中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

陇东旱塬苹果细根对覆膜的可塑性响应

孙文泰，马　明，董　铁，牛军强，尹晓宁，刘兴禄

Response of fine roots of apple to plastic film mulching in the dry tableland of eastern Gansu

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

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210071

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

直立型扁蓿豆对干旱胁迫和复水的响应及适应策略

Medicago ruthenica (L.) Sojak. cv. Zhilixing response and adaptation strategy to drought stress and rehydration

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(12): 1901–1912

密度与地膜覆盖对旱塬幼龄果园中大豆综合生产力的影响

Effects of planting density and film mulching on the integrated productivity of soybean in young apple orchard of the Loess Plateau

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(7): 1138–1150

牛粪和生物炭对苹果根系生长、土壤特性和氮素利用的影响

Effects of cow dung and biochar on root growth, soil properties and nitrogen utilization of apple

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(12): 1795–1801

旱地春玉米不同覆膜种植模式的增产效应

Yield-increase effect of film-mulching and planting pattern on dryland spring maize

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(1): 75–82

有机和常规苹果生产环境影响的生命周期评价

Environmental impact assessment via life cycle analysis for organic and conventional apple productions

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(10): 1527–1534

苹果不同砧穗组合对碳储量的影响研究

Influence of apple grafting combinations on carbon storage in orchards

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(8): 1350–1358

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 9 月 第 29 卷 第 9 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Sep. 2021, 29(9): 1533−1545

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.210071

孙文泰, 马明, 董铁, 牛军强, 尹晓宁, 刘兴禄. 陇东旱塬苹果细根对覆膜的可塑性响应 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(9): 1533−1545
SUN W T, MA M, DONG T, NIU J Q, YIN X N, LIU X L. Response of fine roots of apple to plastic film mulching in the dry table-land of eastern Gansu[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(9): 1533−1545

陇东旱塬苹果细根对覆膜的可塑性响应*

孙文泰, 马 明, 董 铁, 牛军强, 尹晓宁, 刘兴禄

(甘肃省农业科学院林果花卉研究所 兰州 730070)

摘 要: 为探明陇东旱塬苹果树根系年周期生长动态规律, 以及覆膜保墒措施下垂直土层根系数量、形态、分支特性、土壤理化性状的时空差异, 以 18 a 生苹果树 (‘长富 2 号’/山定子) 为试材, 于苹果根系 3 次发根高峰: 春季萌芽至新梢旺长前 (Ⅰ)、新梢停长期 (Ⅱ) 和采果后至落叶期 (Ⅲ), 采用土壤剖面法调查清耕 (CK)、覆膜 2 a (2Y)、覆膜 4 a (4Y) 和覆膜 6 a (6Y) 的根系空间分布, 并对根系生物量、根长、表面积、比根长、比分支数等进行测定, 探索不同覆膜年限处理下细根生长时空动态特征。借助回归统计分析, 阐明苹果树细根生长策略对覆膜年限的响应。结果表明: 在苹果根系生长年周期中, 第Ⅲ次发根高峰最为重要。各处理苹果细根在第Ⅲ次发根高峰的生物量占 3 次发根高峰期总生物量的 73.55%~84.85%, 在第Ⅰ发根高峰表层土壤 (0~20 cm) 的细根分支数分别为第Ⅲ次发根高峰的 130.67%、100.53%、156.63% 和 238.63%, 可提高原位土壤资源利用效率; 在第Ⅲ次发根高峰中, CK 促进细根根长与根表面积在表层土壤中的分布, 分别为第Ⅰ次发根高峰的 275.64% 和 248.96%; 并抑制细根分支, 分支数和比分支数仅为第Ⅰ次发根高峰的 76.53% 和 14.68%, 以达到扩展有效营养空间、降低根系内部竞争的作用。短期覆膜 (2Y) 各土层的土壤含水量分别为 CK 的 112.39%、118.04%、124.06%、133.59% 和 114.49%, 细根生物量在 3 次发根高峰中分别为 CK 的 116.72%、232.35% 和 112.09%; 土壤表层细根比根长在第Ⅰ和Ⅲ次发根高峰相比 CK 分别提高 47.1% 和 62.92%, 根表面积则分别提高 67.21% 和 56.88%; 深层土壤 (80~100 cm) 细根分支数相比 CK 分别提高 282.22% 和 7.27%。可见 2Y 处理可促进表层土壤细根形态性状的表达及深层土壤根系分支结构的建成, 细根均匀分布于垂直土层 0~100 cm 的距干 0~120 cm 范围内。6Y 处理在年生长初期表层土壤的细根分支数和比分支数相比 CK 分别提高 6.11% 和 34.6%, 而在年生长后期则仅为 CK 的 58.1% 和 19.56%, 呈年生长初期重分支、年生长后期简化分支的构型特点, 并显著抑制第Ⅲ次发根高峰细根生长, 深层土壤的细根根长、根表面积和比根长仅为 CK 的 35.19%、40.43% 和 82.67%。即苹果细根生长受物候期和树体营养周转的影响, 在年生长初期应用“资源保守获取型”生长策略, 在年生长后期采取“资源快速获取型”生长策略; 短期覆膜 (2Y) 可改善土壤理化性状, 促进细根拓展延伸范围; 长期覆膜 (6Y) 对亚表层土壤 (20~40 cm) 的破坏作用, 阻碍细根下扎, 集中土壤表层分布。

关键词: 苹果; 覆膜; 细根特征; 适应策略

中图分类号: F323.22 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

* 国家自然科学基金项目 (31760555)、国家现代农业产业技术体系项目 (GARS-27)、甘肃省科技计划项目 (21YF1NA366) 和农业农村部西北地区果树科学观测实验站 (S-10-18) 资助
孙文泰, 主要从事果树栽培研究工作。E-mail: swt830312@126.com
收稿日期: 2021-02-02 接受日期: 2021-05-10

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31760555), the National Modern Agricultural Industrial Technology System of China (GARS-27), the Science and Technology Plan Project of Gansu Province (21YF1NA366) and the Scientific Oberserving and Experimental Station of Fruit Tree Science (Northwest Region), Ministry of Agriculture and Rural Affairs (S-10-18).
Corresponding author, SUN Wentai, E-mail: swt830312@126.com
Received Feb. 2, 2021; accepted May 10, 2021

Response of fine roots of apple to plastic film mulching in the dry tableland of eastern Gansu*

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

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

Abstract: This study investigated the annual growth dynamics of apple tree roots in the dry plateau of Longdong and the temporal and spatial differences in the number, morphology, branching characteristics of the roots, and soil physical and chemical properties in vertical soil layers under film mulching and soil moisture conservation measures. Eighteenth-year-old apple trees ('Nagano Fuji No.2') were assessed three times in the rooting peak times of apple tree: from spring sprouting to vigorous growth of new shoots (Ⅰ), shoots stopped growing (Ⅱ), and from fruit harvest to defoliation (Ⅲ). Using the soil profile and stratified sampling method, different treatments (conventional tillage [CK], film-mulching for two years [2Y], film-mulching for four years [4Y], and film-mulching for six years [6Y]) were investigated to analyze the spatial distribution of biomass, root length, surface area, specific root length, and the specific branch (branch number/dry matter weigh) of roots. Regression analysis was used to assess the fine root growth strategy for apple trees with plastic film mulching. The results showed that the rooting peak Ⅲ was the most important stage of the annual growth cycle of apple roots. The fine roots biomass at rooting peak Ⅲ under each treatment was 73.55%–84.85% of the total biomass at the three rooting peaks. The number of fine root branches at rooting peak Ⅰ in the surface soil (0–20 cm) was 130.67%, 100.53%, 156.63%, and 238.63% of that at rooting peak Ⅲ, which effectively improved the utilization of the soil resources in situ. At rooting peak Ⅲ, CK promoted the distribution of fine root length and root surface area in the surface soil, which were 275.64% and 248.96% of those at rooting peak Ⅰ, respectively. The number of branches and specific branches were only 76.53% and 14.68% of those at rooting peak Ⅰ, which expanded the effective nutrient space and reduced the internal competition of the root system. The soil water content in the short-term mulching (2Y) treatment in each soil layer were 112.39% (0−20 cm), 118.04% (20−40 cm), 124.06% (40−60 cm), 133.59% (60−80 cm), and 114.49% (80−100 cm) of CK; and the fine root biomass was 116.72%, 232.35%, and 112.09% of CK at the three rooting peak times. Compared with CK, the specific root length of the surface fine roots increased by 47.1% and 62.92% at rooting peaks Ⅰ and Ⅲ, and the root surface area increased by 67.21% and 56.88% in 2Y treatment. The number of fine root branches in the deep soil (80–100 cm) increased by 282.22% and 7.27%, respectively, compared with CK. The 2Y treatment promoted fine root morphological trait expression at the surface soil and branch structure establishment in the deep soil. Fine roots were evenly distributed in the 0–100 cm vertical soil layer and 0–120 cm horizontally from tree. Compared with CK, the 6Y treatment increased the number of fine root branches and specific branches by 6.11% and 34.6%, respectively, in the early growth stage, but by 58.1% and 19.56% in the late growth stage. These results demonstrate the characteristics of complex branches in the early growth stage and simplified branches in the late growth stage significantly inhibit the growth of fine roots at rooting peak Ⅲ. The fine root length, root surface area, and specific root length in the deep soil were 35.19%, 40.43%, and 82.67% of those of CK, respectively, in 6Y treatment. Fine root growth was affected by the phenological period and the turnover of tree nutrients; the "conservatively obtaining resources" growth strategy was applied in the early growth stage, and the "rapidly obtaining resources" growth strategy was adopted in the late growth stage. Short-term film mulching (2Y) can improve the physical and chemical properties of the soil and promote fine root extension. Damage from long-term plastic film mulching (6Y) to the subsurface soil (20–40 cm) prevented the fine roots from settling down and they became concentrated in the surface layer.

Keywords: Apple; Film-mulching; Characteristics of fine root; Adaptation strategy

甘肃陇东苹果 (*Malus pumila*) 产区位于黄土高原半干旱区, 当地水资源短缺, 苹果树生育期耗水量大, 降雨时段与其需水不同步, 土壤水是其主要水分来源, 因此土壤水分已成为制约当地苹果产业发展的限制性因素[1]。采取节水保墒措施、减少土壤水分蒸发和提高降水利用效率是提高该区果树生产力的重要措施。地膜覆盖可有效提高地温, 减少土壤水分蒸发, 起蓄水保墒的作用[2-3]。但也有研究表明长期覆膜会增加深层土壤水分和有机质消耗, 降低土壤透气性和微生物活性等[4-5]。作者在甘肃省苹果主产区静宁县长期定位试验中发现, 覆膜后苹果根系, 特别是直径≤2 mm 细根呈现根量减少、集中表层土壤 (0~20 cm) 的"平层化分布"; 随覆膜年限延长, 地温变化剧烈, 节水保墒效果不稳定, 土壤容重增大, 有机质含量降低[6]。

根系是植物摄取、输导、贮存土壤水分、养分的关键器官[7], 在年周期中呈节律性生长, 与地上部生长高峰交替出现, 因树龄、栽培措施、生境、结果等影响而有所差异[7-8]。细根通过生物量分配、分支模式与延伸策略的调整, 依据树龄、地理位置、耕作模式、群体密度等做可塑性调节, 优化自身资源分配, 提高形态稳定性和资源利用率[9]。并可遵循

“经济谱”理论将根系形态与构型特征应对生态环境差异的权衡策略划分为“资源快速获取型”和“资源保守获取型”。即根系以对资源配置与获取模式的权衡实现最大生长效力[10]。

当前对根系生长适应策略研究多集中于林木和作物。白雪等[11]指出随林龄增长, 多枝柽柳 (*Tamarix ramosissima*) 提高根系分支数、减小分支角度, 使根系构型由“扩散型”逐渐转为“密集型”; 徐立清等[12]表明从林缘、林隙到林冠下, 胡桃楸 (*Juglans mandshurica*) 根系通过减少次级分支、增大比根长和比表面积来提高根系对养分的吸收效率; 潘小莲等[13]通过不同覆盖模式小麦 (*Triticum aestivum*) 根系生长研究表明, 长期覆盖地膜造成冬小麦根系富集区域变浅; 李雪萍等[14]指出甘肃马先蒿 (*Pedicularis kansuensis*) 在高密度群体下倾向于“密集型”根系构建模式, 反之为“扩散型”, 体现高寒湿地植物种群应对资源多重竞争的生态适应机制。目前苹果根系研究多为对砧木、施肥方式、水分调控措施的响应规律[8, 15-16], 而旱地果园覆膜下根系年生长时空动态、资源构建与获取策略对土壤质量演化的响应较为欠缺。介于细根活跃的生理功能、可塑性调节特性及“经济谱”权衡特性[10], 通过对不同覆膜年限苹果根系在萌芽至新梢旺长前、新梢停长期、采果后至落叶期的时空变化趋势研究, 探明不同物候期根系生长与空间分布规律; 通过根系对土壤异质性的响应, 明确其在土壤性状空间异质性下资源配置与获取策略的变化趋势, 阐明根系对连续覆膜的反馈机制。有利于指导陇东旱塬苹果蓄水保墒栽培技术合理实施, 为创建良好根际环境、促进苹果高效生产奠定基础。

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 (35°24′N, 105°43′E), 试验园面积 3.34 hm^2, 海拔 1561 m, 年均降雨量 450~550 mm, 主要集中于 7—9 月, 年蒸发量 1531 mm, 干燥度 2.53。年均日照时数 2238 h, 无霜期 159 d, 年平均气温 7.1 ℃, 属于典型的西北黄土高原雨养农业区。土壤为黄绵土, 粉砂质壤土, 土层深厚, 有机质含量低, 表层土壤水分蒸发快, 深层土壤水调节作用差, 团聚作用微弱, 易受侵蚀 (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’(‘Nagano Fuji No.2’), 砧木山定子 (*Malus baccata*), 果树株行距 4 m×5 m。设置清耕 (未覆膜, CK)、覆膜 2 a (2Y)、覆膜 4 a (4Y)、覆膜 6 a (6Y) 4 个处理, 在距离主干 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, 为防止地膜破损, 6 个月左右更换 1 次新膜。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 5.5~4.8 m, 树高 3.5~4.0 m, 主干高度 0.8~1.0 m。各处理栽培管理一致。

表 1　试验区土壤理化性状
Table 1　Physical and chemical properties of soil in the test area

项目 Item	0~20 cm	20~40 cm
全氮 Total N (g·kg^{-1})	1.27	0.74
全磷 Total P (g·kg^{-1})	1.12	0.80
全钾 Total K (g·kg^{-1})	16.86	16.82
有机质 Organic matter (g·kg^{-1})	14.69	9.57
碱解氮 Alkaline hydrolysis N (mg·kg^{-1})	96.25	47.25
速效磷 Available P (mg·kg^{-1})	47.3	14.7
速效钾 Available K (mg·kg^{-1})	377.04	182.96
pH	8.35	8.85
黏粒含量 Clay content (%)	9.70	9.59

1.2　试验方法及测定

于 2019 年苹果根系 3 次发根高峰 [春季萌芽至新梢旺长期 (Ⅰ)、新梢停长期 (Ⅱ)、采果后至落叶期 (Ⅲ)], 采用土壤剖面法系统调查根系分布。为确保减少误差, 每次采样选择树高、冠径、树体结构一致的样树, 在树体同一方向进行。每次采样 5 次重复, 每重复 1 株树。于树干中心位置沿垂直行向方向挖长 1.5 m、宽 30 cm、深 100 cm 的观测沟, 依次调查顺行向距离主干 30 cm、60 cm、90 cm、120 cm、150 cm 处剖面根系, 垂直土层为 20 cm 一层 (图 1)。即在观测沟剖面水平方向画 30 cm×30 cm 网格线, 将每个网格所在土壤区块 (30 cm×30 cm×20 cm) 内根系全部取出。为防止遗漏, 用土筛辅助取根, 并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。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。根系扫描时将根系清洗干净, 迅速放入装有蒸馏水的无色透明塑料水槽内, 用镊子调整根系位置, 避免根系相互交叉、重叠, 扫描数据出现误差。统计根系直径、根长、表面积、根尖、分支数量等。然后将细根 (直径≤2 mm) 在 105 ℃ 下杀青 2 h, 65 ℃ 恒温烘干 48 h 至恒重, 称量根系生物量。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、比根尖数、比分支数等。同时每个剖面的 5 层土壤分别用直径 2.5 cm、高 5 cm 的环刀

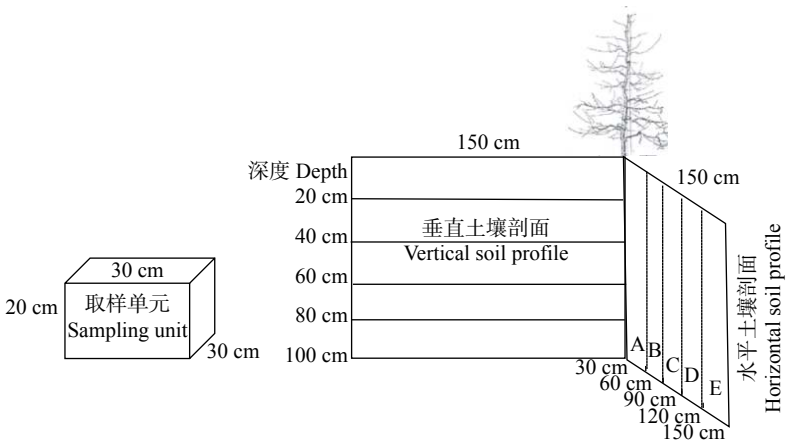

图 1 苹果根系调查示意图 (A、B、C、D、E 为调查根系的 5 个剖面)

Fig. 1 Survey map of apple roots (A, B, C, D, E are five sections of root investigation)

取样, 带回实验室, 待测。

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

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

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

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

$$\text{比根尖数}(\text{No.}\cdot\text{g}^{-1}) = \text{根尖数}/\text{干质量} \quad (5)$$

$$\text{比分支数}(\text{No.}\cdot\text{g}^{-1}) = \text{分支数}/\text{干质量} \quad (6)$$

土壤基本理化性状测定参考李婷婷等[17] 的方法。

土壤容重测定: 将环刀采集的土壤样品全部转移到已知质量的铝盒内 G_0 (g), 称量铝盒及新鲜土壤样品的质量, 记为 G_1 (g)。将样品带回室内, 放在 105 ℃烘箱内烘干至恒量, 称量烘干土及铝盒质量, 记为 G_2 (g)。土壤含水量 ω 和容重 ρ 计算公式为:

$$\omega = [(G_1 - G_2)/(G_2 - G_0)]\times 100\% \quad (7)$$

$$\rho = [(G_1 - G_0)\times 100]/V\times(100 + m) \quad (8)$$

$$V = \pi R^2 h \quad (9)$$

式中: ω 为土壤含水量 (%), h 为环刀高度 (cm), R 为环刀有刃口一端的内半径 (cm), V 为环刀的容积 (cm^3)。

$$\text{土壤总孔隙度}(\%) = 100\times(1 - \rho/p) \quad (10)$$

式中: ρ 为土壤容重 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), p 为土壤比重 (2.65 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)。

$$\text{土壤毛管孔隙度}(\%) = \text{土壤田间持水量}(\%)\times\text{土壤容重}(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}) \quad (11)$$

$$\text{通气孔隙度}(\%) = \text{总孔隙度}(\%) - \text{土壤毛管孔隙度}(\%) \quad (12)$$

根系垂直分布中心 (RVDC):

$$\text{RDVC} = \sum_{i=1}^{n} D_i P_i \quad (13)$$

式中: D_i 为每土层根系取样深度 (cm), P_i 为每土层根长占总根长的百分比。

1.3 数据处理

采用 WPS 软件计算根系表面积、比根长、比分支数等, 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 $P<0.05$ 水平进行显著性分析; 对垂直土层中的苹果细根数量、形态、构型性状与土壤有机质含量及物理性状分别进行 Pearson 相关性分析; 采用二项式函数进行回归统计分析, 检验细根生态适应策略对覆膜年限和土层深度的响应。图表中数据为平均值±标准差。使用 Excel 2016、WPS 软件绘制根系分布图。

2 结果与分析

2.1 不同覆膜年限苹果的细根生物量动态变化

细根生物量是植物对土壤资源利用有效性的反映, 也是光合产物在地下分配的最终体现[6]。苹果细根生物量年生长动态趋势如表 2 所示: 第Ⅰ期细根生物量最低, 占 3 次发根高峰期总生物量的 7.40%~13.00%; 随年生长周期的进行细根生长量逐渐升高, 在第Ⅲ期达顶峰, 占全年 73.55%~84.85%。CK、2Y、4Y 和 6Y 处理在第Ⅲ期的细根生物量分别为第Ⅰ期的 11.02 倍、10.58 倍、5.66 倍和 8.57 倍, 并且第Ⅲ期 2Y 处理细根生物量显著高于其他处理 ($P<0.05$)。随覆膜年限增加, 促进细根生长作用逐渐减弱。6Y 处理抑制细根生长, 3 次发根高峰期生物量为 CK 处理的 74.95%、115.77% 和 58.27%, 在第Ⅲ期中抑制作用最显著 ($P<0.05$)。

2.2 不同覆膜年限苹果的细根空间分布规律

根长反映根系探索资源和拓展空间的能力。由

表 2　不同覆膜年限苹果树根系 3 次发根高峰细根生物量动态

Table 2　Dynamics of fine root biomass at three rooting peak times with different years of film mulching　　g

发根高峰期 Rooting peak time	覆膜年限 Mulching years (a)			
	0 (对照 CK)	2	4	6
Ⅰ	76.96±6.93b	89.83±5.62b	98.81±5.89a	57.68±4.23c
Ⅱ	74.50±7.79c	173.10±9.63a	102.23±10.50b	86.25±7.53bc
Ⅲ	848.11±52.15b	950.61±37.40a	558.91±44.79c	494.16±42.27c

Ⅰ: 春季萌芽至新梢旺长期; Ⅱ: 新梢停长期; Ⅲ: 采果后至落叶期。同行不同小写字母表示不同覆膜年限间在P<0.05水平差异显著。Ⅰ: spring sprouting to vigorous growth period of new shoots; Ⅱ: new shoots stop growing; Ⅲ: fruit harvest to defoliation. Different lowercase letters in the same row indicate significant differences among different treatments of mulching years at P<0.05.

图 2 所知, 清耕对照与覆膜对细根根长年周期生长分配趋势不同, CK、2Y、4Y 和 6Y 处理细根根长在第Ⅲ期分别为第Ⅰ期的 107.75%、97.84%、56.58%和 26.11%。其中 2Y 处理细根根长在第Ⅰ和第Ⅲ期比 CK 分别增加 24.29% 和 12.87%。随覆膜年限延长, 6Y 处理与 CK 相比分别减少 16.41% 和 79.75% (P<0.05)。垂直方向 (图 2): CK 处理在第Ⅰ和第Ⅲ期中 0~20 cm 土层细根占 0~100 cm 土层细根根长总量的 12.68%~32.45%; 覆膜的节水保温作用改变细根根长分布规律, 在第Ⅰ期中 2Y 处理 0~20 cm 土层细根根长相比 CK 提高 156.07%, 占 0~100 cm 土层细根根长总量的 26.13%; 80~100 cm 土层细根根长相比 CK、4Y 和 6Y 处理分别提高 34.35%、47.56% 和 173.43%, 占 0~100 cm 土层细根根长总量的 14.26%。可见 2Y 处理增大细根根长的同时, 也促进细根向深层土壤延伸, 在第Ⅲ期中其根系垂直分布中心为 CK 的 1.36 倍 (表 3)。4Y 和 6Y 处理在第Ⅰ和第Ⅲ期中细根根长集中分布于表层土壤 (0~20 cm), 占比分别为 34.60%~53.00% 和 39.50%~53.62%, 但在亚表层 (20~40 cm) 中呈显著下降 (P<0.05), 相比表层土壤分别减少 51.64%~70.06% 和 56.83%~63.60%, 呈现细根上浮至表层土壤, 亚表层细根亏缺的现象 (图 2)。CK 处理根系垂直分布中心为 46.75~58.09 cm, 2Y 处理为 52.15~63.56 cm, 6Y 处理相比 CK 和 2Y 处理分别提升 7.11~18.11 cm 和 3.38~23.92 cm (表 3)。

水平方向: CK 和 2Y 处理的表层土壤细根根长集中分布于距干水平 0~120 cm 范围内。4Y 和 6Y 处理在第Ⅰ期中水平分布集中于距干 90~150 cm 范围内, 分别占 0~150 cm 范围细根根长总量的 66.21% 和 71.68%。与 CK 相比, 4Y 和 6Y 处理在第Ⅲ期中细根生长受显著抑制 (P<0.05), 集中分布于 0~90 cm 范围内, 分别占距干水平 0~150 cm 范围内细根根长总量的 77.57% 和 66.82% (图 2)。

2.3　不同覆膜年限苹果细根的年周期垂直分布差异

根长和根表面积属于根系数量性状[8]。由表 4 所知, 受春季表层土壤地温较低的影响, CK 处理细根根长和根表面积在 0~20 cm 土层中均表现为第Ⅰ期<第Ⅲ期, 80~100 cm 土层反之。覆膜处理细根根长和根表面积在 0~20 cm 土层均表现为第Ⅰ期>第Ⅲ期。2Y 处理有效促进深层土壤细根根长和根表面积分布, 在第Ⅰ和第Ⅲ期的 80~100 cm 土层中相比 CK 处理分别提高 34.35% 和 18.60%、173.71% 和

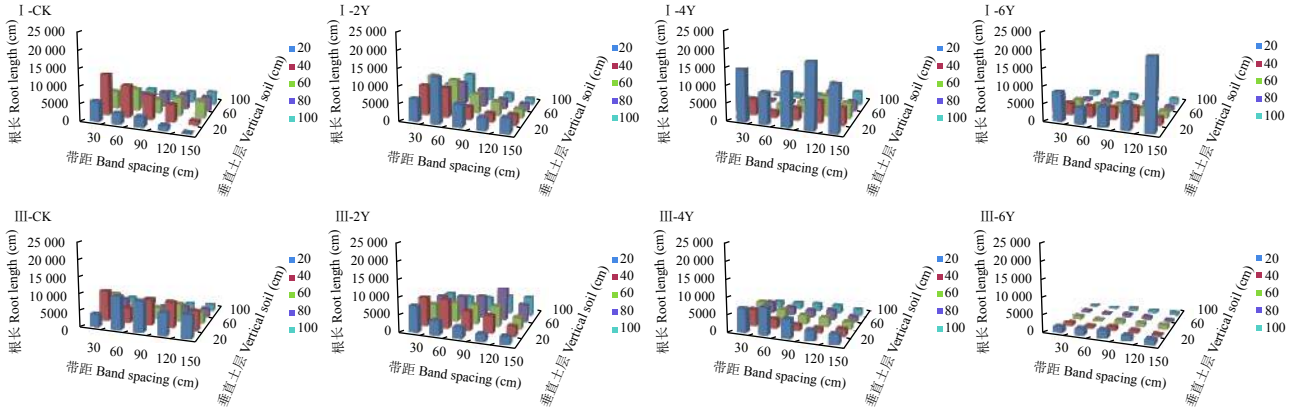

图 2　不同覆膜年限苹果树根系发根高峰 [春季萌芽至新梢旺长期 (Ⅰ)、采果后至落叶期 (Ⅲ)] 的细根根长空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of fine root length in rooting peak times from spring sprouting to vigorous growth of new shoots (Ⅰ) and from fruit harvest to defoliation (Ⅲ) of apple trees with different years of film mulching

CK: 对照; 2Y: 覆膜 2 年处理; 4Y: 覆膜 4 年处理; 6Y: 覆膜 6 年处理。CK: control treatment; 2Y: mulching for 2 years; 4Y: mulching for 4 years; 6Y: mulching for 6 years.

表 3 不同覆膜年限苹果树细根在 3 次发根高峰的垂直分布中心

Table 3 Vertical distribution centers in three rooting peak times of apple fine roots with different years of film mulching cm

覆膜年限 Mulching year (a)	发根高峰 Rooting peak time		
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
0 (对照 CK)	57.21±0.66a	58.09±0.62a	46.75±1.04b
2	54.35±0.94b	52.15±0.60b	63.56±1.31a
4	41.23±0.27c	42.89±0.87c	42.45±0.68c
6	39.10±1.52d	48.77±0.77b	39.64±0.96d

Ⅰ: 春季萌芽至新梢旺长期; Ⅱ: 新梢停长期; Ⅲ: 采果后至落叶期。同列不同小写字母表示不同覆膜年限间在P<0.05水平差异显著。Ⅰ: spring sprouting to vigorous growth of new shoots; Ⅱ: new shoots stop growing; Ⅲ: fruit harvest to defoliation. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments of mulching years at P<0.05.

表 4 不同覆膜年限苹果细根的时空生长分布

Table 4 Spatiotemporal growth and distribution of fine roots of apple with different mulching years

项目 Item	覆膜年限 Mulching years (a)	春季萌芽至新梢旺长期 Spring sprouting to vigorous growth of new shoots (Ⅰ)		采果后至落叶期 Fruit harvest to defoliation (Ⅲ)	
		0~20 cm	80~100 cm	0~20 cm	80~100 cm
根长 Root length (cm)	0 (对照 CK)	13 311.09±452.7d	13 839.71±432.10b	36 690.20±1882.87a	8190.15±602.95c
	2	34 086.36±406.47c	18 593.83±1206.09a	19 257.98±1246.87c	22 417.03±1296.37a
	4	71 155.00±6346.50a	12 601.09±394.29b	26 282.31±6453.39b	9588.59±278.57b
	6	47 031.10±2961.83b	6800.14±126.27c	9046.08±386.76d	2882.28±180.22d
根表面积 Root surface area (cm^2)	0 (对照 CK)	1723.00±56.76c	2721.29±63.40b	4289.63±59.89a	1475.80±67.59b
	2	5015.37±216.77b	3227.53±184.55a	2168.46±92.76c	3754.46±59.07a
	4	10 921.66±720.21a	2512.73±50.24c	3263.16±151.54b	1536.92±128.66b
	6	5242.66±159.77b	1655.36±58.14d	1769.34±61.67d	596.65±20.64c
平均根径 Average root diameter (mm)	0 (对照 CK)	0.60±0.11b	0.82±0.08b	0.51±0.05b	1.12±0.03b
	2	0.54±0.04c	0.81±0.04b	0.46±0.05b	0.91±0.05c
	4	0.75±0.07a	0.91±0.02b	0.51±0.06b	0.84±0.05c
	6	0.84±0.03a	1.18±0.07a	1.03±0.04a	1.32±0.04a
比根长 Specific root length ($cm·g^{-1}$)	0 (对照 CK)	1437.48±78.30c	1346.27±132.94ab	275.28±22.54b	65.42±7.93b
	2	2114.53±136.16a	1497.54±76.23a	448.48±40.57a	90.82±10.02a
	4	1302.72±30.84c	1406.37±75.17a	287.20±70.29b	95.84±11.03a
	6	1822.91±62.69b	1179.53±130.90b	83.58±16.79c	54.08±6.09b
比表面积 Specific surface ($cm^2·g^{-1}$)	0 (对照 CK)	186.07±10.86b	264.72±11.85b	32.19±2.83b	11.79±0.81b
	2	311.13±20.54a	295.23±13.30a	50.50±1.66a	15.21±0.84a
	4	199.96±9.07b	280.44±18.15ab	35.66±1.74b	15.36±0.67a
	6	203.20±15.03b	230.56±18.55c	16.35±0.86c	11.20±0.89b
根尖数 Root tip Number ($No.·cm^{-1}$)	0 (对照 CK)	2.50±0.16b	1.17±0.06c	4.70±0.12d	3.58±0.15d
	2	2.70±0.19b	1.77±0.04a	5.37±0.06b	4.06±0.12c
	4	2.63±0.06b	1.42±0.04b	4.98±0.05c	4.63±0.13b
	6	3.32±0.28a	1.14±0.05c	6.00±0.10a	5.93±0.10a
比根尖数 Specific Root tip ($No.·g^{-1}$)	0 (对照 CK)	3596.10±189.88c	1578.31±51.98c	1293.83±61.69b	234.31±7.57c
	2	5706.82±254.55b	2302.43±80.62a	2408.08±71.63a	568.91±22.12a
	4	3422.74±122.68c	1999.00±95.22b	1430.89±116.52b	444.12±13.69b
	6	6053.91±138.33a	1480.45±28.38c	334.12±28.05c	121.00±10.87d
分支数 Branch number ($No.·cm^{-1}$)	0 (对照 CK)	5.24±0.18b	0.90±0.05c	4.01±0.10a	1.10±0.08b
	2	3.79±0.13c	3.44±0.16a	3.77±0.29a	1.18±0.04b
	4	3.90±0.12c	1.18±0.14b	2.49±0.14b	1.09±0.10b
	6	5.56±0.13a	0.95±0.07c	2.33±0.11b	1.37±0.08a
比分支数 Specific branch ($No.·g^{-1}$)	0 (对照 CK)	7778.18±196.09c	1296.01±63.75d	1141.46±58.96b	78.09±6.89c
	2	8534.12±94.55b	4791.41±86.33a	1741.71±124.82a	116.70±5.57a
	4	5414.70±156.20d	1798.88±57.11c	744.13±12.42c	112.09±10.08a
	6	10 469.38±672.99a	2368.90±65.96b	223.24±19.94d	93.43±4.05b

同列不同小写字母表示在P<0.05水平差异显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments of mulching years at P<0.05.

154.4%。随覆膜年限延长, 细根逐渐向 0~20 cm 土层聚集, 4Y 和 6Y 处理在第Ⅰ期中 0~20 cm 土层的细根根长分别为 CK 的 5.35 倍和 3.53 倍, 根表面积分别为 CK 的 6.34 倍和 3.04 倍; 而 80~100 cm 土层细根根长分别为 CK 的 91.05% 和 49.13%, 根表面积分别为 CK 的 92.34% 和 60.83%。

细根平均直径、比根长和比表面积为根系形态性状。根系可通过调节直径大小反映细根吸收与运输功能的强弱[10]。由表 4 所知, 覆膜利于秋冬土壤保温及早春地温回升, 2Y 处理可减小细根直径, 而长期覆膜细根直径增大, 不同覆膜处理中, 以 6Y 处理最显著 (P<0.05)。6Y 处理在第Ⅰ和第Ⅲ期的 0~20 cm 土层中, 细根平均直径相比 CK 分别提高 40.00% 和 101.96%, 80~100 cm 土层提高 43.9% 和 17.86%。受深层土壤容重较大的影响, CK、2Y、4Y 和 6Y 处理在第Ⅰ和第Ⅲ期的 80~100 cm 土层中, 细根平均直径相比表层土壤分别增大 36.67%、50.00%、21.33% 和 40.48%, 119.61%、97.83%、64.71% 和 28.16%。比根长和比表面积可反映单位生物量构建细根根长和根表面积的大小, 表征细根吸收养分和水分的能力[6]。各处理的比根长和比表面积均表现为第Ⅰ期>第Ⅲ期。2Y 处理可有效提高细根比根长和比表面积。在第Ⅰ和第Ⅲ期的 0~20 cm 土层中, 细根比根长相比 CK 分别提高 47.1% 和 62.92%, 比表面积相比 CK 分别提高 67.21% 和 56.88%; 而在各覆膜处理中, 6Y 处理呈显著抑制作用 (P<0.05), 在第Ⅲ期的 0~20 cm 土层细根比根长和比表面积仅为 CK 的 30.36% 和 50.79%。由此可见在苹果年生长周期前期, 拥有较大比根长和比表面积的细根, 有助于高效地为苹果树生长提供营养; 生长后期细根通过加大直径, 减小比根长和比表面积, 降低消耗, 为翌年苹果树生长与发根做准备, 并以 2Y 处理促进效果好。

根尖数、比根尖数、分支数和比分支数均属于根系分支特性, 表征细根构建与资源利用策略, 影响其空间分布属性、营养吸收能力和固定作用[11]。2Y 处理在第Ⅰ期和第Ⅲ期的 0~20 cm 和 80~100 cm 土层中, 细根根尖数和相比 CK 分别提高 8.00%、51.28%、14.26% 和 13.41%, 比根尖数相比 CK 分别提高 58.69%、45.88%、86.12% 和 142.8%; 6Y 处理细根的比根尖数在第Ⅲ期的 0~20 cm 和 80~100 cm 土层均受显著抑制, 分别为 CK 的 25.82% 和 51.64% (P<0.05)。受秋冬养分回流贮藏于根系的影响, 各处理细根在第Ⅲ期采取资源保守策略。0~20 cm 土层的细根分支数和比分支数均表现为第Ⅰ期>第Ⅲ期。随土层深度的加深, 各处理细根分支数和比分支数均递减, 以 6Y 处理在第Ⅰ和第Ⅲ期的 80~100 cm 土层最显著, 其细根分支数分别为 0~20 cm 土层的 17.09% 和 58.8% (P<0.05), 比分支数分别为 0~20 cm 土层的 22.63% 和 41.85% (P<0.05)。

2.4　不同覆膜年限土壤理化性状垂直差异

由表 5 所知, CK 处理由于果园管理踩踏严重及水分蒸发剧烈, 土壤表层 (0~20 cm) 容重高于亚表层 (20~40 cm), 土壤含水量在 20~40 cm 土层较高, 并随土层加深逐渐降低。2Y 处理有效改善土壤含水量、孔隙度和毛管孔隙度, 各土层容重分别为 CK 的 90.77%、97.64%、96.32%、96.35% 和 97.14%。由于地膜的物理阻隔作用, 阻断了土壤空气与近地面大气、水分的交换, 因此各覆膜处理不同程度地降低了土壤通气度, 以 6Y 处理最低, 各层土壤通气度分别为 CK 的 81.49%、69.96%、83.57%、65.15% 和 69.94%。由于各覆膜处理 20~40 cm 土层毛管孔隙度低于 40~60 cm 土层, 垂直热力学差异导致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 和 4Y 处理在 40~60 cm 土层的土壤含水量相比 20~40 cm 土层呈下降趋势。6Y 处理 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的土壤总孔隙度、毛管孔隙度和土壤通气度在各处理中均为最低, 容重在各覆膜处理中最高, 因此不利于水分保蓄, 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤含水量比 CK、2Y 和 4Y 处理分别降低 9.21% 和16.79%、19.21% 和29.5%、21.05% 和21.24%。不良的土壤结构使 6Y 处理的土壤有机质含量降低, 各土层相比 CK 分别降低 7.03%、24.14%、17.3%、9.65% 和 10.32%。

将垂直土层土壤理化性状与根系数量、形态和构型指标做相关性分析。由表 6 所知, 细根根长、根表面积和比根长与有机质含量在 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层均呈极显著正相关 (P<0.01); 受地膜对表层土壤透气性和土壤结构的影响, 细根数量性状与土壤通气度仅在 20~40 cm 和 40~60 cm 土层呈极显著正相关 (P<0.01), 与毛管孔隙度和土壤含水量在 60~80 cm 和 80~100 cm 土层均呈极显著正相关 (P<0.01); 土壤有机质含量、通气度与细根比根尖数和比分支数均表现为在 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层极显著正相关 (P<0.01), 60 cm 以下无显著相关性, 甚至呈负相关。表明上层土壤的有机质含量和通气度, 深层土壤的土壤含水量和毛管孔隙度决定细根建造成本的大小, 影响其延伸生长。并随土层的加深, 土壤有机质含量和通气度下降均不

表 5 不同覆膜年限苹果园土壤有机质含量及物理性质的垂直变化

Table 5 Vertical changes of organic matter content and physical properties of apple soils with different years of film mulching

覆膜年限 Mulching years (a)	土层深度 Soil depth (cm)	有机质含量 Organic matter content ($g \cdot kg^{-1}$)	含水量 Moisture ($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙度 Porosity (%)	容重 Bulk density ($g \cdot cm^{-3}$)	通气度 Aeration (%)	毛管孔隙度 Capillary porosity (%)
0 (对照 CK)	0~20	12.94±0.17aA	21.07±1.30bBC	54.48±1.17aAB	1.30±0.07abA	35.34±1.60aA	42.65±0.44aB
	20~40	8.41±0.25bA	23.89±2.00aB	47.71±1.33bAB	1.27±0.06bA	27.83±1.07bA	36.09±1.45cA
	40~60	7.86±0.12cA	21.78±1.29abB	45.11±0.87cBC	1.36±0.03abA	25.02±1.72cA	34.66±1.20cB
	60~80	6.94±0.17dA	20.51±0.81bC	45.34±0.76cA	1.37±0.05abA	26.43±1.73bcA	39.54±1.50bA
	80~100	6.49±0.16eB	20.50±1.80bBC	43.78±1.18cA	1.40±0.09aA	25.15±1.86cA	36.77±1.55cB
2	0~20	12.48±0.12aAB	23.68±1.39bAB	57.56±1.36aA	1.18±0.07cB	34.20±1.45aA	44.48±0.74aA
	20~40	8.00±0.11bB	28.20±1.50aA	49.87±1.37bA	1.24±0.02bcA	21.67±1.07bB	34.24±1.06dC
	40~60	7.45±0.11cAB	27.02±1.88aA	46.49±0.89bcAB	1.31±0.06abA	22.15±1.36bB	38.79±1.02cA
	60~80	7.20±0.13dA	27.40±1.20aA	44.63±2.75cdA	1.32±0.05abA	21.80±0.50bB	38.84±1.08cA
	80~100	7.33±0.10cdA	23.47±0.87bAB	41.06±4.48dA	1.36±0.05aA	19.35±0.97cB	40.87±1.09bA
4	0~20	11.7±0.52aC	24.23±1.93aA	51.01±3.54aBC	1.18±0.04cB	26.78±1.80aB	42.14±0.79aB
	20~40	6.56±0.20cC	25.24±1.46aAB	47.26±3.52abAB	1.26±0.05bA	22.02±0.22cB	34.96±1.66bAB
	40~60	7.12±0.22bB	23.21±2.81aB	47.77±1.27abA	1.33±0.05abA	24.56±1.09bA	35.40±0.43bB
	60~80	6.30±0.14cB	24.31±1.01aB	42.96±1.15bcA	1.35±0.04aA	18.65±1.03dC	34.67±1.14bcB
	80~100	7.37±0.28bA	25.23±2.13aA	42.08±3.55cA	1.39±0.03aA	16.85±1.87dC	33.06±0.73cC
6	0~20	12.03±0.31aBC	19.13±1.30aC	49.87±0.37aC	1.24±0.05bB	28.80±1.06aB	41.46±0.95aB
	20~40	6.38±0.09bC	19.88±2.28aC	44.80±2.00bB	1.28±0.05bA	19.47±1.07bcB	32.83±0.37cBC
	40~60	6.50±0.37bC	20.09±0.20aB	43.93±1.16bC	1.37±0.02aA	20.91±1.75bC	36.61±2.00bAB
	60~80	6.27±0.16bcB	18.90±0.20aC	42.31±1.78bcA	1.39±0.05aA	17.22±0.63dC	31.44±0.69cC
	80~100	5.82±0.20cC	18.62±1.75aC	39.85±2.66cA	1.42±0.02aA	17.59±0.91cdBC	32.13±1.04cC

同列不同小写字母表示不同土层间在P<0.05水平差异显著。同列不同大写字母表示不同覆膜年限间在P<0.05水平差异显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different soil layers at P<0.05. Different capital letters in the same column indicate significant differences among different mulching years at P<0.05.

利于细根分支结构的构建。

2.5 不同覆膜年限苹果年生长周期细根生长策略

根系资源构建与获取平衡的提出, 有助于对不同生境植物细根功能和生存策略变异的了解, 分别由根系数量性状 (根长) 和分支特性 (分支数) 代表[11]。对苹果细根根长和分支数用二项式函数进行回归统计分析 (表 7)。垂直土层差异可解释 CK 处理在第Ⅲ期中 94.0% 的根长和 97.6% 的分支表达, 在 2Y 处理中主要影响第Ⅱ期的细根延伸生长。随覆膜年限增加, 土层深度差异对细根生长的影响越发显著。6Y 处理影响苹果树整个年生长周期的细根生产, 对第Ⅱ和第Ⅲ期细根分支特性的决定性高于根长。由此可知, 短期覆膜垂直土层差异主要决定细根数量性状 (根长) 的表达, 长期覆膜对根系分支特性 (分支数) 影响显著。

3 讨论

3.1 不同覆膜年限苹果细根年生长时空动态特征

细根是地下生态系统中最敏感组分, 其形态结构和分布特征决定了植物对土壤肥水的利用能力, 进而实现细根在资源构建与获取策略中的权衡调控[18]。秋季降雨可缓解干旱, 使土壤水资源有效性提高; 同时苹果树光合产物回流至地下可有效地补偿根系构建与维持的碳消耗; 而经历了冬春连旱, 春季地温较低, 大量的营养转移至地上部用于新叶萌发和枝条生长, 造成地下部养分亏缺, 因此苹果细根构建的周年动态趋势为采果后至落叶期>新梢停长期>春季萌芽至新梢旺长期。

细根建造既受物候期和树体营养周转的影响, 也与不同生境下细根“资源保守获取型”和“资源快速获取型”策略权衡响应有关。本试验结果显示: 在第Ⅰ期, 苹果树体的有限资源分配存在互相牵制的矛盾。清耕 (CK) 处理地温回升较慢, 新根在萌发受限和生物量较低的情况下, 为满足树体生长需求, 减少根长投入。并以促进表层土壤细根分支和增大直径的方式提高细根比根长和比表面积, 构建密集根系网络, 提高养分摄取潜力和原位土壤资源利用效率, 为“资源保守获取型”生长策略[19]; 覆膜对表层土壤的保护, 使早春地温回升较快, 土壤水分含量高, 细根无需分化过多侧根即可获取养分资源。因此覆膜 2 a 处理细根采取“资源快速获取型”策略[11], 更多养分资源投入至细根数量性状, 增强其空间拓展能力, 在距干水平 0~120 cm 范围、垂直 0~100 cm 土层中均匀分布, 并可减轻因侧根过多造成的资源传输负担。

表 6　不同覆膜年限苹果细根生长与土壤理化性状的相关性

Table 6　Correlation between apple fine root growth and soil physical and chemical properties under different years of film-mulching

土壤性状 Soil property	土层深度 Soil depth (cm)	数量性状 Quantitative traits		形态性状 Morphological characters			构型性状 Configuration properties			
		根长 Root length	根表面积 Root surface area	平均根径 Average root diameter	比根长 Specific root length	比表面积 Specific surface area	根尖数 Root tip number	比根尖数 Specific root tip	分支数 Branch number	比分支数 Specific branch
有机质含量 Organic matter content	0~20	0.728**	0.603**	−0.673**	0.743**	0.784**	0.641**	0.765**	0.602**	0.712**
	20~40	0.663**	0.676**	−0.771**	0.809**	0.542	0.589*	0.910**	0.651**	0.738**
	40~60	0.887**	0.817**	−0.892**	0.910**	0.935**	0.649**	0.944**	0.568*	0.858**
	60~80	0.450	0.377	−0.740**	0.304	0.168	−0.656**	0.443	−0.221	−0.121
	80~100	−0.400	−0.377	0.238	−0.329	−0.414	−0.480	−0.457	−0.375	−0.775**
含水量 Moisture	0~20	0.199	0.412	−0.676**	0.659**	0.719**	−0.417	0.684**	0.117	0.521
	20~40	0.579*	0.675**	−0.781**	0.461	0.872**	−0.646**	0.564	0.341	0.597*
	40~60	0.555*	0.656**	−0.524	0.458	0.364	−0.006	0.488	0.107	0.364
	60~80	0.890**	0.818**	−0.886**	0.905**	0.919**	−0.760**	0.991**	0.242	0.849**
	80~100	0.676**	0.653**	−0.888**	0.907**	0.756**	−0.369	0.767**	−0.431	0.550
孔隙度 Porosity	0~20	0.375	−0.082	−0.584*	0.710**	0.730**	−0.309	0.789**	0.762**	0.854**
	20~40	0.556	0.629**	−0.595*	0.586*	0.727**	−0.510	0.406	0.450	0.566*
	40~60	0.442	0.266	−0.529*	0.438	0.238	−0.314	0.339	0.360	0.071
	60~80	0.372	0.420	−0.329	0.130	0.130	−0.137	0.353	0.155	0.188
	80~100	−0.030	0.152	−0.078	−0.091	0.120	−0.366	0.042	−0.543*	−0.148
容重 Bulk density	0~20	0.269	−0.122	0.326	−0.309	−0.340	−0.192	−0.347	0.236	−0.120
	20~40	−0.142	−0.199	0.257	−0.231	−0.335	0.248	−0.094	−0.117	−0.153
	40~60	−0.395	−0.380	0.312	−0.271	−0.103	0.136	−0.262	0.093	−0.094
	60~80	−0.571*	−0.519	0.519	−0.530*	−0.550*	0.461	−0.573	−0.139	−0.507
	80~100	−0.403	−0.441	0.288	−0.204	−0.474	0.263	−0.423	0.355	−0.426
通气度 Aeration	0~20	0.339	0.405	−0.417	0.476	0.417	0.636**	0.644**	0.895**	0.680**
	20~40	0.659**	0.694**	−0.456	0.761**	0.779**	0.653**	0.634**	0.589*	0.678**
	40~60	0.635**	0.644**	−0.795**	0.719**	0.787**	0.642**	0.772**	0.633**	0.590**
	60~80	0.333	0.636**	−0.614**	0.168	0.091	0.058	0.263	0.121	0.091
	80~100	0.061	0.182	0.229	−0.277	−0.347	−0.690**	0.030	−0.360	−0.647**
毛管孔隙度 Capillary porosity	0~20	0.229	0.147	−0.633**	0.827**	0.804**	0.240	0.820**	0.658**	0.859**
	20~40	0.303	0.303	−0.330	0.461	0.020	0.610**	0.585*	0.083	0.343
	40~60	0.152	0.251	0.091	−0.172	−0.309	−0.257	−0.067	−0.013	−0.300
	60~80	0.649**	0.667**	−0.628**	0.410	−0.317	−0.357	0.623**	0.190	0.416
	80~100	0.871**	0.893**	−0.398	0.295	0.333	−0.693**	0.633**	−0.288	0.226

*和**分别表示在$P<0.05$和$P<0.01$水平相关。* and ** represent correlation coefficients at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

表 7　不同土层深度 (*x*) 介导下不同发根高峰苹果细根根长与分支 (*y*) 生长策略函数

Table 7　Growth strategy functions of fine root length and branch (y) of apple in different rooting peak times mediated by different soil layer depth (x)

覆膜年限 Mulching years (a)	发根高峰期 Rooting peak time	根长分布函数 Root length distribution function	相关系数 Correlation coefficient	分支数分布函数 Root branch distribution function	相关系数 Correlation coefficient
0 (对照 CK)	Ⅰ	$y=-9.2103x^2+1034x+542.64$	0.624**	$y=-36.158x^2+2887.8x+62\,283$	0.535
	Ⅱ	$y=-1.9882x^2+187.93x+13\,222$	0.945**	$y=-0.4066x^2-139.17x+79\,897$	0.206
	Ⅲ	$y=-0.3645x^2-368.63x+47\,618$	0.940**	$y=15.679x^2-3806.3x+228\,554$	0.976**
2	Ⅰ	$y=-0.9901x^2-76.868x+37\,047$	0.778**	$y=5.8543x^2-1359.2x+148\,802$	0.398
	Ⅱ	$y=4.3715x^2-763.07x+52\,172$	0.983**	$y=46.881x^2-8206.5x+477\,161$	0.968**
	Ⅲ	$y=-5.4424x^2+694.39x+9641.4$	0.545	$y=-7.3148x^2+177.61x+81\,900$	0.730**
4	Ⅰ	$y=-0.9901x^2-76.868x+37\,047$	0.778**	$y=92.115x^2-13\,986x+512\,844$	0.902**
	Ⅱ	$y=4.3715x^2-763.07x+52\,172$	0.983**	$y=78.314x^2-12\,894x+546\,702$	0.991**
	Ⅲ	$y=-5.4424x^2+694.39x+9641.4$	0.545	$y=15.467x^2-2452.4x+105\,418$	0.877**
6	Ⅰ	$y=10.963x^2-1785x+77\,846$	0.968**	$y=72.999x^2-11\,673x+456\,250$	0.939**
	Ⅱ	$y=0.8896x^2-241.89x+21\,850$	0.778**	$y=14.329x^2-2702.7x+163\,002$	0.882**
	Ⅲ	$y=1.4063x^2-245.74x+14\,270$	0.911**	$y=4.6636x^2-774.71x+36\,441$	0.925**

Ⅰ: 春季萌芽至新梢旺长期; Ⅱ: 新梢停长期; Ⅲ: 采果后至落叶期。Ⅰ: spring sprouting to vigorous growth of new shoots; Ⅱ: new shoots stop growing; Ⅲ: fruit harvest to defoliation

这种通过调节细根分支与延伸生长间的平衡, 实现土壤养分和水分资源的最佳配置方式与郭京衡等[20]研究结果一致。

在采果后至落叶期, 经历苹果树周年生产与蒸腾耗水后, 7—9 月集中降雨对土壤水分有良好的补充。清耕 (CK) 处理根际环境良好, 叶片制造养分回流至地下, 贮藏在根系中为翌年生长做准备。因此苹果细根以提高生物量投入, 促进其数量性状表达, 减少分支消耗的方式达到扩展有效营养空间、降低根系内部竞争、提高营养贮存的目的, 与杨雨等[10]对金花小檗 (*Berberis wilsonae*) 细根分支与根长资源投入策略研究结果相同。地膜的物理阻隔作用使膜下土壤透气性较差, 且雨水对膜下水分的均衡渗透具有滞后性[21]。表层土壤含水量和细根比根长、比表面积, 土壤通气性和细根分支数、比分支数均呈极显著正相关, 使覆膜 6 a 的苹果树细根在土壤表层分支结构简化、根长延伸抑制、比根长和比表面积降低, 通过缩短资源传输距离减少过度资源消耗, 增大细根直径以延长根系寿命, 并增强土壤穿透能力的方式实现最佳收益 (养分获取) 与代价 (根系构建与维护) 间的平衡, 与李金航等[22]对养分胁迫下黄栌 (*Cotinus coggygria*) 幼苗根系生长策略研究结果一致。综上, 根系生态适应策略不仅与光合产物在果树地上和地下部之间的协调分配、根际生态环境的差异有密切关系, 还遵循根系经济谱 (RES) 理论, 对细根根长与分支的资源分配存在“此消彼长”的权衡关系。并在苹果细根年周期生长策略回归分析中得以验证, 细根可塑性调节动态体现了其功能对资源有效性季节动态的适应[12]。

3.2 不同覆膜年限苹果细根生长对土壤理化性状垂直差异的响应

果园地面覆盖可抑制水分蒸发, 起蓄水保墒的作用。但卜玉山等[23]对长期覆膜的玉米 (*Zea mays*) 和小麦等农田土壤, 胥生荣等[2]对覆膜后的枸杞 (*Lycium barbarum*) 土壤, 张林森等[5]对覆膜后的苹果园土壤的研究中均指出, 长期覆膜阻碍雨水入渗, 使土壤水分和有机碳处于快速消耗状态。本试验结果表明, 清耕 (CK) 处理由于裸露地表经日常管理踩踏及水分剧烈蒸发后, 表层土壤容重较大, 土壤含水量、总孔隙度和毛管孔隙度较低; 覆膜 2 a 处理对膜下微域土壤的保护, 使其避免遭受践踏压实和降雨溅蚀, 有效改善土壤总孔隙度和毛管孔隙度, 降低土壤容重; 随覆膜年限延长, 覆膜 6 a 处理表层土壤的总孔隙度、毛管孔隙度和土壤通气度降低。同时 20 cm 以下土层的土壤总孔隙度处于压实状态 (40%~45%), 40 cm 以下土壤容重已超出砂壤土最佳容重变异范围 (1.20~1.30 g·cm^{-3})。可见长期覆膜会造成亚表层及以下土壤处于严重压实状态[24], 影响水肥保蓄, 土壤有机质含量和土壤含水量均为各处理最低。

这是由于果园覆膜后减少了对土壤的扰动, 且土层间较大的温差加剧了深层土壤水分在温度梯度和毛管力作用下沿毛管孔隙上升的“夜潮”现象[25]。水汽凝结回落在膜下进行内部循环, 形成水分横向渗透和纵向上升相结合的移动规律, 促使细根向表层土壤聚集, 并加大对该土层水分和有机质的消耗。毛管孔隙度与土壤水肥保蓄性能紧密关联[25], 覆膜 6 a 处理土壤毛管孔隙度在亚表层土壤 (20~40 cm) 中均显著低于 0~20 cm 和 40~60 cm 土层 (P<0.05), 致使表层凝结水难以回渗至 40 cm 以下土层, 加剧深层土壤干旱化的发生。且 60 cm 以上土层的有机质含量和通气度, 60 cm 以下土层的含水量和毛管孔隙度的垂直差异显著影响细根分支、延伸生长的变异, 导致垂直土层对细根根长与分支策略的决定性随覆膜年限的延长而增大。覆膜 6 a 处理在生长初期呈现表层密集分支和深层结构简化的生长策略, 生长后期采取简化分支构型和就地吸收的资源保存策略。这种因长期覆膜打破土壤生态平衡, 影响细根生长的变化趋势与路海东等[26]在地膜覆盖对玉米根际土壤理化性状与根系的影响研究结果一致。综上, 长期覆膜加剧对土壤水分和有效孔隙的影响, 细根周年生长受抑制, 尤以分支数为代表的根系构型特征更为显著, 与单立山等[19]研究结果一致, 但与邹松言等[27]在毛白杨 (*Populus tomentosa*) 细根研究中结果不同, 可能是由于对处在生长旺盛期的 2 年生毛白杨而言, 调整细根形态和构型特征以增强根系吸水效率, 并不足以抵抗生态逆境胁迫, 需加强细根空间拓展范围实现其生态适应性。

3.3 覆膜对亚表层“根-土”复合体的影响

以往的研究表明, 表层土壤理化特性与根系生长更易受土壤管理措施的影响[5]。但本试验结果显示, 随覆膜年限延长, 覆膜 4 a 和覆膜 6 a 处理亚表层土壤 (20~40 cm) 的毛管孔隙度、通气度和有机质含量均低于 0~20 cm 和 40~60 cm 土层。细根根长在亚表层土壤中分布极显著下降, 在第 Ⅰ 期和第 Ⅲ 期中仅分别为表层土壤的 29.94%~48.36% 和 36.4%~43.17%; 在第 Ⅲ 期中, 仅分别为 40~60 cm 土层的 80.63% 和 93.98%。可见长期覆膜对亚表层土壤的破坏作用可直接反馈于细根, 抑制其正常生长, 与韩宾等[28]在小

麦根系研究中得出的亚表层土壤理化性状受破坏会严重阻碍根系下扎的结果一致。还有研究指出在高密度种群环境压迫下, 马先蒿以降低根系拓展能力来适应资源约束[14]。重度和极度胁迫环境限制土壤有效养分范围, 迫使黄栌幼苗根系根长显著降低[22]。可见根长代表细根资源投入的大小和拓展空间的能力, 是细根“资源快速获取”策略的集中体现。该现象表明长期覆膜后, 亚表层土壤中苹果细根可多属性维度协调资源配置以规避逆境胁迫[29]。而亚表层土壤的“隐蔽性”使其微生态变化不易在长久一致的管理措施下被及时发觉, 无形中增加了研究难度, 其演化机理有待于进一步研究。

4　结论

1) 覆膜 2 a 不仅对苹果园表层土壤有保护作用, 还可改善深层土壤物理性状。苹果细根在年生长周期中, 前期采取“资源快速获取型”策略, 迅速占据资源空间, 以提高养分利用效率, 为苹果树周年生产做准备; 后期采取“资源保守获取型”策略, 减少表层土壤细根资源投入, 形成短而细的密集横向分枝细根以提高原位土壤养分利用效率, 拓展水平分布范围的同时促进深层土壤细根延伸生长, 根系垂直分布中心相比清耕 (CK) 处理加深 35.96%。

2) 覆膜 6 a 显著降低苹果园亚表层土壤 (20~40 cm) 的有机质含量、通气度和毛管孔隙度。细根在年生长后期集中分布于距干水平 0~90 cm 范围内的垂直 0~20 cm 土层中, 并通过增大直径延长根系寿命, 简化分支结构以降低资源消耗的方式, 最大化贮存营养; 经历冬春连旱后, 在年生长初期细根集中分布于距干水平 90~150 cm 范围内的垂直 0~20 cm 土层中, 并形成密集根系网络, 提高有限土壤空间中的根系资源获取能力。

3) 陇东旱塬苹果园长期覆膜下, 亚表层土壤 (20~40 cm) 理化性状受显著影响, 不利于水肥保蓄和细根拓展。建议生产中适时揭膜, 利于土壤结构和养分的优化, 促进细根生长。

致谢: 对国家现代农业产业技术体系——平凉综合试验站全体成员, 表示由衷的感谢。

参考文献　References

[1] 李佳旸, 王延平, 韩明玉, 等. 陕北黄土丘陵区山地苹果园的土壤水分动态研究[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(5): 749−758
LI J Y, WANG Y P, HAN M Y, et al. Soil moisture dynamics of apple orchards in Loess Hilly Area of northern Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(5): 749−758

[2] 胥生荣, 张恩和, 马瑞丽, 等. 不同覆盖措施对枸杞根系生长和土壤环境的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(12): 1802−1810
XU S R, ZHANG E H, MA R L, et al. Effects of mulching patterns on root growth and soil environment of *Lycium barbarum*[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(12): 1802−1810

[3] 靳乐乐, 乔匀周, 董宝娣, 等. 起垄覆膜栽培技术的增产增效作用与发展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(9): 1364−1374
JIN L L, QIAO Y Z, DONG B D, et al. Crop yield increasing and efficiency improving effects and development of technology of ridge-furrow cultivation with plastic film mulching[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(9): 1364−1374

[4] CHEN X L, WU P T, ZHAO X N, et al. Effect of different mulches on harvested rainfall use efficiency for corn (*Zea mays* L.) in semi-arid regions of northwest China[J]. Arid Land Research and Management, 2013, 27(3): 272−285

[5] 张林森, 刘富庭, 张永旺, 等. 不同覆盖方式对黄土高原地区苹果园土壤有机碳组分及微生物的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(15): 3180−3190
ZHANG L S, LIU F T, ZHANG Y W, et al. Effects of different mulching on soil organic carbon fractions and soil microbial community of apple orchard in loess plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(15): 3180−3190

[6] 孙文泰, 马明, 董铁, 等. 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[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3153−3163
SUN W T, MA M, DONG T, et al. Response of distribution pattern and physiological characteristics of apple roots grown in the dry area of eastern Gansu to ground mulching[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(10): 3153−3163

[7] 高琛稀, 刘航空, 韩明玉, 等. 矮化自根砧苹果苗木生长动态及其根系分布特征[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2016, 44(5): 170−176
GAO C X, LIU H K, HAN M Y, et al. Growth dynamic and characteristics of root distribution of dwarfing self-rooted rootstock apple nursery[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2016, 44(5): 170−176

[8] 张亚雄. 蓄水坑灌下苹果树细根动态及其影响因素的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017: 53–55
ZHANG Y X. Study on the fine root dynamics of apple trees and relationship with impact factors under water storage pit irrigation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017: 53–55

[9] FRESCHET G T, ROUMET C. Sampling roots to capture plant and soil functions[J]. Functional Ecology, 2017, 31(8): 1506−1518

[10] 杨雨, 李芳兰, 包维楷, 等. 川西亚高山11种常见灌木细根形态特征[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(6): 1376−1384

YANG Y, LI F L, BAO W K, et al. Fine-root morphology of common shrubs in the subalpine forests of western Sichuan[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020, 26(6): 1376−1384

[11] 白雪, 赵成章, 康满萍. 金塔绿洲不同林龄多枝柽柳根系分叉数与分支角度的关系[J]. 生态学报, 2021, 41(5): 1878−1884
BAI X, ZHAO C Z, KANG M P. Relationship between root Forks and branch angle of *Tamarix ramosissima* at different stand ages in oasis of Jinta County[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1878−1884

[12] 徐立清, 崔东海, 王庆成, 等. 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[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 373−380
XU L Q, CUI D H, WANG Q C, et al. Root architecture and fine root characteristics of *Juglans mandshurica* saplings in different habitats in the secondary forest on the west slope of Zhangguangcailing, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(2): 373−380

[13] 潘小莲, 李秀, 赵英, 等. 黄土高原旱塬区不同覆盖模式下冬小麦耗水特征及根系生长规律研究[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(6): 726−733
PAN X L, LI X, ZHAO Y, et al. Characteristics of water consumption and root growth of winter wheat under different covering modes in arid tableland of the Loess Plateau[J]. Journal of Triticeae Crops, 2018, 38(6): 726−733

[14] 李雪萍, 赵成章, 任悦, 等. 尕海湿地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[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3670−3676
LI X P, ZHAO C Z, REN Y, et al. Relationship between root forks and link number, branch angle of *Pedicularis kansuensis* under different density conditions in Gahai Wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): 3670−3676

[15] 刘照霞, 邢玥, 吴晓娴, 等. 矮化中间砧苹果施氮位置对细根分布、氮素吸收和产量品质的影响[J]. 园艺学报, 2021, 48(2): 219−232
LIU Z X, XING Y, WU X X, et al. Effects of nitrogen application position on fine root distribution, nitrogen absorption, yield and quality of dwarfing interstock apple trees[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2021, 48(2): 219−232

[16] 王芬, 刘会, 冯敬涛, 等. 牛粪和生物炭对苹果根系生长、土壤特性和氮素利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(12): 1795−1801
WANG F, LIU H, FENG J T, et al. Effects of cow dung and biochar on root growth, soil properties and nitrogen utilization of apple[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(12): 1795−1801

[17] 李婷婷, 唐永彬, 周润惠, 等. 云顶山不同人工林林下植物多样性及其与土壤理化性质的关系[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 1168−1177
LI T T, TANG Y B, ZHOU R H, et al. Understory plant diversity and its relationship with soil physicochemical properties in different plantations in Yunding Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 1168−1177

[18] 刘涛, 王百田, 曹琪琪, 等. 不同覆盖措施对盐碱地紫穗槐细根适应策略的影响[J]. 草业科学, 2020, 37(6): 1098−1106
LIU T, WANG B T, CAO Q Q, et al. Effects of different mulching measures on the fine-root adaptation strategies of *Amorpha fruticosa* in saline soil[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(6): 1098−1106

[19] 单立山, 苏铭, 张正中, 等. 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[J]. 植物生态学报, 2018, 42(4): 475−486
SHAN L S, SU M, ZHANG Z Z, et al. Vertical distribution pattern of mixed root systems of desert plants *Reaumuria soongarica* and *Salsola passerina* under different environmental gradients[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(4): 475−486

[20] 郭京衡, 曾凡江, 李尝君, 等. 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[J]. 植物生态学报, 2014, 38(1): 36−44
GUO J H, ZENG F J, LI C J, et al. Root architecture and ecological adaptation strategies in three shelterbelt plant species in the southern Taklimakan Desert[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(1): 36−44

[21] 张丽娜, 张育斌, 王军德. 黄土高原降水年内分布差异对旱作果园蒸散特征的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2363−2372
ZHANG L N, ZHANG Y B, WANG J D. Effects of annual distribution difference of precipitation on evapotranspiration characteristics of dry orchard in Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(7): 2363−2372

[22] 李金航, 周玫, 朱济友, 等. 黄栌幼苗根系构型对土壤养分胁迫环境的适应性研究[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(3): 65−77
LI J H, ZHOU M, ZHU J Y, et al. Adaptability response of root architecture of *Cotinus coggygria* seedlings to soil nutrient stress[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(3): 65−77

[23] 卜玉山, 邵海林, 王建程, 等. 秸秆与地膜覆盖春玉米和春小麦耕层土壤碳氮动态[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 322−326
BU Y S, SHAO H L, WANG J C, et al. Dynamics of soil carbon and nitrogen in plowed layer of spring corn and spring wheat fields mulched with straw and plastic film[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(2): 322−326

[24] 魏彬萌, 李忠徽, 王益权. 渭北旱塬苹果园土壤紧实化现状及成因[J]. 应用生态学报, 2021, 32(3): 976−982
WEI B M, LI Z H, WANG Y Q. Status and causes of soil compaction at apple orchards in the Weibei Dry Highland, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(3): 976−982

[25] 徐佳星, 封涌涛, 叶玉莲, 等. 地膜覆盖条件下黄土高原玉米产量及水分利用效应分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(12): 2349−2359
XU J X, FENG Y T, YE Y L, et al. Effects of plastic film mulching on yield and water use of maize in the Loess Plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(12):

2349−2359

[26] 路海东, 薛吉全, 郝引川, 等. 黑色地膜覆盖对旱地玉米土壤环境和植株生长的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(7): 1997−2004
LU H D, XUE J Q, HAO Y C, et al. Effects of black film mulching on soil environment and maize growth in dry land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7): 1997−2004

[27] 邹松言, 李豆豆, 汪金松, 等. 毛白杨幼林细根对梯度土壤水分的响应[J]. 林业科学, 2019, 55(10): 124−137
ZOU S Y, LI D D, WANG J S, et al. Response of fine roots to soil moisture of different gradients in young *Populus tomentosa* plantation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(10): 124−137

[28] 韩宾, 李增嘉, 王芸, 等. 土壤耕作及秸秆还田对冬小麦生长状况及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 48−53
HAN B, LI Z J, WANG Y, et al. Effects of soil tillage and returning straw to soil on wheat growth status and yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(2): 48−53

[29] POTOCKA I, SZYMANOWSKA-PUŁKA J. Morphological responses of plant roots to mechanical stress[J]. Annals of Botany, 2018, 122(5): 711−723