

DOI: 10.5846/stxb202102190468

孙文泰, 马明, 牛军强, 尹晓宁, 董铁, 刘兴禄. 陇东雨养苹果覆膜对土壤团聚体结构稳定性与细根分布的影响. 生态学报, 2022, 42(4): 1582-1593.  
Sun W T, Ma M, Niu J Q, Yin X N, Dong T, Liu X L. Effects of film mulching on soil aggregate structure stability and fine root distribution of rain-fed apple in eastern Gansu. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1582-1593.

# 陇东雨养苹果覆膜对土壤团聚体结构稳定性与细根分布的影响

孙文泰\*, 马明, 牛军强, 尹晓宁, 董铁, 刘兴禄

甘肃省农业科学院林果花卉研究所, 兰州 730070

**摘要:** 不同的果园管理方式可影响果树根系生长、分布与土壤团聚体稳定性、有机碳固存, 进而改变“根-土”复合体响应关系。对西北陇东旱塬不同覆膜年限(2 a、4 a 和 6 a) 苹果园表层土壤(0—20 cm) 细根生长进行调查, 并采用干筛法和湿筛法相结合的方式对土壤团聚体进行分级(>2 mm, 0.5—2 mm, 0.25—0.5 mm 和 <0.25 mm)。计算团聚体稳定性参数[> 0.25 mm 机械稳定性团聚体含量( $DR_{0.25}$ )、> 0.25 mm 水稳性团聚体含量( $WR_{0.25}$ )、平均重量直径(MWD)、平均几何直径(GMD)、团聚体破坏率(PAD)、水稳系数(WSC)]和团聚体有机碳含量。分析细根生长与土壤物理结构对长期覆膜的响应, 探明土壤团聚体稳定性与有机碳固持关系, 揭示黄绵土物理结构稳定机制。结果表明: 6 a 处理通过增加表层土壤黏粒和物理性黏粒比例, 改变孔隙结构, 抑制细根生长, 其根量、根长和根表面积仅为对照(CK)的 20.97%、24.66% 和 41.25%; 降低表层土壤团聚体力稳性, 其  $DR_{0.25}$ 、机械稳定性团聚体 MWD 和 GMD 仅为 CK 的 82.2%、74.02% 和 59.38%; 对水稳性团聚体的保护作用低于短期覆膜(2 a), 其 PAD 和 WSC 为 2 a 处理的 121.17% 和 54.56%。2 a 处理可提高土壤团聚体的力稳性、水稳性和土壤团聚程度, 使土壤结构得到改善。同时对机械稳定性、水稳性团聚体有机碳提升效果优于 6 a 处理, 为 6 a 处理的 115.66% 和 116.6%。大团聚体固持有机碳能力高于微团聚体, 但由于长期覆膜团聚体稳定性的下降, 6 a 处理的  $DR_{0.25}$  为 CK 的 82.2%, 不利于对有机碳的保护, 使土壤有机碳水平对团聚体稳定性变异决定性仅为 29.55%。连续覆膜引发的频繁干湿交替增加了黏粒对土壤结构稳定性的影响权重, 促使表土“隐形”退化, 抑制苹果细根在表层土壤中的生长、分布。2 a 处理对土壤团聚体结构有良好的保护作用, 促进土壤有机碳累积。

**关键词:** 覆膜; 细根; 团聚体稳定性; 有机碳; 主成分分析

## Effects of film mulching on soil aggregate structure stability and fine root distribution of rain-fed apple in eastern Gansu

SUN Wentai\*, MA Ming, NIU Junqiang, YIN Xiaoning, DONG Tie, LIU Xinglu

Institute of Forestry, Fruits and Floriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China

**Abstract:** Different orchard management methods can affect the growth and distribution of fruit roots, the stability of soil aggregates and the ability of organic carbon storage, and then change the response relationship of root-soil complex. The fine root growth of apple orchard surface soil (0—20 cm) with different plastic film mulching years (2 a, 4 a, and 6 a) was investigated in the dry tableland of Longdong, Northwest China. The combination of dry and wet screening methods was used to classify soil aggregates (>2 mm, 0.5—2 mm, 0.25—0.5 mm, and <0.25 mm). The aggregate stability index, including [> 0.25 mm Mechanical stability aggregates content ( $DR_{0.25}$ ), > 0.25 mm water-stabled aggregates content ( $WR_{0.25}$ )],

**基金项目:** 国家自然科学基金(31760555); 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系(GARS-27); 农业农村部西北地区果树科学观测实验站(S-10-18)

收稿日期: 2021-02-19; 网络出版日期: 2021-11-04

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: swt830312@126.com

Mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), percentage of aggregate destruction rate (PAD), water stability coefficient (WSC), and the content of organic carbon were calculated. The response of soil physical structure and fine root growth to long-term film mulching was analyzed, the relationship between soil aggregate stability and organic carbon sequestration was explored, and the stability mechanism of physical structure of loess soil was revealed. The results showed that film-mulching six years inhibited fine root growth by increasing soil clay, the proportion of physical clay and changing pore structure, and the root weight, root length and root surface area were only 20.97%, 24.66% and 41.25% of conventional tillage (CK); The  $DR_{0.25}$ , MWD and GMD of surface soil aggregates were 82.2%, 74.02% and 59.38% of CK; The protective effect of PAD and WSC were 121.17% and 54.56% of film-mulching two years, compared with that of short-term film mulching. Film-mulching two years improved the force stability and water stability of soil aggregates as well as the degree of soil aggregates, and improved the soil structure. At the same time, the organic carbon improvement effect of mechanical stability and water stability aggregates was better than that of film-mulching six years, which was 115.66% and 116.6% of film-mulching six years. Although the ability of large aggregates to hold organic carbon was higher than that of micro aggregates, due to the long-term stability decline of coated aggregates, the  $DR_{0.25}$  of film-mulching six years was only 82.2% of CK, which was not conducive to the protection of organic carbon, so that the decisive effect of soil organic carbon level on the stability variation of aggregates was only 29.55%. The frequent dry-wet alternation caused by continuous film mulching increased the influence weight of clay particles on soil structural stability, promoted the invisible degradation of the topsoil, and inhibited the growth and distribution of fine roots of apple in the topsoil. Film-mulching two years had a good protective effect on soil aggregate structure and promoted soil organic carbon accumulation.

**Key Words:** film-mulching; fine roots; aggregate stability; organic carbon; principal component analysis

甘肃陇东苹果产区光热资源丰富、海拔高、昼夜温差大,是苹果优势主产区之一,属于典型的西北黄土高原雨养农业区<sup>[1]</sup>。土壤为黄绵土,常与黑垆土、褐土和灰钙土等交错存在。具有质地轻、疏松绵软和土层深厚的优点,但有机质含量低、团聚作用微弱,土壤利用不合理易发生土壤退化、水土流失。加之黄土高原气温变化剧烈,导致干湿交替频繁发生,土壤胀缩交替进行,使土壤物理结构难以得到进一步发育,稳定性差<sup>[2]</sup>,保蓄水肥能力下降。因此采取必要的保护措施,提高黄绵土团聚体稳定性对维护良好土壤结构、增加有机碳储量和提高地力起着至关重要的作用<sup>[3-4]</sup>。

不同的果园管理方式可有效改善土壤理化特性,利于果树根系生长,特别是覆膜可提高表层土壤贮水特性、减少土壤养分流失等<sup>[5]</sup>,但也有研究发现长期地膜覆盖会增加土壤剖面深层水分的消耗,土壤透气性下降,引发作物早衰等<sup>[6-7]</sup>。作者在甘肃省苹果主产区静宁县的长期定位试验中发现,果园长期覆膜后的苹果根系,特别是直径 $\leq 2$  mm的细根呈现根量大量减少、集中于表层土壤(0—20 cm)“表层化分布”;随连续覆膜年限的延长,地温变化剧烈,节水保墒效果不稳定,尤其在苹果树大量需水的年生长周期中后期,亚表层土壤含水量下降,孔隙结构破坏,有机质含量降低,不利于根际土壤水肥保蓄;同时根系的大量减少,势必降低其对土壤结构的稳固作用及碳输入。这对土壤肥力低、稳定性差、生态环境脆弱的黄土高原苹果产区,形势尤为严峻。

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其抵抗外部环境变化、保持原有形态的能力是土壤质量或土壤健康的重要评价指标<sup>[8-9]</sup>,包括水稳定性、力学稳定性、化学稳定性、生物稳定性和酸碱稳定性等。受土壤质地、水分等内在理化性状的影响,团聚体结构的破坏引发土壤“隐形”退化<sup>[10]</sup>。顾汪明<sup>[11]</sup>指出随着土壤初始含水量的增加,土壤团聚体组成改变,平均重量直径、团聚体破坏率发生显著变化,团聚体水稳定性降低,削弱了土壤的抗侵蚀能力。马建辉等<sup>[12]</sup>表明在设施蔬菜栽培中,干湿循环促进土体收缩,土壤孔隙中空气被压缩产生巨大压力,迫使土体裂解,团聚体结构破坏,设施土壤发生质量退化。根系应对土壤环境变化可进行动态调整,优化资源分配,同时还可通过交错、穿插、固结、根土黏结等作用,改善土壤理化特性,促进团聚体形成<sup>[13]</sup>。因

此根系作为连接植物地上与地下部分的纽带,造就土壤物理结构差异。耿韧等<sup>[14]</sup>指出农地、草地与林地团聚体稳定性除与根系质量密度显著相关外,均受年均降水量的显著影响。水分是导致团聚体破碎的主要因素。目前多将水稳性团聚体的分布规律作为评价团聚体质量的标准<sup>[15-16]</sup>。但陇东旱塬全年9—10个月无降雨,土壤长期处于干旱状态,80%以上地区无灌溉条件<sup>[17]</sup>。因此,将团聚体力稳性与水稳性研究相结合,完善对西北旱地苹果园土壤结构质量评价。

探索长久单一土壤管理措施下土壤质量演变规律,防止土壤物理退化对农业可持续发展极其重要。当前对土壤结构研究主要集中于不同土壤耕作和施肥方式下农田、林地的土壤团聚体及有机碳差异<sup>[18-20]</sup>,针对不同覆膜年限的保墒措施下土壤质量水平变化趋势,尤其蒸发严重的表层土壤结构稳定性与苹果根系生长互作关系研究较少。为完善西北黄土高原雨养农业区普遍应用的保墒技术—覆膜的根域环境调控机制,明确表层土壤物理质量演化与根系生长发育的响应关系,应进一步探明土壤物理退化在连续覆膜影响下的变化趋势与进程,对本地区苹果产业及土壤健康的可持续发展具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于甘肃省平凉市静宁县国家苹果产业体系平凉综合试验站内,试验园(35°24'N,105°43'E)面积3.34 hm<sup>2</sup>,海拔1561 m,年均降雨量450—550 mm(春夏连旱,7—9月降雨量占全年70%以上),年蒸发量1531 mm。年均日照时数2238 h,无霜期159 d,年平均气温7.1℃,属北温带大陆性气候区。土壤为黄绵土,属粉砂质壤土,pH值7.6—8.9,土层深厚,有机质含量低,吸水力强,但水分蒸发快,深层土壤水调节作用较差,团聚作用微弱,易受侵蚀(表1)。

试验材料为同一果园18 a红富士苹果树,品种‘长富2号’[‘Nagano Fuji No.2’ apple],砧木山定子[M. baccata (L.) crab apple],株行距4 m×5 m。设置清耕(未覆膜,CK)、覆膜2 a、覆膜4 a、覆膜6 a 4个处理。处理1为清耕(CK);其他均为覆膜处理,由距离主干0—1.5 m范围内覆盖黑色地膜(膜厚0.02 mm,膜宽1.5 m)。行间免耕,留约1 m左右操作行,为试验进行,冬季不撤膜,如有破损及时更换新膜。各处理选取树冠大小相似、生长一致的健壮植株,单株小区,每处理5次重复,各处理间设置保护行(清耕)。选择标准为树冠直径在5.5—4.8 m之间,树高在3.5—4.0 m之间,主干高度在0.8—1.0 m之间。各处理其他栽培管理一致。

表1 试验区土壤理化性状

Table 1 Soil physico-chemical properties in test area

项目 Item	0—20 cm	项目 Item	0—20 cm
全氮 Total nitrogen/(g/kg)	1.27	速效钾 Available K/(mg/kg)	377.04
全磷 Total phosphorus/(g/kg)	1.12	pH	8.35
全钾 Total potassium/(g/kg)	16.86	黏粒 Clay/%	9.7
有机质 Organic matter/(g/kg)	14.69	物理性黏粒 Physical clay particles/%	56.75
碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen/(mg/kg)	96.25	压实密度 Compacting density/(g/cm <sup>3</sup> )	2.18
速效磷 Available P/(mg/kg)	47.3		

### 1.2 试验方法及测定

2019年苹果根系发根高峰(果实采后至落叶)采用土壤剖面法系统调查根系分布,于树干中心位置开始沿垂直行向方向挖长1.5 m,宽30 cm,深40 cm(20 cm一层)的观测沟,采集根系(依次调查顺行向距离主干30、60、90、120、150 cm处剖面的根系),每次采样5次重复,每重复1株树。在观测沟剖面上画30 cm×30 cm网格线,将每个网格所在土壤区块内20 cm×30 cm×30 cm的根系分层取出,将取出的整株根系用去离子水洗去表面土壤装入标记好的密封袋,用保鲜盒带回实验室。应用EPSON Expression根系扫描系统与WINRHIZO根系分析软件采集根系形态数据。根系扫描分析时将根系小心清洗干净,迅速放入装有蒸馏水的

无色透明塑料水槽内,同时用镊子调整根系相对位置,以避免根系之间的相互交叉和重叠。测量、计算根系数量、根长、表面积、比根长和根长密度等;细根( $R \leq 2$  mm)在 105 °C 下进行杀青 30 min,80 °C 恒温下烘干至恒质量,测定根系生物量。

根系比根长和根长密度计算公式如下:

$$\text{比根长 (cm/g)} = \text{总根长} / \text{干质量} \quad (1)$$

$$\text{根长密度 (cm/cm}^3\text{)} = \text{总根长} / \text{土样体积} \quad (2)$$

为描述根系分布,采用 Gale 和 Grigal 提出的基于渐进方程式的根系垂直分布模型<sup>[21]</sup>:

$$Y = 1 - \beta^d \quad (3)$$

式中, $Y$  为从地表到深度  $d$  的根系根长累计分数(分数值在 0—1 之间); $d$  为土层深度(cm); $\beta$  为根系根长削弱系数。 $\beta$  高说明根系在深层土壤中分布比例大; $\beta$  低则说明根系集中分布于接近地表的土层中。还可以通过此方程计算  $D_{30}$  和  $D_{50}$ ,分别表示细根根长累积 30% 和 50% 时的深度。

采样时将土壤表面植被与枯草小心铲除,每处理(20 m×15 m)采集表层土壤(0—20 cm)样品,随机选择 5 个取样点,然后将土壤样品均匀混合为 1 个土样约 1 kg,装入硬质盒中运回室内风干,在风干过程中剔除其中的动、植物残体,并沿自然裂隙分成直径 1 cm 左右的小土块,待充分风干后用于土壤团聚体研究。采用干筛法和湿筛法<sup>[22]</sup>分离土壤团聚体,共分为 >2 mm、0.5—2 mm、0.25—0.5 mm 和 <0.25 mm 4 种级别团聚体。并根据 Tisdall 等<sup>[23]</sup>分级方法,把 >0.25 mm 粒级的团聚体称为大团聚体(macro-aggregate); <0.25 mm 粒级的团聚体称为微团聚体(micro-aggregate)。每处理团聚体重复测定 3 次,取平均值;同时采集土样,借助激光粒度分析仪(Mastersizer 2000, Malvern Instruments, Malvern, England)测定土壤机械组成,每个采样点 3 次重复,取平均值。

团聚体稳定性用平均质量直径(mean weight diameter, MWD)、平均几何直径(geometric mean diameter, GMD)、团聚体破坏率(percentage of aggregate decomposition, PAD)、水稳系数(water stability coefficient, WSC)表示,对于 > 0.25 mm 的团聚体用指标  $R_{0.25}$  进行评价,计算公式如下:

$$R_{0.25} = \sum_{i=1}^n W_i \quad (4)$$

平均重量直径(MWD):

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (5)$$

式中, MWD 为平均质量直径,mm; $X_i$  为第  $i$  个孔径筛和第  $i+1$  孔径筛的孔径平均值,mm; $i$  为第  $i$  孔径筛上烘干团聚体质量百分比;平均几何直径(GMD):

$$\text{GMD} = \text{Exp} \left[ \frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (6)$$

$X_i$  为  $i$  组团聚体直径的中值, $W_i$  为  $i$  组团聚体的含量;

团聚体破坏率(PAD):

$$\text{PAD} = 100 \times (DR_{0.25} - WR_{0.25}) / DR_{0.25} \quad (7)$$

水稳系数(WSC):

$$\text{WSC} = 100 \times WR_{0.25} / DR_{0.25} \quad (8)$$

筛分后的各团聚体土壤风干后通过重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)<sup>[24]</sup>;

团聚体中有机碳贡献率计算

$$C_{\text{soc}} = 100\% \times G_s \times C / M_c \quad (9)$$

式中, $C_{\text{soc}}$  为团聚体中有机碳贡献率(%), $G_s$  为该级别团聚体中有机碳含量, $C$  为该级别团聚体的含量(%), $M_c$  为总有机碳含量。

### 1.3 数据处理

采用 WPS 软件计算根系数量、根长、表面积、土壤团聚体分级比例、有机碳含量等,利用 SPSS 21.0 软件对数据进行统计分析,采用单因素方差分析和 LSD(least significant difference)检验在 0.05 水平上进行不同处理下表层土壤根系、土壤物理性状、土壤质地、土壤团聚体及稳定性、有机碳含量等指标的差异显著性;对细根生长、土壤物理性状与各土壤团聚体稳定性指标、有机碳含量进行 Pearson 相关性分析;对与土壤团聚体稳定性相关的土壤物理性状、根系数量、形态性状进行主成分分析;图表中数据为平均值±标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同覆盖处理表层土壤细根分布

细根数量反映了其占有土壤空间变化;根长和根系表面积表征细根吸收功能。由表 2 可知,细根数量、根长和根表面积变化趋势一致,各覆膜处理均表现抑制作用,以长期覆膜(6 a)处理最显著( $P < 0.05$ ),根量、根长和根表面积仅分别为 CK 的 20.97%、24.66% 和 41.25%。通过对根系垂直分布模型的根系削弱系数  $\beta$  及  $D_{30}$ 、 $D_{50}$  的分析,从量化角度揭示细根垂直分布对不同覆膜年限的响应差异。结果表明(表 3),短期覆膜(2 a)可加大细根垂直分布深度,促进细根下扎,因此在表层土壤中表现为细根减少。随覆膜年限增长,根系削弱系数( $\beta$ )下降,根系集中分布层逐渐上升。4 a 和 6 a 处理均减小了根系集中分布深度,6 a 处理的 50% 细根分布于 0—29.27 cm 土层中,0—20 cm 土层细根数量仅占 CK 的 20.97%。可见,6 a 处理对苹果细根生长的抑制作用不仅局限于细根的垂直分布特征,还大大降低了细根的总量。

表 2 不同覆盖处理表层土壤苹果细根根系分布差异

Table 2 The distribution of fine roots of apple in topsoil under different mulching treatments was different

处理 Treatments	根量 Root number/NO	根长 Root length/cm	根表面积 Root surface area/cm <sup>2</sup>
CK	172441±4041.83a	36690.20±1882.87a	4289.63±59.89a
2 a	130941±4060.25b	26282.31±6453.39b	3263.16±151.54b
4 a	103403±4660.29c	19257.98±1246.87c	2168.46±92.76c
6 a	36162±2733.18d	9046.08±386.76d	1769.34±61.67d

同列内不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著

表 3 不同覆盖处理苹果细根根系垂直分布模型及削弱系数

Table 3 Vertical distribution model and weakening coefficient of fine roots of apple under different mulching treatments

项目 Item	CK	2 a	4 a	6 a
模型 Model	$Y = 1 - 0.9737^d$	$Y = 1 - 0.9859^d$	$Y = 1 - 0.9786^d$	$Y = 1 - 0.9766^d$
根系削弱系数 $\beta$ Root weakening factor	0.9737±0.0055b	0.9859±0.0056 a	0.9786±0.0032b	0.9766±0.0022b
$D_{30}$ /cm	23.38	34.14	16.49	15.06
$D_{50}$ /cm	36.01	48.81	32.04	29.27

$D_{30}$ 代表 30%根系根长分布深度(cm); $D_{50}$ 代表 50%根系根长分布深度(cm);根系削弱系数  $\beta$  为根系根长削弱系数,通过计算得出; $\beta$  越大说明根系在深层土壤中分布比例大; $\beta$  越小则说明根系集中分布于接近地表土层;同行内不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著

### 2.2 不同覆盖处理表层土壤团聚体分级及稳定性

测试土壤干筛结果显示(表 4),2 a 处理显著提高了 < 2 mm 机械稳定性团聚体比例,而 6 a 处理显著降低了 > 0.5 mm 机械稳定性团聚体比例( $P < 0.05$ ),分别提高 0.5—0.25 mm 和 < 0.25 mm 机械稳定性团聚体比例( $P < 0.05$ ),微团聚体相比 CK 提高了 121.9%。土样经过加水震荡,> 2 mm 团聚体破碎,水稳性微团聚体比例降低,而 0.25—2 mm 水稳性团聚体比例增大。2 a 处理的水稳性微团聚体比例最低,仅为 CK 的 82.57%,水稳性大团聚体比例增加,为各处理最高( $P < 0.05$ )。

表 4 不同覆盖处理表层土壤团聚体分布差异

Table 4 The distribution of surface soil aggregates was different under different mulching treatments

项目 Item	处理 Treatments	大团聚体 Macro-aggregate/%			微团聚体 Micro-aggregate/%
		>2 mm	2—0.5 mm	0.5—0.25 mm	<0.25 mm
机械稳定性团聚体 Mechanical-stable aggregates	CK	32.12±1.39a	44.04±1.27b	10.65±0.58c	12.83±0.71c
	2 a	20.91±0.94b	46.87±0.79a	17.34±0.62 a	14.65±0.31b
	4 a	32.62±1.22 a	43.98±1.05b	14.44±0.41b	8.89±0.10d
	6 a	15.77±0.74c	38.79±0.24c	16.78±0.31a	28.47±1.70a
水稳性团聚体 Water-stable aggregates	CK	ns	3.05±0.06c	10.45±0.20d	86.07±0.30a
	2 a	ns	10.18±0.78a	18.75±0.24 a	71.07±1.47c
	4 a	ns	2.88±0.12c	11.87±0.16c	85.24±1.61a
	6 a	ns	7.31±0.07b	14.22±0.31b	78.12±2.66b

同列内不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著

$DR_{0.25}$ 、机械稳定性团聚体 MWD 和 GMD 可表征团聚体力稳性特征(表 5)。2 a 处理的  $DR_{0.25}$  相比 CK 提高了 4.88%;4 a 和 6 a 处理则呈现破坏作用,其  $DR_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 分别为 CK 的 98.08%和 82.2%、87.4%和 74.02、78.13%和 59.38%。 $WR_{0.25}$ 、水稳性团聚体 MWD 和 GMD 均可评价团聚体水稳性的高低,2 a 处理显著提高  $WR_{0.25}$ 、水稳性团聚体 MWD 和 GMD,相比 CK 分别提高了 114.3%、17.24%和 228.57% ( $P<0.05$ )。可见 2 a 处理对土壤团聚体力稳性和水稳定性的提高,均可使土壤结构得到改善,而 6 a 处理不利于保持土壤团聚体稳定性。

表 5 不同覆盖处理表层土壤团聚体稳定性差异

Table 5 Stability difference of surface soil aggregates under different mulching treatments

项目 Item	处理 Treatments	$DR_{0.25}$	$WR_{0.25}$	MWD/mm	GMD/mm
机械稳定性团聚体 Mechanical-stable aggregates	CK	86.80±1.32b	—	1.27±0.02 a	0.32±0.02 a
	2 a	91.04±0.83a	—	1.28±0.03a	0.33±0.02 a
	4 a	85.13±1.48b	—	1.11±0.02b	0.25±0.02b
	6 a	71.35±1.43c	—	0.94±0.11c	0.19±0.01c
水稳性团聚体 Water-stable aggregates	CK	—	13.50±0.82c	0.29±0.02c	0.01±0.00c
	2 a	—	28.93±0.54 a	0.34±0.02b	0.02±0.00a
	4 a	—	21.53±0.70b	0.38±0.02 a	0.02±0.00b
	6 a	—	14.76±1.13c	0.29±0.01c	0.01±0.00c

$DR_{0.25}$ 代表> 0.25 mm 的机械稳定性团聚体; $WR_{0.25}$ 代表> 0.25 mm 的水稳性团聚体;MWD: 平均质量直径 Mean weight diameter;GMD: 平均几何直径 Geometric mean diameter;MWD、GMD 值越大,表明团聚体稳定性越大。同列内不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著;

PAD 和 WSC 是表征团聚体稳定性的质量指标。PAD 越小、WSC 越大,则土壤团聚体越稳定。由表 6 可知,2 a 处理的 PAD 值最小,WSC 值最大,分别为 CK 的 80.78%和 218.38%,对表层土壤有良好的保护作用 ( $P<0.05$ )。而 4 a 处理的 PAD 显著低于 CK,4 a 和 6 a 处理的 WSC 显著高于 CK ( $P<0.05$ ),表明随覆膜年限延长,表层土壤团聚体稳定性能降低,物理结构逐渐恶化,土壤退化程度增加。

表 6 不同覆盖处理表层土壤团聚体破坏率和水稳系数差异

Table 6 The damage rate and water stability coefficient of surface soil aggregates were different under different mulching treatments

处理 Treatments	团聚体破坏率 PAD The percentage of aggregate decomposition/%	水稳系数 WSC Water stability coefficient/%
CK	84.45±1.05a	15.56±0.41d
2 a	68.22±1.41b	31.78±0.56 a
4 a	69.83±0.77b	30.17±0.85b
6 a	82.66±1.81a	17.34±0.35c

PAD 代表团聚体破坏率,数值越小,表明团聚体稳定性越大;WSC 代表水稳系数,数值越大,表明团聚体越稳定。同列内不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著

### 2.3 不同覆盖处理表层土壤团聚体有机碳分布

不同处理对土壤各粒级机械稳定性和水稳性团聚体中的有机碳含量影响如表 7 所示。机械稳定性团聚体有机碳总量为 4 a>2 a>6 a>CK, 2 a 和 4 a 处理相比 CK 分别提高了 18.48% 和 19.48% ( $P<0.05$ )。水稳性团聚体有机碳总量为 2 a>4 a>6 a>CK, 2 a, 4 a 和 6 a 处理相比 CK 分别提高了 31.68%、18.75% 和 12.93% ( $P<0.05$ )。可见不同年限地膜覆盖对机械性和水稳性团聚体有机碳总量均有促进作用。在机械稳定性团聚体中, 有机碳总量主要由大团聚体有机碳含量决定 ( $R^2 = 0.777$ ); 而水稳性团聚体中, 微团聚体有机碳可决定 99.3% 有机碳总量的变异 ( $R^2 = 0.993$ )。

表 7 不同覆盖处理表层土壤团聚体有机碳含量(x)与有机碳总量(y)关系

Table 7 Relationship between organic carbon content (x) and total organic carbon (y) of surface soil aggregates under different mulching treatments

项目 Item	处理 Treatments	有机碳总量 Total organic carbon/ (g/kg)	大团聚体 Macro-aggregate/(g/kg)	$R^2$	微团聚体 Micro-aggregate/(g/kg)	$R^2$
机械稳定性团聚体 Mechanical-stable aggregates	CK	6.98±0.04c				
	2 a	8.27±0.07a	$y=0.2626x^2-2.7003x+14.006$	0.777	$y=-1.7863x^2+4.8019x+4.912$	0.286
	4 a	8.34±0.09a				
	6 a	7.15±0.09b				
水稳性团聚体 Water-stable aggregates	CK	7.04±0.09d				
	2 a	9.27±0.06 a	$y=-3.2965x^2+15.496x-9.1251$	0.858	$y=1.061x^2-11.221x+36.618$	0.993
	4 a	8.36±0.09b				
	6 a	7.95±0.09c				

同列内不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著

### 2.4 不同覆盖处理表层土壤物理性状

由表 8 可知, CK 由于裸露的地表在果园日常管理中踩踏严重、水分蒸发剧烈, 表层土壤容重高于各覆膜处理, 土壤含水量和土壤总孔隙度均较低。地膜对土壤表层有一定的保护作用, 2 a 处理可有效改善土壤含水量、总孔隙度和毛管孔隙度, 降低土壤容重, 分别为 CK 的 112.39%、105.65%、104.29% 和 90.08%。由于地膜的物理阻隔作用可有效阻断土壤空气与近地面大气、水分的交换, 因此各覆膜处理可不同程度降低膜下土壤通气度, 以 6 a 处理抑制效果最显著, 仅为 CK 的 81.49% ( $P<0.05$ )。长期覆膜对土壤未进行耕翻扰动, 表层土壤的长久不透气以及剧烈地温波动带来的频繁干湿交替, 使土壤黏粒和物理性黏粒比例呈现显著变化 ( $P<0.05$ ), 分别为 CK 的 102.37% 和 101.16%, 导致土壤容重达到各处理最高。土壤孔隙度、毛管孔隙度和土壤含水量为最低 ( $P<0.05$ ), 仅分别为 2 a 处理的 86.64%、93.21% 和 80.79%。由此可见, 本应对表层土壤具有保护作用的地膜覆盖措施, 在长期连续施行后, 呈现破坏土壤结构的现像。

表 8 不同覆盖处理表层土壤物理性状差异

Table 8 Surface soil physical properties were different under different mulching treatments

土层 Soil layer/cm	处理 Treatments	土壤含水量 Soil moisture/%	土壤孔隙度 Soil porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	土壤通气度 Soil aeration/%	容重 Soil bulk density/ (g/cm <sup>3</sup> )	黏粒 Clay/%	物理性黏粒 Physical clay particle/%
20	CK	21.07±1.30bc	54.48±1.20ab	42.65±0.40b	35.34±1.60a	1.31±0.07a	9.7±0.03c	56.75±0.12b
	2 a	23.68±1.40ab	57.56±1.40a	44.48±0.70a	34.2±1.40a	1.18±0.07b	9.61±0.04d	52.25±0.24d
	4 a	24.23±1.90a	51.01±3.5bc	42.14±0.80b	26.78±1.80b	1.18±0.04b	9.77±0.03b	54.49±0.17c
	6 a	19.13±1.30c	49.87±0.40c	41.46±0.90b	28.8±1.10b	1.24±0.05ab	9.93±0.03a	57.41±0.15a

同列内不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著

## 2.5 表层土壤团聚体稳定性相关性分析

根系生活在土壤中,其形态性状与土壤物理结构、生态环境息息相关,互相影响。对土壤物理性状、细根生长与土壤机械稳定性、水稳性团聚体的稳定性指标做相关性分析(表9)。土壤黏粒比例与土壤团聚体水稳性指标( $DR_{0.25}$ 、机械稳定性团聚体 MWD)呈极显著负相关( $R=-0.743^{**}$ 、 $-0.628^{**}$ ),土壤孔隙度、毛管孔隙度、土壤通气度及根系各指标均与土壤团聚体水稳性指标表现极显著正相关,表明良好的土壤结构与发达的根系均有利于土壤团聚体水稳性的提高。土壤团聚体水稳性指标( $WR_{0.25}$ 、水稳性团聚体 MWD)仅与土壤黏粒比例呈极显著负相关( $R=-0.683^{**}$ 、 $-0.663^{**}$ ),与细根生长无相关性;土壤黏粒比例与机械稳定性团聚体、水稳性团聚体有机碳含量和水稳系数均呈极显著负相关( $R=-0.874^{**}$ 、 $-0.957^{**}$ 、 $-0.949^{**}$ ),与团聚体破坏率呈极显著正相关( $R=0.914^{**}$ )。可见土壤黏粒比例增大,均不利于土壤团聚体稳定性的提高和有机碳的固持。

表9 苹果细根、土壤物理性状与团聚体稳定性、有机碳含量相关性分析

Table 9 Correlation analysis of fine root and soil physical properties of apple with aggregate stability and organic carbon content

项目 Item	$DR_{0.25}$	$WR_{0.25}$	PAD/%	WSC/%	MSA MWD/ mm	WSA MWD/ mm	MSA SOC/ (g/kg)	WSA SOC/ (g/kg)
土壤含水量 Soil moisture/(g/cm <sup>3</sup> )	0.569*	0.077	-0.745**	0.741**	0.344	0.446*	0.462	0.538*
土壤孔隙度 Soil porosity/%	0.712**	0.444	-0.325	0.39	0.77**	0.11	0.257	0.318
毛管孔隙度 Capillary porosity/%	0.716**	0.541*	-0.665**	0.689**	0.657**	0.11	0.728**	0.609**
土壤通气度 Soil aeration/%	0.626**	0.214	0.213	-0.152	0.672**	-0.412	0.321	-0.152
黏粒 Clay/%	-0.743**	-0.683**	0.914**	-0.949**	-0.628**	-0.663**	-0.874**	-0.857**
根量 Root number/NO	0.848**	-0.236	-0.059	0.084	0.887**	0.047	0.031	-0.204
根长 Root length/cm	0.747**	-0.26	-0.071	-0.091	0.852**	-0.117	0.168	-0.286
根表面积 Root surface area/cm <sup>2</sup>	0.676**	-0.229	-0.03	-0.158	0.822*	-0.295	0.26	-0.335

表中数字代表相关系数  $r$ , \* 表示  $P<0.05$ ; \*\* 表示  $P<0.01$

## 2.6 不同覆盖处理下表层土壤团聚体稳定性主成分分析

土壤团聚体稳定性受土壤物理性状和细根生长共同影响。各因子间不可避免地存在多重共线性,为明确各因子影响程度,并对不同处理进行评价,对影响土壤团聚体稳定性的7个土壤物理性状(土壤含水量、土壤孔隙度、毛管孔隙度、土壤通气度、黏粒含量、机械稳定性团聚体有机碳和水稳性团聚体有机碳)与3个根系生长因子(根量、根长和根表面积)进行主成分分析(表10)。0—20 cm 土层中,根据主成分方差贡献率和累积贡献率可选出2个主成分(>85%),代表全部指标92.83%的综合信息,可利用该主成分中的主要载荷因子作为综合评价土壤团聚体稳定性的指标。第一主成分中载荷值较大的指标为黏粒、毛管孔隙度、总孔隙度、根量和根长,代表了土壤质地、孔隙结构和细根生长特征。第二主成分为机械稳定性和水稳性团聚体有机碳含量。即不同覆膜年限主要通过改变表层土壤质地组成和孔隙结构,使细根生长产生适应性生存策略差异,从而对土壤团聚体稳定性产生影响。计算综合得分可知(表11),各处理排名为2 a>4 a>CK>6 a。6 a 处理的综合得分为负值(-0.973),不利于土壤团聚体结构稳定,促使表土“隐形”退化;2 a 处理的得分最高(0.864),对土壤团聚体结构有良好的保护作用。

## 3 讨论

### 3.1 覆膜对苹果园表层土壤团聚体分布与稳定性的影响

土壤是农业生产的物质基础,以团聚体为核心的土壤结构是评价土壤质量高低、诊断土地退化程度的重



要指标之一。根据粒径将土壤团聚体分为大团聚体(> 0.25 mm)和微团聚体(< 0.25 mm)。广泛认为 > 0.25 mm 机械稳定性大团聚体可反映土壤结构的优劣<sup>[10]</sup>。本试验借助干筛法和湿筛法对苹果园表层土壤团聚体进行分级(表 4),结果表明随覆膜年限延长,促使大团聚体破碎为微团聚体。6 a 处理降低机械稳定性大团聚体比例,仅为 CK 的 82.18%。各覆膜处理的  $DR_{0.25}$  为 71.53%—91.11%,  $WR_{0.25}$  为 14.76%—28.93%(表 5)。一般认为土壤  $DR_{0.25} > 60%$  为优良团聚状态,  $WR_{0.25} < 30%$  属于不良团聚状态<sup>[10]</sup>。本结果表明虽然黄绵土表层土壤机械稳定性团聚体均属于优良级团聚状态,但从土壤团聚体质量水平来看,水力学稳定性较差,易受外界水分干扰。在本试验土壤水分与 PAD、WSC 呈极显著相关( $R = -0.745^{**}$ 、 $0.741^{**}$ )中可得以验证(表 9)。

表 10 不同覆盖处理表层土壤团聚体稳定性主成分分析

Table 10 Principal component analysis of surface soil aggregates stability under different mulching treatments

土层 Soil layer/cm	主成分 Principal component	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	载荷矩阵 Load matrix
20	1	63.287	63.29	黏粒、毛管孔隙度、总孔隙度、根量、根长
	2	29.546	92.83	机械稳定性团聚体有机碳、水稳性团聚体有机碳

表 11 不同覆盖处理表层土壤团聚体稳定性综合得分与排名

Table 11 Comprehensive score and ranking of surface soil aggregate stability under different mulching treatments

	综合得分 Composite scores	综合排名 Comprehensive ranking		综合得分 Composite scores	综合排名 Comprehensive ranking
CK	0.049	3	4 a	0.059	2
2 a	0.864	1	6 a	-0.973	4

2 a 处理可增大表层土壤毛管孔隙度和总孔隙度,降低容重与黏粒、物理性黏粒比例(表 8),提高土壤团聚体力稳性和水稳性,尤其对水稳性团聚体的保护作用更为显著( $P < 0.05$ )(表 5);6 a 处理则降低表层土壤毛管孔隙度和总孔隙度,分别为 CK 的 97.21%和 91.54%;增大黏粒和物理性黏粒比例,相比 CK 分别提高了 2.37%和 1.16%。土壤孔隙结构的破坏与土壤质地的改变作为第一主成分的首要载荷因子,直接导致土壤团聚体力稳性的下降(表 10);6 a 处理对水稳性团聚体的保护作用也低于 2 a 处理,其 PAD 和 WSC 分别为 2 a 的 121.17%和 54.56%(表 6)。可见随覆膜年限增加,地膜对表层土壤的保护作用逐渐转为破坏作用。这是由于陇东雨养区苹果园长期覆膜后,土层间较大温差加剧了深层土壤水分在温度梯度与毛管力作用下沿毛管孔隙上升,白天以水汽形式扩散,夜间则呈现“夜潮”现象<sup>[25]</sup>。因地膜的阻拦作用,水汽凝结回落,形成水分膜下横向渗透与纵向上升相结合的移动规律,加剧表层土壤干湿交替的发生。频繁的干湿循环成为土体收缩—膨胀的主要动力<sup>[26]</sup>,导致大团聚体破碎<sup>[27—28]</sup>。因此 6 a 处理土壤颗粒组成变化、孔隙结构改变和机械稳定性大团聚体比例降低,导致土壤微团聚体比例升高,相比 CK 提高了 121.9%。还有研究表明当干湿交替发生时,水分易进入较细的毛管孔隙,使闭蓄态空气被压缩从而导致团聚体破碎<sup>[13]</sup>。此理论在本试验结果中得以验证,4 a 和 6 a 处理的毛管孔隙度均显著低于 2 a 处理(表 8),并与 PAD、WSC 呈极显著相关( $R = -0.665^{**}$ 、 $0.689^{**}$ )(表 9)。表明土壤孔隙结构的破坏可导致团聚体稳定性的下降,与刘秀研究结果一致<sup>[29]</sup>。土壤孔隙不仅限于水分传导和溶质运移,团聚体在自然形成过程中具有多孔单元,结构复杂,也是土体结构稳定的主要决定因素,有待于进一步研究。

土壤团聚体稳定性的主要影响因子由土壤黏粒、有机碳和根系组成,黏粒是形成土壤团聚体的物质基础。干湿交替不仅引发团聚体结构的破碎,还会造成“活性黏粒”随水移动淀积,堵塞孔隙<sup>[30]</sup>。本试验 2 a 处理对膜下微域土壤的保护,使其既可免受 CK 果园管理日常践踏压实和降雨溅蚀破坏,又可防止 6 a 处理频繁的干湿交替对土壤质地组成的改变。2 a 处理的黏粒和物理性黏粒比例仅分别为 CK 的 99.07%和 92.15%,而 6 a 处理则分别为 CK 的 102.37%和 101.16%(表 8),并与土壤团聚体稳定性均呈极显著负相关(表 9),这与粘团

学说似乎背道而驰。但也有研究表明黏粒对土壤膨胀和结构破碎的影响是双面的:一是黏粒强烈的吸水性促使土壤的膨胀性显著增强;二是其胶结作用使土壤膨胀性能降低<sup>[26]</sup>。由此分析造成本试验结果的原因可能是:对长期覆膜的黄绵土来说,频繁的干湿交替对土壤黏粒吸水性能的促进,剧烈的膜下温差对土壤黏粒胶结作用的破坏<sup>[26]</sup>,使其吸水作用对土壤团聚体稳定性的影响权重大于胶结特性。作为决定土壤团聚体稳定性的首要因子(表 10),土壤黏粒对黄绵土结构作用机理有待进一步研究。

### 3.2 覆膜对苹果园表层土壤团聚体有机碳含量与分布的影响

有机碳是土壤重要的胶结物质,可促进土壤结构体的形成<sup>[31]</sup>。本试验中各覆膜处理均不同程度地提高团聚体有机碳含量(表 7),与刘哲研究结果一致<sup>[32]</sup>。2 a 和 4 a 处理对机械稳定性和水稳性团聚体有机碳含量的提升效果优于 6 a 处理,分别为 6 a 处理的 115.66%—116.64% 和 105.16%—116.6%。有研究表明,表土中近 90% 的有机碳位于团聚体内,由于不同粒级、种类的团聚体形成环境与胶结类型不同,导致有机碳含量的差异,进而影响团聚体稳定性。结合不同粒级团聚体有机碳与有机碳总量的回归分析可知(表 7),在机械稳定性团聚体中,有机碳总量主要由大团聚体有机碳含量决定;水稳性团聚体中,微团聚体有机碳含量可决定 99.3% 有机碳总量的变异。这是由于在干燥环境下,稳定的大团聚体对有机碳的固持作用优于微团聚体,但多为活性有机碳,稳定性较差,易受外界环境的干扰<sup>[33—36]</sup>。可从各覆膜处理水稳性大团聚体比例与水稳性团聚体有机碳分布中看出(表 4、7),随覆膜年限的增加,水稳性团聚体固碳量逐渐下降,6 a 处理仅为 2 a 处理的 85.76%。即由于长期覆膜表层土壤水稳性团聚体稳定性与固碳能力的下降,导致土壤总有机碳水平降低,与苑亚茹研究结果一致<sup>[37]</sup>。

土壤团聚体发育、稳定性和固碳能力相关,土壤团聚体的形成是有机胶结作用的结果,反之团聚体内部厌氧环境可降低有机碳分解速度,阻止其矿化损失。但也有些学者认为团聚体与有机碳的关系不适于所有土壤类型或土地利用方式<sup>[38]</sup>,只在减少机械破坏时才具有相关性。本试验对土壤团聚体结构和有机碳固持关系的评价是基于连续覆膜对表层土壤结构具有一定破坏作用下进行的,因此对旱地土壤团聚体固碳机制有待进一步研究。

### 3.3 苹果园表层土壤团聚体稳定性与细根生长的互作关系

根系是植物摄取、输导土壤水分和养分的重要器官,除受土壤环境变化影响进行生长可塑性调节外,在提高土壤结构稳定性和防侵蚀方面有重要作用<sup>[39]</sup>。首先,根系可通过在土体中交错、穿插和物理缠绕固持土壤;其次,根系分泌物中多糖和蛋白质既可起胶结作用<sup>[13]</sup>,又可因其疏水特性降低土壤水分对团聚体稳定性的干扰<sup>[40—41]</sup>;再次,可通过根系分解和淀积物向土壤中补充碳源<sup>[42—43]</sup>。本试验表明随覆膜年限增长,苹果细根逐渐向表层土壤集中,生长量下降。6 a 处理细根根量、根长和根表面积仅为 CK 的 20.97%、24.66% 和 41.25%(表 2、3),并与  $DR_{0.25}$  和 MWD 呈极显著正相关( $R = 0.848^{**}$ 、 $0.747^{**}$ 、 $0.676^{**}$ ;  $0.887^{**}$ 、 $0.852^{**}$ 、 $0.822^{**}$ )(表 9),表明根系的良好生长有利于土壤结构稳定,根系对土壤团聚体稳定性的影响仅次于土壤质地和孔隙结构(表 10)。而根系与土壤团聚体有机碳含量无显著相关性(表 9),与贺同鑫<sup>[28]</sup>认为的根系输入对土壤有机碳固持影响较弱观点一致。可能是连续覆膜表层土壤透气性差,高温、高湿条件下微生物活动减弱,土壤碳代谢酶活性下降,从而影响根系的碳输入与转化。本试验仅针对根系生长发育指标进行评价,未涉及根系分泌物和腐解物在稳定土壤结构的作用及供碳机制,其系统评价有待于进一步研究。

CK 果园表层土壤中细根较多,凋落物可有效补充植物源碳源,但暴露的土壤易受气候和耕作措施的影响。原有的土壤有机碳不断矿化分解,新加入的碳难以及时得到物理保护。因此有机碳总量低,土壤团聚性差,与任荣秀<sup>[44]</sup>研究结果不同。可能是由于山地森林中丰富的凋落物在地表聚集,即可减少雨水对表层土壤的溅蚀作用,又可促使凋落物分解激活微生物活性,并产生分泌物与酶作为胶结物质有效增加土壤团聚体的稳定性。充分说明了不同的土地利用和管理方式均可导致土壤团聚体稳定机制的差异。

## 4 结论

在旱地土壤结构研究中应重视土壤团聚体力稳性的测定与评价;连续覆膜较大的温差和剧烈的干湿交替

可改变黄绵土土壤质地组成及孔隙结构,抑制苹果细根在表层土壤的生长和分布,降低土壤团聚体稳定性和水稳性,导致表土“隐形退化”,并增加黏粒对土壤结构的影响权重;连续覆膜不利于土壤有机碳固存,并导致土壤团聚体有机碳水平对团聚体稳定性变异的决定性下降;短期覆膜(2 a)对土壤团聚体结构有良好的保护作用,长期连续覆膜不利于土壤结构的保护与固碳,应适时揭膜。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 孙文泰, 马明, 董铁, 刘兴禄, 赵明新, 尹晓宁, 牛军强. 陇东旱塬苹果根系分布规律及生理特性对地表覆盖的响应. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3153-3163.
- [ 2 ] 张同娟. 黄土地区表层土壤结构状况与效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [ 3 ] 张向前, 杨文飞, 徐云姬. 中国主要耕作方式对旱地土壤结构及养分和微生态环境影响的研究综述. 生态环境学报, 2019, 28(12): 2464-2472.
- [ 4 ] 吕国华, 李小强, 白文波, 王罕博, 宋吉青. 半湿润与半干旱区黄绵土冬小麦农田土壤剖面特征研究. 土壤通报, 2019, 50(5): 1033-1037.
- [ 5 ] 任小云, 冯新新, 宋宇琴, 袁宏霞, 田彩芳, 李六林. 黄土高原丘陵沟壑区梨园垄沟覆地布效应的研究. 经济林研究, 2018, 36(3): 107-113.
- [ 6 ] 付威. 黄土旱塬田间管理措施对土壤理化性状及作物产量影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [ 7 ] Chen X L, Wu P T, Zhao X N, Persaud N. Effect of different mulches on harvested rainfall use efficiency for corn (*Zea mays* L.) in semi-arid regions of northwest China. *Arid Land Research and Management*, 2013, 27(3): 272-285.
- [ 8 ] An S S, Mentler A, Mayer H, Blum W E H. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China. *CATENA*, 2010, 81(3): 226-233.
- [ 9 ] 曾全超, 李娅芸, 刘雷, 安韶山. 黄土高原草地植被土壤团聚体特征与可蚀性分析. 草地学报, 2014, 22(4): 743-749.
- [ 10 ] 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. 应用生态学报, 2021, 32(3): 976-982.
- [ 11 ] 顾汪明. 冻融循环对东北黑土团聚体稳定性影响机制的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [ 12 ] 马建辉, 叶旭红, 韩冰, 李文, 虞娜, 范庆锋, 张玉玲, 邹洪涛, 张玉龙. 膜下滴灌不同灌水控制下限对设施土壤团聚体分布特征的影响. 中国农业科学, 2017, 50(18): 3561-3571.
- [ 13 ] 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. 水土保持学报, 2020, 34(3): 267-273, 298-298.
- [ 14 ] 耿韧, 张光辉, 洪大林, 李振炜. 黄土高原农地草地林地土壤团聚体稳定性沿降水梯度的变化特征. 农业工程学报, 2019, 35(3): 141-148.
- [ 15 ] Du Z L, Zhao J K, Wang Y D, Zhang Q Z. Biochar addition drives soil aggregation and carbon sequestration in aggregate fractions from an intensive agricultural system. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(3): 581-589.
- [ 16 ] Du Z L, Ren T S, Hu C S, Zhang Q Z. Transition from intensive tillage to no-till enhances carbon sequestration in microaggregates of surface soil in the North China Plain. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 26-31.
- [ 17 ] 孙文泰, 刘兴禄, 董铁, 尹晓宁, 牛军强, 马明. 陇东旱塬苹果园不同覆盖措施对土壤性状、根系分布和果实品质的影响. 果树学报, 2015, 32(5): 841-851.
- [ 18 ] 周纯亮, 吴明. 中亚热带四种森林土壤团聚体及其有机碳分布特征. 土壤, 2011, 43(3): 406-410.
- [ 19 ] 王峻, 薛永, 潘剑君, 郑宪清, 秦秦, 孙丽娟, 宋科. 耕作和秸秆还田对土壤团聚体有机碳及其作物产量的影响. 水土保持学报, 2018, 32(5): 121-127.
- [ 20 ] 于法展, 张茜, 张忠启, 李玲, 雷良媛, 张少坤, 陈俊. 庐山不同森林植被对土壤团聚体及其有机碳分布的影响. 水土保持研究, 2016, 23(6): 15-19.
- [ 21 ] Gale M R, Grigal D F. Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, 17(8): 829-834.
- [ 22 ] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627-633.
- [ 23 ] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *European Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141-163.
- [ 24 ] Nelson D W, Sommers L E. Total carbon, organic carbon, and organic matter//Sparks D L, Page A L, Helmke P A, Loeppert R H, Soltanpour N P, Tabatabai M A, Johnston C T, Sumner M E, eds. *Methods of Soil Analysis. Part 3 Chemical Methods*, 5.3. Madison: SSSA, 1996: 961-1010.
- [ 25 ] 徐佳星, 封涌涛, 叶玉莲, 张润泽, 胡昌录, 雷同, 张树兰. 地膜覆盖条件下黄土高原玉米产量及水分利用效应分析. 中国农业科学, 2020, 53(12): 2349-2359.

- [26] 巩学鹏, 唐朝生, 施斌, 王宏胜, 冷挺, 谈云志, 邓永锋. 黏性土干/湿过程中土结构演化特征研究进展. 工程地质学报, 2019, 27(4): 775-793.
- [27] 刘艳, 马茂华, 吴胜军, 冉义国, 王小晓, 黄平. 干湿交替下土壤团聚体稳定性研究进展与展望. 土壤, 2018, 50(5): 853-865.
- [28] 姚旭, 景航, 梁楚涛, 谷利茶, 王国梁, 薛莲. 人工油松林表层土壤团聚体活性有机碳含量对短期氮添加的响应. 生态学报, 2017, 37(20): 6724-6731.
- [29] 刘秀, 司鹏飞, 张哲, 陈保青, 董雯怡, 严昌荣, 刘恩科. 地膜覆盖对北方旱地土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响. 生态学报, 2018, 38(21): 7870-7877.
- [30] 胡旭凯, 陈居田, 朱利霞, 李俐俐. 干湿交替对土壤团聚体特征的影响. 中国农业科技导报, 2021, 23(2): 141-149.
- [31] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, Hwat B S, 李秀英, 李娟. 不同施肥处理对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响. 生态学报, 2010, 30(4): 1035-1041.
- [32] 刘哲, 韩霁昌, 孙增慧, 余正洪, 张卫华, 高红贝. 外源新碳对红壤团聚体及有机碳分布和稳定性的影响. 环境科学学报, 2017, 37(6): 2351-2359.
- [33] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. European Journal of Soil Science, 2000, 51(4): 595-605.
- [34] Elliott E T, Cambardella C A. Physical separation of soil organic matter. Agriculture, Ecosystems & Environment, 1991, 34(1/4): 407-419.
- [35] 窦森, 郝翔翔. 黑土团聚体与颗粒中碳、氮含量及腐殖质组成的比较. 中国农业科学, 2013, 46(5): 970-977.
- [36] Chung H, Grove J H, Six J. Indications for soil carbon saturation in a temperate agroecosystem. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(4): 1132-1139.
- [37] 苑亚茹, 邹文秀, 郝翔翔, 李娜, 尤孟阳, 韩晓增. 黑土团聚体结合碳对不同有机肥施用量的响应. 生态学报, 2019, 39(9): 3235-3242.
- [38] 贺同鑫, 胡宝清, 张建兵, 张诗萌, 庞榆, 裴广廷, 胡刚, 张伟, 孙建飞. 植被恢复十年喀斯特坡地细根对土壤碳氮存留与可利用性的影响. 生态学报, 2020, 40(23): 8638-8648.
- [39] 孙一惠, 马岚, 张栋, 夏晓平, 薛孟君, 苗新云. 2种扦插护岸植物根系对土壤结构的改良效应. 北京林业大学学报, 2017, 39(7): 54-61.
- [40] Rillig M C, Mummey D L. Mycorrhizas and soil structure. New Phytologist, 2006, 171(1): 41-53.
- [41] Bardgett R D, Mommer L, De Vries F T. Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes. Trends in Ecology & Evolution, 2014, 29(12): 692-699.
- [42] Xia M X, Talhelm A F, Pregitzer K S. Fine roots are the dominant source of recalcitrant plant litter in sugar maple-dominated northern hardwood forests. New Phytologist, 2015, 208(3): 715-726.
- [43] Jackson R B, Lajtha K, Crow S E, Hugelius G, Kramer M G, Piñeiro G. The ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2017, 48: 419-445.
- [44] 任荣秀, 杜章留, 孙义亨, 宋学姝, 陆森. 华北低丘山地不同土地利用方式下土壤团聚体及其有机碳分布特征. 生态学报, 2020, 40(19): 6991-6999.