

## 渭北不同园龄苹果园土壤团聚体状况及演变趋势研究\*

石宗琳<sup>1, 2</sup> 王加旭<sup>1</sup> 梁化学<sup>1</sup> 史红平<sup>1</sup> 魏彬萌<sup>3</sup> 王益权<sup>1†</sup>

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 衡水学院生命科学系, 河北衡水 053000)

(3 陕西省土地工程建设集团, 西安 710075)

**摘要** 为了探索果业生产和果园管理措施对土壤质量的影响, 选取了渭北旱源苹果主产区彬县10a幼龄和21a老龄苹果园0~40 cm土壤为研究对象, 以农田为对照, 采用干筛法和湿筛法研究了不同种植年限果园土壤团聚状况与演变趋势。结果表明: 渭北地区土壤机械稳定性团聚体以<0.25 mm微团聚体为优势级别, 仅0~20 cm处随园龄递增果园土壤团聚化趋势较为明显, >0.25 mm土壤团聚体含量(DSAC<sub>0.25</sub>)、平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)均显著增大, 团聚体分形维数(D)递减, 但是, 10~0.25 mm和5~1 mm最有价值团聚体和团聚系数(K<sub>CTP</sub>)均在递减。渭北土壤水稳性团聚组成中约60%为<0.25 mm微团聚体, 在0~30 cm处土壤水稳性团聚体的MWD、GMD和WSAC<sub>0.25</sub>呈现为农田(对照CK)>10a果园>21a果园, 随园龄递增有明显增大趋势。>0.25 mm团聚体的破坏率(PAD<sub>0.25</sub>)随园龄增加显著增大, 递增幅度随土层深度增加而递减。相关分析表明, 土壤总有机碳(TOC)、颗粒态有机碳(POC)与机械稳定性团聚体各项指标呈极显著相关, 土壤碳酸钙含量、黏粒含量与水稳定团聚体多项指标呈极显著相关, PAD<sub>0.25</sub>与土壤理化性质呈显著相关。研究表明, 果树种植在表观上明显提高了渭北地区表层0~20 cm土壤机械稳定性大团聚体数量, 增强了土壤抗风蚀能力, 但却显著降低了土壤团聚体的农艺质量及其稳定性, 果园土壤团聚体的农艺质量显著退化与有机物及碳酸钙含量递减有着直接关系。

**关键词** 苹果园; 种植年限; 土壤团聚体状况; 团聚体稳定性

**中图分类号** S151.9; S152.4 **文献标识码** A

团聚体是影响土壤孔隙状况以及水、肥、气、热状况的重要因素<sup>[1-2]</sup>, 是决定土壤抗蚀、压实、板结等物理过程的关键指标, 也是土壤中物质和能量转化的场所, 对植物生长以及土壤有机碳储备具有深远的影响<sup>[1, 3]</sup>。团聚体稳定性作为土壤生态变化的重要指标而倍受关注<sup>[4]</sup>。渭北地区农田大面积更替为苹果园, 研究随植被更替以及果园年龄递增、土壤管理措施的变化, 土壤团聚状况及其稳定性演化趋势, 将是分析渭北地区果业可持续发展、生态健康的重要内容。

土壤团聚体状况及稳定性不仅受颗粒组成、有机及无机胶结物、交换性阳离子组成的影响, 而且很大程度上也受土壤环境变化、植被类型以及人为生产活动的强烈影响<sup>[2, 5-6]</sup>。频繁的耕作活动被认为是破坏土壤团聚体状况的因素之一, 随耕作强度增加土壤团聚体含量减少、稳定性降低<sup>[3]</sup>。平衡施肥和低肥处理的土壤团聚体较常规施肥的更稳定。增施有机肥、有机无机配合施用、秸秆还田能显著增加较大直径水稳性团聚体的含量, 改善土壤团聚状况<sup>[3]</sup>。黄土高原地区恢复禁牧草地与造林

\* 农业部2010年农村能源综合建设项目(1251005507)、陕西省农业厅2013农业专项资金项目(2013182)资助。Supported by the 2010 Integrated Rural Energy Development Project of the Ministry of Agriculture of China (1251005507) and the 2013 Agricultural Special Funds of Shaanxi Province (2013182)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: soilphysics@163.com

作者简介: 石宗琳(1986—), 女, 重庆巴南人, 博士研究生, 主要从事果园土壤质量研究。E-mail: misshilin@163.com

收稿日期: 2016-06-22; 收到修改稿日期: 2016-09-08; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-11-22

是增加土壤团聚体稳定性、减少土壤侵蚀的有效方法<sup>[7]</sup>。上述工作足以证实不同耕作、施肥、土地利用措施变更均会不同程度地影响土壤团聚体的形成过程及团聚状况。

渭北地区气候独特,自然生态条件优越成为苹果优生区,自1980年以来大面积从农田更替为果园,极大地改善了生态景观,促进了经济快速发展<sup>[8]</sup>。然而,果园多年大量使用无机化肥、农药等不合理的土壤管理措施<sup>[9]</sup>,以及因为覆被更替使得果园土壤的干湿交替过程弱于农田等,随着植果年限增加,果树明显衰老、果实产量与品质下降、果园土壤质量退化明显,尤其是在20~40 cm处土壤紧实化问题较为普遍,且有愈加严重趋势,制约着苹果生产和果业可持续发展<sup>[8,10]</sup>。因此系统研究果园土壤质量演变趋势显得尤为必要。目前对渭北果园土壤质量的研究多集中在养分状况方面<sup>[9]</sup>,少有涉及容重、紧实度、孔隙度以及饱和导水率等指标的果园土壤物理退化研究<sup>[8,10]</sup>,随园龄递增土壤团聚体状况演变过程及演变态势少有人问津,至今仍然缺乏对渭北地区果树衰老、果园退化以及果树忌地发生的全面认识。本研究以渭北相同自然条件下的苹果园土壤为研究对象,以农田土壤为对照,分析不同植果年限的果园土壤及农田土壤团聚体组成、稳定性及其变化趋势、进一步分析不同种植年限土壤的理化性质与团聚体稳定性的关系,旨在揭示果园生产与人为耕作管理对土壤质量的影响,为果业可持续发展、防止果园土壤质量退化提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验选在陕西省渭北旱塬中西部苹果主产区的彬县,属黄土沟壑塬区,平均海拔1108 m,年均气温9.7℃,昼夜温差11.7℃,年均降水量579 mm,无霜期180d,属典型大陆性暖温带半干旱气候特征。试验地点选在该县新民镇,此处苹果规模化栽培历史较长,具有渭北果区气候、土壤以及栽培管理模式的代表性,苹果品种为红富士。土壤类型为壤质黑垆土,系统分类名称为堆垫干润均腐土(Cumuli-Ustic Isohumosols)。

### 1.2 样品采集

采样时间为2014年5月份,选择了自然生态条件相同、植果年限分别为10a的幼龄、21a的老龄苹

果园作为研究对象,每个园龄各选取3个果园作为试验重复。在每个果园内选取代表性的果树3株,依据果树根系分布特征以及施肥管理情况,在距离树干1m且非施肥位置处设置采样点,按0~10、10~20、20~30、30~40 cm逐层采集原状土柱样品约1kg,并装入硬质盒中防止在运输过程中受挤压破坏。基于该地区均是从农田更替为果园的客观现实,在果园旁边选取未曾植果的、常规管理模式的农田作为对照(CK),按相同层次采集土壤样品。将所采集土样运回室内,在阴凉处自然风干,在风干过程中沿团聚体间自然裂隙轻轻掰分成直径1cm左右的小土块,剔除其中植物残体,待充分风干后把同一个果园内相同土层样品混合备用,共获得24个果园及12个农田原状土壤样品。一部分用于土壤团聚体状况测定,另一部分磨细后供土壤性质测定。

### 1.3 样品分析

土壤团聚体组成测定分别采用了干筛法和湿筛法。在干筛时称取风干土样约500 g,用孔径为10、7、5、3、2、1、0.5、0.25 mm的套筛,在8411型电动振筛分机上(浙江省上虞市道墟五四仪器厂)以30次 $\text{min}^{-1}$ 筛分5 min,将留在每级筛子上的团聚体称重,计算各级团聚体占土样总量的百分比。然后按其百分比,配成2份质量为50 g的土样,作湿筛分析用。在湿筛时先将团聚体充分润湿5 min后,再用孔径为5、2、1、0.5、0.25 mm的套筛,在TTF-100型土壤团聚体分析仪(浙江省上虞市舜龙实验器厂)上以30次 $\text{min}^{-1}$ 筛分6 min(振幅4 cm)。湿筛结束后将留在各级筛孔上的团聚体用水洗入铝盒中,烘干后称重,计算水稳性团聚体组成。

供试土壤有机质含量测定采用硫酸-重铬酸钾外加热法,碳酸钙含量测定采用气量法,土壤容重测定采用环刀法,土壤机械组成采用沉降分析的吸管法<sup>[11]</sup>,土壤颗粒态有机碳含量参考Cambardella和Elliott<sup>[12]</sup>的研究方法。供试土壤基本理化性质见表1,其中随着园龄增长土壤碳酸钙含量减少极为明显。

### 1.4 土壤团聚体评价指标

团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)计算采用式(1)和式(2)<sup>[13]</sup>

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n (\bar{X}_i W_i) \quad (1)$$

表1 土壤基本理化性质

		Table 1 Basic physical and chemical properties of the soils investigated						
处理 Treatment	土层深度 Soil layer (cm)	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay	总有机碳 TOC	颗粒态有机碳 POC	容重 Bulk density	碳酸钙 CaCO <sub>3</sub>
		(2 ~ 0.02mm)	(0.02 ~ 0.002mm)	(< 0.002mm)	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(g cm <sup>-3</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )
		(%)						
对照CK	0 ~ 10	31.29	46.43	22.28	10.37	3.64	1.23	61.47
	10 ~ 20	31.82	42.37	25.80	10.06	3.09	1.29	64.64
	20 ~ 30	29.85	43.91	26.24	7.25	1.84	1.56	65.36
	30 ~ 40	31.28	42.65	26.07	6.38	1.15	1.64	52.72
10a果园 10a orchard	0 ~ 10	32.96	40.45	26.59	8.27	3.58	1.21	59.32
	10 ~ 20	35.72	35.71	28.57	7.72	2.75	1.35	55.04
	20 ~ 30	24.63	47.75	27.63	6.67	2.17	1.52	58.21
21a果园 21a orchard	0 ~ 10	42.29	32.15	25.56	9.53	2.80	1.29	40.12
	10 ~ 20	43.94	26.57	29.49	7.76	2.87	1.36	52.88
	20 ~ 30	51.46	26.01	22.53	6.11	1.21	1.51	54.36
	30 ~ 40	50.21	20.98	28.81	4.90	0.77	1.56	52.13

$$\text{GMD} = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n W_i}\right) \quad (2)$$

式中， $\bar{X}_i$ 为某级别团聚体直径（mm）的中值， $W_i$ 为团聚体的百分含量。

土壤团聚体分形维数（ $D$ ）的计算采用杨培岭等<sup>[14]</sup>的推导公式

$$\lg W_{(r < R_i)} / W_T = (3 - D) \lg R_i / R_{\max} \quad (3)$$

式中， $D$ 为土壤团聚体的分形维数， $W_{(r < R_i)}$ 为直径小于 $R_i$ 累计土壤团聚体的质量， $r$ 为土壤团聚体直径， $W_T$ 为总质量， $R_i$ 为两相邻直径 $R_i$ 和 $R_{i+1}$ 间团聚体的平均直径， $R_{\max}$ 为最大级别的平均直径。

> 0.25 mm团聚体破坏率计算公式<sup>[13]</sup>

$$\text{PAD}_{0.25} = \frac{W_a - W_b}{W_a} \times 100\% \quad (4)$$

式中， $\text{PAD}_{0.25}$ 表示 > 0.25 mm 团聚体破坏率， $W_a$ 表示 > 0.25 mm机械稳定性团聚体含量， $W_b$ 表示 > 0.25 mm水稳性团聚体含量。

土壤团聚体系数（ $K_{\text{CTP}}$ ）计算公式<sup>[15]</sup>

$$K_{\text{CTP}} = \frac{\sum (10 \sim 0.25) \text{mm}}{\sum (> 10 \text{mm} + < 0.25 \text{mm})} \quad (5)$$

式中，分子为不同处理土壤10 ~ 0.25 mm团聚体的累积值，分母为直径 > 10 mm与直径 < 0.25 mm团聚体含量之和。

采用Excel2007和SAS8.0进行统计分析，多重比较采用邓肯检验，显著水平（ $p < 0.05$ ）。

## 2 结果

### 2.1 果园土壤机械稳定性团聚体状况演化趋势

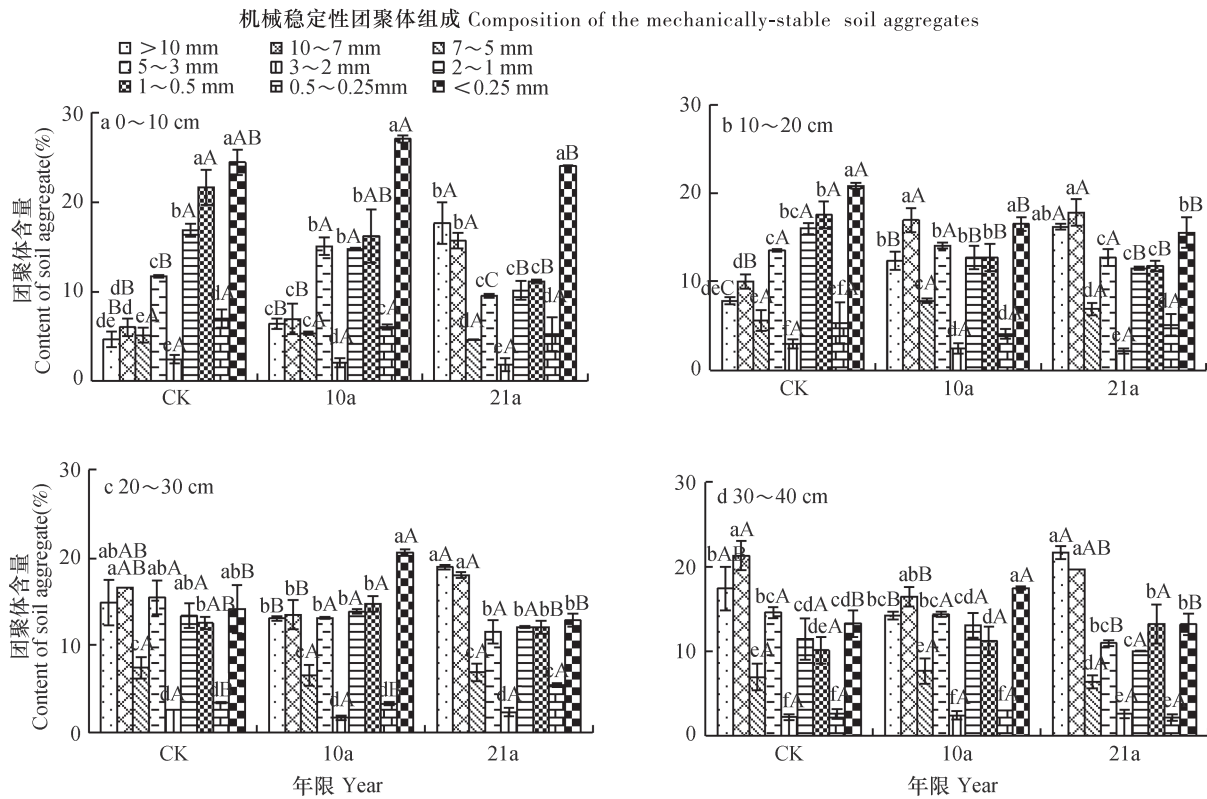
土壤团聚体组成是决定土壤质量好坏的因素之一<sup>[13]</sup>。通过干筛法获得不同试验土壤的机械稳定性团聚体组成。由图1可知，不同处理下土壤团聚体的组成差异明显。在0 ~ 10 cm土层，农田对照（CK）土壤团聚体组成随直径减小呈现阶梯式递增态势，< 0.25 mm微团聚体占据优势级别。当农田更替为果园后，直径较小的团聚体含量逐渐减少，直径较大的团聚体增加，直至21a果园土壤团聚体组成呈现出M型分布态势，具有直径较大和较

小团聚体两个优势级别(图1a)。在10~20 cm土层,不同处理土壤团聚体组成差异与0~10 cm具有一致规律,团聚体组成优势和变化幅度均小于0~10 cm土层(图1b)。在20~40 cm土层各处理的土壤团聚体组成呈现出数量均匀化态势,无明显优势级别团聚体呈现(图1c和图1d)。

从团聚体的环境质量考虑,>10 mm团聚体在改善土壤孔性、增强土壤通透性、增强抗风蚀能力等方面具有重要价值,尤其是对于表层土壤而言更显得重要<sup>[13-16]</sup>。与农田相比,10a果园土壤>10 mm团聚体含量在0~20 cm土层平均提高了36%以上( $p < 0.05$ ),但在20~40 cm土层降低了12%以上。21a果园土壤>10 mm团聚体含量在0~40 cm土层均高于农田和10a果园,分别为农田和10a果园的1.24倍~3.76倍和1.30倍~2.75倍。>10 mm的团聚体含量的增加对于提高果园土壤接纳降水,减少地面径流,增加土壤抗风蚀能力产生了一定的效果。

从土壤团聚体的农艺质量出发,直径10~0.25 mm的团聚体是决定土壤物理、化学和生物性质的重要指标,被称之为理想团聚体<sup>[13, 16]</sup>。>10 mm团聚体含量过多会因结构体过大而影响土壤保墒性和作物出苗,直径<0.25 mm微团聚体含量过多会因结构体过小而影响土壤通气透水性和微生物活性。与农田相比,在0~40 cm土层范围,果园土壤10~0.25 mm的团聚体含量有减小趋势,10a果园土壤10~0.25 mm团聚体含量较农田土壤减少了0.34%~6.57%,21a果园土壤较农田土壤减少了4.26%~15.71%。从农田更替为果园,土壤团聚体的农艺质量有明显下降趋势,下降幅度最大的为0~10 cm表层。

目前,常用评价土壤团聚体状况的指标有>0.25 mm机械稳定性团聚体含量(DSAC<sub>0.25</sub>)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、团聚体分形维数(D)<sup>[17]</sup>等。从土壤的整体团聚状况来看(见表2),与农田相比,10a果园>



注:不同小写字母表示相同处理下不同级别团聚体含量差异显著,而大写字母则表示相同级别不同处理间团聚体含量差异显著( $p < 0.05$ )。下同 Note: Different lowercase letters and capital letters indicate significant difference at 5% level in content of soil aggregates between different fractions of soil aggregates in the same treatment and between different treatments of the same fraction of soil aggregates, respectively. The same below

图1 果园土壤机械稳定性团聚体组成

Fig. 1 Composition of the mechanically-stable soil aggregates in the orchards

0.25 mm 团聚体含量, 在 10 ~ 20 cm 土层显著提高了 5.43% ( $p < 0.05$ ), 其他土层下降范围为 3.46% ~ 7.51%, 达显著水平 ( $p < 0.05$ )。21a 果园 > 0.25 mm 团聚体含量在 0 ~ 40 cm 土层范围均大于农田土壤, 且较 10a 果园提高了 1.19% ~ 9.37%, 除 10 ~ 20 cm 土层外, 其他土层 DSAC<sub>0.25</sub> 增幅达到了显著水平 ( $p < 0.05$ )。说明在植被更替过程中土壤团聚体状况是先减弱后增强的过程。

与农田相比, 10 a 果园 MWD 和 GMD 在 0 ~ 20 cm 土层分别提高了 13.80% ~ 36.12% 和

6.84% ~ 48.82%, 在 20 ~ 40 cm 土层分别下降了 13% 左右和 22% 以上 ( $p < 0.05$ ), 分形维数  $D$  在 0 ~ 10 cm 和 20 ~ 40 cm 土层提高了 0.64% ~ 3.67%, 在 10 ~ 20 cm 土层显著降低了 1.57% ( $p < 0.05$ )。0 ~ 40 cm 土层范围 21a 果园 MWD 和 GMD 值分别较 10a 果园提高了 7.66% ~ 56.86% 和 8.04% ~ 52.37%, 除 0 ~ 10 cm 土层, 21a 果园团聚体分形维数  $D$  较 10a 果园下降了 0.39% ~ 4.26%。各处理土壤的 MWD 和 GMD 在 20 ~ 40 cm 土层大于 0 ~ 20 cm 土层, 团聚体分形维数  $D$  变化趋势相反。

表 2 供试土壤机械稳定性团聚体状况

Table 2 Mechanically-stable aggregate indexes of tested soils

处理 Treatment	土层深度 Soil layer (cm)	机械稳定性团聚体 Mechanical-stable aggregate				
		DSAC <sub>0.25</sub> <sup>1)</sup> (%)	MWD <sup>2)</sup> (mm)	GMD <sup>3)</sup> (mm)	$D$ <sup>4)</sup>	$K_{CTP}$ <sup>5)</sup>
对照 CK CK	0 ~ 10	75.54bAB	2.29dB	0.95dB	2.67aA	2.44aA
	10 ~ 20	79.15bB	3.02cC	1.28cB	2.62aA	2.41aA
	20 ~ 30	85.92aA	4.33bB	2.13bA	2.53bA	2.52aA
	30 ~ 40	86.71aA	4.89aA	2.51aA	2.51bA	2.29bA
10a 果园 10a orchard	0 ~ 10	72.92cB	2.61cB	1.01cB	2.61aA	1.99cB
	10 ~ 20	83.45aA	4.11abB	1.89aA	2.58bA	2.45aAB
	20 ~ 30	79.46bB	3.75bC	1.58bB	2.62bA	1.98cB
	30 ~ 40	82.52aB	4.23aB	1.96aB	2.58bA	2.15bA
21a 果园 21a orchard	0 ~ 10	75.93bA	4.09cA	1.54cA	2.67aA	1.40bC
	10 ~ 20	84.44aA	4.42bcA	2.05bA	2.57abA	2.15aB
	20 ~ 30	86.91aA	4.64abA	2.25abA	2.53abA	2.13aB
	30 ~ 40	87.30aA	5.00aA	2.50aB	2.47bA	1.87aB

注: 1)、2)、3)、4)、5) 分别表示机械稳定性团聚体 > 0.25mm 含量、平均重量直径、几何平均直径、分形维数和团聚体系数。下同。Note: 1), 2), 3), 4) and 5) stands for content of > 0.25mm soil aggregates (DSAC<sub>0.25</sub>), mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), fractal dimension ( $D$ ) and coefficient ( $K_{CTP}$ ) of mechanically-stable soil aggregates, respectively. The same below

土壤团聚体系数 ( $K_{CTP}$ ) 是以 10 ~ 0.25 mm “优质”团聚体和 > 10 mm 及 < 0.25 mm 等 “不良性状”团聚体为综合性指标, 从 “量” 和 “质” 两个方面评价土壤团聚状况<sup>[15]</sup>。从表 2 看出, 农田土壤的  $K_{CTP}$  变化在 2.29 ~ 2.52, 各土层均高于果园土壤。随园龄增加各土层  $K_{CTP}$  有明显递减趋势, 其中以 0 ~ 10 cm 土层的递减幅度最明显, 从农田的 2.44 递减至 21a 果园的 1.40。

## 2.2 果园土壤水稳性团聚体状况及演变趋势

水稳性团聚体较非水稳性团聚体对于保持

土壤稳定状态更具重要价值<sup>[1]</sup>。从图 2 看出, 渭北土壤水稳性团聚体状况普遍较差, 无论农田还是果园土壤经湿筛后的水稳性团聚体组成均以 < 0.25 mm 的微团聚体作为优势级别, 变化范围为 48.11% ~ 76.57%, 大部分土壤在 60% 以上。0 ~ 30 cm 土层内两个园龄果园土壤的 < 0.25 mm 微团聚体含量均高于农田, 且随园龄增加而增加, 表层土壤的增加幅度高于底层, 在 0 ~ 20 cm 土层范围各处理间差异达显著水平 ( $p < 0.05$ ), 20 ~ 30 cm 处差异不显著, 在 30 ~ 40 cm 处, < 0.25 mm 微团聚

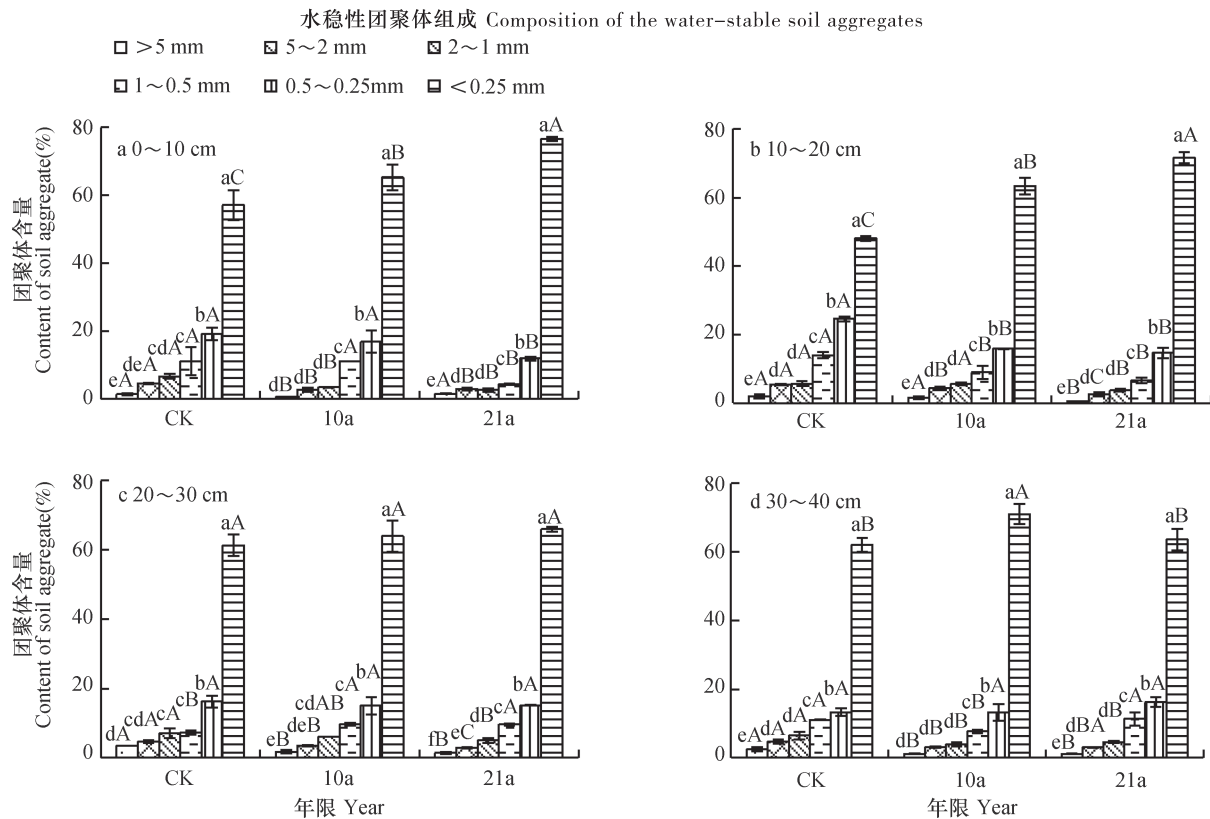


Fig. 2 Composition of the water-stable soil aggregates in the orchards

体含量从农田到10a果园显著递增,进一步演变至21a果园又显著递减 ( $p < 0.05$ )。

由表3可以看出, 0~40 cm土层范围内农田土壤中 > 0.25 mm水稳性团聚体含量 ( $WSAC_{0.25}$ ) 变化范围为37.99%~44.86%, 分别较10a和21a果园土壤提高了7.49%~41.76%和4.39%~83.18%, 且随园龄增加而减小。相同土层不同处理土壤水稳性团聚体的MWD和GMD的变化趋势与 $WSAC_{0.25}$ 变化相一致, 农田土壤的MWD和GMD均显著大于两个园龄果园 ( $p < 0.05$ )。土壤水稳性团聚体的分形维数 $D$ 变化范围虽然小, 但在相同土层间基本上也呈现出了从农田到果园规律性的显著递增态势 ( $p < 0.05$ )。总之, 果园土壤水稳性团聚性较农田差, 且随园龄递增水稳性团聚状况逐渐变差。

### 2.3 果园土壤团聚体稳定性特征

土壤团聚体的稳定性与其大小是同等重要的质量指标, 土壤科学发展更加关注团聚体的稳定性, 因为它直接关系到土壤对不同环境的适应与协调性能。比较表2和表3, 渭北农田、10a果园和21a果园土壤机械稳定性团聚体与水稳性团聚体的各项指标差异很大, 机械稳定性团聚体的MWD、GMD、

$D$ 和 > 0.25mm团聚体含量分别是水稳性团聚体的4.10倍~11.75倍、3.56倍~10.64倍、1.09倍~1.16倍和1.52倍~3.24倍, 说明渭北土壤团聚体的水力学稳定性较差。

团聚体破坏率 ( $PAD_{0.25}$ ) 是表示土壤团聚体在水力作用下分散程度的度量指标, 其值越小表明土壤团聚体水力学稳定性越高<sup>[13]</sup>。由图3看出从农田到果园土壤,  $PAD_{0.25}$ 值逐渐增大, 只是在不同土层处其变化幅度有所差异。在0~40 cm土层范围, 农田土壤的 $PAD_{0.25}$ 均低于两个园龄果园土壤 ( $p < 0.05$ )。在0~30 cm土层范围, 以21a果园土壤 $PAD_{0.25}$ 最大, 范围为60.82%~69.14%, 是10a果园土壤的1.05倍~1.45倍, 而在30~40 cm土层处, 21a果园 $PAD_{0.25}$ 较10a果园减少了12.48%。除20~30cm土层外, 其他各土层土壤 $PAD_{0.25}$ 值在处理间的差异达显著水平 ( $p < 0.05$ )。由此可以得出果园0~20 cm土层范围土壤团聚体的水力学稳定呈现出逐渐变差的过程。

### 2.4 果园土壤性质与团聚体状况之间的相关关系

相关关系表明 (表4), 土壤总有机碳 (TOC)、颗粒态有机碳 (POC) 与机械稳定性团

表3 供试土壤水稳性团聚体状况

Table 3 Water-stable aggregate indexes of tested soils

处理 Treatment	土层深度 Soil layer (cm)	水稳性团聚体 Water-stable aggregate			
		WSAC <sub>0.25</sub> <sup>1)</sup> (%)	MWD <sup>2)</sup> (mm)	GMD <sup>3)</sup> (mm)	D <sup>4)</sup>
对照CK	0~10	42.91bA	0.56bA	0.27bA	2.30aB
	10~20	51.89aA	0.64aA	0.31aA	2.26bC
	20~30	38.77bA	0.64aA	0.27bA	2.31aA
	30~40	37.99bA	0.60abA	0.27bA	2.26bB
10a果园 10a orchard	0~10	34.76abB	0.41bB	0.22abB	2.31bAB
	10~20	36.61aB	0.53aB	0.25aB	2.30bcB
	20~30	36.07aA	0.51aB	0.25aAB	2.28cB
	30~40	28.93bB	0.42bC	0.21bC	2.33aA
21a果园 21a orchard	0~10	23.43cC	0.40bB	0.19bC	2.32aA
	10~20	28.39bC	0.38bC	0.20bC	2.32aA
	20~30	34.05aA	0.46aB	0.23aB	2.30bAB
	30~40	36.39aA	0.46aB	0.24aB	2.23cC

聚体MWD、GMD、*D*和DSAC<sub>0.25</sub>呈极显著负相关或正相关，而与水稳性团聚体各指标相关性不显著，说明土壤有机碳影响机械稳定性团聚体数量及其稳定性。土壤碳酸钙含量与水稳性团聚体MWD、GMD和WSAC<sub>0.25</sub>呈极显著正相关，与*D*相关性不显著，说明碳酸钙含量影响水稳性团聚体数量和稳定性。砂粒、粉粒和黏粒含量与水稳性团聚体MWD、

GMD和WSAC<sub>0.25</sub>呈显著相关性，说明土壤质地影响水稳性团聚体的稳定性。仅砂粒和粉粒与土壤机械稳定性团聚体MWD呈显著相关，与其他指标相关性均不显著，说明土壤质地对土壤团聚体机械稳定性影响较小。土壤TOC、POC、碳酸钙(CaCO<sub>3</sub>)、粉粒与团聚体破坏率(PAD<sub>0.25</sub>)均呈极显著负相关，砂粒和黏粒与PAD<sub>0.25</sub>呈显著或极显著正相关。

表4 土壤团聚体稳定性指标与土壤理化性质的相关性

Table 4 Correlation between soil aggregate stability indexes and soil physicochemical properties

项目 Item	机械稳定性团聚体 Mechanically-stable aggregate				水稳性团聚体 Water-stable aggregate				团聚体破坏率 PAD <sub>0.25</sub> <sup>1)</sup>
	MWD	GMD	<i>D</i>	DSAC <sub>0.25</sub>	MWD	GMD	<i>D</i>	WSAC <sub>0.25</sub>	
总有机碳TOC	-0.74**	-0.81**	0.73**	-0.66**	0.21	0.30	0.18	0.31	-0.51**
颗粒态有机碳POC	-0.83**	-0.88**	0.82**	-0.61**	-0.01	0.12	0.30	0.19	-0.46**
碳酸钙CaCO <sub>3</sub>	-0.23	-0.27	-0.01	-0.01	0.61**	0.72**	-0.16	0.75**	-0.72**
砂粒Sand	0.41*	0.31	-0.13	0.11	-0.58**	-0.57**	0.17	-0.53**	0.51**
粉粒Silt	-0.46**	-0.30	0.10	-0.12	0.66**	0.67**	-0.24	0.64**	-0.62**
黏粒Clay	0.25	0.03	0.10	0.05	-0.37*	-0.46**	0.30	-0.50**	0.47**

注：\*表示相关性达显著水平 ( $p < 0.05$ )，\*\*表示相关性达极显著水平 ( $p < 0.01$ )。1)表示团聚体破坏率Note: \* and \*\* means significant difference at  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ , respectively. 1) means destruction rate of  $> 0.25$  mm soil aggregates

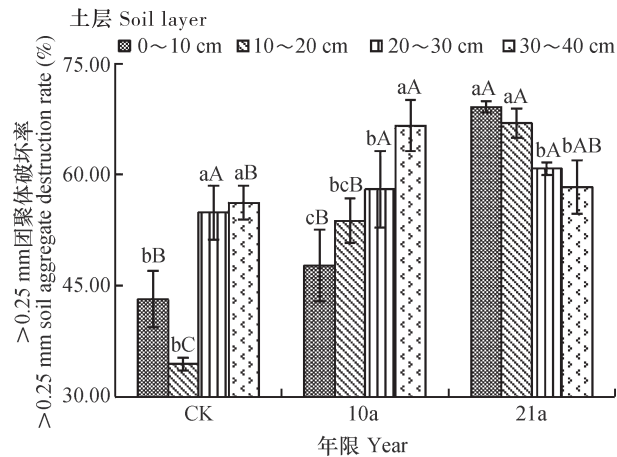


图3 果园土壤 >0.25mm团聚力破坏率变化趋势

Fig. 3 Variation of >0.25mm soil aggregate in destruction rate as affected by orchard cultivation

注：不同小写字母表示相同处理下不同土层间 $PAD_{0.25}$ 差异显著，而大写字母则表示相同土层不同处理间 $PAD_{0.25}$ 差异显著 ( $p < 0.05$ ) Note: Different lowercase letters and capital letters indicate significant difference at 5% level in destruction rate of >0.25 mm soil aggregates between different soil layers in the same treatment and between different treatments in the same soil layer, respectively

### 3 讨论

#### 3.1 渭北果园土壤团聚体状况评价

渭北从农田植被更替为果园，因有冠层的保护作用，以及对近地面空气湿度、干湿变化程度等小气候的影响，体现着明显的气候作用特征，表现为在0~20 cm土层范围果园土壤 >10 mm团聚体含量大于农田，且随着种植年限的增加而增加，说明果园抗风蚀能力高于农田，随着年限增加，抗风蚀能力以及表层土壤通气性得到了改善。尽管从农田更替为果园以及随种植年限的递增，渭北土壤团聚体状况有不同程度的变化，但是，对土壤团聚体的评价不能只依据变化方向和程度，更要依据它在土壤诸多因素方面的作用进行评价。

以干筛后10~0.25 mm团聚体含量和 $K_{CPT}$ 为指标评价土壤团聚状态，土壤10~0.25mm含量 >60%为优良团聚状态，60%~40%为良好状态，<40%则为差等状态；土壤 $K_{CPT} > 1.5$ 为优良级别，1.5~0.67为良好，<0.67为差等团聚状态<sup>[15]</sup>。依据这两个指标及其阈值和表2可以得出，目前渭北农田和果园土壤多属于优良级团聚状态，仅21a果园在0~10 cm土层的团聚状态递减至良好级别。但渭北果园各层土壤团聚状态指标均逐

渐逼近于上述指标阈值，意味着土壤团聚质量正发生着潜在的退化过程，只是暂未表现出明显的结果而已。综上所述，以机械稳定性团聚体的团聚水平为考量，渭北地区从农田更替为果园后随着植果年龄增加土壤团聚化水平有增加趋势，但是，土壤团聚体的质量水平则有明显的退化态势。

以湿筛后 >0.25 mm团聚体为指标，认为 <30%属于不良团聚状态，30%~40%属于较差团聚状态，40%~75%属于良好状态，>75%属于相当优良状态。依据表3可以看出，在0~20 cm土层范围，渭北土壤团聚状态已经从农田的良好级别演化为10a果园的较差状态，又进一步演化为21a果园的不良状态。而20~40 cm土层各处理间虽然均属较差团聚状态，级别没有变化，但是 >0.25 mm团聚体存在明显的递减趋势。

综合干筛和湿筛后不同试验处理土壤团聚体状态变化情况可以得出，渭北果园土壤表观上机械稳定性团聚体似乎有增大的趋势，提高了土壤抗风蚀的环境质量，但是，从团聚体的农艺性状考量，渭北果园土壤团聚体质量呈显著的递减和退化态势。

#### 3.2 植果对土壤团聚体状况的影响

一般情况下认为干筛后 >0.25 mm团聚体含量 ( $DSAC_{0.25}$ ) 越高、MWD和GMD值越大表示土壤团聚体稳定性越强，土壤结构性越好，而分形维数 ( $D$ ) 与之相反， $D$ 值越小，表明土壤团聚体越稳定，土壤结构状态越好<sup>[13, 18]</sup>。渭北地区果园土壤机械稳定性团聚体的MWD、GMD和 $DSAC_{0.25}$ 随种植年限延长而增大，随土壤深度增加而增加； $D$ 则相反，随园龄增大和随土层深度增加而减小，说明植果提高了土壤团聚体的机械稳定性，与刘文利等<sup>[13]</sup>对延边地区苹果梨园团聚体研究结果一致。在0~20 cm土层，10a果园土壤机械稳定性团聚体MWD、GMD大于农田，而在20~40 cm土层变化趋势相反，说明农田改建为果园提高了0~20 cm土层的土壤机械稳定性，因为农田土壤0~20 cm土层扰动较果园大，降低了 >10 mm大团聚体数量，因此MWD和GMD值减小<sup>[19]</sup>。农田、10a和21a果园土壤20~40 cm土层MWD和GMD值大于0~20 cm土层，与赵红和吕贻忠<sup>[20]</sup>研究结果类似，说明20~40 cm土层土壤团聚体机械稳定性优于0~20 cm土层，这也是因为表层受人为活动干扰多，扰动频繁，尽管有机质含量高于下层，但在土壤扰动过程中易于暴露，分解速度大于下层，弱化了对机械稳





定性团聚体的胶结作用<sup>[19]</sup>。

土壤中较大直径的水稳性团聚体越多,对保持土壤结构稳定状态具有重要贡献,也是衡量土壤抗侵蚀能力的指标之一<sup>[1]</sup>。本研究结果表明数量优势级别水稳性团聚体随直径减小而增加,与Huang等<sup>[21]</sup>研究结果一致。数量上优势级别的水稳性团聚体直径越小,意味着团聚体在浸水条件下抵抗破坏能力越小,在湿筛过程中大部分非水稳性团聚体散碎,形成了小直径的水稳性团聚体<sup>[22]</sup>。有研究表明,在同一母质上发育的土壤因利用类型的不同,团聚体的组成和数量均可能发生巨大变化<sup>[6]</sup>。渭北农田土壤水稳性团聚体的MWD、GMD和WSAC<sub>0.25</sub>大于果园土壤,*D*和PAD<sub>0.25</sub>均低于果园土壤,说明农田土壤水稳性高于果园土壤,土壤结构的稳定性,抗侵蚀性、透水性则更强,与董莉丽<sup>[17]</sup>运用LB法对不同利用类型下土壤水稳性团聚体研究结果相一致。这与农田和果园的管理措施不同,有机质输入质和量存在差别有关系<sup>[6]</sup>。一方面渭北地区果园土壤有机肥料投入少,为了预防病虫害,多采取了清耕模式,减少了有机质的投入<sup>[8]</sup>。另一方面,土地利用方式改变打破了土壤有机碳库的周转规律,有机碳含量减少<sup>[23]</sup>。农田改为果园后处于生态系统调整与恢复期,有机质大多为新形成的,有机黏结介质多为暂时性的和瞬时性的物质,容易分解,因而团聚体稳定性较低<sup>[24]</sup>。与农田相比,果园土壤>0.25 mm水稳性团聚体显著下降,团聚性能变差,与孙蕾等<sup>[8]</sup>研究结果一致。

随着种植年限延长,同样降低水稳性团聚体MWD、GMD、WSAC<sub>0.25</sub>,而*D*和PAD<sub>0.25</sub>增加,说明随着植果年限的延长土壤团聚体水稳性明显下降,土壤结构变差,抗侵蚀、通透性能下降。这是因为果园土壤长期大量施用的无机化肥<sup>[8]</sup>对团聚体稳定性产生影响<sup>[25]</sup>,长期植果加速了土壤钙素退化<sup>[26]</sup>,减少了水稳性团聚体形成的胶结剂。刘文利等<sup>[13]</sup>对苹果梨园土壤团聚体水稳性研究得出,MWD、GMD随着种植年限的增加而增加,*D*随种植年限增加而减小,果园土壤结构日趋稳定,抗侵蚀能力增强,其研究结果与本研究结果相反,原因可能与土壤矿物学性质、果树品种以及植果年限等相关。本研究中果园土壤机械稳定性大于农田,且随种植年限延长而增加,但水稳性低于农田,且随种植年限增加而减小,这可能受植被冠层和胶结物质的种类及性质影响,果园和农田土壤湿度变异性

不同,在作物生长季节里受干湿交替、冻融交替等物理-机械因素影响的团聚体基本上均是非水稳性的<sup>[27]</sup>。任何土壤的团聚体越大,稳定性也越差,这亦是在耕地中难以形成更大团聚体的原因<sup>[27]</sup>。

### 3.3 土壤团聚体稳定性的影响因素

土壤团聚体的形成是土壤物理学界一直关注的重要课题,众多学者已开展了卓有成效的研究工作。Edwards和Bremner<sup>[28]</sup>提出,大团聚体是由黏粒-多价金属-有机质复合体组成的“有机-无机”复合模式;Puget和Chenu<sup>[29]</sup>认为,大团聚体的形成是微团聚体通过有机碳胶结形成,微团聚体与大团聚体之间的转化和再分布受耕作方式和土地利用方式的影响。从农田更替为果园,植被、施肥、耕作管理以及地面小气候等变化是驱动土壤有机质、碳酸钙等性质及其团聚体状况演化的动力。渭北地区植果后0~40 cm土层的TOC、POC以及碳酸钙含量均低于农田土壤(表1),土壤团聚体状况的物质条件显著地改变了,势必会影响土壤的团聚作用。本研究结果表明土壤TOC、POC和土壤机械稳定性MWD、GMD和DSAC<sub>0.25</sub>呈极显著负相关性,与赵红和吕贻忠<sup>[20]</sup>研究结果类似,说明田间情况下土壤机械稳定性团聚体的形成不仅受有机碳数量,更重要受有机质种类的影响<sup>[23]</sup>。TOC、POC与水稳性团聚体指标相关性不显著,说明在黄土性土壤中TOC和POC不是土壤水稳性团聚体形成的主导因素,与赵红和吕贻忠<sup>[20]</sup>研究结果相悖,这可能是因为该地区土壤中所含的有机质含量少,种类多属于瞬时性和临时性的胶结剂,浸水容易分解流失<sup>[26]</sup>。

本研究结果在体现有机质对团聚体作用的时候,似乎与一般认识和概念相悖。但是,这不能否定有机质对土壤的团聚作用,只是在渭北地区自然条件下土壤有机质含量和质量对于矿物颗粒的胶结与团聚作用强度不够明显而已,较早时A.Н.Соколовский<sup>[30]</sup>就曾指出,“有决定意义的不是腐殖质的总量,而是那些不可逆絮凝胶体腐殖质的数量”,土壤腐殖质含量愈高,团聚体的水稳性越强,在本文中被PAD<sub>0.25</sub>与有机质含量及颗粒态有机质呈显著负相关所佐证。已有研究表明,土壤团聚体水稳性下降和水稳性团聚体数量的减少均与有机质含量下降有关<sup>[19,31]</sup>,增加土壤有机质是促进团聚体稳定性,防止土壤侵蚀的基本途径<sup>[17]</sup>。也有研究表明,有机质总量与团聚体稳定性之间没

有显著相关<sup>[32]</sup>。李霄云等<sup>[16]</sup>研究得出有机质含量与干筛团聚体稳定性指标相关性不显著,而与湿筛团聚体稳定性指标呈极显著相关性。以上研究说明有机质对团聚体稳定性的影响非常复杂。

土壤团聚体的形成还依赖于其他因素。有研究认为,尽管黏粒和碳酸钙的胶结力较腐殖质弱<sup>[33]</sup>,但在石灰性土壤中有机质并不是最重要团聚体胶结物<sup>[34]</sup>,碳酸钙显著影响团聚体形成<sup>[35]</sup>。在本研究地区土壤碳酸钙含量与水稳性团聚体MWD、GMD和WSAC<sub>0.25</sub>呈极显著正相关,与D相关性不显著,证实了“不溶性化合物会导致水稳性团聚体的形成”<sup>[30]</sup>,对团聚体水稳性起重要作用的是难溶性碳酸钙(表4),与Virto等<sup>[35]</sup>研究结果一致。砂粒、粉粒和黏粒含量与水稳性团聚体MWD、GMD和WSAC<sub>0.25</sub>呈显著相关性,仅砂粒和粉粒与土壤机械稳定性团聚体MWD呈显著相关,与其他指标相关性均不显著,这也与一般的逻辑相悖,是因为随植被更替,近地层农田气候变化以及耕作强度的变化产生的团聚效应掩盖了颗粒粒级效应的缘故。尽管农田耕作较为频繁,但是在适耕期内合理的机械耕作,会具有良好的结构并取得较好的收成。Д.Г.Виленский发现有意义的现象是在适宜湿度条件下的机械“拌合”会产生稳固性团聚体,在土壤干燥时得以保存,并具有很高的水稳性<sup>[30]</sup>。相同地域内土壤质地对土壤团聚体机械稳定性影响较小,这与李霄云等<sup>[16]</sup>对陕西交口灌区农田土壤团聚体研究结果一致。

## 4 结论

渭北地区果树种植提高了0~20 cm土层土壤抗风蚀的环境质量和机械稳定性,但随种植年限增加,土壤团聚体的农艺质量下降。该地区土壤水稳性团聚体含量随直径减小而增加,农田土壤水稳性高于果园土壤,结构更稳定,抗侵蚀、保水保肥能力更强。并且随着种植年限延长,0~30cm土层果园土壤团聚体水稳性、抗侵蚀、保水保肥能力下降。该地区土壤团聚体机械稳定性受TOC和POC影响显著,受土壤质地影响较小;而对水稳性起重要作用的是碳酸钙和土壤质地,而TOC不是水稳性团聚体的主要胶结剂,对水稳性团聚体影响较小。MWD、GMD、WSAC<sub>0.25</sub>、D和PAD<sub>0.25</sub>相互间关系达

显著水平,均可作为团聚体稳定性评价指标。综上所述,在该地果树种植区域,应通过多施易分解的有机肥、适当深翻等土壤管理措施,增强土壤结构的稳定性,减少老龄果园土壤退化问题,促进果业可持续发展。

## 参考文献

- [1] 刘敏英, 郑子成, 李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体的分布特征及稳定性研究. 茶叶科学, 2012, 32(5): 402—410  
Liu M Y, Zheng Z C, Li T X. Study on the composition and stability of soil aggregates with different tea plantation age (In Chinese). Journal of Tea Science, 2012, 32(5): 402—410
- [2] 孙艳, 王益权, 刘军, 等. 日光温室蔬菜栽培对土壤团聚体稳定性的影响——以陕西省泾阳县日光温室土壤为例. 土壤学报, 2011, 48(1): 168—174  
Sun Y, Wang Y Q, Liu J, et al. Effects of solar greenhouse vegetable cultivation on soil aggregates stability—A case study of solar greenhouse soil in Jingyang County, Shanxi Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(1): 168—174
- [3] 王丽, 李军, 李娟, 等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响. 应用生态学报, 2014, 25(3): 759—768  
Wang L, Li J, Li J, et al. Effect of tillage rotation and fertilization on soil aggregates and organic carbon content in corn field in Weibei highland (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(3): 759—768
- [4] 朱锡明, 韩春爽, 姜玉杰, 等. 土壤有机碳稳定性的影响. 中国农学通报, 2014, 30(21): 29—34  
Zhu X M, Han C S, Lou Y J, et al. The effect of the stability of soil organic carbon (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(21): 29—34
- [5] Barreto R C, Madari B E, Maddock J E L, et al. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO<sub>2</sub> in the surface layer of a rhodic ferralsol in southern brazil. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 132(3/4): 243—251
- [6] 史奕, 陈欣, 沈善敏. 土壤团聚体的稳定机制及人类活动影响. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1491—1494  
Shi Y, Chen X, Shen S M. Stable mechanisms of soil aggregate and effects of human activities (In Chinese).

- Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13 (11): 1491—1494
- [ 7 ] An S S, Darboux F, Cheng M. Revegetation as an efficient means of increasing soil aggregate stability on the Loess Plateau (China). *Geoderma*, 2013, 209/210: 75—85
- [ 8 ] 孙蕾, 王益权, 张育林, 等. 种植果树对土壤物理性状的双重效应. *中国生态农业学报*, 2011, 19 (1): 19—23
- Sun L, Wang Y Q, Zhang Y L, et al. Dual effect of fruit tree cultivation on soil physical characteristics (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19 (1): 19—23
- [ 9 ] 石宗琳, 王益权, 冉艳玲, 等. 渭北苹果园土壤有机碳库变异特征. *土壤学报*, 2013, 50 (1): 206—210
- Shi Z L, Wang Y Q, Ran Y L, et al. Variation of soil organic carbon pool in apple orchard in Weibei (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (1): 206—210
- [ 10 ] 魏彬萌, 王益权. 渭北果园土壤物理退化特征及其机理研究. *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 (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21 (3): 694—701
- [ 11 ] 郑必昭. *土壤分析技术指南*. 北京: 中国农业出版社, 2012
- Zheng B Z. *Soil analysis technology guide* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2012
- [ 12 ] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56 (3): 777—783
- [ 13 ] 刘文利, 吴景贵, 傅民杰, 等. 种植年限对果园土壤团聚体分布与稳定性的影响. *水土保持学报*, 2014, 28 (1): 129—135
- Liu W L, Wu J G, Fu M J, et al. Effect of different cultivation years on composition and stability of soil aggregate fraction in orchard (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28 (1): 129—135
- [ 14 ] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. *科学通报*, 1993, 38 (20): 1896—1899
- Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Using weight distribution of soil particle size to express soil fractal features (In Chinese). *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38 (20): 1896—1899
- [ 15 ] Шейн Курс Е В. *физики почв*. Издательство Московского университета, 2005
- [ 16 ] 李霄云, 王益权, 孙慧敏, 等. 有机污染型灌溉水对土壤团聚体的影响. *土壤学报*, 2011, 48 (6): 1125—1132
- Li X Y, Wang Y Q, Sun H M, et al. Effects of irrigation water polluted with organic contaminants on soil aggregates (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (6): 1125—1132
- [ 17 ] 董莉丽. 不同土地利用类型下土壤水稳性团聚体的特征. *林业科学*, 2011, 47 (4): 95—100
- Dong L L. Characteristics of soil water stable aggregates under different land-use types (In Chinese). *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47 (4): 95—100
- [ 18 ] 王勇, 张建辉, 李富程. 耕作侵蚀对坡耕地土壤水稳性团聚体和水分特征的影响. *水土保持学报*, 2015, 29 (1): 180—185
- Wang Y, Zhang J H, Li F C. Tillage erosion influences on soil water-stable aggregate and moisture properties on the hillslope (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29 (1): 180—185
- [ 19 ] 张孝存, 郑粉莉, 王彬, 等. 不同开垦年限黑土区坡耕地土壤团聚体稳定性与有机质关系. *陕西师范大学学报 (自然科学版)*, 2011, 39 (5): 90—95
- Zhang X C, Zheng F L, Wang B, et al. The relationships between aggregate water stability and soil organic matter of slope land with different reclamation years in black soil region (In Chinese). *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2011, 39 (5): 90—95
- [ 20 ] 赵红, 吕贻忠. 保护性耕作对潮土结构特性的影响. *生态环境学报*, 2009, 18 (5): 1956—1960
- Zhao H, Lü Y Z. The effect of conservation tillage on the structural characteristics of Fluvo-aquic soil (In Chinese). *Ecology and Environment Sciences*, 2009, 18 (5): 1956—1960
- [ 21 ] Huang R Z, Li F, Zhai C H, et al. Impact of soil reservoir construction measures on soil aggregates characteristics in red soil orchard. *Journal of Nanchang Institute of Technology*, 2012, 31 (1): 44—50
- [ 22 ] 谭秋锦, 宋同清, 彭晚霞, 等. 峡谷型喀斯特不同生态系统土壤团聚体稳定性及有机碳特征. *应用生态学报*, 2014, 25 (3): 671—678
- Tan Q J, Song T Q, Peng W X, et al. Stability and organic carbon characteristics of soil aggregates under different ecosystems in karst canyon region (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25 (3): 671—678
- [ 23 ] Shi Z L, Li X Y, Zhang L, et al. Impacts of farmland

- conversion to apple (*Malus domestica*) orchard on soil organic stocks and enzyme activities in a semiarid loess region. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 178: 440—451
- [24] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响. *环境科学*, 2014, 35 (12): 4695—4704
- Li J L, Jiang C S, Hao Q J. Impact of land use type on stability and organic carbon of soil aggregates in Jinyun Mountain (In Chinese). *Environmental Science*, 2014, 35 (12): 4695—4704
- [25] 徐爽, 王益权. 不同类型土壤团聚体化学稳定性分析. *农业机械学报*, 2014, 45 (4): 173—178
- Xu S, Wang Y Q. Chemical stability of aggregates under different types of soil (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45 (4): 173—178
- [26] 魏彬萌, 王益权, 石宗琳, 等. 渭北苹果园土壤钙素退化状态. *中国农业科学*, 2015, 48 (11): 2199—2207
- Wei B M, Wang Y Q, Shi Z L, et al. Calcium degradation status of orchard soil in Weibei region, Shaanxi Province, China (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48 (11): 2199—2207
- [27] 布雷迪 N C. 土壤的本质与性状. 第8版. 南京农学院土化系译. 北京: 科学出版社, 1982: 38
- Brady N C. *The natural and properties of soils*. 8th ed. Department of Soil and Agricultural Chemistry, Nanjing Agricultural College. trans. Beijing: Science Press, 1982: 38
- [28] Edwards A P, Bremner J M. Micro-aggregates in soil. *European Journal of Soil Science*, 1900, 18 (1): 64—73
- [29] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamic of soil organic matter associated with particle-size fractions of water stable aggregate. *European Journal of Soil Science*, 2001, 51 (51): 595—605
- [30] 柯夫达 B A. 土壤学原理 (上册). 陆宝树, 周礼恺, 吴珊眉, 等译. 北京: 科学出版社, 1981: 239—246
- Ковда В А. Soil science principle (first volume) (In Chinese). Lu B S, Zhou L K, Wu S M, et al. trans. Beijing: Science Press, 1981: 239—246
- [31] 刘威, 张国英, 张静, 等. 2种保护性耕作措施对农田土壤团聚体稳定性的影响. *水土保持学报*, 2015, 29 (3): 117—122
- Liu W, Zhang G Y, Zhang J, et al. Effects of two conservation tillage measures on soil aggregate stability (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29 (3): 117—122
- [32] Chesters G, Attoe O J, Allen O N. Soil aggregation in relation to various soil constituents. *Soil Science Society of America Journal*, 1957, 21 (3): 272—277
- [33] Boix-Fayos C, Calvo-Cases A, Imeson A C, et al. Influence of soil properties on the aggregation of some mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. *Catena*, 2001, 44 (1): 47—67
- [34] Fang Y, Zhang M, Sun Y, et al. Soil organic carbon fractions and aggregate stability in carbonated and no carbonated soils in tunisia. *Agronomy Journal*, 2008, 7 (2): 127—137
- [35] Virto I, Gartzia-Bengoetxea N, FernÁNdez-Ugalde O. Role of organic matter and carbonates in soil aggregation estimated using laser diffractometry. *Pedosphere*, 2011, 21 (5): 566—572

## Status and Evolution of Soil Aggregates in Apple Orchards Different in Age in Weibei

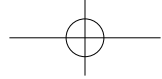
SHI Zonglin<sup>1, 2</sup> WANG Jiaxu<sup>1</sup> LIANG Huaxue<sup>1</sup> SHI Hongping<sup>1</sup> WEI Binmeng<sup>3</sup> WANG Yiquan<sup>1†</sup>

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

(2 Department of Life Science, Hengshui University, Hengshui, Hebei 053000, China)

(3 Shaanxi Land Construction Group, Xi'an 710075, China)

**Abstract** 【Objective】 The semiarid region of Weibei is identified as one of the best “eugenic” apple-producing areas in China, owing to its unique eco-environmental conditions. Since the 1980, Weibei has adjusted its agricultural structure by converting large areas of farmland into apple orchard, in order to improve local ecological landscape and economy. But this change in land-use and implementation of a series of unscientific orchard managements (e.g., inappropriately increasing the application of inorganic fertilizers



and pesticides) has led to soil quality degradation, such as declining soil micro-ecosystem biodiversity, soil nutrient imbalance, and their subsequent impacts on yield and quality of the fruit getting more and more significant with increasing age of the apple orchards. Soil aggregates and their stability influence a wide range of soil properties, including carbon stabilization, soil porosity, water infiltration, bulk density, water erosion resistance, etc. Aggregate stability is an issue that has been a focus of increasing attention in recent years as one of the soil properties that can serve as an important indicator of soil quality. So it is necessary to study status and evolution of soil aggregates as affected by changes in land use and management practice and ongoing cultivation as apple orchard in an attempt to provide a scientific basis for maintaining sustainable development of the apply industry and the ecology in the region. **【Method】** In this study, two apple orchards different in age (10a, juvenile and 21a, over-mature) and a tract of farmland nearby were selected in the semiarid loess region of Weibei, Bin country, Shaanxi, China as objects for investigation of soil aggregates in the 0 ~ 40 cm soil layer. Soil samples collected from the sampling lots were analyzed for fractionation of soil aggregates with the dry-sieving and wet-sieving methods, and so for soil basic properties, and soil aggregate stability and correlation between the two. **【Result】** Results show that the fraction of < 0.25 mm micro-aggregates dominated in the soil layers of the apple orchards and farmland (CK). The topsoil (0 ~ 20 cm) in the apple orchards displayed a pronounced aggregation trend with age, which was embodied in significant increase in content of > 0.25 mm soil aggregates ( $DSAC_{0.25}$ ), mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) and decrease in fractal dimension ( $D$ ), content of 10 ~ 0.25 mm and 5 ~ 1 mm valuable aggregates and coefficient of aggregate ( $K_{CTP}$ ). The composition of water-stable soil aggregates in the soil of Weibei, about 60% was < 0.25 mm soil micro-aggregate. In terms MWD, GMD and  $WSAC_{0.25}$  of water-stable soil aggregates in the 0 ~ 30 cm soil layer, an decreasing order of CK > Orchard of 10a > Orchard of 21a was found, and the trend was getting more and more obvious with increasing orchard age. Soil water stable aggregates, soil structure, erosion resistance and fertility retention ability in the 0 ~ 30 cm soil layer of apple orchards decreased with increasing orchard age.  $WSAC_{0.25}$  was significantly lower than  $DSAC_{0.25}$ . Destruction rate of > 0.25 mm soil aggregates ( $PAD_{0.25}$ ) also significantly increased with increasing orchard age, and the increase declined in extent with soil depth. Correlation analysis shows that soil total organic carbon (TOC), and particulate organic carbon (POC) was closely related to various indices of mechanically-stable soil aggregates, while soil  $CaCO_3$  content and clay content were significantly related to a number of indexes of water-stable soil aggregates, and  $PAD_{0.25}$  to soil physical and chemical properties. **【Conclusion】** Orchard plantation apparently increases the content of mechanically-stable soil macro-aggregate content in the 0 ~ 20 cm, soil aggregation level, and hence its resistance to wind erosion, but significantly reduces agronomical quality and stability of soil aggregates. The significant degradation of agronomical quality of soil aggregates in apple orchards is directly related to the decrease in soil organic matter and  $CaCO_3$  content in the soil. It is, therefore, recommended that in this semiarid region, more input of easy-to-decompose organic manure, and appropriate soil management measures be adopted to improve stability of the soil in structure, solve the problem of soil degradation in orchards, and promote sustainable development of the apple industry in the region.

**Key words** Apple orchard; Planting age; Soil aggregate status; Soil aggregate stability

(责任编辑：檀满枝)