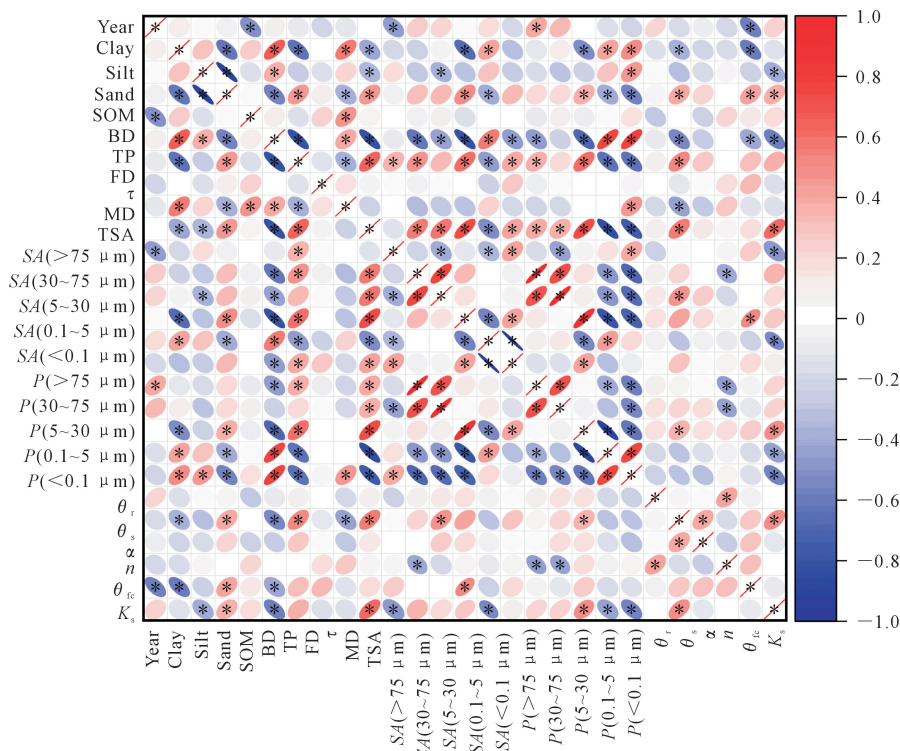


隙土壤与粘粒含量呈负相关,与砂粒含量呈正相关,相对较小的超微与极微小孔隙土壤体积占比与粘粒含量呈显著正相关,与砂粒含量呈显著负相关,大孔隙及中孔隙土壤与土壤粒度组成之间未见显著相关关系。容重与大孔隙与微孔隙土壤体积百分含量呈显著负相关,容重与超微孔隙与极微孔隙土壤体积百分含量呈显著正相关。土壤孔曲率与容重呈正相关,即随着容重升高,孔隙变得更加曲折。土壤孔曲率与土壤各级孔隙之间的相关性分析也证实了这一点,因为土壤孔曲率与极微小孔隙土壤呈正相关,说明孔曲率主要由小孔贡献,容重升高,小孔增多,孔曲率相应就增加,土壤总孔隙度与大孔隙及微孔隙土壤体积含量呈显著正相关,与超微孔隙和极微孔隙土壤体积含量呈显著负相关;而土壤总比表面积有着不同趋势,与中孔隙土壤呈负相关,与极微孔隙土壤的体积与表面积占比呈显著正相关,与中孔隙土壤的体积与表面积占比

呈显著负相关,说明不同孔径土壤孔隙对孔隙度以及总比表面积贡献不同,土壤孔隙比表面积主要由较大孔隙贡献,土壤孔隙比表面积主要由较小孔隙贡献。土壤有机质含量与耕作种植年限呈显著负相关,有机质含量随耕作种植年限变化的拟合直线斜率为 $-0.085$ ,即为每 5 a 果园 0~1 m 果园土壤有机质含量下降  $0.425 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

由图 7 可知,孔体积中位直径 MD 与土壤粒度组成、土壤容重、土壤总孔隙度、土壤各级孔隙度以及各级孔隙比表面积、土壤饱和含水率和饱和导水率等大部分指标都能建立显著的相关关系,表明孔直径体积中位数可以作为孔径分析的有效统计指标。土壤孔隙分形维数与其他指标之间没有显著相关关系。

由图 7 还可知,土壤水力特征与土壤孔隙结构相关关系方面,饱和导水率 $K_s$ 与容重呈显著负相关,从孔隙结构层面来看,饱和导水率 $K_s$ 与孔直径体积



注:Year 为耕作种植年限;Clay、Silt、Sand 分别为粘粒、粉粒与砂粒的百分含量;SOM 为土壤有机质含量;BD 为土壤容重;TP 为总孔隙度;FD 为分形维数; $\tau$  为孔曲率;MD 为孔体积中位直径;TSA 为孔隙总表面积;SA 与 P 分别为某一孔径范围内孔隙表面积及孔体积占总表面积与体积的百分数。图中颜色标尺为  $R^2$ , \* 代表相关性达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。

Note: Year is the plant years; Clay, Silt and Sand are the percentages of clay, silt and sand respectively; SOM is the content of soil organic matter. BD: Bulk density; TP: Total porosity; FD: Fractal dimension;  $\tau$ : Tortuosity; MD: Median diameter; TSA: Total surface area. SA and P are respectively the percentage of the pore surface area and pore volume in the total surface area and volume within a certain aperture range. The color scale in the figure is  $R^2$ , and \* indicates that the correlation has reached the significant level ( $P < 0.05$ ).

图 7 土壤孔隙结构特征、土壤粒度组成、容重及有机质与土壤水力特征之间的 Pearson 相关关系

Fig.7 Pearson correlation among soil pore structure characteristics, soil particle size distribution, bulk density, soil organic matter, and soil hydraulic characteristic parameters

中位数呈显著正相关,与土壤总孔隙比表面积呈显著负相关。 $K_s$ 与超微孔隙与极微孔隙土壤体积占比呈显著负相关; $K_s$ 与5~30  $\mu\text{m}$ 微孔隙土壤体积占比呈显著正相关。田间持水量 $\theta_{fc}$ 与5~30  $\mu\text{m}$ 微孔的比表面积呈显著正相关,表明从孔隙结构的功能性来讲,5~30  $\mu\text{m}$ 微孔在导水与持水方面均具有重要作用。同时,田间持水量与种植年份呈显著负相关,表明土壤持水能力随种植年限增长有逐年下降趋势,田间持水量随耕作种植年限变化的拟合直线斜率为-0.0016,即每5 a田间持水量下降0.8%  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。形状参数 $n$ 与土壤大孔隙及中孔隙含量呈显著负相关,与孔曲率及微小孔隙含量呈正相关;形状参数 $\alpha$ 与总孔隙度呈正相关,与孔曲率呈负相关,但相关性没有达到显著水平;饱和含水率 $\theta_s$ 与总孔隙度意义接近,与总孔隙度表现出强烈显著的正相关关系,与容重呈显著负相关关系,但与孔曲率呈显著负相关。

记土壤大孔隙(>75  $\mu\text{m}$ )、中孔隙(30~75

$\mu\text{m}$ )、微孔隙(5~30  $\mu\text{m}$ )、极微孔隙(0.1~5  $\mu\text{m}$ )与超微孔隙(<0.1  $\mu\text{m}$ )的比表面积及孔体积占比分别为 $A_1, A_2, \dots, A_5$ 及 $P_1, P_2, \dots, P_5$ ,以此为输入变量,采用逐步回归分析的方法建立对饱和导水率 $K_s$ 、田间持水量 $\theta_{fc}$ 及土壤水分特征曲线VG模型形状参数 $n$ 的预测回归模型如下式(6)~(10)所示,模型的系数及统计学参数见表4:

$$K_s = -2.785 A_4 + 3.925 \quad (6)$$

$$K_s = -8.860 V_4 + 2.941 \quad (7)$$

$$\theta_{fc} = 1.197 A_3 + 0.246 \quad (8)$$

$$n = -143.412 A_1 + 1.300 \quad (9)$$

$$n = -6.306 P_1 - 1.295 P_4 + 1.593 \quad (10)$$

本研究中除对 $\theta_{fc}$ 的孔体积占比预测模型不能通过显著性检验,只能通过孔隙比表面积进行模型的构建外, $K_s$ 与 $n$ 利用孔体积占比构建的模型调整后的 $R^2$ 都优于利用孔比表面积构建的模型。本研究通过孔体积建立的回归模型可以分别解释饱和导水率 $K_s$ 与 $n$  81.4%及76.2%的变化。

表4 模型系数及误差

Table 4 Summary of model coefficients and errors

预测变量 Dependent variable	输入变量 Variable entered	非标准化系数 Nonstandard coefficient	标准误差 Standard error	标准系数 Standard coefficient	$t$	Sig.	$R$	$R^2$	调整后 $R^2$ Readjusting $R^2$	标准估计 的误差 Error of standard
$K_s$	常量 Constant	3.925	0.727		5.402	0.000				
	$A_4$	-2.785	0.844	-0.675	-3.299	0.006	0.675	0.456	0.414	0.301
	常量 Constant	2.941	0.284		10.368	0.000				
	$P_4$	-8.860	1.754	-0.814	-5.053	0.000	0.814	0.663	0.637	0.237
$\theta_{fc}$	常量 Constant	0.246	0.022		11.219	0.000				
	$A_3$	1.197	0.528	0.532	2.266	0.041	0.532	0.283	0.228	0.0325
$n$	常量 Constant	1.300	0.039		33.187	0.000				
	$A_1$	-143.412	60.468	-0.550	-2.372	0.034	0.550	0.302	0.248	0.066
	常量 Constant	1.593	0.104		15.327	0.000				
	$P_1$	-6.306	1.577	-0.884	-3.999	0.002	0.762	0.580	0.510	0.053
	$P_4$	-1.295	0.466	-0.615	-2.780	0.017				

### 3 讨论

本研究中依据果园实际耕作措施,将0~100 cm土壤以20 cm与40 cm为界将土壤划分为表土耕作扰动层、潜在犁底层与心土层,利用压汞仪测定土壤孔隙结构,以空间换时间的方法分析不同种植年限苹果园土壤孔隙结构,并对土壤孔隙结构与土壤水力特征进行相关性分析。袁杰等<sup>[23]</sup>以毗邻的30 a未曾变动草地和耕地为研究对象,发现草地和耕地土壤理化性质以30 cm为界存在显著差异;史艺杰等<sup>[24]</sup>研究表明设施蔬菜种植显著增加了0~15 cm表层土壤50~500  $\mu\text{m}$ 孔隙,并提高了土壤团聚

体的稳定性;赵冀等<sup>[25]</sup>研究表明不同耕作处理的土壤孔隙度差异主要在0~20 cm及20~40 cm土层;魏彬萌等<sup>[12]</sup>研究认为渭北果园土层以20 cm为界土壤具有明显的“上松下实”变异特征,结合目前研究进展,界限的划分是可行的。

魏彬萌等<sup>[12]</sup>研究认为渭北果园20 cm以下土层土壤容重已超出了苹果树健康生长的阈值,与本研究结果一致。魏彬萌等<sup>[12]</sup>认为造成这一现象的原因主要是土壤团聚作用差、有机质含量低,加之植果期间人为扰动少,土壤中分散的粘粒会向下层移动,而本研究认为20 cm以下土壤出现容重过高除了土壤本身存在团聚作用差以及有机质含量低



以外,长期种植条件下耕作的扰动造成的孔隙结构改变同样是重要原因,没有观测到粘粒含量的明显变化。于东雪等<sup>[26]</sup>研究表明在黄土高原 0~40 cm 土层容重随深度增加而增加,本研究中 0~100 cm 土壤容重呈现先增加后下降的趋势,可能是因为耕作的缘故使得潜在犁底层被压缩,但在受到人为耕作扰动较小的心土层存在较多的苹果根系,根系穿插同时伴随较多的动物及微生物活动,会促进土壤疏松<sup>[27]</sup>,有研究表明距离树干 60 cm 处的根长密度随土层深度增加呈现双峰型,峰值出现在 10~20 cm 和 40~50 cm 土层中<sup>[28]</sup>,这也可能是造成正值盛果期根系生长旺盛的 13 a 果园在心土层土壤容重低于 33 a 果园的原因。同一土层容重随耕作种植年限先减小后增大,新翻果园与老果园容重较大,正值盛果期果树容重较小,与刘森等<sup>[29]</sup>研究结果一致。同时,本研究也表明土壤容重与土壤各级孔隙度、各级孔隙面积、饱和导水率都有着显著的相关关系,土壤容重仍可以作为土壤结构状况的简单而综合的反映指标。有研究表明有机质是土壤团聚体形成的重要胶结物<sup>[30]</sup>,它可以通过影响团聚体的形成和发育进而改善土壤结构,使总孔隙度和毛管孔隙度增加从而增强土壤对水分的吸附作用,土壤有机质能够很好地调节水分的运动,当土壤有机质达到较高含量时对其影响尤其明显。本研究中果园土壤有机质整体处于较低含量水平,且随种植年限增加而显著降低,与人工林种植年限对土壤有机质影响取得了不同的结果,如 Abaker 等<sup>[31]</sup>研究表明随着人工林种植年限增加,土壤有机质含量缓慢上升。可能由于果园的清园管理,烂果、枯枝落叶会被清扫出,果园缺少了土壤有机质最主要的初始来源<sup>[32]</sup>,有机质含量低也可能是造成土壤微小孔隙占比升高的原因。

土壤孔隙是土壤水分和空气的主要储存空间。土壤紧实会减少土壤孔隙,破坏孔隙网络,从而使土壤中空气和水分的输送受阻,导致土壤持水性降低,形成缺氧的微环境,阻碍根系的正常生长<sup>[18]</sup>。本研究中 2 a 与 33 a 果园在 20~40 cm 土壤深度处存在容重的局部最大值与饱和导水率的局部最小值,多方面表明有出现犁底层的可能,与超微、极微小孔隙土壤的集中有很大的关系。微小孔隙、超微孔隙与极微小孔隙土壤能够与土壤粒度建立显著相关关系,土壤大孔隙及中孔隙与土壤粒度组成之间未见显著相关关系,出现这一差异的可能原因是由于

微小孔隙主要是土壤颗粒间孔隙,受土壤颗粒影响较大,而大孔隙与中孔隙主要形成于土壤颗粒粘聚形成的微团粒间,与土壤的粘聚方式有关,可能受耕作条件或作物根系发育影响,如本研究中土壤大孔隙与种植年限有显著的相关关系。本研究中土壤孔隙分维特征并未与其他指标建立显著的相关关系,可能是由于土壤分维特征在时间上比较稳定,本研究中的样点没有形成足够梯度的缘故。

本研究表明 5~30  $\mu\text{m}$  微孔在土壤导水与持水方面均很重要,饱和导水率与微孔孔隙度呈显著正相关,田间持水量与微孔比表面积呈显著正相关,说明土壤 5~30  $\mu\text{m}$  微孔具有良好的连通性,并且 5~30  $\mu\text{m}$  微孔土壤表面的吸附可能在维持田间持水量方面起重要作用。本研究中不同果园频繁受到扰动的表土层田间持水量值非常接近,在不易受到耕作扰动的心土层,田间持水量随果园种植年限的升高先增大后减小。王檬檬等<sup>[33]</sup>研究认为 17 a 富士苹果园 100 cm 土层内田间持水量表现出随土层增加而上升的趋势( $P<0.05$ ),与本研究正值盛果期的 13 a 果园一致。

刘樟荣等<sup>[34]</sup>认为非饱和土在高、低吸力范围内的主要持水机制分别为吸附作用和毛细作用,吸附水含量主要与气、液、固界面性质相关,受矿物成分、温度和孔隙水化学性质直接影响,毛细水含量主要与孔隙结构特征有关,受容重、应力历史等因素影响,因此,质地接近的土壤其持水曲线在高吸力范围内更加重合,在低吸力范围可能存在较大变异性,这与本研究水分特征曲线规律一致,同时我们还发现对应土壤水分特征曲线高吸力段的微孔隙、超微孔隙与极微小孔隙土壤与土壤粒度组成呈显著相关性,而对应土壤水分特征曲线高吸力段的大孔隙和中孔隙土壤与土壤粒度组成未见显著相关关系,由于本研究中土壤粒度组成基本一致,这也可能是造成土壤水分特征曲线在低吸力段变异性强而在高吸力段比较重合的原因之一。土壤水分特征曲线 VG 模型的参数中, $\alpha$  和  $n$  与土壤的质地和结构有关, $\alpha$  越小,持水能力越强;参数  $n$  的取值影响拟合水分特征曲线的弯曲程度, $n$  值越小,曲线越平缓<sup>[21]</sup>,与本研究结果一致,VG 模型参数  $\alpha$  值与土壤砂粒含量、大孔隙体积比呈正相关,与粉粒含量和粘粒含量呈负相关;参数  $n$  值与砂粒含量呈正相关,与粉粒含量呈负相关,本研究中构建的回归预测模型的  $n$  值主要与大孔隙与极微小孔隙呈负相

关,这与本文中关于极微孔隙含量与粉粒间呈显著正相关也可相互印证。

## 4 结 论

1) 极微孔隙 ( $0.1 \sim 5 \mu\text{m}$ ) 与超微孔隙 ( $<0.1 \mu\text{m}$ ) 聚集的农田土壤属于结构较差的土壤,表现为容重升高、土壤导水持水能力下降以及土壤水分对作物有效性降低,不利于作物生长及生态持水。

2) 在频繁受到耕作扰动的表土层,2 a、13 a 及 33 a 果园土壤之间各级孔隙占比非常接近;在不易受到耕作扰动的心土层,大孔隙与中孔隙土壤含量都表现出随耕作种植年限的增加而增加的趋势。

3) 同一果园中大孔隙 ( $>75 \mu\text{m}$ ) 与中孔隙 ( $30 \sim 75 \mu\text{m}$ ) 土壤百分含量最大值出现在表土层,微孔隙 ( $5 \sim 30 \mu\text{m}$ ) 土壤最大百分含量出现在心土层,极微孔隙 ( $0.1 \sim 5 \mu\text{m}$ ) 与超微孔隙 ( $<0.1 \mu\text{m}$ ) 土壤含量最高值出现在潜在犁底层。

4)  $5 \sim 30 \mu\text{m}$  微孔在土壤的导水及持水方面均有重要作用,其比表面积与田间持水量呈显著正相关,其孔隙度与饱和导水率呈显著正相关。

5) 田间持水量与种植年份呈现显著负相关,表明土壤持水能力随种植年限增长有逐年下降趋势;饱和导水率  $K_s$  与孔直径体积中位数呈显著正相关,与总孔隙比表面积呈显著负相关。 $K_s$  与超微孔隙与极微孔隙体积占比呈显著负相关;VG 模型形状参数  $n$  与大孔隙及中孔隙含量呈显著负相关。研究所建立的对土壤水力参数的回归预测模型可以为研究区土壤水力参数预测提供参考。

## 参 考 文 献:

- [1] 姚泽卿. 改革开放以来洛川苹果产业发展与农村经济社会进步研究[D]. 西安: 西北大学, 2016.  
YAO Z Q. Research on luochuan apple industry development and rural economic and social progress since reform and opening up[D]. Xi'an: Northwest University, 2016.
- [2] 魏彬萌, 王益权. 渭北果园土壤物理退化特征及其机理研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 694-701.  
WEI B M, WANG Y Q. Physical degradation characteristics and mechanism of orchard soil in Weibei Region[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2015, 21(3): 694-701.
- [3] 张丹, 陈红, 高庭艳, 等. 生态果园建设对土壤物理特性的影响[J]. 西南农业学报, 2007, 20(6): 1262-1266.  
ZHANG D, CHEN H, GAO T Y, et al. Effect of ecological orchard construction on soil physical properties[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2007, 20(6): 1262-1266.
- [4] 孙利军, 张仁陟, 黄高宝. 保护性耕作对黄土高原旱地地表土壤理化

性状的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(6): 207-211.

- SUN L J, ZHANG R Z, HUANG G B. Effects of the conservation tillage on the physicochemical characteristics of soil surface in the semi-arid areas of the Loess plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(6): 207-211.
- [5] KODEŠOVÁ R, JIRKU V, KODEŠ V, et al. Soil structure and soil hydraulic properties of Haplic Luvisol used as arable land and grassland[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 111(2): 154-161.
- [6] VIZIOLI B, CAVALIERI-POLIZELI K M V, TORMENA C A, et al. Effects of long-term tillage systems on soil physical quality and crop yield in a Brazilian Ferralsol[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 209: 104935.
- [7] DE OLIVEIRA J A T, CÁSSARO F A M, PIRES L F. Quantification of the pore size distribution of a Rhodic Hapludox under different management systems with X-ray microtomography and computational simulation[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 209: 104941.
- [8] ZHAO Y D, HU X, LI X Y. Analysis of the intra-aggregate pore structures in three soil types using x-ray computed tomography [J]. CATENA, 2020, 193: 104622.
- [9] JURY W A, OR D, PACHEPSKY Y, et al. Kirkham's legacy and contemporary challenges in soil physics research[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(5): 1589-1601.
- [10] 李会杰. 黄土高原林地深层土壤根系吸水过程及其对水分胁迫和土壤碳输入的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019.  
LI H J. Root water uptake process in deep Soil for forest growing on the loess plateau and its effect on water stress and Soil carbon input [D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2019.
- [11] TABOADA M A, MICUCCI F G, COSENTINO D J, et al. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina[J]. Soil and Tillage Research, 1998, 49(1/2): 57-63.
- [12] 魏彬萌, 李忠徽, 王益权. 渭北旱塬苹果园土壤紧实化现状及成因[J]. 应用生态学报, 2021, 32(3): 976-982.  
WEI B M, LI Z H, WANG Y Q. Status and causes of soil compaction at apple orchards in the Weibei Dry Highland, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(3): 976-982.
- [13] 袁娜娜. 室内环刀法测定土壤田间持水量[J]. 中国新技术新产品, 2014, (9): 184.  
YUAN N N. Determination of field capacity by indoor cutting ring method[J]. China New Technologies and New Products, 2014, (9): 184.
- [14] SUN W J, CUI Y J. Determining the soil-water retention curve using mercury intrusion porosimetry test in consideration of soil volume change[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, 12(5): 1070-1079.
- [15] CARNIGLIA S C. Construction of the tortuosity factor from porosimetry[J]. Journal of Catalysis, 1986, 102(2): 401-418.
- [16] AVNIR D, PFEIFER P. Fractal dimension in chemistry: an intensive characteristic of surface irregularity[J]. Nouveau journal de Chimie, 1983, 7(2): 71-72.
- [17] 熊艳艳, 吴先球. 粗大误差四种判别准则的比较和应用[J]. 大学物

- 理实验,2010,23(1):66-68.
- XIONG Y Y, WU X Q. The generalizing application of four judging criterions for gross errors[J]. Physical Experiment of College, 2010, 23(1): 66-68.
- [18] 张方博,侯玉雪,敖园园,等.土壤紧实胁迫下根系-土壤的相互作用[J].植物营养与肥料学报,2021,27(3):531-543.
- ZHANG F B, HOU Y X, AO Y Y, et al. Root-soil interaction under soil compaction[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2021, 27(3): 531-543.
- [19] LAL R, SHUKLA M K. Principles of soil physics[M]. New York: Marcel Dekker Inc., 2004: 142-144.
- [20] BREWER R B. Book review: fabric and mineral analysis of soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1965, 29(2):iv-vi.
- [21] SCHAAP MG, LEIJ F J, VAN GENUCHTENET M T, et al.Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions[J]. Journal of Hydrology, 2001, 251(3/4): 163-176.
- [22] 李文政,刘目兴,易军,等.三峡山地不同坡位土壤的水分特征曲线及水力学性质[J].水土保持学报,2021,35(3):135-142.
- LI W Z, LIU M X, YI J, et al. Soil water retention curve and hydraulic properties at different slope positions in the Three Gorges mountainous area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 135-142.
- [23] 袁杰,鄂崇毅,曹广超,等.30 a耕作对高寒草地土壤碳氮与颗粒组成的影响[J].干旱区研究,2017,34(3):487-494.
- YUAN J, E C Y, CAO G C, et al. Effect of cultivation on soil carbon and nitrogen contents and particle composition in alpine grassland[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(3): 487-494.
- [24] 史艺杰,王美艳,徐胜祥,等.太湖流域典型设施蔬菜地土壤结构特征研究[J].土壤,2020,52(5):1050-1056.
- SHI Y J, WANG M Y, XU S X, et al. Study on soil structure characteristics of typical greenhouse vegetable field in Taihu lake region[J]. Soils, 2020, 52(5): 1050-1056.
- [25] 赵冀,王维,张鹏,等.轮耕对冬春休闲旱地土壤结构及团聚体稳定性的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(6):52-58, 115.
- ZHAO J, WANG W, ZHANG P, et al. Effects of rotation tillage patterns on soil aggregates stability and soil structure of the dry land in winter and spring fallow period[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(6): 52-58, 115.
- [26] 于冬雪,贾小旭,黄来明,等.黄土区不同土层土壤容重空间变异与模拟[J].土壤学报,2019,56(1):55-64.
- YU D X, JIA X X, HUANG L M, et al. Spatial variation of soil bulk density in different soil layers in the Loess area and simulation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(1): 55-64.
- [27] LU J R, ZHANG Q, WERNER A D, et al. Root-induced changes of soil hydraulic properties-a review[J]. Journal of Hydrology, 2020, 589: 125203.
- [28] 张绍武.基于根区土壤水氮分布的苹果园滴灌施肥技术参数优选研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2019.
- ZHANG S W. Optimization of technical parameters of drip fertigation based on apple root-zone soil water and nitrogen distribution[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2019.
- [29] 刘森,蔡春菊,范少辉,等.不同恢复年限对川南丘陵区竹林地土壤质量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2022,50(1):63-71.
- LIU M, CAI C J, FAN S H, et al. Effects of different restoration years on soil quality of Bambusa rigida plantations in southern Sichuan[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2022, 50(1): 63-71.
- [30] 杨欣坤,王宇,赵兰坡,等.土壤水动力学参数及其影响因素研究进展[J].中国农学通报,30(3):38-43.
- YANG X K, WANG Y, ZHAO L P, et al. Research progress on hydrodynamic parameters and its affecting factors[J]. Chinese Agricultural Science, 30(3): 38-43.
- [31] ABAKER W E, BERNINGER F, STARR M. Changes in soil hydraulic properties, soil moisture and water balance in Acaciasenegal plantations of varying age in Sudan[J]. Journal of Arid Environments, 2018, 150: 42-53.
- [32] 汪景宽,徐英德,丁凡,等.植物残体向土壤有机质转化过程及其稳定机制的研究进展[J].土壤学报,2019,56(3):528-540.
- WANG J K, XU Y D, DING F, et al. Process of plant residue transforming into soil organic matter and mechanism of its stabilization: a review[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(3): 528-540.
- [33] 王檬檬,李钢铁,党宏忠,等.黄土残塬沟壑区苹果园土壤的持水特征[J].中国水土保持科学,2019,17(6):27-33.
- WANG M M, LI G T, DANG H Z, et al. Water-holding characteristics of apple orchards in the gully area of the Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(6): 27-33.
- [34] 刘樟荣,叶为民,崔玉军,等.基于微孔填充和毛细管凝聚理论的持水曲线模型[J].岩土力学,2021,42(6):1549-1556.
- LIU Z R, YE W M, CUI Y J, et al. Water retention curve model based on micro-pore filling and capillary condensation theories[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1549-1556.