

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.02.019

郭鸿鑫, 孙崇玉, 孙立强, 等. 长期梨树种植土壤团聚体组成及有机碳分布特征. 土壤, 2022, 54(2): 351–357.

长期梨树种植土壤团聚体组成及有机碳分布特征^①

郭鸿鑫, 孙崇玉*, 孙立强, 包先明, 洪秀萍

(淮北师范大学生命科学学院, 安徽淮北 235000)

摘要: 为探究长期梨树种植土壤团聚体结构及其对土壤有机碳的影响, 以砀山县良梨镇共 12 个年限的梨树土壤为研究对象, 以果园附近农田土壤为对照, 分析不同梨树种植年限土壤(0~20 cm)的团聚体粒级分布、土壤及各团聚体组分有机碳含量的动态特征。研究表明: 随着种植年限的增加, 土壤大团聚体(>0.25 mm)含量呈先上升后略有下降并趋于稳定的趋势, 种植 150 a 处取得最大值达到 798.8 g/kg。梨园土壤总有机碳含量、大团聚体有机碳含量相较对照农田土壤显著提高($P<0.05$), 分别提高了 1.45 倍和 2.24 倍, 而微团聚体(<0.25 mm)有机碳含量显著下降。各个年限梨园土壤有机碳主要由大团聚体贡献, 贡献率为 68.06%~98.78%, 相较农田土壤(39.76%)贡献率提高 28.3%~59.02%; 微团聚体的贡献率随着年限的增加而下降, 表明梨园的长期种植促使有机碳从微团聚体向大团聚体分配。土壤大团聚体含量与有机碳含量呈极显著正相关($P<0.01$), 均随着种植年限的增加先上升后下降至稳定趋势。表明梨园种植有利于改善土壤结构, 增加土壤的固碳潜力。

关键词: 梨园种植; 土壤团聚体; 有机碳分布; 贡献率

中图分类号: S152.4 **文献标志码:** A

Aggregate Composition and Organic Carbon Distribution in Long-term Pear Planting Soil

GUO Hongxin, SUN Chongyu*, SUN Liqiang, BAO Xianming, HONG Xiuping
(College of Life Science, Huaibei Normal University, Huaibei, Anhui 235000, China)

Abstract: In order to explore aggregate structure of long-term pear planting soil and its effect on soil organic carbon, pear planting soils in Liangli Town, Dangshan County, which has a total of 12 years from 10 to 300 years, were used as the research object, and the farmland soil near pear orchard was used as a control. Soil aggregate size distribution (0–20 cm), organic carbon contents in soils and aggregates were studied in order to explore the correlation between soil aggregates and organic carbon for long-term pear planting. The results showed that with the increase of planting years, the content of soil macro-aggregates (>0.25 mm) increased first, then decreased slightly and tended to stabilize, reached a maximum value (798.8 g/kg) in 150 years. The contents of soil total organic carbon and organic carbon of macro-aggregates significantly increased by 1.45 times and 2.24 times respectively compared with the control ($P<0.05$), while organic carbon content of micro-aggregates (<0.25 mm) decreased significantly. Soil organic carbon was mainly contributed by large aggregates, with the contribution rate of 68.06%–98.78%, which was 28.3%–59.02% higher than that of control (39.76%). The contribution rate of micro-aggregate decreased with year, indicating that the long-term pear planting promoted the distribution of organic carbon from micro-aggregate to macro-aggregate. There was a significant positive correlation between the contents of macro-aggregates and organic carbon ($P<0.01$), and they all increased first and then decreased to a stable trend with year. It shows that pear planting is beneficial to improve soil structure and increase carbon sequestration potential of the soil.

Key words: Pear planting; Soil aggregate; Organic carbon distribution; Contribution rate

长期植果过程中的土壤质量演变一直是土壤科学关注的热点, 长期的种植年限会显著影响土壤的结 构组成, 主要体现在对土壤团聚体的粒径组分和稳定性的影响^[1-3]。大量研究表明, 土壤团聚体的粒径组

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41902172)、安徽省高等学校科学研究一般项目(KJ2020B19)和安徽高校科研平台创新团队项目(KJ2015TD001)资助。

* 通讯作者(sunchongyu01@163.com)

作者简介: 郭鸿鑫(1998—), 男, 安徽淮北人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态研究。E-mail: 1397136067@qq.com

分随耕种年限的不同而呈现有规律的变化,耕种年限越长,大团聚体(>0.25 mm)的占比越高^[4-5]。土壤团聚体作为土壤结构的关键组成单元,是土壤中稳定性与非稳定性团聚体的总和,对土壤的孔隙度、持水性、透气性和抗腐蚀性都有着重要的影响^[6-7]。稳定性是团聚体结构的核心要素,研究土壤水稳态团聚体的结构状态和粒径组成是评价土壤结构性能的重要指标^[8]。

土壤团聚体的形成离不开多种形态胶结物质的促进过程,有机碳作为团聚体结构形成的骨架,是土壤结构的核心成分。土壤有机碳是地球碳循环的重要组成部分,是土壤质量的关键核心,土壤的固碳效果与耕种年限之间有明显的规律响应^[9]。研究表明,随着种植年限的提高,果园有机碳含量出现先增加后降低的趋势^[9],也有研究表明随着种植年限的增加,土壤有机碳含量在逐渐减小^[10]。土壤有机碳可以促进土壤水稳性团聚体的形成^[11-13],不同粒径的团聚体中有机碳的分布不同,DeGryze 等^[14]通过研究白杨演替土壤中团聚体与有机碳的关系,认为土壤有机碳主要由微团聚体(<0.25 mm)贡献,主要是因为微团聚体受到的破坏干扰较小,对有机碳具有良好的保护效果,有机碳在微团聚体中不易被分解^[15]。也有研究表明,土壤大团聚体有机碳含量高于微团聚体^[16-18],其原因在于大团聚体是来自微团聚体经菌丝和植物根系的聚合效果而形成,大团聚体中的有机碳状态活跃程度较高。因此,探究长期种植对团聚体结构与有机碳累积之间的影响具有重要意义。

作为国家地理的标志性产品,砀山酥梨的种植有着数千年的悠久历史,到目前为止,砀山酥梨的产业体系已经成为当地的主要经济来源,年加工能力达 120 万吨,产品销往美国、新西兰等 20 多个国家^[19]。目前,国内对于长期的农田连作研究较为深入,而对于长期梨园种植对土壤结构稳定性,以及梨园土壤团聚体与有机碳的相关性研究还尚未见有报道。因此,本研究以砀山梨园土壤样品为研究对象,研究长期梨树种植土壤团聚体结构及其对土壤碳累积的影响,可以弥补砀山地区梨园生态系统中土壤结构和有机碳固持等方面研究的不足,旨在为砀山梨园的合理管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域选择在安徽省宿州市砀山县,砀山县位于安徽省的北部,地处暖温带半湿润季风气候区,年平均气温 14 ℃,年平均降水量约 773.6 mm,气候温

和,日照充足,无霜期长。本试验所采样梨树土壤位于砀山县良梨镇梨树王园区(34°25'N, 116°31'E),土壤类型为黄壤砂土,所种植的梨树品种均为酥梨,园区梨树种植执行统一施肥、人工授粉、除病虫害管理。研究区种植梨树前的土地使用方式为农田,所种作物为小麦,休耕 2 ~ 3 a 后开始种植梨树。研究区以百龄以上的梨树为主,所占面积约 67 000 m²,幼龄梨树(10 ~ 60 a)所占面积约 8 000 m²。研究区土壤基本理化性质如下:土壤 pH 7.82($m \pm V$: 1 : 2.5)、有机质 12.71 g/kg、全氮 0.77 g/kg、全磷 0.84 g/kg、有效磷 8.75 mg/kg、速效钾 104.39 mg/kg、土壤容重 1.35 g/cm³。

1.2 土样采集与分析

样品采集于 2020 年 7 月,通过查阅资料和与当地种植管理人员的询问调查,选择研究区内梨树种植 10、20、30、50、60、100、150、200、240、250、280、300 a 共 12 个年限的样地,根据梨园年限的实际情况并遵循科学原则,按照每个年限共取回 56 份土壤样品,同时选择临近的农田为对照样地。为了减少采样误差,所有研究样地选择地形条件、土壤类型均比较接近的区域。采样选择树体大小、树势基本一致的代表性梨树,避免梨树相互距离太近的干扰,所采集土壤样品的梨树间距在 20 m 以上,并且避开施肥点。以梨树为中心设置 2 m × 2 m 的正方形区域,在对角线上取点,每株以对角线方向距树干 1 m 设置 4 个采样点,去掉表层土壤与杂草,每点挖取 0 ~ 20 cm 深度的土壤,土样采用四分法进行均匀混合取对角两组作为一个土壤样品,避免挤压,放入自封袋内带回实验室进行自然风干并挑拣出植物残体和石块,保留筛分团聚体的土壤样品后,将其余土样磨碎过筛后保存用于测定。

土壤水稳定性团聚体粒径组分分离采用湿筛法^[6]进行。具体方法为:称取风干土块 100 g,按照土块自然裂隙掰成 1 cm 左右大小的土块,将其放置由 0.053、0.25、0.5、1、2 mm 合成的套筛的顶处(2 mm 处),使土块全部浸入到液面以下,静置 5 min 后用团粒结构仪(TPF-100)以 30 r/min 的速度进行筛分 5 min。筛分结束后,将每粒经筛上的团聚体冲洗到烧杯中,获得>2 mm、1 ~ 2 mm、0.5 ~ 1 mm、0.25 ~ 0.5 mm、0.053 ~ 0.25 mm、<0.053 mm 的水稳性团聚体。然后对烧杯中的团聚体在 60 ℃下进行烘干、称重,由此可获得各种粒径团聚体的成分含量,将各组分团聚体保留用于团聚体组分粒径有机碳的测定,土壤有机碳测定采用高温外热重铬酸钾氧化法。

团聚体对有机碳贡献率计算公式如下:

贡献率= $w(C_1) \times w(A_1) \times 100/w(C_2)$
式中： $w(C_1)$ 为某粒径层级土壤团聚体中有机碳含量(g/kg); $w(A_1)$ 为该粒径层级团聚体的含量(g/kg); $w(C_2)$ 为该样品土壤的总有机碳含量(g/kg)。

1.3 数据统计方法

使用软件 Microsoft Excel 2015 对数据进行初步处理,使用 SPSS 软件(Ver.25, 2017)对数据进行单因素方差分析和相关分析,使用 Sigma Plot 14.0 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 梨园长期种植土壤团聚体分布特征

在团聚体组分中,>0.25 mm 的团聚体粒径组分称之为大团聚体(macro-aggregate), <0.25 mm 的团聚体粒径组分称之为微团聚体(micro-aggregate)^[4]。由表 1 可知,梨园土壤以>2 mm 粒径团聚体为主,占 30.6%,随着梨树种植年限的增加,>2 mm 粒径团聚

体整体上呈先增加后下降的趋势,在种植 150 a 处含量达到最大值 576.2 g/kg,较对照农田提高了 173.3%。种植年限较短(10 ~ 50 a)的梨园土壤中>2 mm 团聚体的含量显著低于长期种植的土壤($P<0.05$)。粒径在 1 ~ 2 mm, 0.5 ~ 1 mm 和 0.25 ~ 0.5 mm 的团聚体均呈现出和 >2 mm 团聚体相对一致的规律性。随着梨园种植树龄的增加,土壤中的水稳性大团聚体(>0.25 mm)含量表现出先增加后降低至稳定趋势,于种植 150 a 处取得最大值 798.8 g/kg,相较 10 a 梨龄处土壤提高了 69.8%,自种植 200 a 之后的土壤大团聚体含量无显著差异。而微团聚体(<0.25 mm)的数量随着梨树种植年限增加呈降低趋势,在 0.053 ~ 0.25 mm 组分中,种植 10 ~ 50 a 梨园土壤的含量显著高于其他年限样品,种植年限较长的各梨园土壤之间无显著性差异;在<0.053 mm 组分中,除种植年限 20 a 梨园土壤外,其他年限土壤含量均显著低于对照农田的含量(318.3 g/kg)。

表 1 不同种植年限土壤水稳态团聚体粒径分布(g/kg)
Table 1 Distributions of soil water-stable aggregates with different pear planting years

种植年限 (a)	大团聚体				微团聚体	
	>2 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm	0.053 ~ 0.25 mm	<0.053 mm
10	140.0 ± 20.4 fgh	42.9 ± 4.1 e	105.4 ± 10.4 cde	182.1 ± 15.3 abc	381.6 ± 24.6 a	148.0 ± 14.6 cd
20	186.7 ± 1.5 defg	44.1 ± 0.5 e	88.1 ± 9.5 de	186.6 ± 10.2 ab	190.7 ± 8.9 bc	303.8 ± 8.7 ab
30	126.8 ± 66.9 gh	59.0 ± 10.1 abcde	149.5 ± 35.2 bc	193.6 ± 40.7 ab	242.5 ± 29.2 b	228.6 ± 9.7 bc
50	151.5 ± 20.6 fgh	38.3 ± 3.4 e	122.1 ± 16.5 cde	204.5 ± 13.2 a	329.3 ± 10.2 a	154.4 ± 10.3 cd
60	268.9 ± 8.2 cdef	70.2 ± 7.1 abcd	127.8 ± 4.0 bcd	162.9 ± 2.8 abc	185.3 ± 20.0 bc	184.9 ± 2.2 cd
100	277.8 ± 54.6 bcde	77.5 ± 12.4 ab	146.4 ± 19.9 bcd	188.9 ± 24.9 ab	171.6 ± 9.1 bc	137.7 ± 32.3 cd
150	576.2 ± 14.2 a	53.4 ± 1.3 bcde	97.9 ± 7.6 cde	71.3 ± 4.1 e	93.3 ± 15.5 d	108.1 ± 14.4 d
200	306.8 ± 41.0 bcde	83.3 ± 11.6 a	123.0 ± 21.6 cde	132.2 ± 18.1 bcde	184.3 ± 7.4 bc	170.4 ± 31.6 cd
240	416.9 ± 90.3 b	47.4 ± 4.3 de	94.6 ± 14.1 cde	128.0 ± 33.2 bcde	174.7 ± 15.0 bc	138.3 ± 35.1 cd
250	489.3 ± 0.4 a	44.6 ± 0.5 e	66.5 ± 3.7 e	70.1 ± 9.8 e	195.3 ± 10.7 bc	134.2 ± 12.1 cd
280	406.9 ± 69.3 bc	50.4 ± 3.7 cde	91.3 ± 11.4 cde	115.5 ± 18.0 cde	138.4 ± 23.0 cd	197.5 ± 53.9 cd
300	324.2 ± 62.4 bcd	72.6 ± 10.1 abc	99.3 ± 13.1 cde	140.3 ± 17.7 abcd	201.4 ± 27.6 bc	162.3 ± 51.4 cd
农田	210.8 ± 8.7 cdef	60.0 ± 2.6 abcde	200.1 ± 6.2 a	78.7 ± 10.2 de	132.1 ± 10.4 cd	318.3 ± 6.7 a

注：表中数据为平均值 ± 标准误；同列数据小写字母不同表示同一粒径团聚体不同种植年限土壤间差异达 $P<0.05$ 显著水平；农田为梨园土壤样品对照；下同。

2.2 梨园长期种植土壤团聚体中有机碳分布特征

由表 2 可知,全土的有机碳含量随着种植年限的增加而表现出先上升后下降至稳定状态,在种植 150 a 处显著高于其他年限。随着粒径的不断减小,10 ~ 300 a 的梨园土壤团聚体组分中的有机碳含量均表现出先增加后降低的变化趋势,在 1 ~ 2 mm 粒径组分中含量最高,微团聚体(<0.25 mm)中有机碳含量最低。不同种植年限对土壤团聚体内有机碳分布有显

著影响,梨园土壤各粒径组分有机碳含量均在种植 150 a 取得最大值,对照土壤团聚体组分的有机碳有显著升高($P<0.05$)。梨树种植初期(20 a 和 30 a),各粒径中有机碳含量都较低,随着梨园年限的增加,>2 mm 和 1 ~ 2 mm 两个大团聚体组分内有机碳含量变化显著($P<0.05$),呈增加趋势。对于>2 mm 粒径团聚体,有机碳含量在种植 150 a 取得最大值 13.3 g/kg,相较于对照农田和 10 a 梨园土壤分别提高了 104.6%

表 2 全土和不同粒径团聚体内有机碳含量(g/kg)
Table 2 Organic carbon contents in soils and different size aggregates

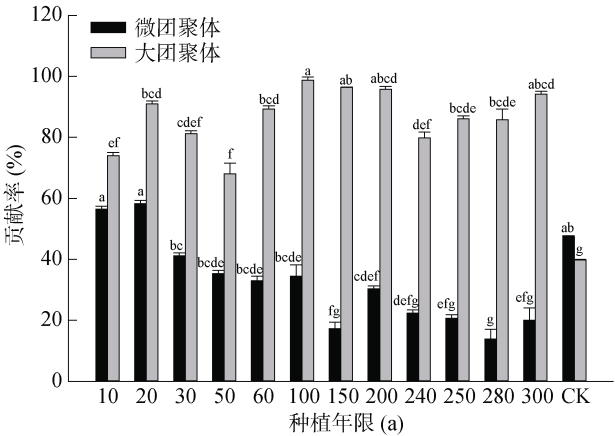
种植年限(a)	全土	>2 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm	0.053 ~ 0.25 mm	<0.053 mm
10	4.75 ± 0.13 e	8.6 ± 0.09 bc	6.7 ± 0.12 d	9.0 ± 0.12 ab	6.3 ± 0.18 bcd	4.0 ± 0.07 cd	7.9 ± 0.08 abc
20	4.58 ± 0.11 e	6.1 ± 0.06 c	12.9 ± 0.10 ab	10.2 ± 0.12 ab	8.4 ± 0.09 bc	2.5 ± 0.03 d	7.3 ± 0.14 bcd
30	5.78 ± 0.38 d	12.1 ± 0.44 ab	14.6 ± 0.44 a	10.4 ± 0.39 ab	8.5 ± 0.41 bc	4.4 ± 0.10 cd	5.2 ± 0.05 de
50	6.08 ± 0.32 cd	8.4 ± 0.10 bc	11.8 ± 0.13 abc	9.9 ± 0.14 ab	7.1 ± 0.44 bc	4.5 ± 0.14 cd	6.0 ± 0.13 de
60	6.06 ± 0.35 cd	11.7 ± 0.40 ab	13.1 ± 0.31 ab	10.9 ± 0.17 ab	8.4 ± 0.01 bc	6.0 ± 0.12 bc	5.2 ± 0.06 de
100	6.49 ± 0.42 bcd	11.4 ± 0.23 ab	13.2 ± 0.21 ab	10.4 ± 0.18 ab	7.7 ± 0.35 bc	8.1 ± 0.11 ab	6.8 ± 0.13 bcd
150	10.86 ± 0.45 a	13.3 ± 0.12 a	16.0 ± 0.07 a	12.0 ± 0.27 a	11.7 ± 0.36 a	9.1 ± 0.34 a	10.3 ± 0.12 a
200	7.15 ± 0.56 b	11.3 ± 0.16 ab	15.9 ± 0.25 a	9.9 ± 0.26 ab	9.1 ± 0.29 ab	6.1 ± 0.09 bc	5.6 ± 0.05 cde
240	6.75 ± 0.18 bcd	11.1 ± 0.14 ab	13.2 ± 0.18 ab	9.2 ± 0.28 ab	7.4 ± 0.58 bc	4.7 ± 0.14 cd	5.4 ± 0.14 cde
250	7.42 ± 0.10 b	8.2 ± 0.12 bc	10.0 ± 0.09 bcd	8.8 ± 0.06 abc	7.7 ± 0.05 bc	7.5 ± 0.12 ab	6.2 ± 0.15 cde
280	7.32 ± 0.41 b	11.6 ± 0.18 ab	12.3 ± 0.19 abc	8.1 ± 0.21 abc	6.8 ± 0.43 bc	4.1 ± 0.14 cd	4.4 ± 0.24 e
300	6.83 ± 0.40 bc	11.0 ± 0.26 ab	15.2 ± 0.33 a	11.7 ± 0.15 a	8.3 ± 0.15 bc	5.5 ± 0.12 bc	5.3 ± 0.10 cde
农田	6.35 ± 0.12 bcd	6.5 ± 0.04 c	8.5 ± 0.04 cd	5.0 ± 0.16 c	3.7 ± 0.18 d	3.4 ± 0.14 cd	1.5 ± 0.12 f

和 54.7%；对于 1 ~ 2 mm 粒径团聚体，种植 150 a 土壤有机碳含量最高达到 16.0 g/kg，相较于对照农田和 10 a 梨园土壤分别提高了 88.2% 和 138.8%。而在其他粒径较小的组分中，有机碳含量分布随种植年限的变化不显著。不同粒径团聚体中有机碳的分布于种植 250 a 处分布最均匀，极差值达到 3.8 g/kg；而种植 200 a 处分布范围最广，极差值达到 1.03 g/kg。

由图 1 可知，除对照农田外，所有种植年限的梨园土壤团聚体对有机碳贡献率均是大团聚体(>0.25 mm)高于微团聚体(<0.25 mm)。随着种植年限的增加，梨园土壤微团聚体对有机碳的贡献率呈现逐渐下降的趋势，梨树种植初期(10 a 和 20 a)，微团聚体对有机碳的贡献率显著高于其他年限($P<0.05$)，分别达到 56.46% 与 58.26%，之后呈逐渐下降的趋势，这主要是由于微团聚体含量随着种植年限的增加而下降的缘故；梨园长期种植，即种植 200 a 后的微团聚体对有机碳贡献率无显著变化，呈稳定趋势。大团聚体对有机碳的贡献率显著高于微团聚体，贡献率为 68.06% ~ 98.78%，相较农田土壤(39.76%)贡献率提高 28.3% ~ 59.02%，其中种植 100 a 处取得贡献率最大值为 98.78%。梨园种植初期(10 ~ 50 a)，大团聚体对有机碳的贡献率波动较大，然后逐渐趋于稳定，种植年限达 100 a 后的大团聚体对有机碳的贡献率无显著差异。

2.3 土壤大团聚体与有机碳变化特征

由表 3 可知，土壤大团聚体(>0.25 mm)含量与总有机碳含量之间存在极显著的正相关关系($P<0.01$)，而土壤微团聚体(>0.25 mm)含量与总有机碳含量之间存在极显著的负相关关系($P<0.01$)。



(图中小写字母不同表示不同种植年限土壤间差异达 $P<0.05$ 显著水平，下同)

图 1 不同种植年限土壤团聚体对有机碳贡献率
Fig. 1 Contribution rate of organic carbon in aggregates to soil total organic carbon

表 3 土壤总有机碳含量与团聚体含量的相关性
Table 3 Correlation between soil total organic carbon content and aggregate content

	SOC	大团聚体	微团聚体
SOC	1		
大团聚体	0.841**	1	
微团聚体	-0.841**	-1.000**	1

注：**表示相关性达 $P<0.01$ 显著水平。

由图 2 可知，随着种植年限的增加，梨园土壤有机碳含量和大团聚体含量有着相同的动态变化趋势，均表现出先增加后降低至稳定状态，二者在种植 150 a 处取得最大值，有机碳含量达到 10.8 g/kg，相较于对照农田土壤显著提高了 41.7% ($P<0.05$)；土壤大团聚体

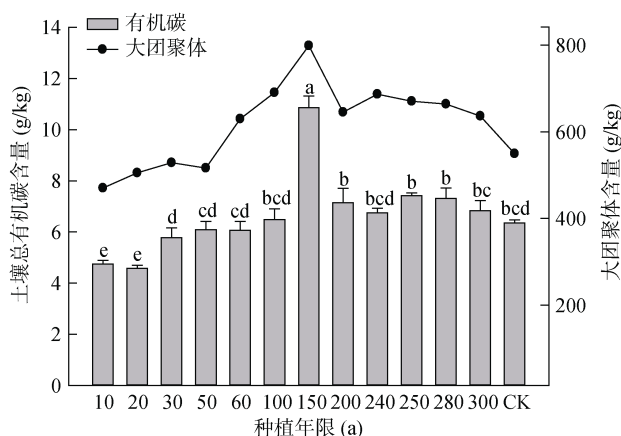


图2 不同种植年限土壤有机碳含量与大团聚体含量变化
Fig. 2 Content changes of soil organic carbon and macro-aggregates with year

含量达到 798.8 g/kg, 相较于对照农田土壤提高了 45.3%。这可能是由有机质含量变化导致, 有机质作为土壤团聚体组成中良好的胶结物质, 其含量变化影响着土壤微团聚体聚合为大团聚体的过程, 从而使团聚体为有机碳良好的贮存累积提供了较稳定的环境。梨园种植初期, 土壤大团聚体和有机碳含量有明显上升趋势, 土壤大团聚体含量在种植 10 a 处取得最小值; 土壤有机碳含量在 20 a 处取得最小值, 且与 10 a 处有机碳含量无显著性差异。种植 200 a 后的大团聚体含量与有机碳含量均无显著性差异变化。土壤种植年限的增加主要提升了种植 50 ~ 150 a 处的结构稳定性。

3 讨论

3.1 梨园长期种植对土壤团聚体粒径组分的影响

土壤团聚体是植物稳定生长发育的基础, 通常将土壤团聚体中高富含 >0.25 mm 的团聚体组成认为是较稳定的结构。土地的开垦翻耕等人为方式会破坏原生态土壤已形成的稳定的团聚体结构^[20], 但是随着作物的长期种植会对土壤的团粒组织有新一层次的聚合效果。刘晓利和何园球^[21]通过对荒地开垦为旱地、水田和菜园的团聚体组成研究指出荒地开垦会破坏土壤结构, 随着种植年限的增加, 土壤大团聚体含量组成会不断上升, 较长年限处的大团聚体含量会逐渐高于对照农田土壤的状态, 并且在最长 100 a 处取得最大值。本试验中选取的较短年限(10 ~ 50 a)土壤的大团聚体含量随着年限增加而增加(图 2), 但均属于年限较短的幼龄梨树团聚体结构稳定性较差, 其大团聚体含量均低于对照土壤; 随着种植年限的增加, 在种植 150 a 处取得最大值 798.8 g/kg (表 1), 并且自种植 100 a 开始梨树土壤的大团聚体含量高于对照农

田(图 2), 这与上述研究结果一致, 这主要是因为随着园区种植梨树数量与年限的增加, 土壤中根系生长繁密, 大大增加土壤的抗蚀性, 并且植物根系的分泌物可以促进土壤团聚体的聚合过程, 防止水土流失。随着种植年限的增加, 日益深邃的梨树根系对于改善土壤环境起到十分关键的作用。

本研究中种植年限 150 ~ 300 a 处土壤中大团聚体开始表现为先下降后趋于稳定状态(图 2), 目前有关种植年限的土壤研究还未达到 300 a 的土壤样品, 其大团聚体自 150 a 处下降可能是因为老龄梨树土壤有机质含量下降影响, 作为土壤团聚结构的凝结物质, 有机质是土壤结构形成的关键因子, 其分布与组成影响着土壤的团聚结构^[22]。而种植 200 a 后梨树土壤大团聚体含量变化保持稳定状态, 通过对研究区管理措施的研究而知, 可能是因为多年定期的修剪枝叶与打药除草, 加之梨园游客的踩踏行为, 会导致土壤缝隙减小、聚合度高而至紧实度增加, 其中对于老龄梨树更是表现较为明显, 这些因素导致老龄梨树的大团聚体含量保持稳定。

3.2 梨园长期种植对土壤有机碳含量的影响

随着荒地的开垦, 梨树的种植参与土壤结构的破坏与重建。梨树王园区的种植管理均有着规范的施肥和园林处理措施。在本研究中, 随着种植年限的增加, 土壤总有机碳含量均表现出先上升后下降的趋势, 在 150 a 处取得最大值 10.8 g/kg(图 2), 显著高于其他种植年限($P < 0.05$), 这可能是因为梨园生态环境系统中种植 150 a 的梨树属于黄金时期的壮龄梨树, 梨树的营养生长与生殖生长过程相对平衡旺盛, 枝繁叶茂的梨树生长必然伴随着大量枯枝落叶的还土过程, 从而导致土壤的肥力增加, 使得土壤有机碳维持在一个较高的水平。种植 10 ~ 20 a 的土壤有机碳含量显著小于农田土壤($P < 0.05$), 这主要是因为幼龄梨树的种植破坏了未开垦土壤原有的稳定团聚体结构, 不利于碳组分的固持效果, 使得有机碳含量的大量损失, 并且幼龄梨树的生长龄较短, 梨树生长主要在增加体内营养物质积累, 对土壤中的养分汲取程度较高, 并且枯落物较为稀少, 综合导致土壤有机碳含量较低。随着梨树种植年限的增加, 植物根系通过与微生物的共生效应而进行养分的吸收, 从而导致有机碳含量逐渐地恢复升高^[23-24]。自种植年限 150 a 后土壤有机碳含量呈下降趋势(图 2), 这可能是因为土壤有机碳含量变化同时依赖于外界的输入和系统循环的输出作用^[25], 在幼龄和壮龄期的梨树会给予充分的肥料供应水平, 自种植 200 a 后的梨树已属老龄梨树, 躯干组织已无

明显变化状态,果园管理过程中,追肥明显少于幼龄梨树,200 a 后的土壤有机碳含量处于相对较高水平,其原因可能在于高龄多年的落叶等有机物的回归土壤导致。李志军^[9]通过对新疆南部果园的有机碳研究得出:土壤有机碳含量随着种植年限的增加而表现出先上升后下降的趋势,盛果期的果树土壤有机碳含量取得最大值,高于老龄期和幼龄期。本试验的研究结果与此保持一致。

3.3 土壤团聚体结构在有机碳含量变化过程中的作用

土壤大团聚体的形成,主要依赖于团粒结构胶结物质的聚合作用,有机质作为关键的结构支连接着不同的团粒组织。李景等^[26]通过对河南豫西地区长期耕作试验地为研究对象,探究团聚体与有机碳的含量变化指出土壤中有机碳含量的变化与水稳性大团聚体的含量呈现出正相关的关系。本试验中,依据图 2 可知随着种植年限的增加,土壤有机碳含量与水稳性大团聚体含量的变化趋势保持一致状态,均在种植 150 a 处取得最大值,这与上述研究结果一致。大团聚体与有机质的相辅相成,是形成土壤良好肥力基础的重要关节,稳定的土壤结构对于土壤碳库的保持效果显著^[25]。

团聚体各粒径土壤有机碳含量分布随着种植年限变化,150 a 处的有机碳含量在各粒径层级中均为最高(表 2),这主要是因为 150 a 处土壤总有机碳含量显著高于其余各年限($P<0.05$),加上大团聚体含量在 150 a 处取得最大值,二者综合影响。陈晓芬等^[27]通过研究不同施肥处理对水稻土团聚体和有机碳的影响得出在不同施肥情况下团聚体 1~2 mm 组分的有机碳含量最高,并且有机碳主要由大团聚体贡献。易亚男^[28]通过对湖南红壤水稻团聚体及有机碳组分研究得出土壤有机碳主要分布在大团聚体处,且有机碳含量从大团聚体到微团聚体的过程中逐步减少。Six 等^[13]的研究也表明颗粒中的有机碳含量与大团聚体的有机结合碳之间有明显的正相关关系。本试验中测得团聚体有机碳含量在 1~2 mm 粒径中取得最大值(表 2), <1 mm 后随着粒径的减小有机碳含量也在逐步减小,团聚体有机碳含量主要分布在大团聚体处。同时根据图 1 贡献率分析可知,大团聚体是有机碳的主要贡献源,大团聚体对有机碳的贡献率与土壤大团聚体含量变化基本保持一致,种植年限对于团聚体中有机碳含量的影响主要是通过影响土壤大团聚体与微团聚体组成差别导致。微团聚体贡献率随着年

限的增加而下降,主要是因为微团聚体含量占比组成减少导致,所采集的梨园土壤样品有机碳贡献率微团聚体均低于大团聚体,这与李玮等^[15]、王兴等^[20]的研究结果一致。这主要是因为大团聚体是由微团聚体通过菌丝与植物根系聚合形成,微团聚体被认为是有机碳贮存的良好场所,长期种植年限的梨树在恢复过程中通过胶结物质的作用下可以促进土壤微团聚体的大量结合而成大团聚体,提升对有机碳的保护效果,以及随着种植年限推移,团聚体的稳定性效果增加,综合导致大团聚体中贮存的有机碳含量较高^[29]。种植 10 a 的土壤 <0.053 mm 粒径团聚体有机碳含量较高(表 2),可能是因为种植 10 a 的土壤团聚体结构稳定性较差,微团聚体占比 52.96%(表 1),并且种植年限 10 a 的土壤有机碳含量较低,为 4.76 g/kg(图 2),大部分土壤组织颗粒在水的分解作用下脱离原有的聚合组织,导致 <0.053 mm 粒径处的黏粒含量较高,容易形成有机碳复合体。

4 结论

1)梨园的长期种植可以有效提升土壤大团聚体的占比组成,土壤大团聚体含量随着种植年限的增加而表现出先上升后略有下降并趋于稳定,在 150 a 处取得最大值,达到 798.8 g/kg。

2)随着梨园种植年限的增加,土壤碳固持能力增加,团聚体有机碳含量均在 150 a 处取得最大值,团聚体对有机碳的贡献率主体为大团聚体,种植年限梨园土壤大团聚体对有机碳的贡献率为 68.06%~98.78%,而微团聚体的贡献率随着年限的增加而下降,梨园的长期种植促使有机碳从微团聚体向大团聚体分配。

3)土壤大团聚体含量与有机碳含量之间呈极显著的正相关性,良好的土壤团聚体结构有利于土壤有机碳的累积。梨园种植对于改善土壤结构、增加土壤碳储量有促进作用。

参考文献:

- [1] 赵红,袁培民,吕贻忠,等.施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响[J].土壤,2011,43(2):306-311.
- [2] 沈仁芳,颜晓元,张甘霖,等.新时期中国土壤科学发展现状与战略思考[J].土壤学报,2020,57(5):1051-1059.
- [3] Burdakovskii M, Kiseleva I, Perepelkina P, et al. Impact of different fallow durations on soil aggregate structure and humus status parameters[J]. Soil and Water Research, 2019, 15(1): 1-8.

- [4] 石宗琳, 王加旭, 梁化学, 等. 渭北不同园龄苹果园土壤团聚体状况及演变趋势研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 387–399.
- [5] 王涛, 何丙辉, 秦川, 等. 不同种植年限黄花生生物埂护坡土壤团聚体组成及其稳定性[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 153–158.
- [6] 张霞, 张育林, 刘丹, 等. 种植方式和耕作措施对土壤结构与水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 250–261.
- [7] Spohn M, Giani L. Water-stable aggregates, glomalin-related soil protein, and carbohydrates in a chronosequence of sandy hydromorphic soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(9): 1505–1511.
- [8] 何瑞成, 吴景贵, 李建明. 不同有机物料对原生盐碱地水稳性团聚体特征的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 310–316.
- [9] 李志军. 种植年限对新疆南部果园土壤养分及有机碳组分的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
- [10] 杜少平, 马忠明, 薛亮. 不同年限旱砂田土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1619–1625.
- [11] 曹寒冰, 谢钧宇, 王楚涵, 等. 不同施肥措施对旱地采煤塌陷区复垦土壤结构及玉米品质的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 251–257.
- [12] Smith R, Tongway D, Tighe M, et al. When does organic carbon induce aggregate stability in vertosols? [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 201: 92–100.
- [13] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(14): 2099–2103.
- [14] DeGryze S, Six J, Paustian K, et al. Soil organic carbon pool changes following land-use conversions[J]. Global Change Biology, 2004, 10(7): 1120–1132.
- [15] 李玮, 郑子成, 李廷轩, 等. 不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6326–6336.
- [16] 王勇, 姬强, 刘帅, 等. 耕作措施对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1365–1373.
- [17] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 不同施肥处理对黑垆土各粒级团聚体中有机碳含量分布的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 931–938.
- [18] 张艺, 戴齐, 尹力初, 等. 后续施肥措施改变对水稻土团聚体有机碳分布及其周转的影响[J]. 土壤, 2017, 49(5): 969–976.
- [19] 夏雪瑶. 砀山梨产业化发展研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2017.
- [20] 王兴, 钟泽坤, 张欣怡, 等. 长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2416–2424.
- [21] 刘晓利, 何园球. 不同利用方式和开垦年限下红壤水稳性团聚体及养分变化研究[J]. 土壤, 2009, 41(1): 84–89.
- [22] 史登林, 王小利, 段建军, 等. 氮肥减量配施生物炭对黄壤稻田土壤有机碳活性组分和矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4117–4124.
- [23] 章明奎, 郑顺安, 王丽平. 利用方式对砂质土壤有机碳、氮和磷的形态及其在不同大小团聚体中分布的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(8): 1703–1711.
- [24] 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 34–37, 117.
- [25] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 447–455.
- [26] 李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 378–386.
- [27] 陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(5): 950–960.
- [28] 易亚男. 不同施肥和地下水位管理对水稻土团聚体及有机碳组分的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, .
- [29] 刘均阳, 周正朝, 苏雪萌. 植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 267–273, 298.