



黄土高原长期覆膜苹果园土壤物理退化与细根生长响应

孙文泰* 马 明

甘肃省农业科学院林果花卉研究所, 兰州 730070

摘 要 甘肃陇东黄土高原为中国苹果主产区之一, 生产中多采取覆膜方式节水保墒, 但长期覆膜易导致土壤物理性状退化及苹果根系生长障碍。为探明长期覆膜对苹果园表层土壤(0–20 cm)、亚表层土壤(20–40 cm)物理特性、土壤结构稳定性及苹果细根数量、形态、构型、解剖性状的影响, 以18年生苹果树为试验材料, 于苹果树发根高峰(果实采后至落叶期), 以清耕(CK)为对照, 采用土壤剖面法系统调查覆膜2年(2Y)、覆膜4年(4Y)、覆膜6年(6Y)的表层土壤、亚表层土壤物理性状变化趋势, 苹果根系根长、表面积、比根长、导管直径、导管密度等指标的空间分布特征。并借助主成分分析, 抽取覆膜条件下根系与土壤变化主要因子, 分析应对根际土壤物理退化的苹果树细根生长适应策略调整。结果表明: 短期覆膜(2Y)可有效改善亚表层土壤含水量、总孔隙度, 分别比CK提高了18.04%、4.53%, 土壤密度降低了2.36%, 促进细根在亚表层土壤中的生长, 比表面积为CK的151%; 覆膜促使黏粒向亚表层土壤移动, 产生明显的淀积黏化作用。土壤物理性黏粒在亚表层土壤中高于表层土壤, 2Y、4Y和6Y处理亚表层土壤物理性黏粒为表层土壤的115.64%、115.58%和114.21%, 呈现土壤紧实化。土壤质地、团聚体特征、有机质含量为主导亚表层土壤退化进程的主要载荷因子, 使根系数量、构型特征受到抑制, 导致长期(4Y、6Y)覆膜苹果的细根集中分布于表层土壤中。亚表层土壤中细根变粗、抑制延伸生长、增大导管直径, 以弥补细根数量、形态性状弱化带来的吸收功能减弱, 促使根系采取“密集型”根系构建策略。综上所述, 长期覆膜果园亚表层土壤出现物理“隐形”退化, 影响果树根系健康生长和土壤可持续利用。2年为适宜陇东旱塬的连续覆膜年限, 生产中应适时揭膜, 促进根系生长和土壤结构优化。

关键词 覆膜; 细根; 亚表层土壤; 土壤质地; 团聚体稳定性; 主成分分析

孙文泰, 马明 (2021). 黄土高原长期覆膜苹果园土壤物理退化与细根生长响应. 植物生态学报, 45, 972-986. DOI: 10.17521/cjpe.2021.0248

Response of soil physical degradation and fine root growth on long-term film mulching in apple orchards on Loess Plateau

SUN Wen-Tai* and MA Ming

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

Abstract

Aims The Longdong Loess Plateau in Gansu Province is one of the main apple producing areas in China. Plastic film-mulching is often applied to maintain soil moisture as well as water-saving in apple orchards. It is reported that long-term film mulching may cause the degradation of soil physical properties and inhibition of root growth. The objective of this study were to explore the effect of long-term mulching on the physical properties, stability of the surface (0–20 cm) and subsurface (20–40 cm) layer soil, and to investigate the changes of apple fine root growth characteristics in quantity, morphology, configuration and anatomical traits.

Methods Using soil profile and stratified sampling method, the changes of the physical properties and soil structural stability of the surface and subsurface layer soil was analyzed under film-mulching 2 years (2Y), film-mulching 4 years (4Y) and film-mulching 6 years (6Y), conventional tillage (CK) treatments, and roots of 18-year-old apple trees were collected at rapid growing period (days after fruit harvest and before defoliation) to investigate the spatial distribution by measuring the root length, surface area, specific root length, catheter diameter and catheter density. Principal component analysis was used to extract the main factors of root and soil changes

收稿日期Received: 2021-07-02 接受日期Accepted: 2021-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(31760555)、国家重点研发计划(SQ2016ZY06002345)和农业农村部西北地区果树科学观测实验站(S-10-18)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (31760555), the National Key R&D Program of China (SQ2016ZY06002345), and the Scientific Observing and Experimental Station of Fruit Tree Science (Northwest Region), Ministry of Agriculture and Rural Affairs (S-10-18).

* E-mail: swt830312@126.com

under the condition of plastic film mulching, and to analyze the adaptation strategies for fine root growth of apple trees to the physical degradation of rhizosphere soil.

Important findings Short-term film mulching (2Y) treatment significantly improved the soil water content and total porosity in the subsurface soil layer, increased by 18.04%, 4.53%, respectively, and reduced the soil density by 2.36% than that of conventional tillage (CK) treatments. Growth of fine roots increased in subsurface soil, and the specific surface area was 151% of CK. Film mulching promoted the movement of clay particles to the subsurface soil resulting in obvious deposition and cementation. The physical clay in subsurface soil was higher than that of surface soil. The physical clay in subsurface soil under 2Y, 4Y and 6Y mulching were 115.64%, 115.58% and 114.21% of those in surface soil, which led to soil compaction. Soil texture, aggregate characteristics and organic matter content were selected as the main load factors, which dominated degradation process of subsurface soil, and inhibited the number and configuration characteristics of roots, apple fine roots of long-term film mulching (4Y or 6Y) concentrated in the surface layer of the soil. In the subsurface soil, fine roots were found to be shortened and coarsened with inhibiting elongation growth and increasing catheter diameter, indicating the “intensive” root construction strategy the offset the weakening of absorption function caused by the fine root quantity and weakening of morphological characteristics. In conclusion, the ‘invisible’ degradation of subsurface soil physical property occurred in long-term film mulching orchard will have an influence on healthy roots growth and sustainable soil utilization. It is recommended that 2-year was the suitable for continuous film mulching years in Longdong area, and the mulching film should be removed periodically to promote root growth and optimize soil structure.

Key words film mulching; fine roots; subsurface soil; soil texture; aggregate stability; principal component analysis

Sun WT, Ma M (2021). Response of soil physical degradation and fine root growth on long-term film mulching in apple orchards on Loess Plateau. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 972-986. DOI: 10.17521/cjpe.2021.0248

甘肃陇东黄土高原苹果产区是我国苹果优势主产区之一, 年降水量450–550 mm, 具有春夏连旱, 集中降水与苹果树大量需水时空错位的特点, 属于典型的西北黄土高原雨养农业区。当地土壤为黄绵土, 属粉砂质壤土, 质地轻、疏松绵软、土层深厚, 但有机质含量低, 土壤结构及水肥调节作用差(张德奇等, 2005)。气候干旱与土壤肥力水平低、结构稳定性差共同构成限制当地苹果产业发展的重要因素。清耕制管理加剧土壤表层裸露、地表水蒸发, 土壤扰动导致水土流失、土壤有机碳矿化损失。苹果树在生命周期内需消耗大量水分, 而覆盖地膜是一项成熟的节水保墒措施(孙文泰等, 2015), 当地果农多采取长期连续覆膜。良好的土壤物理状态、稳定的土壤结构可协调水肥气热循环供应, 优化细根资源分配, 构建合理的生态适应策略(单立山等, 2018; 徐立清等, 2020)。在甘肃省苹果主产区静宁县的长期定位试验中发现, 长期覆膜的苹果根系, 特别是直径 ≤ 2 mm的细根出现根量减少、集中在表层土壤(0–20 cm)分布, 亚表层(20–40 cm)及以下根系缺失、活力下降(孙文泰等, 2016)。同时随覆膜年限延长, 地温变化剧烈, 节水保墒效果不稳定, 土壤密度增大, 有机质含量降低。

良好的土壤环境是维护优质“根-土”复合体的基本条件。当前旱地覆盖保护性栽培在土壤养分、蓄水等方面的研究表明, 覆膜可提高表层土壤贮水特性、减少养分流失(王淑颖等, 2021)。但也有学者指出覆盖虽可有效保护表层土壤, 但土壤内部却发生密度增大、土壤紧实现象(孙蕾等, 2011)。卜玉山等(2006, 2010)的研究表明, 由于地膜的隔水作用, 虽能暂时增加表土层水分含量, 但不能有效利用降水补渗, 出现土壤深层水分耗竭, 团粒结构被破坏, 土壤肥力下降。吕洁婷(2017)指出, 作物前期因覆膜水温调节作用生长快速, 是以对土壤养分、水分过度消耗为前提的, 造成深层土壤水资源匮乏。这些研究结果与王益权等(2016)在密集型农业生产下土壤疲劳研究中的观点一致。即受土地常年过度使用、化学肥料大量投入、耕作模式单一等影响, 土壤体质受损、生产力衰减, 呈现土壤退化。诸如侵蚀、沙化、盐渍化等“显性”退化, 因其直观性易引起重视, 在草原、湿地、荒漠退化演替及恢复等方面研究较为深入(陈卓鑫, 2020; 冯兰茜等, 2020; 徐国荣等, 2020); 土壤的“隐型”退化虽客观存在, 但由于空间“隐蔽性”使其短期内不易被察觉, 导致土壤机体与协调机能的慢性损伤(王加旭等, 2017)。石宗琳

DOI: 10.17521/cjpe.2021.0248

等(2017, 2019)指出土壤黏粒“淋溶淀积”导致渭北果园土壤深层紧实化, 并显著降低土壤团聚体农艺质量及稳定性; 魏彬萌等(2015)研究表明大量单施化肥与长期种植苹果树使土壤钙退化特征明显, 是土壤化学“隐型”退化特征之一; 魏彬萌等(2015, 2018)还指出有机质含量低的壤质土, 土壤团聚性差, 土壤黏粒向土壤深层移动并积淀造成渭北果园20 cm以下土壤紧实度增大、饱和导水率递减, 干燥化与紧实化并存。可见旱地果园土壤“隐型”退化研究尚处于起步阶段, 仅涉及土壤退化表现, 未与根系生长动态相关联。而土壤“隐型”退化可细分为“隐性”、“隐形”退化(王益权等, 2016)。“隐性”退化为土壤物理性质退化, 包括密度、通气性、孔隙等; “隐形”退化为土壤团聚体结构退化。对土壤退化类别的精确研究有利于制定合理措施改善土壤退化趋势, 恢复地力。

不同果园管理措施对根际土壤生态环境影响不同, 良好的深层土壤结构、水肥保蓄能力对果树生产可持续发展具有不可忽视的作用(魏彬萌等, 2021)。西北雨养农业区覆膜条件下亚表层土壤健康及根系生长响应规律研究尚显不足。为探明膜下根域环境调控机理, 本研究以红富士苹果树为研究对象, 通过对不同覆膜年限苹果园亚表层土壤物理质量的演化规律及根系生长特征的研究, 拟探究如下问题: (1)覆膜如何影响亚表层土壤结构与稳定性? 覆膜年限是否造成土壤特性的显著性差异? (2)黄土高原雨养农业区黄绵土在长期覆膜后会产生何种“隐型”退化? (3)苹果根系生长动态对土壤“隐型”退化的响应规律? 从而探明长期覆膜黄土高原黄绵土亚表层土壤物理质量退化机理, 并深入明确土壤物理退化对根系功能、结构、解剖性状的调节机制, 为实现土壤健康、绿色可持续发展奠定基础。

1 材料和方法

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(35.40° N, 105.72° E, 试验园面积3.3 hm²), 海拔1 561 m, 年降水量450 mm, 集中在7–9月, 年蒸发量1 531 mm, 干燥度2.53。年日照时间2 238 h, 无霜期159天, 年平均气温7.1 °C。土壤为黄绵土, 为粉砂质壤土, pH 7.6–8.9, 土层深厚, 有机质含量低, 深层土壤水调节作用差, 团聚作用微弱, 易受侵蚀, 造成水土流失(表1)。

试验材料为同一果园18年生红富士苹果树, 品种‘长富2号’, 砧木山荆子(*Malus baccata*), 株行距4 m × 5 m。设置清耕(未覆膜, CK)、覆膜2年(2Y, 2017年覆盖地膜)、覆膜4年(4Y, 2015年覆盖地膜)、覆膜6年(6Y, 2013年覆盖地膜) 4个处理, 除地膜覆盖年限差异外, 其他栽培管理措施一致。沿垂直行向方向, 距离主干0–1.5 m范围内覆盖黑色地膜(厚0.02 mm, 宽1.5 m)。行间免耕, 留约1 m左右操作行。地膜如有破损, 及时更换。各处理选取树冠大小相似、生长一致的健壮植株, 每处理15次重复, 单株为一个重复, 连续3行为一个处理, 各处理间设置保护行。选择标准为树冠直径4.8–5.5 m, 树高3.5–4.0 m, 主干高度0.8–1.0 m。

1.2 试验方法及测定

于2019年苹果根系发根高峰(果实采后至落叶期)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, 用去离子水清洗根系表面土壤, 装入标记好的密封袋, 用保鲜盒带回实验室。根样分为2部分, 一部分用于根系解剖结构测定(石蜡切片); 另一部分应用EPSON Expression根系扫描系统与WINRHIZO根系分析软件采集根系形态、结构数据。根系扫描分析时将根系小心清理干净, 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

表1 甘肃陇东苹果园试验区土壤理化性状

Table 1 Soil physico-chemical properties in apple orchard experimental area of Longdong, Gansu

土层深度 Soil depth (cm)	全氮含量 Total nitrogen (N) content (g·kg ⁻¹)	全磷含量 Total phosphorus (P) content (g·kg ⁻¹)	全钾含量 Total potassium (K) content (g·kg ⁻¹)	有机质含量 Organic matter content (g·kg ⁻¹)	碱解氮含量 Alkaline hydrolysis N content (mg·kg ⁻¹)	速效磷含量 Available P con- tent (mg·kg ⁻¹)	速效钾含量 Available K content (mg·kg ⁻¹)	pH
20	1.27	1.12	16.86	14.69	96.25	47.3	377.04	8.35
40	0.74	0.80	16.82	9.57	47.25	14.7	182.96	8.85

免根系之间相互交叉和重叠, 扫描数据出现误差。统计根系直径、根长、表面积、根尖数、分支数等。然后将细根(直径 ≤ 2 mm)在105 °C下杀青2 h, 65 °C恒温烘干48 h至恒质量, 测定根系生物量。根据根系形态指标与根系生物量, 计算比根长、比表面积、根尖数、分支数等。同时每个剖面的2层土壤分别用体积为100 cm³的环刀取样, 带回实验室, 用于土壤基本理化性状、土壤质地和土壤团聚体稳定性的测定。

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

$$\text{比表面积}(\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}) = \text{根系表面积} / \text{干质量} \quad (2)$$

$$\text{根尖数}(\text{No.} \cdot \text{cm}^{-1}) = \text{总根尖数量} / \text{根系长度} \quad (3)$$

$$\text{分支数}(\text{No.} \cdot \text{cm}^{-1}) = \text{总分支数量} / \text{根系长度} \quad (4)$$

根系解剖结构: 采集直径 ≤ 2 mm的细根, 用去离子水清洗干净后, 放入FAA固定液中固定, 采用FAA固定石蜡切片法测定细根显微结构, OLYMPUS BX151生物显微镜(Olympus, Tokyo, Japan)观察, Motic 3000 CCD数码成像系统(Motic, Ottawa, Canada)拍照, 并用Motic 3000软件测量数据。所得数据来自3个重复样品中5个样片上50个视野的平均值, 观察根系导管结构与数量变化, 导管密度(No.·mm⁻²)为根系单位木质部横截面积上的导管数量。

木质部导管横截面按近似椭圆形计算(Martre *et al.*, 2000), 其修正公式为:

$$r_{\text{lum}}^4 = (d_{\text{max}}^3 + d_{\text{min}}^3) / (8d_{\text{max}}^2 + 8d_{\text{min}}^2) \quad (5)$$

式中, r_{lum} 为木质部导管半径, d_{max} 和 d_{min} 分别为木质部导管腔的最大和最小直径。

土壤基本理化性状测定参考郑必昭(2012)。

$$\text{土壤压实度}(PD) = BD + 0.09C \quad (6)$$

式中, BD 为土壤密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); C 为土壤黏粒含量。

$$\text{土壤板结系数}(CL) = (1.5FSi + 0.75CSi) / (C + 10OM) - K \quad (7)$$

式中, FSi 、 CSi 、 C 分别代表土壤细粉砂、粗粉砂以及黏粒的比例, OM 为土壤有机质含量, $K = \text{pH} - 7$ 。

每处理(20 m × 15 m)采集土壤样品(0–40 cm土层, 每20 cm一层)用于土壤机械组成测定。土壤机械组成用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000, Malvern Panalytical, Worcestershire, UK)测定, 每个采样点3个重复, 取平均值。

物理性黏粒包括黏粒、粗黏粒、细粉粒、中粉粒在内的直径 < 0.05 mm的土壤颗粒。

采集亚表层土壤样品约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组成及稳定性研究。每处理团聚体质量测定3次, 取平均值。

团聚体组成经干筛(郑必昭, 2012)、湿筛(Elliott, 1986)后, 团聚体稳定性用平均质量直径(MWD , mm)、平均几何直径(GMD)、团聚体破坏率(PAD)、水稳系数(WSC)表示, 计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (8)$$

$$GMD = \text{Exp} \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (9)$$

$$PAD = 100 \times (DR_{0.25} - WR_{0.25}) / DR_{0.25} \quad (10)$$

$$WSC = 100 \times WR_{0.25} / DR_{0.25} \quad (11)$$

式中, X_i 为第 i 个孔径筛和第 $i + 1$ 个孔径筛的孔径平均值; i 为第 i 个孔径筛上烘干团聚体质量百分比; \bar{x}_i 为某级别团聚体直径的中值, W_i 为团聚体的百分含量, $DR_{0.25}$ 为 > 0.25 mm机械稳定性团聚体含量, $WR_{0.25}$ 为 < 0.25 mm水稳性团聚体含量。

1.3 数据处理

采用WPS软件计算根系表面积、比根长、比表面积等, 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最小显著差异法(LSD)检验在0.05水平上不同处理下的垂直土层根系、土壤理化性状、土壤质地、土壤团聚体及稳定性等指标的差异显著性; 对细根与不同覆膜年限、垂直土层深度, 不同土层土壤物理性状与覆膜年限进行Pearson相关性分析; 对土壤物理性状、根系数量、形态、构型性状进行主成分分析; 图表中的数据为平均值 \pm 标准差。

2 结果

2.1 不同覆膜年限表层与亚表层土壤理化性状与团聚体结构稳定性

由表2可知, CK土壤有机质含量、总孔隙度、通气度和毛管孔隙度随土层加深而逐渐降低。由于裸露地表踩踏严重及水分蒸发剧烈, 土壤表层密度较大, 黏粒含量、 PD 、 CL 均高于亚表层土壤, 覆膜处理反之; 2Y处理提高表层土壤含水量、总孔隙度和毛管孔隙度, 降低土壤密度; 地膜的物理阻隔作用使各覆膜处理不同程度降低土壤通气度, 以6Y处理最显著, 表层和亚表层土壤通气度仅为CK的81.49%、

表2 甘肃陇东苹果园覆膜后垂直方向土壤物理性状变化(平均值±标准差)
Table 2 Changes of soil physical properties in vertical direction of film mulching apple orchard in Longdong, Gansu (mean ± SD)

指标 Indicator	土层 Soil layer (cm)	CK	2Y	4Y	6Y
有机质含量 Organic matter content (g·kg ⁻¹)	0-20	12.94 ± 0.17 ^a	12.48 ± 0.12 ^a	11.70 ± 0.52 ^a	12.03 ± 0.31 ^a
	20-40	8.41 ± 0.25 ^b	8.00 ± 0.11 ^b	6.56 ± 0.20 ^b	6.38 ± 0.09 ^b
土壤含水量 Soil moisture (g·cm ⁻³)	0-20	21.07 ± 1.30 ^b	23.68 ± 1.39 ^b	24.23 ± 1.93 ^a	19.13 ± 1.30 ^a
	20-40	23.89 ± 2.00 ^a	28.20 ± 1.50 ^a	25.24 ± 1.46 ^a	19.88 ± 2.28 ^a
土壤孔隙度 Soil porosity (%)	0-20	54.48 ± 1.17 ^a	57.56 ± 1.36 ^a	51.01 ± 3.54 ^a	49.87 ± 0.37 ^a
	20-40	47.71 ± 1.33 ^b	49.87 ± 1.37 ^b	47.26 ± 3.52 ^{ab}	44.80 ± 2.00 ^b
土壤密度 Soil density (g·cm ⁻³)	0-20	1.30 ± 0.07 ^{ab}	1.18 ± 0.07 ^{ab}	1.18 ± 0.04 ^b	1.24 ± 0.05 ^a
	20-40	1.27 ± 0.06 ^b	1.24 ± 0.02 ^a	1.26 ± 0.05 ^a	1.28 ± 0.01 ^a
土壤通气度 Soil aeration (%)	0-20	35.34 ± 1.60 ^a	34.20 ± 1.45 ^a	26.78 ± 1.80 ^a	28.80 ± 1.06 ^a
	20-40	27.83 ± 1.07 ^b	21.67 ± 1.07 ^b	22.02 ± 0.22 ^b	19.47 ± 1.07 ^b
毛管孔隙度 Capillary porosity (%)	0-20	42.65 ± 0.44 ^a	44.48 ± 0.74 ^a	42.14 ± 0.79 ^a	41.46 ± 0.95 ^a
	20-40	36.09 ± 1.45 ^b	34.24 ± 1.06 ^b	34.96 ± 1.66 ^b	32.83 ± 0.37 ^b
黏粒含量 Clay content (%)	0-20	9.70 ± 0.03 ^a	9.61 ± 0.04 ^b	9.77 ± 0.03 ^b	9.93 ± 0.03 ^a
	20-40	9.59 ± 0.06 ^b	9.83 ± 0.07 ^{ab}	9.93 ± 0.09 ^{ab}	10.20 ± 0.35 ^a
粉粒含量 Silt content (%)	0-20	79.72 ± 0.53 ^b	77.16 ± 1.32 ^b	79.20 ± 1.00 ^a	79.15 ± 1.19 ^b
	20-40	82.27 ± 1.76 ^a	83.42 ± 0.59 ^a	81.87 ± 1.28 ^a	83.95 ± 1.69 ^a
砂粒含量 Sand content (%)	0-20	10.58 ± 0.14 ^a	13.23 ± 0.13 ^a	11.03 ± 0.08 ^a	10.92 ± 0.12 ^a
	20-40	8.14 ± 0.05 ^b	6.75 ± 0.02 ^b	8.20 ± 0.10 ^b	5.85 ± 0.05 ^b
物理性黏粒 Physical clay particles (%)	0-20	56.75 ± 0.12 ^a	52.25 ± 0.24 ^b	54.49 ± 0.17 ^b	57.41 ± 0.15 ^b
	20-40	57.89 ± 0.37 ^a	60.42 ± 0.17 ^a	62.98 ± 1.10 ^a	65.57 ± 1.15 ^a
PD (g·cm ⁻³)	0-20	2.18 ± 0.08 ^a	2.05 ± 0.08 ^b	2.06 ± 0.04 ^b	2.13 ± 0.03 ^b
	20-40	2.14 ± 0.04 ^{ab}	2.12 ± 0.02 ^{ab}	2.16 ± 0.03 ^{ab}	2.20 ± 0.02 ^a
CL	0-20	0.24 ± 0.01 ^a	0.02 ± 0.00 ^b	0.09 ± 0.01 ^b	0.31 ± 0.02 ^b
	20-40	0.18 ± 0.01 ^b	0.05 ± 0.00 ^a	0.44 ± 0.01 ^a	0.51 ± 0.02 ^a

同列内不同小写字母表示在0.05水平上差异显著。CK, 对照; 2Y, 覆膜2年; 4Y, 覆膜4年; 6Y, 覆膜6年。CL, 土壤板结系数; PD, 土壤压实度。
Different lowercase letters indicate significant differences at $p = 0.05$ level. CK, control treatment; 2Y, mulching for 2 years; 4Y, mulching for 4 years; 6Y, mulching for 6 years. CL, coefficient of soil consolidation; PD, packing density of soil.

75.13% ($p < 0.05$)。亚表层土壤毛管孔隙度显著低于表层土壤($p < 0.05$)，热力学差异导致的土壤深层水分沿毛管孔隙上升后难以回渗至40 cm以下土层，致使2Y、4Y和6Y处理土壤含水量在土壤亚表层高于表层；且土壤黏粒含量和物理性黏粒含量分别为表层土壤的102.29%、101.64%、102.72%和115.64%、115.58%、114.21%，导致密度、PD和CL均高于表层土壤，以CL最为显著($p < 0.05$)。覆膜亚表层土壤的不良结构，使其土壤有机质含量低于CK、2Y、4Y和6Y处理分别为CK的95.12%、78.00%、75.86%。

土壤团聚体作为土壤结构、功能的基本单元，对土壤水分移动、养分循环具有重要意义。对亚表层土壤团聚体分布及稳定性进行分析(图1)，2Y处理提高WSC、水稳性团聚体MWD和GMD，为CK的218.38%、117.24%和328.57% ($p < 0.05$)，而PAD仅为CK的80.78%，表明短期覆膜可提高团聚体机械

稳定性和水稳性。随覆膜年限增加，WSC和水稳性团聚体GMD逐渐降低，PAD增大。6Y处理团聚体稳定性最差，水稳性团聚体GMD仅为CK的85.71%。

2.2 不同覆膜年限表层与亚表层土壤细根性状分布差异

根长和根表面积属于根系数量性状，反映根系在土壤中的形态与功能(图2)。CK表层土壤细根根长和根表面积分布低于亚表层，为亚表层土壤的38.94%和34.76%，各覆膜处理反之。覆膜可显著提高表层细根根长和根表面积($p < 0.05$)，2Y、4Y和6Y处理为CK的256.07%、534.50%、353.32%和291.08%、633.88%、304.28%；亚表层土壤细根变化趋势与表层土壤相反，2Y、4Y和6Y处理细根根长、根表面积分别为CK的77.54%、62.33%、50.09%和94.3%、79.75%、61.86%，且抑制作用随覆膜年限延长而增加。

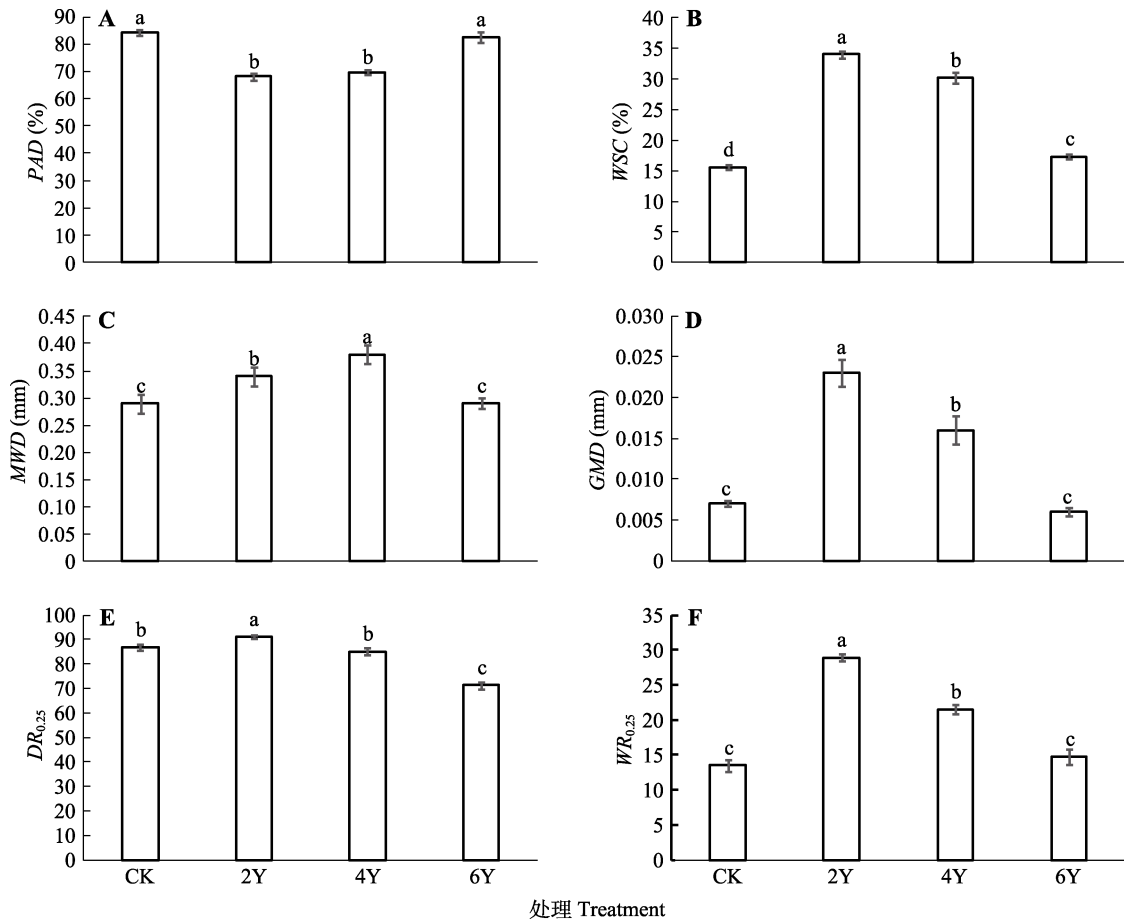


图1 甘肃陇东覆膜苹果园亚表层土壤团聚体组成及稳定性(平均值±标准差)。A, 团聚体破坏率(PAD)。B, 水稳系数(WSC)。C, 水稳性团聚体平均质量直径(MWD)。D, 水稳性团聚体平均几何直径(GMD)。E, >0.25 mm机械稳定性团聚体含量(DR_{0.25})。F, <0.25 mm水稳性团聚体含量(WR_{0.25})。CK, 对照; 2Y, 覆膜2年; 4Y, 覆膜4年; 6Y, 覆膜6年。不同小写字母表示不同处理间各指标存在显著差异($p < 0.05$)。

Fig. 1 Composition and stability of subsurface soil aggregates of film mulching apple orchard in Longdong, Gansu (mean \pm SD). A, Agglomerate failure rate (PAD). B, Water stability coefficient (WSC). C, Average mass diameter of water-stable aggregates (MWD). D, Average geometric diameter of water-stable aggregates (GMD). E, >0.25 mm mechanical stability aggregate content (DR_{0.25}). F, <0.25 mm water-stable aggregate content (WR_{0.25}). CK, control treatment; 2Y, mulching for 2 years; 4Y, mulching for 4 years; 6Y, mulching for 6 years. Different lowercase letters indicate that there are significant differences ($p < 0.05$) in each index among different treatments.

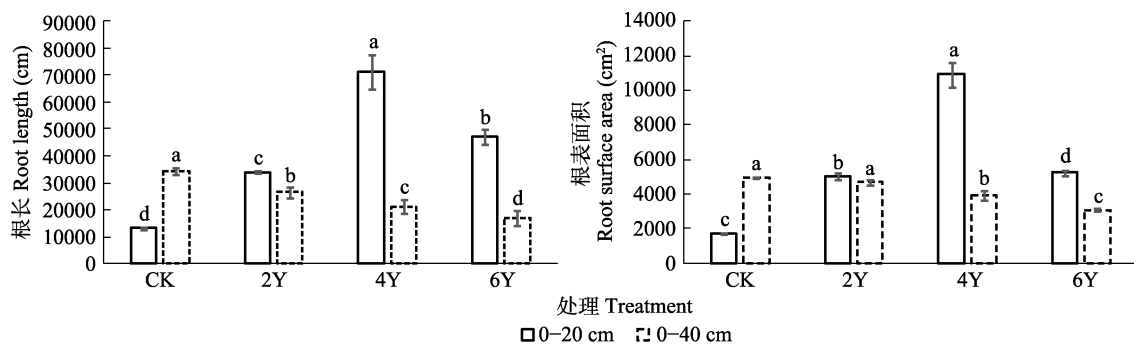


图2 甘肃陇东苹果园不同覆膜年限苹果细根数量性状土层差异(平均值±标准差)。CK, 对照; 2Y, 覆膜2年; 4Y, 覆膜4年; 6Y, 覆膜6年。不同小写字母表示不同处理间各指标存在显著差异($p < 0.05$)。

Fig. 2 Soil layer differences in the quantitative characters of fine roots of apple with different years of film mulching apple orchard in Longdong, Gansu (mean \pm SD). CK, control treatment; 2Y, mulching for 2 years; 4Y, mulching for 4 years; 6Y, mulching for 6 years. Different lowercase letters indicate that there are significant differences ($p < 0.05$) in each index among different treatments.

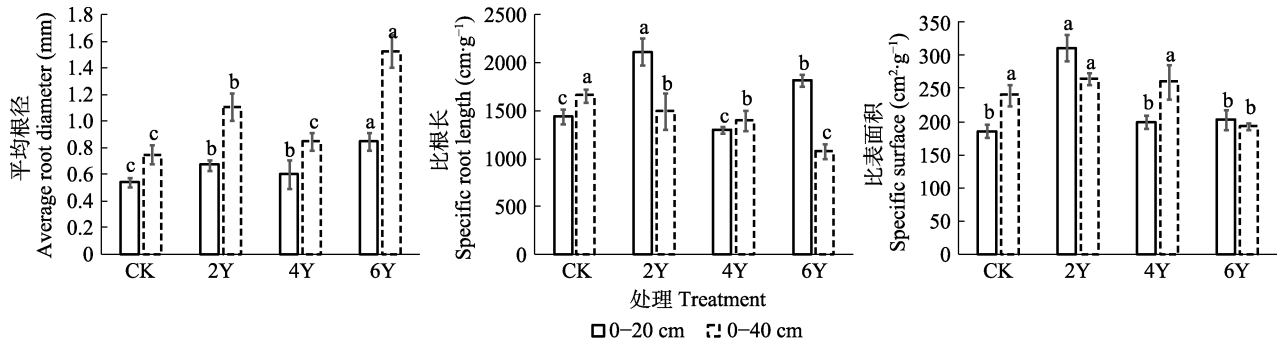


图3 甘肃陇东苹果园不同覆膜年限苹果树细根形态性状土层差异(平均值±标准差)。CK, 对照; 2Y, 覆膜2年; 4Y, 覆膜4年; 6Y, 覆膜6年。不同小写字母表示不同处理间各指标存在显著差异($p < 0.05$)。

Fig. 3 Soil layer differences in fine root morphological characters of apple trees with different years of film mulching apple orchard in Longdong, Gansu (mean \pm SD). CK, control treatment; 2Y, mulching for 2 years; 4Y, mulching for 4 years; 6Y, mulching for 6 years. Different lowercase letters indicate that there are significant differences ($p < 0.05$) in each index among different treatments.

细根平均直径、比根长和比表面积属于根系形态性状,反映细根在土壤中资源获取效率及投入成本(图3)。各处理细根直径均表现为随土层加深而增大,且各覆膜处理细根直径均大于CK,以6Y处理最显著,在表层和亚表层土壤中直径为CK的157.41%和204% ($p < 0.05$);比根长和比表面积表明单位生物量可构建、维持细根的长度、表面积大小,反映根系吸收养分和水分的能力。2Y处理提高表层土壤中细根比根长和比表面积,分别为CK的147.1%和167.21% ($p < 0.05$)。在亚表层土壤中,覆膜对细根的促进作用随覆膜年限增长而减弱,6Y处理表现出显著抑制作用($p < 0.05$),分别为CK的65.03%和80.31%。

根尖数和分支数为根系构型性状,影响细根空间分布属性、营养吸收和固定能力(图4)。CK细根的根尖数和分支数均表现为亚表层土壤高于表层土壤,而各覆膜处理反之。6Y处理最显著($p < 0.05$),为表层土壤的68.67%和59.53%。各覆膜处理细根在土壤亚表层的根系构型特征受抑制,2Y、4Y和6Y处理分支数分别为CK的41.74%、31.58%和60.07% ($p < 0.05$)。

根的解剖结构与植物生理功能密切相关,体现根系生长发育水平,其导管密度、直径、管壁厚度和横截面积均与植物抗逆性紧密联系(图5)。CK在表层土壤中细根导管较细、管壁薄、密度低、横截面积小;在亚表层土壤中,导管变粗、管壁变厚、密度和横截面积显著增大,分别为表层土壤的145.57%、161.31%、307.66%和321.95%。表层土壤6Y处理细根导管直径和管壁厚度增大,分别为CK的142.4%和161.31%;亚表层土壤中,导管密度和横截面积

降低,分别为CK的42.87%和82.28% ($p < 0.05$)。

2.3 不同覆膜年限土壤物理性状与根系生长的相关性分析

土壤密度是土壤的重要物理性质,土壤紧实度的敏感性指标,影响根系在土壤中的穿透阻力。由表3可知,亚表层土壤密度与该土层黏粒含量、物理性黏粒含量、PD和PAD均呈极显著正相关关系($r = 0.655^{**}$ 、 0.673^{**} 、 0.628^{**} 、 0.694^{**}),与水稳性团聚体MWD和GMD呈极显著负相关关系($r = -0.678^{**}$ 、 -0.697^{**})。即土壤团聚体稳定性差,导致土壤结构体破碎,活性黏粒随水移动填充土壤孔隙,因此PD增大、土壤密度较高;土壤含水量与物理性黏粒含量和PAD均呈极显著负相关关系($r = -0.737^{**}$ 、 -0.745^{**}),与水稳性团聚体MWD和GMD均呈极显著正相关关系($r = 0.746^{**}$ 、 0.73^{**}),表明物理性黏粒的累积和团聚体的不稳定状态不利于土壤水分存蓄;而土壤有机质含量与土壤含水量、水稳性团聚体GMD均呈极显著正相关关系($r = 0.784^{**}$ 、 0.678^{**}),与物理性黏粒含量、PAD均呈极显著负相关关系($r = -0.696^{**}$ 、 -0.605^{**}),表明土壤含水量下降、结构退化不利于土壤有机质含量的提高。黄土高原的土壤细粉粒和中粉粒占比最大,物理性黏粒由黏粒、粗黏粒、细粉粒和中粉粒在内的直径 <0.05 mm的土壤颗粒组成,是黄绵土的主要构成成分,因此本试验中土壤物理性黏粒含量与各土壤物理性状的相关关系大于黏粒总含量。

将亚表层土壤各理化性状与细根数量、形态、构型和解剖性状做相关性分析(表4)可知,细根数量性状(根长、根表面积)与土壤总孔隙度、毛管孔隙度、通气度、水稳性团聚体MWD和GMD均呈极显

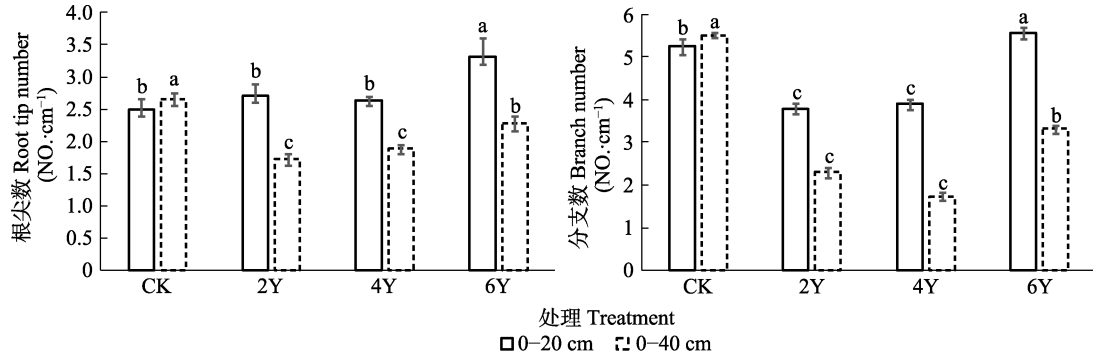


图4 甘肃陇东苹果园不同覆膜年限苹果树细根构型性状土层差异(平均值±标准差)。CK, 对照; 2Y, 覆膜2年; 4Y, 覆膜4年; 6Y, 覆膜6年。不同小写字母表示不同处理间各指标存在显著性差异($p < 0.05$)。

Fig. 4 Soil layer difference of fine root architecture characters with different years of film mulching apple orchard in Longdong, Gansu (mean \pm SD). CK, control treatment; 2Y, mulching for 2 years; 4Y, mulching for 4 years; 6Y, mulching for 6 years. Different lowercase letters indicate that there are significant differences ($p < 0.05$) in each index among different treatments.

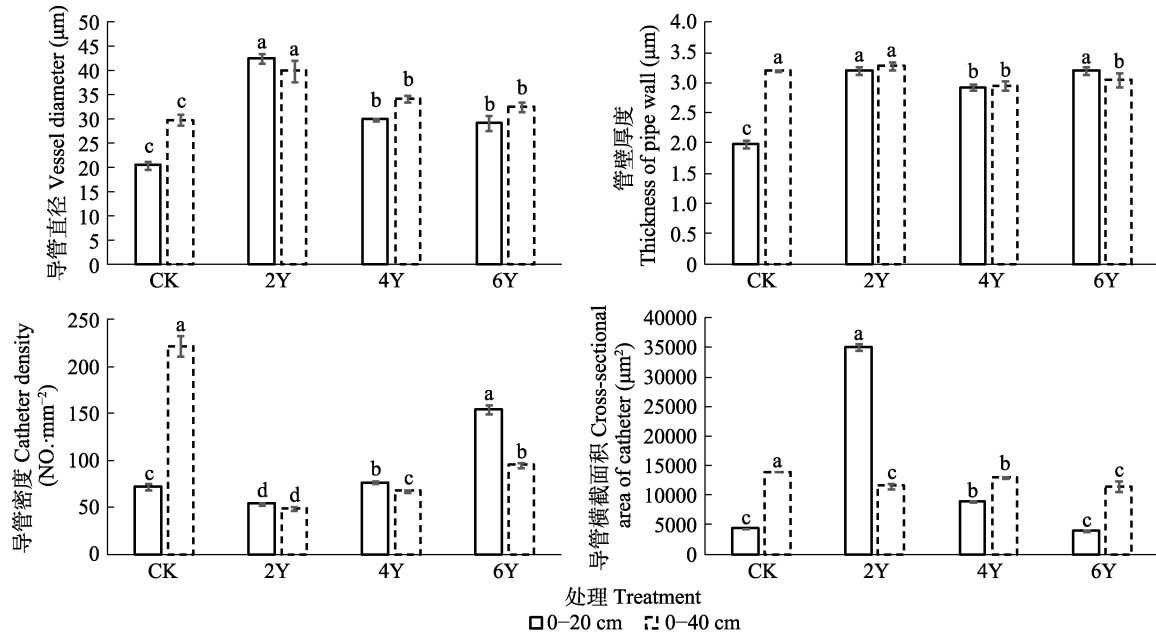


图5 甘肃陇东苹果园不同覆膜年限苹果细根解剖结构土层差异(平均值±标准差)。CK, 对照; 2Y, 覆膜2年; 4Y, 覆膜4年; 6Y, 覆膜6年。不同小写字母表示不同处理间各指标存在显著性差异($p < 0.05$)。

Fig. 5 Soil layer difference of fine roots anatomical structure with different years of film mulching apple orchard in Longdong, Gansu (mean \pm SD). CK, control treatment; 2Y, mulching for 2 years; 4Y, mulching for 4 years; 6Y, mulching for 6 years. Different lowercase letters indicate that there are significant differences ($p < 0.05$) in each index among different treatments.

著正相关关系, 与土壤黏粒含量、物理性黏粒含量、 PD 和 CL 均呈极显著负相关关系, 其中与土壤物理性黏粒含量相关性最大($r = -0.964^{**}$ 、 -0.954^{**}), 表明黏粒含量增加, 土壤团聚体结构不稳定, 透气性差, 阻碍苹果细根拓展; 根系通过对直径的调节适应根际环境, 并决定养分吸收效率。细根直径与土壤黏粒含量、物理性黏粒含量、 PD 和 CL 均呈极显著正相关关系关系($r = 0.636^{**}$ 、 0.906^{**} 、 0.711^{**} 、 0.900^{**}), 与土壤总孔隙度、毛管孔隙度和通气度呈极显著负相关关系, 表明细根直径主要受土壤质地

和有效孔隙(毛管孔隙、通气孔隙)的影响; 而细根分支主要受土壤黏粒含量和团聚体的机械稳定性影响。土壤黏粒含量高, 团聚体稳定性差, 促进细根分支。导管特征主要受土壤密度、物理性黏粒含量、 PD 和团聚体稳定性的影响。表现为土壤黏粒含量高, 土壤密度与 PD 增大、团聚体稳定性差, 则细根导管直径小、密度大。由此可知, 亚表层黏粒淀积, 土壤密度、 PD 增大, 导致苹果细根生长阻力变大, 直径增粗, 并以分支特性和导管数量的改变弥补其延伸生长变弱带来的功能差异。

表3 甘肃陇东苹果园覆膜后亚表层土壤物理性状相关性

Table 3 Correlation of soil physical properties of subsurface soil after film mulching in apple orchard of Longdong, Gansu

指标 Indicator	有机质含量 Organic matter content (g·kg ⁻¹)	土壤含水量 Soil moisture (g·cm ⁻³)	土壤密度 Soil density (g·cm ⁻³)	黏粒含量 Clay content (%)	物理性 黏粒含量 Physical clay particles content (%)	土壤压实度 Packing density of soil (g·cm ⁻³)	团聚体破坏率 Aggregates processing damage rate (%)	水稳性团聚体平 均质量直径 Mean weight diameter of water-stable aggregates (mm)	水稳性团聚体平均 几何直径 Geometric mean diameter of water-stable aggregates (mm)
有机质含量 Organic matter content (g·kg ⁻¹)	1	0.784**	0.068	0.097	-0.696**	-0.260	-0.605**	0.438	0.678**
土壤含水量 Soil moisture (g·cm ⁻³)		1	-0.132	-0.244	-0.737**	-0.411	-0.745**	0.746**	0.730**
土壤密度 Soil density (g·cm ⁻³)			1	0.655**	0.673**	0.628**	0.694**	-0.678**	-0.697**
黏粒含量 Clay content (%)				1	0.203	0.684**	0.597*	-0.567*	-0.280
物理性黏粒含量 Physical clay particles content (%)					1	0.646**	0.914**	-0.663**	-0.984**
土壤压实度 Packing density of soil (g·cm ⁻³)						1	0.719**	-0.528*	-0.619**
团聚体破坏率 Aggregates processing damage rate (%)							1	-0.839**	-0.923**
水稳性团聚体平均 质量直径 Mean weight diameter of water-stable aggregates (mm)								1	0.645**
水稳性团聚体平均 几何直径 Geometric mean diameter of water- stable aggregates (mm)									1

** $p < 0.01$; * $p < 0.05$ 。

表4 甘肃陇东苹果园覆膜后亚表层土壤物理性状与细根生长相关性

Table 4 Correlation between physical properties of subsurface soil and fine root growth after film mulching in apple orchard of Longdong, Gansu

指标 Indicator	根长 Root length (cm)	根表面积 Root surface area (cm ²)	平均根径 Average root diameter (mm)	比根长 Specific root length (cm·g ⁻¹)	分支数 Branch number (NO·cm ⁻¹)	导管直径 Vessel diameter (μm)	导管密度 Catheter density (NO·mm ⁻²)
有机质含量 Organic matter content (g·kg ⁻¹)	0.312	0.552*	-0.567*	0.656**	-0.687**	0.400	-0.665**
土壤含水量 Soil moisture (g·cm ⁻³)	0.033	0.339	-0.400	0.465	-0.821**	0.379	-0.687**
土壤孔隙度 Soil porosity (%)	0.617**	0.791**	-0.690**	0.479	-0.508*	0.429	-0.541*
土壤密度 Soil density (g·cm ⁻³)	-0.611**	-0.147	-0.230	0.319	0.622**	-0.677**	0.751**
土壤通气度 Soil aeration (%)	0.723**	0.709**	-0.736**	0.645**	0.088	-0.152	-0.561*
毛管孔隙度 Capillary porosity (%)	0.747**	0.773**	-0.589**	0.543*	-0.527*	0.603**	-0.579*
黏粒含量 Clay content (%)	-0.568**	-0.553**	0.636**	-0.595*	0.607**	-0.289	0.710**
物理性黏粒含量 Physical clay particles content (%)	-0.964**	-0.954**	0.906**	-0.817**	0.612**	-0.835**	0.774**
土壤压实度 Packing density of soil (g·cm ⁻³)	-0.557*	-0.697**	0.717**	-0.811**	0.607**	-0.623**	0.719**
土壤板结系数 Limit of soil compaction	-0.858**	-0.932**	0.900**	-0.797**	0.622**	-0.218	-0.397
团聚体破坏率 Aggregates processing damage rate (%)	-0.621**	-0.651**	0.046	-0.321	0.966**	-0.790**	0.734**
水稳系数 Water stability coefficient (%)	0.459	0.586*	0.172	0.333	-0.956**	0.834**	-0.818**
水稳性团聚体平均质量直径 Mean weight diameter of water-stable aggregates (mm)	0.231	0.798**	-0.127	-0.268	-0.853**	0.430	-0.537*
水稳性团聚体平均几何直径 Geometric mean diameter of water-stable aggregates (mm)	0.701**	0.393	-0.233	0.417	-0.928**	0.845**	-0.634**

** $p < 0.01$; * $p < 0.05$ 。

2.4 不同覆膜处理对土壤及根系影响的主成分分析

根系性状指标多样, 借助主成分分析通过降维, 对细根根长、表面积、直径、比根长、比表面积、根尖数、分支数和导管直径等16个指标抽取主要因子, 探究覆膜处理对苹果细根生长发育的影响。由表5可知, 根据主成分方差贡献率和累积贡献率选出2个主成分(>85%), 代表89.15%综合信息, 可利用该主成分的主要载荷因子作为综合评价苹果细根变异的指标。第一主成分中载荷值较大的指标为根长和分支数, 代表根系数量、分支特性; 第二主成分为导管直径和导管密度, 代表根系解剖特征。即亚表层土壤中苹果细根由数量、分支和解剖特性产生生长差异应对覆膜年限差异带来的影响。对各处理进行综合得分排名, 覆膜不利于亚表层土壤苹果细根生长, 尤其是长期覆膜(4Y和6Y)综合得分为-0.50、-0.72, 表现出显著抑制作用, 并随覆膜年限延长而增大。

对亚表层土壤有机质含量、土壤含水量、土壤密度、总孔隙度、毛管孔隙度、土壤通气度、黏粒含量、物理性黏粒含量、PD、PAD、WSC、水稳性团聚体MWD和GMD等18个指标进行主成分分析, 选出2个主成分(>85%)代表86.34%综合信息。第一主成分中载荷值较大的指标为物理性黏粒含量、水稳性团聚体GMD、有机质含量、WSC和PAD, 可代表土壤质地、有机质和团聚体特征; 第二主成分为土壤密度和PD, 代表土壤紧实特性, 即覆膜影响亚

表层土壤质地、团聚体、有机质和紧实度特性。对各处理进行综合得分排名可知, 2Y处理可优化亚表层土壤理化特性, 4Y和6Y处理综合得分为-0.123、-0.913, 对亚表层土壤具有显著破坏作用。

3 讨论

3.1 覆膜年限介导下苹果园亚表层土壤物理结构稳定性分异规律

目前对农田、林地的土壤肥力质量演变研究较为丰富(卜玉山等, 2010), 而对于具有气候特殊性、生态脆弱性的黄土高原苹果园土壤物理质量演化的关注较为欠缺(张琨等, 2020)。本研究结果显示, 由于果园日常管理踩踏严重、水分蒸发剧烈, CK表层土壤密度、黏粒含量、PD和CL均高于亚表层土壤。2Y处理可有效避免践踏压实及降雨溅蚀破坏, 改善土壤总孔隙度和毛管孔隙度, 降低土壤密度, 分别为CK的105.65%、104.29%和90.77%。同时有效提高土壤团聚体稳定性, PAD仅为CK的80.78%。6Y处理降低表层土壤孔隙度, 并分别增大表层、亚表层土壤黏粒含量和物理性黏粒含量, 分别为CK的102.37%、106.36%和101.16%、113.27%。物理性黏粒作为土壤结构稳定性首要载荷因子与PAD、水稳性团聚体MWD、GMD和PD呈极显著相关关系($r = 0.914^{**}$ 、 -0.663^{**} 、 -0.984^{**} 、 0.646^{**}), 其含量的增加导致土壤团聚体水稳性下降、PD增大。可见覆膜对土壤的保护作用随年限延长逐渐转变为破坏作用, 改变土壤颗粒组成, 降低肥水保蓄能力。6Y处理在

表5 甘肃陇东苹果园覆膜后亚表层根系与土壤各性状主成分分析

Table 5 Principal component analysis of subsurface root and soil characters after film mulching in apple orchard of Longdong, Gansu

指标 Indicator	主成分 Principal component	方差贡献率 Variance contribution rate (%)	累积贡献率 Cumulative contribution rate (%)	载荷矩阵 Load matrix	综合得分 Composite scores	综合排名 Comprehensive ranking
根系 Root	1	63.66	63.66	根长、分支数 Root length, Branch number	CK 0.98	1
					2Y 0.24	2
	2	25.49	89.15	导管直径、导管密度 Vessel diameter, Catheter density	4Y -0.50	3
					6Y -0.72	4
土壤 Soil	1	59.98	59.98	物理性黏粒含量、水稳性团聚体平均几何直径、有机质含量、水稳系数、团聚体破坏率 Physical clay particles content, Geometric mean diameter of water-stable aggregates, Organic matter content, Water stability coefficient, Aggregates processing damage rate	CK 0.10	2
					2Y 0.93	1
	2	26.37	86.34	土壤密度、土壤压实度 Soil density, Packing density of soil	4Y -0.12	3
					6Y -0.91	4

CK, 对照; 2Y, 覆膜2年; 4Y, 覆膜4年; 6Y, 覆膜6年。

CK, control treatment; 2Y, mulching for 2 years; 4Y, mulching for 4 years; 6Y, mulching for 6 years.

表层、亚表层土层的土壤含水量、有机质含量分别为CK的90.79%、83.32%和92.97%、75.86%，与卜玉山等(2010)的研究结果一致。

果园地面覆盖可改变土壤水温变化规律，尤其覆膜后土层间较大温差可加剧“夜潮”现象发生(徐佳星等, 2020)，水汽凝结回落于膜下循环。表层土壤频繁的干湿交替成为土体收缩-膨胀的主要动力(巩学鹏等, 2019)。土壤的膨胀-收缩可导致大团聚体破碎，“活性黏粒”释放并随水移动淀积，堵塞孔隙，增大土壤密度和PD(祝飞华等, 2015)。且干湿交替易促使水分进入毛管孔隙，压缩闭蓄态空气，使团聚体破碎(刘均阳等, 2020)。胥生荣等(2018)在旱地覆膜枸杞根系生长与土壤环境研究中表明，覆膜具有显著增温效果，但蒸腾耗水使土壤深层储水量显著减小。地膜覆盖的增产效果在欠水年难以实现，并造成深层土壤水分耗竭(董云云, 2020)。本研究6Y处理长期频繁的干湿交替促使土壤结构体破碎，黏粒向土壤亚表层移动，产生明显的“淀积黏化”作用。长期未对土壤进行翻动，加剧黏粒在亚表层土壤中的积累，填充土壤孔隙，堵塞水气传送通道，使亚表层毛管孔隙显著低于表层土壤；土壤黏粒、物理性黏粒比例是表层土壤的102.72%和114.21%，致使回落的凝结水难以下渗至40 cm以下土层。加之表层土壤细根耗水量巨大，亚表层土壤含水量仅为CK的75.86%；土壤密度为 $1.28 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，该数值虽然尚处于砂壤土最佳土壤密度变异范围($1.20\text{--}1.30 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)内，但其总孔隙度处于压实状态(40%–45%)；PD为 $2.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，超出最高阈值($1.75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)，因此6Y处理的亚表层土壤处于严重压实状态(魏彬萌等, 2015, 2021)。由于覆膜后减少耕作扰动，不涉及机械压实，亚表层土壤紧实原因归结于“自然压实”，使土壤紧实与含水量下降共同危害苹果细根的正常生长。

土壤团聚体是评价土壤质量高低和诊断土地退化程度的重要指标(石宗琳等, 2017)。各覆膜处理的亚表层土壤 $DR_{0.25}$ 为71.35%–91.04%， $WR_{0.25}$ 为14.76%–28.93%。 $DR_{0.25} > 60\%$ 为优良团聚状态， $WR_{0.25} < 30\%$ 属于不良团聚状态(魏彬萌等, 2021)。虽然覆膜后亚表层土壤机械稳定性团聚体属优良级团聚状态，但从团聚体农艺质量来看，水力学稳定性较差，与魏彬萌等(2021)对渭北旱塬苹果园亚表层土壤研究结果一致。黏粒的深层淀积既造成了土壤团聚物

质基础的差异，也影响了深层土壤的通透性(魏彬萌等, 2015)，因此土壤物理性黏粒含量变化与土壤水稳性团聚体稳定性呈极显著负相关关系($r = -0.663^{**}$ 、 -0.984^{**})，并与团聚体的稳定性指标共同抽取为主要载荷因子，表明长期覆膜后土壤团聚体农艺性状的劣化可主导土壤质量退化。即长期覆膜后，亚表层土壤的团聚体特征优先受影响，呈“隐形”退化，与前人的研究结果(孙蕾等, 2011；石宗琳等, 2017)一致。

3.2 长期覆膜土壤物理退化对细根生长适应策略的影响

细根的形态结构和垂直分布特征决定了植物对立地资源利用能力的高低(高玉寒等, 2017)。黄土高原秋季集中降雨可有效缓解土壤干旱，提高根际资源有效性，同时采果后的养分回流可有效补偿根系构建的碳消耗。面对不同生境，根系通过权衡碳分配呈现生态适应策略差异。根长决定根系在土壤中营养吸收和空间拓展能力，分支数则影响根系空间分布属性、营养吸收效率和固定作用(Mooney *et al.*, 2010)，可直观通过二者的权衡关系反映植物根系的吸收效率与构建策略(Kong *et al.*, 2014)。在本研究覆膜对亚表层土壤中苹果细根生长的影响中得以验证，根长与分支特性是对覆膜措施最敏感的根系生长指标。

土壤资源空间异质性决定根系生长策略。良好的表层土壤理化性状使2Y处理增大细根根长、减少分支数，分别为CK的256.07%、72.33%。构建减少分支的较长根系，有利于避免根系生态位的交叠重复以及减少过多分支带来的碳消耗，增强根系空间拓展能力(宋清华等, 2015)。6Y处理的表层土壤细根分支数、根径、导管直径和导管密度均显著高于CK，而由于亚表层土壤黏粒沉积、土壤含水量下降，造成土壤孔隙结构破坏，土壤密度增加，土壤团聚体稳定性下降，细根伸长生长受显著抑制，仅为CK、2Y和4Y处理的50.08%、64.59%和80.35%。宋清华等(2015)指出甘肃臭草(*Melica przewalskyi*)分配至根系分支数与根长的资源存在“此消彼长”的权衡关系，反映根系获取资源策略的差异；李雪萍等(2019)研究表明，在水肥条件优良的土壤中，甘肃马先蒿(*Pedicularis kansuensis*)降低构建根系传输功能(根长的碳需求量，增强分支能力，选择“密集型”根系构建策略，反之其根系为“扩散型”；红砂(*Reaumuria*

songarica)面对地下资源竞争压力,选择增大根系分支数和比根长来提高对水肥的利用效率(郑慧玲等, 2015),本试验结果与之一致。苹果细根根长、分支特性的生长发育规律分别与土壤孔隙特性、土壤密度、黏粒含量、物理性黏粒含量、*PD*、*CL*、*PAD*、水稳性团聚体*GMD*的相关关系呈相反的趋势,即良好的土壤物理性状与稳定的土壤结构利于“扩散型”根系拓展土壤资源利用范围;反之,应对生态逆境,则选择“密集型”根系构建策略,与宋清华等(2015)对根系伸长与分支关系的研究结果一致。由此可知6Y处理的亚表层土壤紧实与干燥的特点增大了苹果细根的生长阻力,在该土层的生长量降低;土壤“隐形”退化促进细根分支,最大限度保证细根与土壤的接触面积,在有限生存空间中满足生存需求(Colombi *et al.*, 2017; Potocka & Szymanowska-Pulka, 2018)。而表层土壤理化性状优于亚表层,为弥补亚表层土壤的细根亏缺与资源匮乏造成的功能障碍,促进“密集型”细根网络占据表层土壤,提高资源获取能力,即“在土壤资源丰富的环境中,分支数较大可使根系迅速占据土壤空间快速生长”(郭京衡等, 2014)。

植物通过调整根系空间分布和形态结构等适应生境变化,同时作为土壤与植物的桥梁,根系可采取多种机制改善土壤理化性状。除老化、死亡根系的腐解物、淀积物可向根际土壤补充碳源外(Jackson *et al.*, 2017),细根通过在土体中交错、穿插和物理缠绕提高土壤水稳性团粒结构(吕渡等, 2018)。本研究中,细根根长与*PAD*、水稳性团聚体*GMD*均呈极显著相关关系($r = -0.621^{**}$ 、 0.701^{**}),根表面积与*PAD*、水稳性团聚体*MWD*均呈极显著相关关系($r = -0.651^{**}$ 、 0.798^{**}),表明苹果细根生长有利于土壤结构稳定。有研究表明植物根系的延伸能促进土壤开裂形成大孔隙或孔道,但也有学者指出根系生长对周边土壤的挤压作用会影响小孔隙形成;大孔隙使根系与土壤接触不紧密,干旱条件下更易失水(孙梅等, 2015);还有学者表明根系残体可在某种程度上破坏毛管孔隙的连续性(李永宁等, 2019)。本研究中,土壤毛管孔隙度、总孔隙度均与苹果细根根长、根表面积呈极显著正相关关系($r = 0.747^{**}$ 、 0.773^{**} 、 0.617^{**} 、 0.791^{**}),表明覆膜后细根生长有利于改善土壤孔隙结构。但细根的生长与土壤水分含量无相关性,可能是由于膜下频繁的干湿交替与密集细根

强大的耗水作用相互交织,干扰了细根对与水分的反馈,其机理有待于进一步研究。

4 结论

1)短期覆膜(2年, 2Y)不仅对表层土壤有保护作用,还可改善亚表层土壤物理性状,提高团聚体稳定性,根系采取“扩散型”生长策略。

2)长期覆膜(6年, 6Y)显著降低亚表层土壤团聚体稳定性,增大土壤密度、压实密度和土壤板结系数,形成短粗根系构成的“密集型”根系网络,提高就地资源获取能力。

3)陇东旱塬苹果园长期覆膜,亚表层土壤团聚体稳定性优先受到影响,呈“隐形”退化,不利于土壤水肥储蓄。建议生产中适时揭膜,重视亚表层土壤物理结构保护。

参考文献

- Bu YS, Miao GY, Zhou NY, Shao HL, Wang JC (2006). Analysis and comparison of the effects of plastic film mulching and straw mulching on soil fertility. *Scientia Agricultura Sinica*, 39, 1069-1075. [卜玉山, 苗果园, 周乃健, 邵海林, 王建程 (2006). 地膜和秸秆覆盖土壤肥力效应分析与比较. 中国农业科学, 39, 1069-1075.]
- Bu YS, Shao HL, Wang JC, Miao GY (2010). Dynamics of soil carbon and nitrogen in plowed layer of spring corn and spring wheat fields mulched with straw and plastic film. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 18, 322-326. [卜玉山, 邵海林, 王建程, 苗果园 (2010). 秸秆与地膜覆盖春玉米和春小麦耕层土壤碳氮动态. 中国生态农业学报, 18, 322-326.]
- Chen ZX, Wang WL, Guo MM, Wang TC, Guo WZ, Wang WX, Kang HL, Yang B, Zhao M (2020). Effects of vegetation restoration on soil erodibility on different geomorphological locations in the loess-tableland and gully region of the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 35, 387-398. [陈卓鑫, 王文龙, 郭明明, 王天超, 郭文召, 王文鑫, 康宏亮, 杨波, 赵满 (2020). 黄土高原沟壑区植被恢复对不同地貌部位土壤可蚀性的影响. 自然资源学报, 35, 387-398.]
- Colombi T, Kirchgessner N, Walter A, Keller T (2017). Root tip shape governs root elongation rate under increased soil strength. *Plant Physiology*, 174, 2289-2301.
- Dong YY (2020). *Effects of Plastic Film and Straw Mulching on Soil Physical Properties and Crop Yield of Dry Cropland in Hilly and Gully Region of the Loess Plateau*. PhD dissertation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi. [董云云 (2020). 地膜和秸秆覆盖对黄土高原丘陵沟壑区旱作农田土壤物理特性及作物产量的影响. 博士学位

- 位论文, 西北农林科技大学, 陕西杨凌.]
- Elliott ET (1986). Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soil. *Soil Science Society of America Journal*, 50, 627-633.
- Feng LQ, Wang WL, Guo MM, Shi QH, Chen TD, Kang HL (2020). Effects of root density on gully headcut erosion and morphological evolution process in gully regions of Loess Plateau. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 36, 88-96. [冯兰茜, 王文龙, 郭明明, 史倩华, 陈同德, 康宏亮 (2020). 根系密度对黄土塬沟头溯源侵蚀产沙和形态演化过程的影响. 农业工程学报, 36, 88-96.]
- Gao YH, Yao YF, Guo YF, Zhao WH, Wen J, Yang Y, Qi W (2017). Response of *Caragana microphylla* fine root surface area density to spatial distribution of soil moisture. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33, 136-142. [高玉寒, 姚云峰, 郭月峰, 赵文昊, 温健, 杨阳, 祁伟 (2017). 柠条锦鸡儿细根表面积密度对土壤水分空间分布的响应. 农业工程学报, 33, 136-142.]
- Gong XP, Tang CS, Shi B, Wang HS, Leng T, Tan YZ, Deng YF (2019). Evolution of soil microstructure during drying and wetting. *Journal of Engineering Geology*, 27, 775-793. [巩学鹏, 唐朝生, 施斌, 王宏胜, 冷挺, 谈云志, 邓永锋 (2019). 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, 27, 775-793.]
- Guo JH, Zeng FJ, Li CJ, Zhang B (2014). Root architecture and ecological adaptation strategies in three shelterbelt plant species in the southern Taklimakan Desert. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 36-44. [郭京衡, 曾凡江, 李尝君, 张波 (2014). 塔克拉玛干沙漠南缘三种防护林植物根系构型及其生态适应策略. 植物生态学报, 38, 36-44.]
- Jackson RB, Lajtha K, Crow SE, Hugelius G, Kramer MG, Piñeip G (2017). The ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 48, 419-445.
- Kong XP, Zhang ML, de Smet I, Ding ZJ (2014). Designer crops: optimal root system architecture for nutrient acquisition. *Trends in Biotechnology*, 32, 597-598.
- Li XP, Zhao CZ, Ren Y, Zhang J, Lei L (2019). Relationship between root forks and link number, branch angle of *Pedicularis kansuensis* under different density conditions in Gahai Wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 3670-3676. [李雪萍, 赵成章, 任悦, 张晶, 雷蕾 (2019). 尕斯库勒湖不同密度下甘肃马先蒿根系分叉数与连接数、分支角度的关系. 生态学报, 39, 3670-3676.]
- Li YN, Wang ZY, Wang B, Zhang BQ, Zhang NN (2019). Differences in soil physical properties of typical vegetation in loess hilly region and effects on water conductivity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 33, 176-181. [李永宁, 王忠禹, 王兵, 张宝琦, 张娜娜 (2019). 黄土丘陵区典型植被土壤物理性质差异及其对导水特性影响. 水土保持学报, 33, 176-181.]
- Liu JY, Zhou ZC, Su XM (2020). Review of the mechanism of root system on the formation of soil aggregates. *Journal of Soil and Water Conservation*, 34, 267-273. [刘均阳, 周正朝, 苏雪萌 (2020). 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, 34, 267-273.]
- Lü D, Yang YH, Zhao WH, Lei SY, Zhang XP (2018). Fine root biomass distribution and coupling to soil physicochemical properties under different restored vegetation types. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 3979-3987. [吕渡, 杨亚辉, 赵文慧, 雷斯越, 张晓萍 (2018). 不同恢复类型植被细根分布及与土壤理化性质的耦合关系. 生态学报, 38, 3979-3987.]
- Lü JT (2017). *Effects of Straw Incorporation and Plastic Film Mulch on Soil Physicochemical Properties*. PhD dissertation, Lanzhou University, Lanzhou. [吕洁婷 (2017). 秸秆还田与地膜覆盖对土壤理化性状影响. 博士学位论文, 兰州大学, 兰州.]
- Martre P, Durand JL, Cochard H (2000). Changes in axial hydraulic conductivity along elongating leaf blades in relation to xylem maturation in tall fescue. *New Phytologist*, 146, 235-247.
- Mooney KA, Halitschke R, Kessler A, Agrawal AA (2010). Evolutionary trade-offs in plants mediate the strength of trophic cascades. *Science*, 327, 1642-1644.
- Potocka I, Szymanowska-Pulka J (2018). Morphological responses of plant roots to mechanical stress. *Annals of Botany*, 122, 711-723.
- Shan LS, Su M, Zhang ZZ, Wang Y, Wang S, Li Y (2018). Vertical distribution pattern of mixed root systems of desert plants—*Reaumuria soongarica* and *Salsola passerina* under different environmental gradients. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 475-486. [单立山, 苏铭, 张正中, 王洋, 王珊, 李毅 (2018). 不同生境下荒漠植物红砂-珍珠猪毛菜混生根系的垂直分布规律. 植物生态学报, 42, 475-486.]
- Shi ZL, Wang JX, Liang HX, Shi HP, Wei BM, Wang YQ (2017). Status and evolution of soil aggregates in apple orchards different in age in Weibei. *Acta Pedologica Sinica*, 54, 387-399. [石宗琳, 王加旭, 梁化学, 史红平, 魏彬萌, 王益权 (2017). 渭北不同园龄苹果园土壤团聚体状况及演变趋势研究. 土壤学报, 54, 387-399.]
- Shi ZL, Wu DY, Wang YQ, Gao XK, Mu JD (2019). Effects of different planting years on soil physical and chemical properties in orchards in Weibei areas. *Journal of Henan Agricultural University*, 53, 799-805. [石宗琳, 武大勇, 王益权, 高小宽, 慕建东 (2019). 不同种植年限对渭北地区果园土壤理化性质的影响. 河南农业大学学报, 53, 799-805.]
- Song QH, Zhao CZ, Shi YC, Du J, Wang JW, Chen J (2015). Trade-off between root forks and link length of *Melica przewalskyi* on different aspects of slopes. *Chinese Journal*

- of *Plant Ecology*, 39, 577-585. [宋清华, 赵成章, 史元春, 杜晶, 王继伟, 陈静 (2015). 不同坡向甘肃臭草根系分叉数和连接长度的权衡关系. *植物生态学报*, 39, 577-585.]
- Sun L, Wang YQ, Zhang YL, Li JB, Hu HY (2011). Dual effect of fruit tree cultivation on soil physical characteristics. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 19, 19-23. [孙蕾, 王益权, 张育林, 李建波, 胡海燕 (2011). 种植果树对土壤物理性状的双重效应. *中国生态农业学报*, 19, 19-23.]
- Sun M, Huang YX, Sun N, Xu MG, Wang BR, Zhang XB (2015). Advance in soil pore and its influencing factors. *Chinese Journal of Soil Science*, 46, 233-238. [孙梅, 黄运湘, 孙楠, 徐明岗, 王伯仁, 张旭博 (2015). 农田土壤孔隙及其影响因素研究进展. *土壤通报*, 46, 233-238.]
- Sun WT, Liu XL, Dong T, Yin XN, Niu JQ, Ma M (2015). Root distribution, soil characteristics, root distribution and fruit quality affected by different mulching measures in apple orchard in the dry area of eastern Gansu. *Journal of Fruit Science*, 32, 841-851. [孙文泰, 刘兴禄, 董铁, 尹晓宁, 牛军强, 马明 (2015). 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*, 32, 841-851.]
- Sun WT, Ma M, Dong T, Liu XL, Zhao MX, Yin XN, Niu JQ (2016). Response of distribution pattern and physiological characteristics of apple roots grown in the dry area of eastern Gansu to ground mulching. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27, 3153-3163. [孙文泰, 马明, 董铁, 刘兴禄, 赵明新, 尹晓宁, 牛军强 (2016). 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*, 27, 3153-3163.]
- Wang JX, Wang YQ, Li X, Liang HX, Shi HP, Shi ZL (2017). Evaluation of soil physical state in Guanzhong farmland. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 35, 245-252. [王加旭, 王益权, 李欣, 梁化学, 史红平, 石宗琳 (2017). 关中农田土壤物理状态与分析. *干旱地区农业研究*, 35, 245-252.]
- Wang YQ, Shi ZL, Jiao CQ, Li P, Wei Y, Zhang L, Wang YJ, Qu Z (2016). Analysis of the harmfulness of soil fatigue under intensive agriculture. *Land Development Engineering Research*, 1, 57-64. [王益权, 石宗琳, 焦采强, 李鹏, 魏样, 张露, 王永建, 曲植 (2016). 密集型农业生产条件下土壤疲劳及其危害性浅析. *土地开发工程研究*, 1, 57-64.]
- Wang SY, Li XH, Cheng N, Fu SF, Li SY, Sun LJ, An TT, Wang JK (2021). Effects of plastic film mulching and fertilization on the sequestration of carbon and nitrogen from straw in soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 54, 345-356. [王淑颖, 李小红, 程娜, 付时丰, 李双异, 孙良杰, 安婷婷, 汪景宽 (2021). 地膜覆盖与施肥对秸秆碳氮在土壤中固存的影响. *中国农业科学*, 54, 345-356.]
- Wei BM, Li ZH, Wang YQ (2021). Status and causes of soil compaction at apple orchards in the Weibei dry highland, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 32, 976-982. [魏彬萌, 李忠徽, 王益权 (2021). 渭北旱塬苹果园土壤紧实化现状及成因. *应用生态学报*, 32, 976-982.]
- Wei BM, Wang YQ, Li ZH (2018). Effects of planting apple trees on distribution of soil cementing materials in Weibei apple orchards. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 26, 1692-1700. [魏彬萌, 王益权, 李忠徽 (2018). 种植苹果树对渭北果园土壤胶结物质分布的影响. *中国生态农业学报*, 26, 1692-1700.]
- Wei BM, Wang YQ, Shi ZL, Li P, Shi HP, Liang HX, Wang JX (2015). Calcium degradation status of orchard soil in Weibei region, Shaanxi Province, China. *Scientia Agricultura Sinica*, 48, 2199-2207. [魏彬萌, 王益权, 石宗琳, 李鹏, 史红平, 梁化学, 王加旭 (2015). 渭北苹果园土壤钙素退化状态. *中国农业科学*, 48, 2199-2207.]
- Xu GR, Ma WW, Song LC, Tang YM, Zhou XL, Shang YX, Yang X (2020). Characteristics of soil nitrogen content and enzyme activity in Gahai wetland under different vegetation degradation conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 40, 8917-8927. [徐国荣, 马维伟, 宋良翠, 唐艳梅, 周晓雷, 尚友贤, 杨玺 (2020). 植被不同退化状态下尕斯库勒湖湿地土壤氮含量及酶活性特征. *生态学报*, 40, 8917-8927.]
- Xu JX, Feng YT, Ye YL, Zhang RZ, Hu CL, Lei T, Zhang SL (2020). Effects of plastic film mulching on yield and water use of maize in the Loess Plateau. *Scientia Agricultura Sinica*, 53, 2349-2359. [徐佳星, 封涌涛, 叶玉莲, 张润泽, 胡昌录, 雷同, 张树兰 (2020). 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*, 53, 2349-2359.]
- Xu LQ, Cui DH, Wang QC, Zhang Y, Ma SJ, Zhu KY, Hu JW, Li HL (2020). Root architecture and fine root characteristics of *Juglans mandshurica* saplings in different habitats in the secondary forest on the west slope of Zhanguangcailing, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 31, 373-380. [徐立清, 崔东海, 王庆成, 张勇, 马双娇, 朱凯月, 胡建文, 李红丽 (2020). 张广才岭西坡次生林不同生境胡桃楸幼树根系构型及细根特征. *应用生态学报*, 31, 373-380.]
- Xu SR, Zhang EH, Ma RL, Wang Q, Liu QL, Wang HL (2018). Effects of mulching patterns on root growth and soil environment of *Lycium barbarum*. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 26, 1802-1810. [胥生荣, 张恩和, 马瑞丽, 王琦, 刘青林, 王鹤龄 (2018). 不同覆盖措施对枸杞根系生长和土壤环境的影响. *中国生态农业学报*, 26, 1802-1810.]
- Zhang DQ, Liao YC, Jia ZK (2005). Research advances and prospects of film mulching in arid and semi-arid areas. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 23, 208-213. [张德奇, 廖允成, 贾志宽 (2005). 旱区地膜覆盖技术的研究进展及发展前景. *干旱地区农业研究*, 23, 208-213.]
- Zheng HL, Zhao CZ, Xu T, Duan BB, Han L, Feng W (2015).

- Trade-off relationship between root forks and branch angle of *Reaumuria songarica* on different aspects of slopes. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 1062-1070. [郑慧玲, 赵成章, 徐婷, 段贝贝, 韩玲, 冯威 (2015). 红砂根系分叉数和分支角度权衡关系的坡向差异. 植物生态学报, 39, 1062-1070.]
- Zhang K, Lyu YH, Fu BJ, Yin LC, Yu DD (2020). The effects of vegetation coverage changes on ecosystem service and their threshold in the Loess Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 75, 949-960. [张琨, 吕一河, 傅伯杰, 尹礼唱, 于丹丹 (2020). 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值. 地理学报, 75, 949-960.]
- Zheng BZ (2012). *Technical Guide for Soil Analysis*. 3rd ed. China Agriculture Press, Beijing. 28. [郑必昭 (2012). 土壤分析技术指南. 3版. 中国农业出版社, 北京. 28.]
- Zhu FH, Wang YQ, Shi ZL, Zhang RX, Ran YL, Wang YC (2015). Effects of rotational tillage on soil physical properties and winter wheat root growth on annual double cropping area. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 7454-7463. [祝飞华, 王益权, 石宗琳, 张润霞, 冉艳玲, 王亚城 (2015). 轮耕对关中一年两熟区土壤物理性状和冬小麦根系生长的影响. 生态学报, 35, 7454-7463.]

责任编辑: 李彦 责任编辑: 李敏