

DOI:10.11686/cyxb2025091

http://cyxb.magtech.com.cn

任浩奇, 李彤, 杨荣, 等. 生草对陇东果园土壤肥力影响的区域评估. 草业学报, 2026, 35(2): 83-94.

REN Hao-qi, LI Tong, YANG Rong, *et al.* Effects of herbage ground cover on orchard soil fertility enhancement in the Longdong Region of Gansu Province. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(2): 83-94.

生草对陇东果园土壤肥力影响的区域评估

任浩奇¹, 李彤^{1*}, 杨荣^{2*}, 王鸿⁴, 赵明新⁴, 刘学周⁵, 宋淑钧^{2,3}, 孙开^{2,3}, 薛俊武⁶

(1. 兰州财经大学农林经济管理学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院临泽内陆河流域研究站, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 甘肃省农业科学院林果花卉研究所, 甘肃 兰州 730000; 5. 甘肃省经济作物技术推广站, 甘肃 兰州 730000; 6. 会宁县农机中心, 甘肃 白银 730700)

摘要:为明确旱区果园生草栽培模式的实施效应, 揭示生草与清耕果园土壤养分指标差异的影响因素。以陇东地区12县(区)45组生草—清耕果园为研究对象, 系统分析土壤表层有机质(SOM)、全氮(TN)、全碳(TC)、全磷(TP)、碱解氮(AN)和pH的差异性特征, 并探讨气候条件、土壤类型及生草管理措施的调控效应。结果表明: 1)与清耕相比, 生草使SOM、TN、TC、AN和pH分别增加26.7%、7.1%、10.4%、18.2%和2.5%, TP降低8.3%; 频率统计结果显示, 生草较清耕SOM、TN、TC、TP、AN和pH明显增加的样点分别占比44.4%、35.6%、53.3%、26.7%、37.8%和73.3%。2)年降水量与SOM、TC、AN、pH变化率呈显著正相关($P < 0.05$), 且年降水量超过400 mm时, 土壤SOM、TC变化率大于0; 年均气温的高低对TP和pH的变化率无显著影响, 与SOM和AN的变化率呈显著正相关($P < 0.05$); 3)生草年限与TN、TP、AN、SOM、TC变化率呈显著正相关($P < 0.05$), pH与生草年限的负线性关系未达到显著水平; SOM、TN、TC、AN、TP变化率均随生草年限增加而增加, 其中TP的增速最快, 达 $8.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$; 生草4年以上的果园SOM、TN含量均高于清耕。4)人工生草TP变化率($-18.3%$)显著低于自然生草($4.9%$), pH值相反; 黑垆土TC变化率比黄壤土提高25.7%, TP降低27.6% ($P < 0.05$)。研究结果可为陇东地区果园生草技术的优化与推广提供科学依据, 指导果农根据当地气候条件和土壤类型, 合理选择生草类型和管理措施, 以提高果园土壤肥力, 促进果园生态系统的可持续发展。

关键词: 果园生草; 土壤; 养分含量; 陇东地区

Effects of herbage ground cover on orchard soil fertility enhancement in the Longdong Region of Gansu Province

REN Hao-qi¹, LI Tong^{1*}, YANG Rong^{2*}, WANG Hong⁴, ZHAO Ming-xin⁴, LIU Xue-zhou⁵, SONG Shu-jun^{2,3}, SUN Kai^{2,3}, XUE Jun-wu⁶

1. School of Agricultural and Forestry Economics and Management, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730000, China; 2. Linze Inland River Basin Research Station, Northwest Institute of Ecology, Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Gansu Academy of Agricultural Sciences, Forestry and Fruit and Flower Research Institute, Lanzhou 730000, China; 5. Gansu Province Cash Crop Technology Extension Station, Lanzhou 730000, China; 6. Baiyin City Huining County Agricultural Machinery Center, Baiyin 730700, China

收稿日期: 2025-03-20; 改回日期: 2025-05-21

基金项目: 甘肃省科技重大专项计划“省力化绿色智慧宜机果园模式创建与配套关键技术研发”课题3“果园绿色管理模式与生态效益评估”(23ZDNA001), 甘肃省农业科技支撑项目“苹果绿色低碳建园模式与栽培关键技术研究示范”(KJZC-2024-8)和甘肃省现代旱作特色农业科技支撑项目(KJZC-2025-12)资助。

作者简介: 任浩奇(1997—), 男, 甘肃平凉人, 在读硕士。E-mail: 2370236101@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: gansult@126.com; yangrong@lzb.ac.cn

Abstract: This study examined soil nutrient differences between clean-cultivated orchards and those with grass or similar ground cover to identify the effect of orchard management regime on soil properties in arid regions of China. We identified 45 pairs of orchards in 12 counties of the Longdong area of Gansu Province for sampling. The two orchards in each pair were near to each other and matched for age and type of fruit tree, but differed in that one was clean-cultivated, while the other was managed with herbage ground cover. Systematic analysis was conducted on the variations of soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), total carbon (TC), total phosphorus (TP), alkaline-hydrolyzable nitrogen (AN), and pH in the soil surface. The impacts of climatic conditions, soil types, and grass cultivation practices were deliberated upon. The results showed that: 1) In comparison to clean tillage, the soil SOM, TN, TC, AN, and pH levels were increased by 26.7%, 7.1%, 10.4%, 18.2%, and 2.5%, respectively, where herbage ground cover was present, while TP decreased by 8.3%. The 45 pairs of orchards were categorized for the same 6 parameters as increased, unchanged or decreased when herbage ground cover was present and the resulting frequency ratios of percentage of the 45 paired sites increased: percentage of sites increased under herbage cover SOM, TN, TC, AN, pH and TP levels were 44.4%, 35.6%, 53.3%, 37.8%, 73.3% and 26.7%, and decreased were 24.4%, 33.3%, 24.4%, 26.7%, 22.2%, and 51.1%, respectively. 2) Annual rainfall showed a significant positive correlation with SOM, TC, AN, and pH ($P < 0.05$). At sites with annual rainfall greater than 400 mm, both SOM and TC rates of change exceeded zero. However, annual air temperature did not have a significant impact on TP and pH, but exhibited a positive correlation with SOM and AN ($P < 0.05$). 3) A significant positive correlation was observed between the number of years since establishment of herbage cover and the rates of change in TN, TP, AN, SOM, and TC ($P < 0.05$). There was a trend of a negative linear association between pH and the number of years since herbage establishment, however, this trend did not achieve statistical significance. The rates of change in SOM, TN, TC, AN, and TP all increased with time since establishment of orchard ground cover, with TP showing the highest growth rate at $8.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$. Furthermore, orchards with ground cover established for more than 4 years demonstrated higher levels of SOM and TN compared to those clean-cultivated orchards. 4) The rate of change of TP under sown vegetation cover (-18.3%) was significantly more negative than that in natural grassland (4.9%), while the opposite was true for pH, with sown ground cover exhibiting a faster rate of pH increase than naturally occurring herbage. The rate of TC increase in dark loessial soil was 25.7% higher than that in yellow loam soil, while the rate of TP decrease was 27.6% faster in dark loessial than yellow loam soil ($P < 0.05$). These results offer a scientific foundation for optimizing and promoting orchard grassing techniques in the Longdong area. They can also assist fruit growers in selecting appropriate grassing methods and management practices based on local climate conditions and soil types, so as to improve orchard soil fertility and promote the sustainable development of orchard ecosystem.

Key words: orchard grass; soil; nutrient content; Longdong region

耕地是农业生产的基础,对保障国家粮食安全和农民生计具有至关重要的作用。近年来,部分耕地存在过度开垦、粗放管理和化肥过量使用等问题,对土壤质量和生态环境造成了严重损害,在西北干旱、半干旱地带尤为凸显^[1]。在此背景下,果园生草技术作为生态农业的重要实践,通过在果园行间种植耐刈割草种并定期还田^[2],不仅能够固土保肥、蓄水保墒,还可促进养分循环与微生物活性,为旱区果园生态化管理提供了技术路径^[3]。

果园生草技术的综合效益已在大量研究得到验证,主要包括草种适应性筛选^[4-5]、土壤理化性质与微生物群落改良^[6-7]、果园微环境调控^[8],以及对果树生长发育和果实品质的影响等方面^[9]。在草种筛选方面,我国已针对不同生态区特性,系统整理出4科20属共计617种适用草种^[4]。其中,西北旱区通过长期田间试验,成功推广箭筈豌豆(*Vicia sativa*)、毛苕子(*Vicia villosa*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)等抗逆性强的豆科草种^[5]。在果园生

草对旱区土壤养分影响方面,山西、陕西、甘肃等地开展了大量实地试验,例如程滨等^[10]在山西省汾阳市核桃(*Juglans mandshurica*)园种植大豆(*Glycine max*)、毛苕子等4种绿肥发现,0~20 cm土层全氮、速效钾含量分别平均提高16.7%和5.3%;李会科等^[11]在陕西洛川10 hm²的苹果(*Malus pumila*)园生草发现,禾本科和豆科草种均能提高土壤养分含量,其中禾本科草种在提升土壤有机质、全氮、全钾方面优于豆科草种,分别比豆科高6.1%、9.1%和14.7%;张帆等^[12]在甘肃省西峰区某苹果园进行人工和自然生草发现,人工生草在提升土壤养分含量方面效果优于自然生草,其中种植白三叶草(*Trifolium repens*)的效果最优,土壤有机质、全氮含量分别比自然生草高21.2%和10.4%。因此,果园生草对旱区土壤养分的提升具有积极作用。然而,现有研究仅针对单一地点,再扩充到更大区域时往往会遇到不同的甚至截然相反的结论,这表明,在更大区域采用果园生草模式时,土壤养分的变化方向、变化幅度以及具体指标的表现很可能受到土壤类型、气候条件以及生草管理具体措施等多重因素的影响,从而导致研究结果的不确定性。鉴于此,本研究有必要开展一项区域性的综合调查试验,通过在大尺度上设置多个采样点位,系统地分析果园生草技术对土壤养分影响的实际情况。

陇东地区是重要的果树种植区,果树种植面积占甘肃省果园种植面积(331333.3 hm²)的70.0%^[13],该区域内果园生草技术已经有一定程度的推广,但现有研究多聚焦于单一地点的生草效应,对区域尺度下气候—土壤—管理互作机制的解析仍显不足。因此,选择陇东地区具有代表性的12个县(区)中的45组果树种植试验样点,系统分析生草和清耕果园0~20 cm土壤表层有机质(soil organic matter, SOM)、全氮(total nitrogen, TN)、全碳(total carbon, TC)、全磷(total phosphorus, TP)、碱解氮(alkaline-hydrolyzable nitrogen, AN)和pH的变化,并探讨降水、气温等环境因素对果园生草的适应性,以及不同生草年限、生草类型和土壤类型对土壤养分变化率的影响,旨在为陇东及黄土高原旱区果园土壤管理策略的优化及生草技术的应用推广提供指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究聚焦于甘肃省陇东地区,样本采集点遍布静宁、庄浪、灵台、宁县、庆城、秦安、秦州、武山、礼县、甘谷、通渭、会宁等县(区)的主要果树种植区,地理坐标区间为北纬34°12′—36°05′,东经105°09′—108°31′,海拔为1135~1819 m(图1)。该区域属于温带大陆性气候,年平均气温为7~12℃,年降水量介于300~700 mm。研究区域包括平地 and 梯田两种地形结构,土壤类型以黄绵土、黄壤土、黑垆土为主。

1.2 研究方法

基于甘肃省果园种植重点县区分布图,本研究共选取45组生草和清耕果园的对照试验样点(图1),具体的取样和分析过程如下:

采样点的选取:在样点选择过程中,与当地农机部门及农户充分沟通,结合各县区果园种植面积、地形差异及土壤类型,优先选取区域内生草面积较大、有代表性且具备生草与清耕对照条件的果园。每个县区2~5组采样点,每组采样点间隔8 km以上,以减少空间相关性对研究结果的干扰。

每组采样点中生草和清耕果园相邻设置,同时确保两者栽培年限、果树品种一致,从而有效控制变量。此外,详细记录各采样点的位置信息、生草年限、生草类型、果树品种、土壤类型、种植年限,并收集区域海拔、降水量、温度等环境信息。研究样点的果园类型、生草管理及年限分布信息如表1所示。

土壤样品的采集:本研究于2024年6月开展田间样本采集,在采集过程中根据果园面积合理确定取样点数量。通常面积较小的果园(如0.67 hm²以内),设置5~10个取样点;面积较大(超过0.67 hm²)时,按每增加0.33 hm²多设置2个采样点。取样时考虑果园地形、果树种植行向等因素,对于有一定坡度的生草果园,要在坡顶、坡中、坡底分别设置采样点。取样时利用直径为5 cm的土钻,垂直插入土壤,缓慢旋转并下压,采集0~20 cm耕层深度的土壤样本,将每个取样点内的土壤样品充分混合,用四分法收集混合样品^[14]。

样本保存和分析:将采集好的土壤样本装入干净、密封的样品袋,带回实验室进行风干、称重、编号。用常规分析方法测定各土壤养分指标^[15],使用重铬酸钾容量法测定土壤有机质(SOM)含量,凯氏定氮法测定全氮(TN)

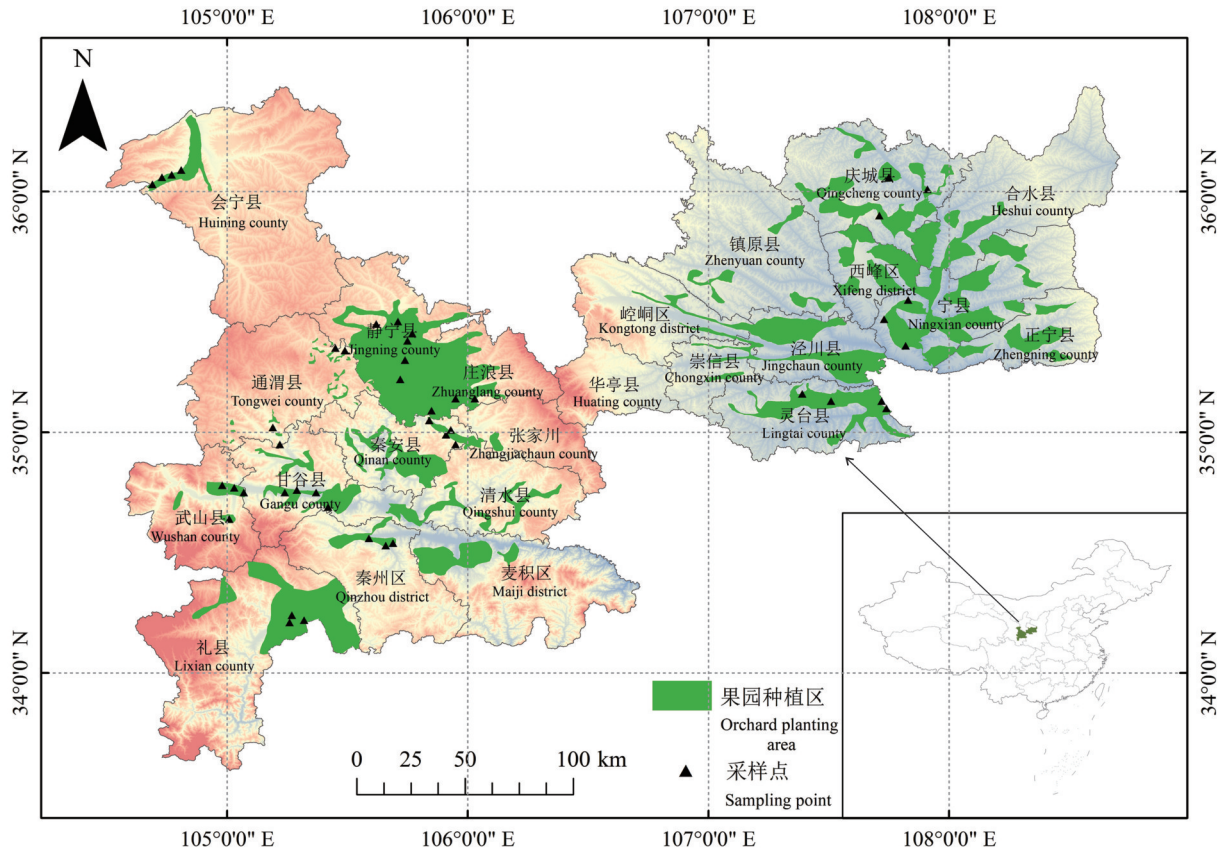


图1 研究区域和取样点分布

Fig. 1 Study area and sampling sites

基于自然资源部标准地图服务网站GS(2022)1873号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website GS(2022)1873 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

表1 研究样点的果园类型、生草管理及年限分布

Table 1 Distribution of orchard types, grassing management, and grassing ages in the study

指标 Indicators	分组 Categories
果园类型 Orchard types	苹果 <i>M. pumila</i> (88.9%)、樱桃 <i>Cerasus pseudocerasus</i> (6.7%)、花椒 <i>Zanthoxylum bungeanum</i> (4.4%)
果树生长年限 Fruit tree growth ages	5~10 (42.2%)、10~15 (37.8%)、15~20 (20.0%)
生草类型 Grassing types	豆科 Fabaceae (15.6%)、禾本科 Graminae (8.9%)、十字花科 Brassicales (6.7%)、自然生草 Self-sown grass (68.9%)
生草年限 Grassing ages	2 (6.7%)、3 (15.6%)、4 (6.7%)、5 (8.9%)、6 (15.6%)、7 (13.3%)、8 (13.3%)、9 (8.9%)

注: 果树生长年限和生草年限分组中的单位均为“年(a)”。括号中数据代表各分组类型数占总样点数的比例。

Note: The units in the groups for fruit tree growth ages and grassing ages are all “years(a)”. The data in parentheses represent the proportion of the number of each group type to the total number of sample points.

含量,红外光谱法测定全碳(TC)含量,硫酸—高氯酸消煮法测定全磷(TP)含量,碱解扩散法测定碱解氮(AN)以及电极法测定土壤pH。

1.3 数据处理

分别对生草果园和清耕果园的土壤养分数据进行描述性统计分析,以揭示两组数据的基本特征和分布规律,采用Shapiro-Wilk(S-W)检验方法,对两组土壤养分数据的正态性进行检验。根据检验结果,将样本指标分为符合正态分布和不服从正态分布两类。对于符合正态分布的样本指标,采用配对样本 t 检验进行差异性分析,以判断生草果园与清耕果园之间土壤养分的显著性差异($P < 0.05$);对于不服从正态分布的样本指标,则采用非参数检验中的威尔科克森符号秩检验进行差异性分析。计算土壤各养分指标的变化率(以生草果园相对于清耕果园

的变化为基准),并根据变化率的大小将其分为 3 组:增加、基本不变(以 1 倍的标准误差作为基本不变的判断标准)和减少,并对各组进行频率统计。根据各采样点所属县区,对土壤养分指标的变化率进行平均处理,并分别与年降水量和年平均气温进行回归拟合分析,以探讨气候因素对土壤肥力变化的影响;将土壤养分变化率数据按照 1 年间隔从低到高进行排序并求平均,随后将平均变化率与生草年限进行回归拟合分析(有 5 个采样点未收集到具体的生草年限数据,故在分析时予以剔除)。按照生草类型和土壤类型(黑垆土、黄绵土、黄壤土)对土壤养分变化率数据进行分类,并进行单因素方差分析,以确定不同生草类型和土壤类型对土壤肥力变化的影响及其相关关系。采用 ArcMap 10.8 进行地理信息处理,Excel 2024 进行数据分析和初步分析,SPSS 26.0 进行统计分析和差异性检验,Origin 2024 进行图形绘制和结果可视化。

2 结果与分析

2.1 土壤养分含量的描述性统计分析和 *t* 检验

对 45 组土壤养分数据进行描述性统计分析(表 2),结果显示,清耕果园土壤 SOM 含量为 4.0~19.4 g·kg⁻¹,平均值为 12.0 g·kg⁻¹,标准差为 3.3。TN、TC、TP、AN 含量和 pH 分别为 0.6~3.3 g·kg⁻¹、15.9~34.0 g·kg⁻¹、1.4~5.4 g·kg⁻¹、37.3~217.5 mg·kg⁻¹和 7.6~8.7,平均值分别为 1.4 g·kg⁻¹、22.2 g·kg⁻¹、2.4 g·kg⁻¹、89.1 mg·kg⁻¹和 8.1。生草果园土壤 SOM、TN、TC、TP、AN 含量和 pH 分别为 5.8~49.1 g·kg⁻¹、0.8~3.9 g·kg⁻¹、17.8~49.5 g·kg⁻¹、1.5~4.6 g·kg⁻¹、27.3~429.8 mg·kg⁻¹和 7.8~8.7,平均值分别为 15.2 g·kg⁻¹、1.5 g·kg⁻¹、24.5 g·kg⁻¹、2.2 g·kg⁻¹、105.3 mg·kg⁻¹和 8.3。

根据 S-W 检验结果,pH 符合正态分布,因此采用配对样本 *t* 检验,其他养分指标采用威尔科克森符号秩检验。结果表明,生草较清耕果园土壤 SOM、TC 和 pH 分别显著增加 26.7%、10.4% 和 2.5% ($P < 0.05$)。TN、AN 含量分别增加 7.1% 和 18.2% ($P > 0.05$),TP 含量降低 8.3% ($P > 0.05$,表 2)。

表 2 土壤养分含量的描述性统计及 *t* 检验结果

Table 2 Descriptive statistics of the indexes of soil nutrient contents and *t*-test result

指标 Indicators		最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Average	标准差 Standard deviation	<i>t</i> 值 <i>t</i> value
有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	a	4.0	19.4	12.0	3.3	-2.7**
	b	5.8	49.1	15.2	8.0	
全氮 Total nitrogen (g·kg ⁻¹)	a	0.6	3.3	1.4	0.5	-0.5
	b	0.8	3.9	1.5	0.6	
全碳 Total carbon (g·kg ⁻¹)	a	15.9	34.0	22.2	3.8	-3.0**
	b	17.8	49.5	24.5	5.7	
全磷 Total phosphorus (g·kg ⁻¹)	a	1.4	5.4	2.4	0.8	1.5
	b	1.5	4.6	2.2	0.7	
碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen (mg·kg ⁻¹)	a	37.3	217.5	89.1	33.4	-1.1
	b	27.3	429.8	105.3	69.8	
pH	a	7.6	8.7	8.1	0.3	-3.8***
	b	7.8	8.7	8.3	0.2	

注: *、**、*** 分别代表 $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$, a, b 分别代表清耕和生草。

Note: *, **, *** represent $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$, a, b represent clean tillage and grassing.

2.2 土壤养分变化率的频率统计

对 45 组试验样点的土壤养分变化率进行频率统计的结果显示(图 2),生草果园土壤 SOM 含量较清耕果园明显增加的样点有 20 个,占比 44.4%。TN、TC、TP、AN、pH 分别有 16、24、12、17、33 个,分别占比 35.6%、53.3%、26.7%、37.8% 和 73.3%。

2.3 气候对土壤养分变化率的响应

通过对年降水量与土壤养分变化率进行线性及非线性回归拟合分析(图3)发现,除土壤TN、TP外,SOM、TC、AN、pH的变化率均与年降水量之间呈显著相关关系。其中,土壤SOM、TC的变化率与年降水量之间呈显著正相关($P < 0.05$)关系,且年降水量分别超过313和391 mm时,生草果园土壤SOM和TC含量大于清耕。pH的变化率与年降水量之间呈正线性函数关系($P < 0.05$),增加速率为0.008,决定系数 R^2 为0.49。土壤TN、AN的变化率随年降水量的增加而增加,TP的变化率逐渐减少($P > 0.05$)。

年平均气温和土壤养分变化率的线性和非线性的回归拟合分析(图4)表明,年平均气温的高低对TC、TP和pH的变化率无显著影响,与SOM和AN的变化率呈显著正相关($P < 0.05$)关系,且增加速率逐渐加快, R^2 分别为0.13、0.17。土壤TC和TP的变化率与年平均气温的正线性关系不显著($P > 0.05$)。

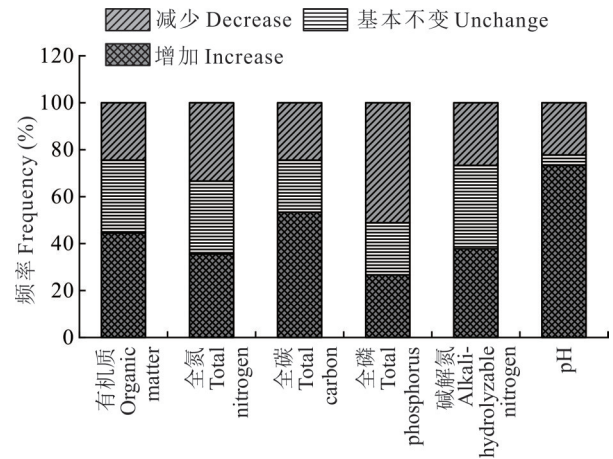


图2 土壤养分含量变化率的频率统计

Fig. 2 Frequency statistics of rate of change of soil nutrient contents

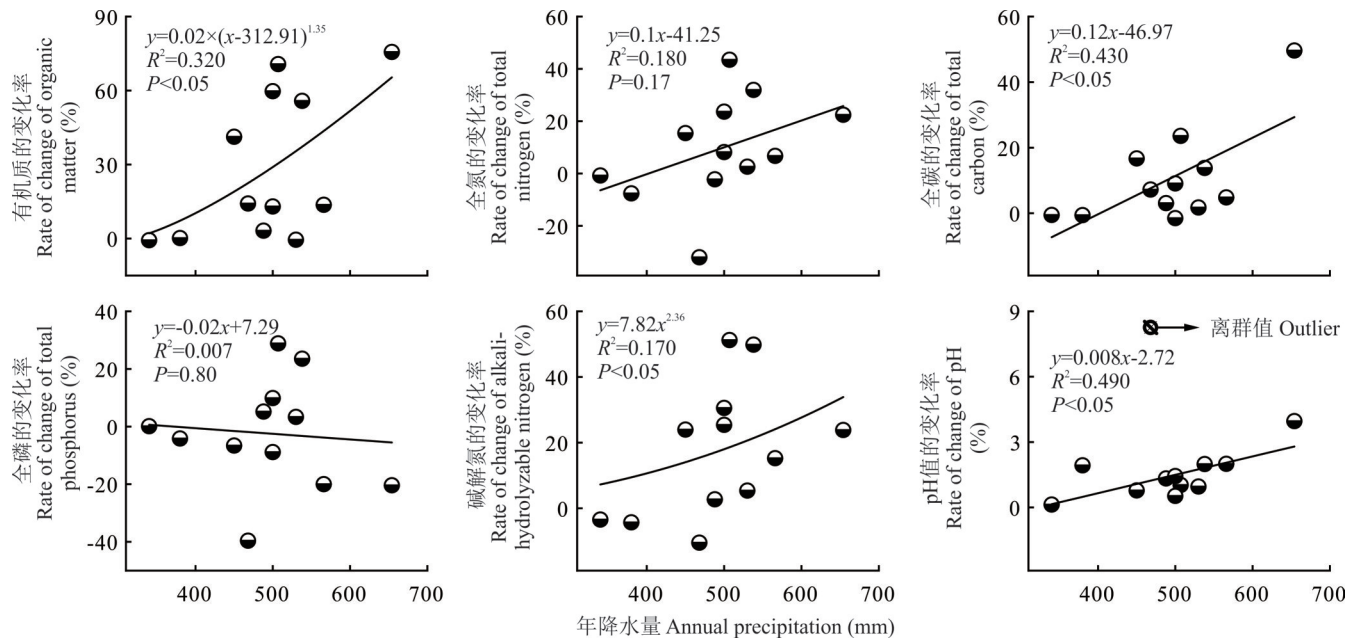


图3 年降水量和土壤养分变化率之间的回归关系

Fig. 3 Regression relationships between annual precipitation and rates of change in soil nutrients

2.4 生草年限、生草类型和土壤类型对土壤养分变化率的响应

生草年限与土壤养分变化率的回归分析(图5)结果显示,除生草年限与土壤pH的变化率负相关关系不显著外($R^2 = 0.47, P = 0.06$),与SOM、TN、TC、TP、AN的变化率均呈显著正相关($P < 0.05$)关系。其中,SOM、TC随生草年限的增加而增加,但增加速率逐渐减慢;TN、AN、TP随生草年限的增加匀速增加,TN和AN的增加速率基本一致,TP的增加速率最快($8.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)。生草年限分别超过4.0、3.2年,土壤TN和AN变化率大于0;超过6.0年,TP的变化率大于0(图5)。

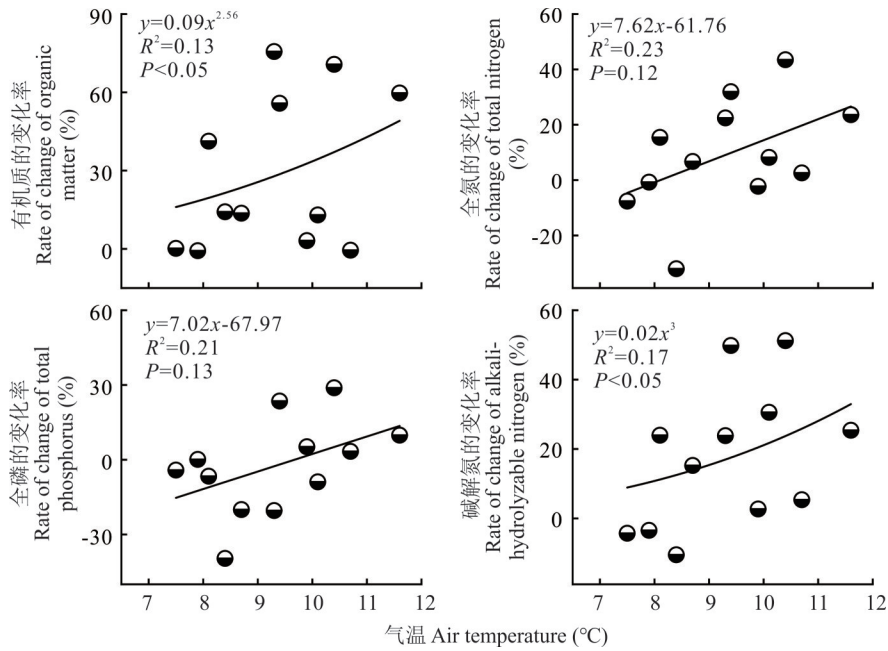


图 4 年平均气温和土壤养分变化率之间的回归关系

Fig. 4 Regression relationships between average annual air temperature and rates of change in soil nutrients

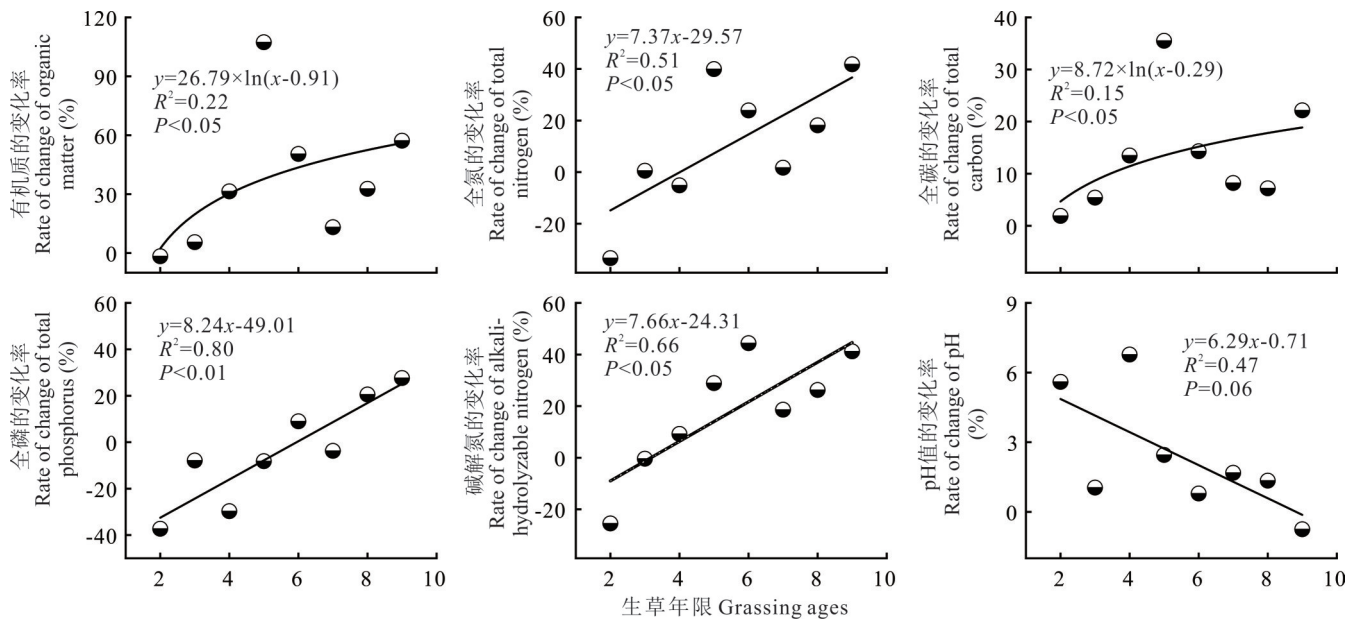


图 5 生草年限和土壤养分变化率之间的回归关系

Fig. 5 Regression relationships between grassing ages and rates of change in soil nutrients

将土壤养分变化率按照草种科属(禾本科、豆科、十字花科和自然生草)进行分类,发现不同科属草种之间土壤养分变化率不显著。进一步按照人工生草和自然生草两种生草条件进行分类,发现两种生草条件对土壤 SOM、TN、TC 和 AN 的变化率影响也不显著,对 TP、pH 影响显著($P < 0.05$,图 6)。人工生草 TP 变化率(-18.3%)显著低于自然生草(4.9%);pH 相反,人工生草比自然生草显著高 2.8%($P < 0.05$)。

不同土壤类型下养分的变化特征如图 6 所示。土壤类型对果园生草 SOM、TN、AN 和 pH 的变化率影响不显著,对 TC 和 TP 影响显著。黑垆土比黄壤土果园生草 TC 的变化率显著高 25.7%,黄绵土与另外两种土壤类型之间无显著差异($P > 0.05$)。土壤类型为黑垆土和黄绵土时,TP 的变化率小于 0,分别为-19.7%和-2.4%,黄壤土的变化率为 7.9%,黑垆土和黄壤土之间存在显著差异($P < 0.05$)。

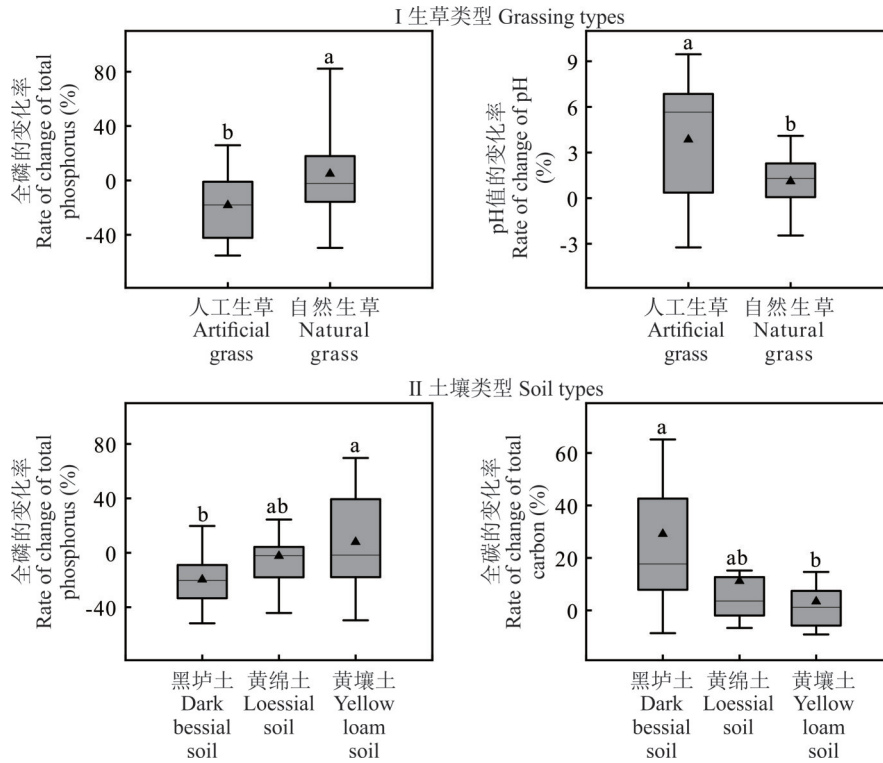


图6 不同生草类型、土壤类型的养分变化率特征

Fig. 6 Characterization of nutrient rates of change in different grassing types and soil types

不同字母表示不同组之间差异显著。The different letters mean significant differences among different groups.

3 讨论

3.1 生草对果园土壤养分的总体效应

果园生草作为提升土壤肥力的一项有效管理措施,其对土壤养分的影响呈显著的效应分化与机制多样性。本研究表明,相较于清耕,陇东地区果园生草可显著提升土壤SOM、TC含量(表2),其原因可能有以下几个方面:1)生草通过改善土壤物理结构,提高土壤保水能力与大团聚体占比^[16],形成对有机碳的物理保护,进而降低微生物对土壤有机碳的分解速率;2)生草提升了土壤微生物数量与酶活性^[17],加速养分循环与能量流动,促进有机物质的合成与积累;3)生草覆盖不仅通过拦截径流减少雨水与灌溉水对土壤的冲刷侵蚀^[18],降低养分流失风险,同时草本生物量在刈割后归还土壤,直接为土壤提供营养物质输入,进一步促进土壤碳库的积累。进一步研究发现,生草比清耕处理土壤SOM、TC含量分别提高26.7%和10.4%,虽与前人结论^[11,19]一致,但提升幅度存在差异,例如李会科等^[11]4年人工生草SOM增幅达39.2%~58.4%,本研究较低;钱进芳等^[19]2年自然生草仅提高12.9%,本研究高于其。这种差异可能与生草年限、生草类型以及区域环境与管理措施的不同有关。然而,生草对土壤养分的提升效应存在区域性和指标特异性,并非所有养分要素均能通过生草措施实现同步增长。频率统计结果显示(图2),生草果园土壤TP含量增加的样点占比35.6%,减少的样点占比60.0%,这表明TP对生草的响应在不同区域间存在较大差异。进一步测定发现,试验区内生草和清耕果园TP平均含量差异较小(生草比清耕低8.3%),与部分研究结果不一致^[20]。这种差异可能与土壤磷素的累积水平及形态变化密切相关。在长期大量施用磷肥的果园中,土壤磷素形态可能已处于较高累积水平,随着全磷含量的增加,土壤中的磷形态逐渐从无机磷和Fe-P向Al-P转变^[21]。这种磷形态的转变可能削弱了生草对土壤全磷含量的提升效果,导致生草处理在本研究中对全磷含量的影响不明显。因此,生草对土壤TP含量的影响呈现空间异质性,其效应受制于区域土壤磷素本底特征、成土母质类型及长期施肥管理形成的磷素赋存状态等因素,需基于区域尺度差异开展精准化评估与管理策略制定。

已有研究^[22-23]表明果园生草能够降低土壤 pH,改善土壤盐渍化程度,而本研究结果有所不同。究其原因,一方面可能是本研究区域内多数果园以自然生草为主,草类残体分解过程中释放的盐基离子(如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等)在土壤中积累,对土壤 pH 产生中和或提升效应;另一方面,黄土高原地区气候干旱、蒸发强烈,生草系统下植物蒸腾作用加剧可能导致土壤水分亏缺,促使盐分随毛管水向表层迁移并富集^[24],这一过程通过盐分组成变化间接影响 pH 值。需要说明的是,本研究区域土壤盐渍化问题并不突出,上述机制对 pH 的影响需结合长期定位观测进一步验证。

3.2 气候条件对生草增肥效应的影响

降水量的大小会影响果园的保水、养分循环和土壤结构改善效果,进而影响生草对果园土壤肥力和生态环境的积极作用。本研究回归分析显示,随降水量的增加 SOM、TN、TC、AN 和 pH 的变化率增加(图 3),其原因可能表现为两个方面:1)降水量增加能够提升果树新梢生物量及草本植物生产力^[25],通过凋落物输入与根系分泌物扩大果园土壤供给;2)降水量的增加也会提高光合作用速率,从而提升近地层 O_2 含量,降低 CO_2 浓度,使土壤 pH 值升高^[26]。然而,当降水量低于 312 mm 时,生草果园土壤 SOM 和 TC 含量均小于清耕果园,可能因干旱条件下草种与果树竞争有限水分^[27],影响根系生长及土壤有机质积累。基于此,建议年降水量小于 400 mm 区域实施生草管理时,需配套灌溉措施以维持草—果树系统水分协同阈值。然而,与碳氮养分的正向响应不同,TP 变化率随降水量增加呈反向变化(图 3),这可能与磷素淋溶损失加剧有关^[28]。高湿环境促进磷酸盐向深层迁移,同时刺激草—果树系统对磷的竞争性吸收^[29],从而导致土壤表层磷素含量降低。

本研究还发现,土壤 SOM、TN、TP、AN 均随气温的增加而增加(图 4)。其响应机制呈现微生物代谢与植物光合的协同驱动特征。一方面,温度升高促进了微生物的代谢活动^[30],加速了有机质的分解和养分的矿化过程;另一方面,研究区气温($7\sim 12\text{ }^\circ\text{C}$)处于植物光合作用的下限至最适温度区间,升温可提升光合碳同化速率^[31],增加凋落物与根系分泌物输入量,进而增加了土壤养分的积累。

3.3 生草年限与类型对果园生草土壤养分的影响

随生草年限增加,果园土壤肥力整体呈提升趋势,但不同养分指标的响应模式存在差异(图 5)。生草初期,受草—果树养分竞争影响,生草果园土壤养分含量低于清耕处理;而生草年限超过 4 年后,养分变化率随年限增加呈渐进式增长,这可能与土壤微生物群落演替及酶活性提升有关。例如李会科等^[11]通过果园生草种植白三叶草发现在 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层,生草 5 年比生草 3 年过氧化氢酶、脲酶及磷酸酶活性均有所提高,其中脲酶的活性提高最大(40.7%)。付学琴等^[32]进一步对土壤酶活性、微生物数量和土壤养分进行回归拟合,结果显示微生物数量、过氧化氢酶活性同有机质、全氮、全钾等呈显著正相关关系,磷酸酶活性与全磷和一些速效养分呈显著正相关关系。但生草年限的增加并不会一直加速土壤有机物质的积累,可能在较长的生草年限后,土壤养分含量增加速率会维持在一个相对较高的水平,并持续为果园生态系统等提供养分支持。值得注意的是,TP 变化率随年限增速最快($8.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$),明显高于碳氮养分(图 5)。这一差异可能源于磷素形态的进一步转化,随生草年限的增加,草种持续分泌磷酸酶及有机酸,将土壤中累积的难溶性 Fe-P、Al-P 转化为可溶性磷与有机磷^[33],而区域土壤磷饱和导致活化磷在耕层滞留,表现为 TP 增加速率最快。结合前期发现的降水—磷淋失关联(图 3),生草对 TP 的调控实为“活化—固持—淋失”动态平衡的结果,其效应随环境梯度(如降水、磷本底值)不同而变化。

本研究还发现,陇东地区果园不同草种间土壤养分变化率差异不显著,这一现象可能与研究区内土壤养分的垂直分布特性有关。不同生草品种在不同土壤层次中对养分的影响各异,但在整体水平上可能达到了一种动态平衡,这种平衡掩盖了草种间土壤养分变化的差异^[34]。进一步研究发现,人工生草的 TP 变化率显著低于自然生草,而土壤 pH 的变化趋势则相反(图 6I)。这一差异可能与两种生草方式下果园管理措施的不同有关。田间调查发现,本研究区内自然生草的果园通常会实施定期翻耕作业,这些管理措施不仅有助于增加土壤中 TP 的含量,还能通过改善土壤结构,促进土壤中酸碱平衡的调节。相比之下,人工生草的果园为了保护播撒的草种,往往不采取上述措施,因此陇东地区人工生草的果园在提升土壤 TP 含量和调节土壤酸碱平衡方面效果不如自然生草。

3.4 土壤类型对生草增肥效应的影响

土壤类型对果园生草模式下 TC、TP 的响应具有显著调控作用(图 6),其本质是土壤物理结构与化学吸附特性对养分周转路径的协同作用。本研究发现,黑垆土果园土壤 TC 变化率比黄壤土高 25.7%,这可能与黑垆土疏松多孔的物理结构有关^[35]。这种结构不仅促进凋落物的分解,还能加速腐殖质的稳定化过程。相比之下,黄壤土的黏粒含量较高,限制了氧气的扩散和微生物的活性,从而导致碳周转速率较低^[36]。在磷素动态方面,两种土壤类型呈相反的响应趋势:黑垆土 TP 变化率为负(-19.7%),黄壤土为 7.9%,该差异与土壤磷吸持容量(phosphorus sorption capacity)有关。黄壤土中铁铝氧化物含量较高,对磷的吸附能力较强^[37],而黑垆土等有机质含量高但铁铝氧化物相对较少的土壤,磷吸持容量相对较低^[38]。因此,土壤类型通过物理结构与化学吸附的双重机制来调控果园生草系统的碳磷循环过程,建议黑垆土区配套磷素活化草种(如豆科)与有机改良措施,以突破磷吸持限制。

4 结论

本研究通过对陇东地区果园生草与清耕土壤养分的对比分析,揭示了生草对土壤肥力的显著提升作用及其影响因素。具体而言,生草提高了土壤 SOM、TN、TC 和 AN 含量,分别增加 26.7%、7.1%、10.4% 和 18.2%,而 TP 和 pH 变化幅度不大(-8.3% 和 2.5%)。年降水量和气温是影响土壤养分变化的重要因素,降水量超过 400 mm 时,生草果园土壤 SOM 和 TC 含量显著高于清耕果园,且气温升高促进了 SOM 和 AN 的积累。生草年限对土壤养分的提升具有累积效应,生草超过 4 年后,SOM 和 TN 含量显著高于清耕。不同生草类型和土壤类型对土壤养分变化率的影响存在差异,人工生草 TP 变化率低于自然生草,黑垆土 TC 变化率显著高于黄壤土,而 TP 的变化率相反。因此,果园生草技术的实施需根据当地气候条件和土壤类型,合理选择草种并注重果园管理,以避免果树与草种间的水肥竞争,从而有效提升果园的生态与经济效益。

参考文献 References:

- [1] Kong X B, Chen W G, Dang Y X. Current situation, challenges and transformation of cultivated land protection in China. *Journal of Social Science of Hunan Normal University*, 2023, 52(5): 31–41.
孔祥斌, 陈文广, 党昱譔. 中国耕地保护现状、挑战与转型. *湖南师范大学社会科学学报*, 2023, 52(5): 31–41.
- [2] Hao Z W, Ji L. Present situation and prospect of the study on interplanting grass in orchard in China. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2017, 45(3): 486–490.
郝紫微, 季兰. 我国果园生草研究现状与展望. *山西农业科学*, 2017, 45(3): 486–490.
- [3] Hu P, Gao X D, Zhao X N, *et al.* Effects of grassing on orchard ecosystem services: a global meta-analysis. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(8): 1238–1248.
呼盼, 高晓东, 赵西宁, 等. 生草对果园生态系统服务功能的影响: 全球数据整合分析研究. *中国生态农业学报*, 2022, 30(8): 1238–1248.
- [4] Cao W D. Green fertilizer germplasm resource description specifications and data standards. Beijing: China Agriculture Press, 2007: 1–3.
曹卫东. 绿肥种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2007: 1–3.
- [5] Ma S K, Wang C M, Zhao C L, *et al.* Screening of water-saving and sink-enhancing plant species in arid and semi-arid regions of Northwest China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, 46(8): 122–131.
马沈轲, 王春梅, 赵春林, 等. 西北干旱半干旱地区节水增汇植物种类筛选. *北京林业大学学报*, 2024, 46(8): 122–131.
- [6] Couédel A, Alletto L, Tribouillois H, *et al.* Cover crop crucifer-legume mixtures provide effective nitrate catch crop and nitrogen green manure ecosystem services. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 254(2): 50–59.
- [7] Li H K. Eco-environmental effect and integrated technical system of green cover in apple orchard in Weibei dryland farming areas. Yangling: Northwest A&F University, 2008.
李会科. 渭北旱地苹果园生草的生态环境效应及综合技术体系构建. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [8] Chen J, Zhang Q, Yang M Y, *et al.* Effects of growing grass on microclimate environment and apple leaves in apple orchard. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2023, 25(12): 158–167.

- 陈俊, 张琦, 杨梦宇, 等. 生草对苹果园小气候环境及苹果叶片的影响. 中国农业科技导报, 2023, 25(12): 158—167.
- [9] Bhaskar V, Westbrook A S, Bellinder R R, *et al.* Integrated management of living mulches for weed control: A review. *Weed Technology*, 2021, 35(5): 856—868.
- [10] Cheng B, Zhao R F, Hua X Z, *et al.* Effects of interrow grass on soil nutrients, organic carbon components and enzyme activities in walnut orchard. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(6): 57—64.
程滨, 赵瑞芬, 滑小赞, 等. 行间生草对核桃园土壤养分、有机碳组分及酶活性影响. 中国土壤与肥料, 2021(6): 57—64.
- [11] Li H K, Zhang G J, Zhao Z Y, *et al.* Effects of interplanting of herbage on soil nutrient of non-irrigated apple orchard in the Loess Plateau. *Acta Horticulturae Sinica*, 2007, 34(2): 477—480.
李会科, 张广军, 赵政阳, 等. 黄土高原旱地苹果园生草对土壤养分的影响. 园艺学报, 2007, 34(2): 477—480.
- [12] Zhang F, Ma Z H, Li W F, *et al.* Effects of grass types on soil nutrition and fruit quality of apple orchards in dryland area. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2024, 59(1): 135—143.
张帆, 马宗桓, 李文芳, 等. 生草类型对旱作区苹果园土壤营养及果实品质的影响. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(1): 135—143.
- [13] National Bureau of Statistics of China. *Statistical yearbook of China*. Beijing: China Statistics Press, 2024.
国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2024.
- [14] Zhu X Z, Zhang J T. Improving the method of plotless sampling for forest community. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(1): 137—140.
朱珣之, 张金屯. 森林群落无样地取样方法的改进. 北京林业大学学报, 2008, 30(1): 137—140.
- [15] Lu R K. *Analytical methods for soil and agro-chemistry*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [16] Yan T Y. *Variation characteristics of soil aggregates and aggregate carbon in orchards covered with living mulching*. Yangling: Northwest A & F University, 2019.
闫涛宇. 果园生草覆盖土壤团聚体和团聚体碳的变化特征. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [17] Liu Y P, Mao Y F, Hu Y L, *et al.* Effects of grass planting in apple orchard on soil microbial diversity, enzyme activities and carbon components. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(10): 1792—1805.
刘业萍, 毛云飞, 胡艳丽, 等. 苹果园生草对土壤微生物多样性、酶活性及碳组分的影响. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(10): 1792—1805.
- [18] Cheng Z Z, Fan X P, Xia Y, *et al.* Combined effects of living mulch and fertilizer reduction on nitrogen and phosphorus runoff loss in a citrus orchard. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(6): 1358—1367.
程子珍, 范先鹏, 夏颖, 等. 生草覆盖及配合化肥减量对柑橘园地表径流氮磷流失的影响. 农业资源与环境学报, 2023, 40(6): 1358—1367.
- [19] Qian J F, Wu J S, Huang J Q. Effects of sod-cultural practices on soil nutrients and microbial diversity in the *Carya cathayensis* forest. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(15): 4324—4332.
钱进芳, 吴家森, 黄坚钦. 生草栽培对山核桃林地土壤养分及微生物多样性的影响. 生态学报, 2014, 34(15): 4324—4332.
- [20] Huang Q Q. *The study on the variation characteristics and bioavailability of soil phosphorus forms in apple orchard*. Yangling: Northwest A & F University, 2021.
黄倩倩. 果园生草土壤磷形态变化特征及其生物有效性的研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [21] Ye G K, E S Z, Chen Z Y, *et al.* The forms and classification methods of phosphorus in soil: research progress. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(1): 96—102.
冶废康, 俄胜哲, 陈政宇, 等. 土壤中磷的存在形态及分级方法研究进展. 中国农学通报, 2023, 39(1): 96—102.
- [22] Yang L, Mao Y F, Hu Y L, *et al.* Effects of orchard grass on soil fertility and apple tree nutrition. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(2): 325—337.
杨露, 毛云飞, 胡艳丽, 等. 生草改善果园土壤肥力和苹果树体营养的效果. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2): 325—337.
- [23] Wang Y, Chen C, Ma L N, *et al.* Inter-row grass: effects on soil nutrients and pH value of kiwifruit orchards in Northern Qinling Mountains. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(15): 59—65.
王依, 陈成, 马兰妮, 等. 行间生草对秦岭北麓猕猴桃园土壤养分、pH值的影响. 中国农学通报, 2019, 35(15): 59—65.
- [24] Wang Q H, Wang J D, Li S, *et al.* Experiments to simulate the salinisation process of loess under a dynamic water cycle. *Environmental Research*, 2025, 268: 120739.

- [25] Yue X F, Zhang T H, Li Y Q. Effects of rainfall regime during the growing season on the annual plant communities in semiarid sandy land, northeast China. *Global Ecology and Conservation*, 2023, 43: e02456.
- [26] Ju X, Yue Z R, Zhao S Y, *et al.* Response of soil pH to precipitation alterations across Chinese grassland: A Meta-analysis. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(1): 262–272.
居新, 岳卓然, 赵守逸, 等. 中国草地土壤pH值对降雨变化的响应——Meta分析. *草地学报*, 2025, 33(1): 262–272.
- [27] Zheng C H, Wang R S, Zhou X, *et al.* Effects of mulch and irrigation regimes on water distribution and root competition in an apple-soybean intercropping system in Loess Plateau, China. *Agricultural Water Management*, 2021, 246: 106656.
- [28] Gu S, Dupas R, Casquin A, *et al.* Hydrological conditions influence the prediction of soil phosphorus indices on phosphorus leaching in hydromorphic soils. *Science of the Total Environment*, 2025, 967: 178856.
- [29] Xu C, Dao C J, Zhao P C, *et al.* Effects of rainfall intensity on soil nitrogen and phosphorus leaching characteristics in different planting patterns. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(7): 1568–1579.
徐翠, 刀承娇, 赵鹏程, 等. 不同生草模式下降雨强度对土壤氮磷淋溶特性的影响. *农业环境科学学报*, 2024, 43(7): 1568–1579.
- [30] Song B, Li Y S, Yu Z H, *et al.* Changes in enzyme activity, structure and growth strategies of the rhizosphere microbiome influenced by elevated temperature and CO₂. *Science of the Total Environment*, 2024, 954: 176522.
- [31] Li P, Xiao X X, Yao Y, *et al.* Site-specific apparent optimum air temperature for vegetation photosynthesis across the globe. *Scientific Data*, 2024, 11(1): 758.
- [32] Fu X Q, Liu J E, Huang W X. Effects of natural grass on soil microbiology, nutrient and fruit quality of Nanfeng tangerine yard. *Acta Horticulturae Sinica*, 2015, 42(8): 1551–1558.
付学琴, 刘琚珥, 黄文新. 南丰蜜橘园自然生草对土壤微生物和养分及果实品质的影响. *园艺学报*, 2015, 42(8): 1551–1558.
- [33] Tian J, Liang C Y, Lu X, *et al.* Mechanism of root exudates regulating plant responses to phosphorus deficiency. *Journal of South China Agricultural University*, 2019, 40(5): 175–185.
田江, 梁翠月, 陆星, 等. 根系分泌物调控植物适应低磷胁迫的机制. *华南农业大学学报*, 2019, 40(5): 175–185.
- [34] Ma Y, Zhang D G. Regulation mechanisms of rhizosphere nutrient cycling processes in grassland: A review. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(11): 172–182.
马源, 张德罡. 草地根际过程对养分循环调控机制研究进展. *草业学报*, 2020, 29(11): 172–182.
- [35] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. China soil database. Nanjing: Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, 2024.
中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤数据库. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2024.
- [36] Guo Z, Lu Y J. Influencing factors of content of organic carbon in cultivated soils of yellow soil and suggested countermeasures. *Hans Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 9(6): 432–437.
郭振, 卢垟杰. 黄壤有机碳含量的影响因素研究进展及提升对策. *农业科学*, 2019, 9(6): 432–437.
- [37] Xia L. Study on yellow soil adsorption and desorption characters of fluorine and phosphate in mountain regions of western Sichuan. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2010.
夏丽. 氟、磷在川西山地黄壤中的吸附—解吸特征研究. 成都: 四川农业大学, 2010.
- [38] Wang Q, Chen Y H, Zhang N Y, *et al.* Phosphorus adsorption and desorption characteristics as affected by long-term phosphorus application in black soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(9): 1569–1581.
王琼, 陈延华, 张乃于, 等. 长期施磷黑土中磷的吸附—解吸特征及其影响因素. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(9): 1569–1581.