

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.02.040

CSTR:32311.14.rswc.2026.02.040

任浩奇, 李彤, 杨荣, 等. 生草对甘肃省苹果主产区土壤碳氮密度空间分布的影响与储量评估[J]. 水土保持研究, 2026, 33(2):141-150.

Ren Haoqi, Li Tong, Yang Rong, et al. Influence of grass planting on spatial distribution and stock assessment of soil carbon and nitrogen density in major apple-producing area of Gansu Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(2):141-150.

生草对甘肃省苹果主产区土壤碳氮密度 空间分布的影响与储量评估

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

(1. 兰州财经大学农林经济管理学院, 兰州 730000;

2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室

临泽内陆河流域研究站, 兰州 730000; 3. 甘肃省农业科学院林果花卉研究所, 兰州 730000;

4. 甘肃省经济作物技术推广站, 兰州 730000; 5. 会宁县农机中心, 甘肃 会宁 730700)

摘要: [目的] 探究甘肃省苹果园生草管理对土壤碳氮储量的调控效应及其空间分异规律, 为黄土高原半干旱区果园生态系统碳氮固存与土壤质量提升提供科学依据。 [方法] 以甘肃省黄土高原丘陵沟壑区 22 个果业县为研究对象, 通过野外采样、土壤理化分析、反距离加权(IDW)空间插值技术和冗余分析(RDA), 系统对比生草与清耕模式下土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)含量、质地特征及其空间分布差异, 并估算区域碳氮储量。 [结果] (1) 生草果园 0—20 cm 土壤 SOC 和 TN 含量较清耕果园分别提高 31.7% 和 10.8%, 土壤容重平均增加 1.60%, 但区域间表现不同。(2) 土壤中砂粒含量减少 7.03%, 粉粒与黏粒含量分别增加 0.15% 和 2.65%, 但在不同县域尺度下果园种植区的影响效果存在差异。(3) 生草果园土壤 SOC 和 TN 的密度均值为 2.24 kg/m² 和 0.39 kg/m², 较清耕果园提高 25.84% 和 8.33%, 其中灵台、泾川等水热优越区增幅较大。(4) 冗余分析表明, 黏粒变化率(解释率 20.90%)、年降雨量(11.50%)及生草年限(8.10%)是驱动碳氮密度变化的核心因子。(5) 区域储量估算表明, 生草果园 SOC 和 TN 总储量分别为 8 449.44 kt 和 1 422.59 kt, 较清耕果园增加 26.40% 和 7.37%, 平凉、天水、庆阳三市为增储核心区域。 [结论] 生草通过优化土壤质地, 增强有机质吸附与微生物活性, 提升了甘肃省苹果园土壤碳氮密度和储量, 但其效应受气候-土壤系统协同调控。建议依据区域水热条件与土壤类型制定差异化生草策略, 以实现黄土高原果园生态系统的可持续发展。

关键词: 苹果园生草; 甘肃省; 土壤碳氮储量; 土壤质地; 空间异质性

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0141-10

Influence of grass planting on spatial distribution and stock assessment of soil carbon and nitrogen density in major apple-producing area of Gansu Province

Ren Haoqi¹, Li Tong¹, Yang Rong², Wang Hong³, Zhao Mingxin³,
Liu Xuezhou⁴, Song Shujun², Sun Kai², Xue Junwu⁵

(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, State Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Forestry, Fruit and Flower Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730000, China; 4. Gansu Provincial Technical Extension Station for Cash Crops, Lanzhou 730000, China; 5. Huining County Agricultural Machinery Center, Huining, Gansu 730700, China)

收稿日期: 2025-05-27

修回日期: 2025-06-11

接受日期: 2025-06-20

资助项目: 甘肃省科技重大专项计划(23ZDNA001); 甘肃省农业科技支撑项目(KJZC-2025-22, KJZC-2025-12, KJZC-2024-8)资助

第一作者: 任浩奇(1997—), 甘肃平凉人, 硕士研究生, 研究方向为果园土壤管理和生态效益。E-mail: 2370236101@qq.com

通信作者: 李彤(1978—), 甘肃天水人, 博士, 副教授, 研究方向为作物栽培。E-mail: gansult@126.com

杨荣(1979—), 甘肃武威人, 博士, 研究员, 主要从事农业生态学研究。E-mail: yangrong@lzb.ac.cn

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

Abstract: [Objective] This study investigates the regulatory effects of grass-planting management on soil carbon and nitrogen storage in apple orchards in Gansu Province and its spatial differentiation patterns, thereby providing a scientific basis for carbon and nitrogen sequestration in orchard ecosystems and soil quality improvement in the semi-arid region of the Loess Plateau. [Methods] 22 fruit-producing counties in the hilly-gully region of the Loess Plateau, Gansu Province were selected as the research objects. Field sampling, soil physicochemical analysis, inverse distance weighted (IDW) spatial interpolation, and redundancy analysis (RDA) were used to systematically compare the differences in soil organic carbon (SOC) content, total nitrogen (TN) content, texture characteristics, and their spatial distributions under grass planting and clean tillage practices, and to estimate regional carbon and nitrogen stocks. [Results] (1) In grass-planting orchards, the SOC and TN contents in the 0—20 cm soil layer increased by 31.7% and 10.8%, respectively, compared with those of clean-tillage orchards, and the soil bulk density (BD) increased by an average of 1.60%, with varying performances across different regions. (2) The sand content in the soil decreased by 7.03%, while the contents of silt and clay increased by 0.15% and 2.65%, respectively. However, the influence on orchard planting areas varied at different county scales. (3) The average densities of SOC and TN in grass-planting orchards were 2.24 kg/m² and 0.39 kg/m², respectively, which were 25.84% and 8.33% higher than those in clean-tillage orchards, with greater increases in hydrothermally favorable areas such as Lingtai and Jingchuan. (4) Redundancy analysis indicated that the clay variation rate (explaining 20.90%), annual precipitation (11.50%), and grass-planting duration (8.10%) were the key factors driving variations in carbon and nitrogen density. (5) Regional stock estimation showed that total SOC and TN stocks in grass-planting orchards were 8 449.44 kt and 1 422.59 kt, respectively, which were 26.40% and 7.37% higher than those in clean-tillage orchards. The cities of Pingliang, Tianshui, and Qingyang were the core regions for stock increase. [Conclusion] Grass planting improves soil texture and enhances the organic matter adsorption and microbial activity, thereby increasing the density and storage of soil carbon and nitrogen in apple orchards in Gansu Province. However, its effects are regulated by the coordinated control of the climate-soil system. It is recommended to develop differentiated grassing-planting strategies based on regional hydrothermal conditions and soil types to achieve sustainable development of orchard ecosystems in the Loess Plateau.

Keywords: grass planting in apple orchards; Gansu Province; soil carbon and nitrogen stocks; soil texture; spatial heterogeneity

在全球气候变化与农业可持续发展的双重背景下,土壤碳氮储量的动态变化已成为生态学和农学研究的热点问题^[1]。作为陆地生态系统中最大的有机碳库和氮库,土壤碳氮储量直接影响气候调节、土壤肥力及作物生产力^[2]。果园作为重要的农业生态系统,其管理措施对土壤碳氮循环及其生态功能具有显著影响。传统清耕果园管理方式虽便于田间操作,但长期实施易导致土壤有机质分解加速、结构破坏,进而引发水土流失和碳氮养分流失。而生草管理作为一种生态友好的果园管理措施,通过植被覆盖增加有机质输入、改善土壤结构^[3],被认为是一种潜在的碳氮固存策略。

国内外学者在果园生草管理对土壤碳氮循环的影响方面已开展了大量研究。国外相关研究多集中于温带湿润或地中海气候区的果园系统。例如在西班牙杏园(*Prunus armeniaca* L.)的研究表明,长期生

草覆盖可提升土壤有机碳储量并改善氮素利用效率^[4];美国华盛顿州苹果园(*Malus pumila* Mill.)的研究也发现,种植豆科作物能有效增加土壤氮固存潜力^[5]。国内早期研究主要为生草对土壤理化性质的短期效应,例如刘业萍等^[6]在苹果园间作3年白三叶草(*Trifolium repens* L.)发现,土壤有机碳和全氮分别提高23.34%和28.90%;薛欣欣等^[7]橡胶园种植山毛豆(*Tephrosia candida* DC.)发现,土壤有机碳含量增加19.8%。这些研究为生草管理的局部效应提供了依据,但其结论多基于小尺度试验,难以反映区域尺度的空间异质性。近年来,随着空间分析技术的发展,一些研究开始关注土壤碳氮储量的空间分布特征。在全球尺度上,Zhou等^[8]利用全球干旱区129个国家12 000个站点的数据,分析了不同土地覆盖类型的土壤有机碳和总氮储量、驱动其空间分布的因素及不同气候情景下的变化趋势。在全国尺度上,

于东升等^[9]对中国土壤有机碳密度和储量进行了全面估算,揭示了土壤碳储量在全国范围内的空间格局,为宏观层面的土壤碳管理提供了重要依据。在自然生态系统尺度上,蔡文良^[10]和张亦凡^[11]等对不同地区森林生态系统中的碳氮储量及其空间分布特征进行了深入分析,进一步加深了对自然生态系统中土壤碳氮循环的理解。然而,在农田尺度下,尽管付传城^[12]和李子阳^[13]等分别对典型温带滨海地区与西南紫色土丘陵区果园土壤碳氮的空间动态特征及储量进行了分析与估算,但针对干旱半干旱区大尺度的果园土壤碳氮储量估算研究较少,尤其是果园生草这类管理措施对土壤碳氮密度和储量的影响研究存在空白。黄土高原地区水热条件复杂多变,土壤本底贫瘠^[14],在此区域开展果园生草措施对土壤碳氮储量的研究,更能明显揭示其调控效应时空分异规律。而甘肃省作为我国苹果种植面积第二大省和核心优势产区,地处半干旱气候带,果园实施生草管理后,对土壤碳氮储量的提升效应在干旱半干旱区具有较强的代表性,值得深入探究。

鉴于此,本研究以甘肃省果园核心区为研究对象,聚焦黄土高原丘陵沟壑区甘肃省22个苹果种植县,以大面积野外调查采样和室内分析测定为基础,采用土壤理化分析、IDW空间插值技术和冗余分析,系统解析生草管理措施对土壤碳氮库动态变化的调控效应,揭示不同地理梯度下果园生草效应的分异规律。本研究可为黄土高原半干旱区果园生草的实施效应和土壤碳氮储量的提升机制提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究以甘肃省果园核心区为研究对象,研究范围覆盖该区域典型果树栽培带,涵盖黄土高原丘陵沟壑区的22个重点果业县(区),包括静宁、庄浪、泾川、灵台、崆峒区、崇信、秦安、麦积区、甘谷、秦州区、清水、武山、宁县、庆城、西峰区、镇原、正宁、合水、礼县、西和县、通渭、会宁。研究区地理坐标范围为34°12′—36°5′N,105°9′—108°31′E。该区域地处大陆性温带气候区,海拔梯度为1 100~2 000 m。水热条件呈现显著的垂直分异特征,年均气温为7~12℃,无霜期160~210 d。降水时空异质性突出,平均降水量为300~700 mm,集中于6—9月。

1.2 碳、氮储量计算

本研究基于甘肃省经济作物技术推广站提供的苹果产业提质增效优势区计划表,选取12个重点果业县(静宁、庄浪、灵台、宁县、庆城、秦安、秦州、武

山、礼县、甘谷、通渭、会宁)中45组生草-清耕对照试验样点。样点选取遵循多级控制原则:县域尺度上按2~5组/县均衡分布,组间距 ≥ 8 km;样组内限定生草与清耕样方水平距离 ≤ 300 m,栽培年限匹配(差异 ≤ 2 年)、地形同质化(坡度 $\pm 5\%$),确保试验可比性。土壤采样采用动态密度法优化布点方案:基础单元(≤ 0.67 hm²)设置5~10个采样点,面积每扩展0.33 hm²增设2点,坡地系统沿坡面法线分设坡顶、坡腰、坡脚三级采样带。使用定制不锈钢土钻($\Phi=5$ cm)垂直采集0—20 cm耕层原状土,单点取样量 ≥ 500 g,混合样经机械四分法缩分后转运至实验室。土壤容重测定采用环刀法,以标准环刀($\Phi=5$ cm,容积100 cm³)取0—20 cm未扰动土柱,经105℃烘干至恒重。样本经风干、称重、编号后,用常规分析方法测定各土壤养分指标^[15];元素分析仪测定全氮,重铬酸钾外加热法测定有机质,样品带回室内自然风干,过2 mm孔径的土壤筛,用湿筛加吸管法分析土壤粒级组成。

采用范贝梅伦转换系数(Van Bemmelen Factor=1.724)将土壤有机质(Soil Organic Matter, SOM)换算为有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)^[16]。进一步对生草与清耕果园的土壤理化参数(SOC、TN、BD)及质地组成(砂粒、粉粒、黏粒)进行描述性统计分析。采用Shapiro-Wilk检验评估数据的正态性对符合正态分布的参数进行配对样本t-检验;对非正态分布的参数选用Wilcoxon符号秩检验,显著性水平设定为 $p < 0.05$ 。

基于上述测定的土壤有机碳(SOC)和全氮(Total Nitrogen, TN)含量,计算各采样点的土壤有机碳密度(Soil Organic Carbon Density, SOCD)和全氮密度(Total Nitrogen Density, TND)。计算公式为^[17]

$$\text{SOCD} = \text{SOC} \times \text{BD} \times H / 100 \quad (1)$$

式中:SOCD为土壤有机碳密度(kg/m²);SOC为土壤有机碳含量(g/kg);BD为土壤容重(g/cm³);H为土层厚度(H=20 cm)。

对于已采样的县(区),基于实测数据,计算各点的土壤SOC和TN密度,并取所属县(区)内所有采样点的平均值;未采样县(区)则根据其所在市域已采样县(区)的SOC和TN密度平均值进行估算。结合甘肃省经济作物技术推广站提供的苹果产业提质增效优势区计划表,获取各县(区)果园种植面积数据,分别计算甘肃省0—20 cm土层中,采用生草或清耕措施的果园土壤SOC和TN储量。其计算公式如下:

$$\text{SOC}_{\text{储量}} = \text{SOCD} \times S \quad (2)$$

式中:SOCD_{储量}单位为kt;S为各县(区)果园种植区面

积(km²)。土壤 TN 密度及储量计算公式与 SOC 密度及储量计算公式相同。

1.3 空间插值分析

以生草相较清耕果园的变化为基准,计算土壤 SOC、TN 和 BD 的变化率。基于实测样点数据($n=45$),建立包含地理坐标与目标变量的空间数据库。利用 ArcGIS 10.8 平台的空间分析模块,采用反距离加权(Inverse Distance Weighting, IDW)方法对土壤 SOC、TN、BD 和土壤质地(砂粒、黏粒、粉粒)的变化率(生草对比清耕)进行空间插值分析计算公式如下^[18]:

$$Z_{(x)} = \sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^p} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p} \quad (3)$$

式中: $Z_{(x)}$ 为待插值点的估计值; Z_i 为已知样本点的观测值; d_i 为第*i*个样点到待插值点的欧氏距离; p 为幂次参数,通常取值为1~3; n 为参与插值的样点数量。同样依据上述 IDW 插值方法,对 SOC 和 TN 密度进行空间异质性插值分析,以揭示土壤 SOC 和 TN 密度在空间上的分布特征。采用 Canoco 5 软件进行冗余分析(Redundancy Analysis, RDA),解析环境因子(海拔、年均温、年降雨量)、土壤质地变化率(砂粒、粉粒、

黏粒)及生草年限对 SOC、TN 密度变化的驱动效应。

2 结果与分析

2.1 描述性统计分析

研究区内生草果园土壤 SOC、TN 和 BD 含量均高于清耕果园,其中清耕果园 SOC、TN 和 BD 的平均含量为 6.96g/kg、1.39g/kg 和 1.23g/cm³,生草果园分别为 8.80g/kg、1.48g/kg 和 1.25g/cm³(表 1)。按照 Nielsen 等标准^[19],生草和清耕果园 BD 呈弱变异外, SOC 和 TN 的变异系数 27.73%~52.73%,均为中度变异。在 5% 的单样本 S-W 检验下,生草和清耕果园 BD 均符合正态分布,因此采用配对样本 t 检验,其他养分指标(SOC、TN)及土壤质地(砂粒、粉粒、黏粒)采用本威尔科克森符号秩检验。统计分析表明(表 1),与清耕模式相比,生草处理使土壤 SOC 含量显著提高 31.73%($p<0.01$),TN、BD 含量变化未达显著水平($p>0.05$),其均值分别增加 10.82% 和 1.63%。进一步分析土壤质地发现,生草与清耕果园砂粒、粉粒与黏粒组分间的差异均不显著($p>0.05$),其均值变化分别为-7.03%、0.15% 和 2.65%。

表 1 土壤养分含量的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of soil nutrient contents

指标		最大值	最小值	均值	标准差	变异系数/%	t 值
有机碳 SOC/(g·kg ⁻¹)	清耕	11.27	2.34	6.96	1.93	27.73	-2.65**
	生草	28.5	3.35	8.80	4.64	52.73	
全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	清耕	3.88	0.60	1.39	0.45	32.37	-0.51
	生草	3.31	0.79	1.48	0.59	39.86	
容重 BD/(g·cm ⁻³)	清耕	1.49	1.04	1.23	0.12	9.42	-0.67
	生草	1.51	0.96	1.25	0.13	11.05	
砂粒 (2~0.05 mm)/%	清耕	26.20	2.04	10.66	6.05	56.78	1.79
	生草	26.21	1.95	9.92	5.61	56.54	
粉粒 (0.05~0.002mm)/%	清耕	73.11	52.64	64.75	6.31	9.74	-0.17
	生草	74.34	48.89	64.85	6.30	9.71	
黏粒 (<0.002mm)/%	清耕	44.73	17.32	24.58	5.92	24.07	-1.47
	生草	46.53	17.19	25.23	6.40	25.37	

注:**代表 $p<0.05$ 。

2.2 基于 IDW 插值的土壤 SOC、TN、BD 变化率空间分布特征

对生草较清耕果园土壤 SOC、TN、BD 变化率进行 IDW 插值,分析区域内果园生草的碳、氮等养分变化率的空间分布特征(图 1)。除会宁县外,其他县(区)的果园种植区土壤 SOC 变化率均大于 0,其增加率基本在 0~66.66% 区间内,在静宁、灵台、泾川、庆城四个县的果园种植部分区域 SOC 的变化率出现了高值区(图 1A)。TN 的变化率分布与 SOC 类似,会宁、静宁(东北部)、庄浪、礼县(西北部)果园种植区

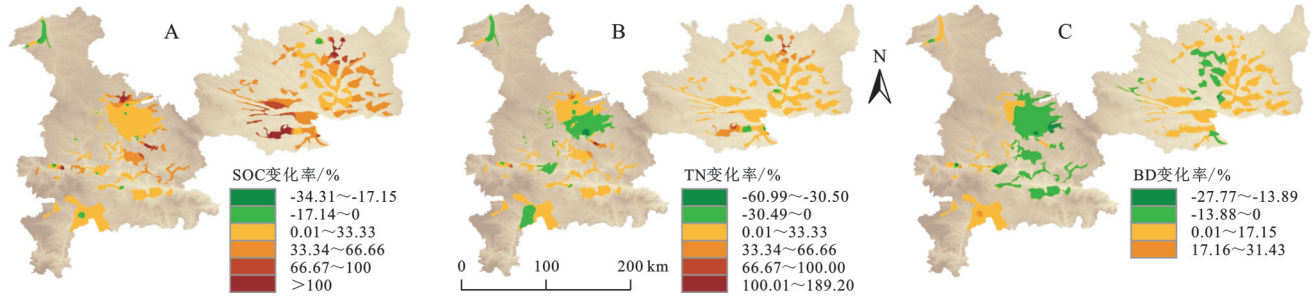
内 TN 含量小于 0,其他区域增加率基本维持在 0~33.33%,在灵台、庆城果园种植部分区域也出现了高值区(图 1B)。BD 的变化率分布与 SOC 整体上相反,在会宁、礼县等县(区)BD 的变化率大于 0,而静宁、庄浪、秦安等县(区)小于 0,变化率基本维持在-30%~30%,没有出现高值区(图 1C)。

2.3 土壤质地变化率空间分布特征

土壤质地变化率的 IDW 空间插值图(图 2)所示,砂粒、粉粒与黏粒组分变化呈现显著空间分异特征。砂粒变化率整体呈下降趋势,但礼县、静宁

及灵台等果园生草区出现局部增长;粉粒变化呈现正负斑块镶嵌格局,庆城-合水交界带增幅最大;黏

粒变化趋势与砂粒基本相反,灵台、武山等高值区增幅超 20.00%。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2022)1873 号标准地图制作,底图未作修改。

图 1 土壤养分变化率的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of soil nutrient variation rates

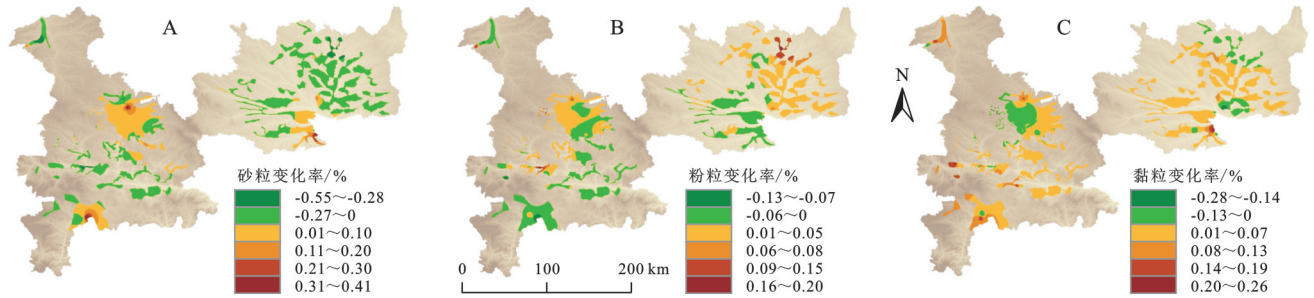


图 2 土壤质地变化率的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil texture variation rates

2.4 生草与清耕果园土壤 SOC 和 TN 密度的空间分布特征及区域储量估算

研究区内生草和清耕果园 SOC 和 TN 密度的 IDW 空间插值图(图 3)所示,果园生草整体上提高甘肃省果园种植区 0—20 cm 土层土壤 SOC 和 TN 密度。具体而言,清耕果园 SOC 密度(图 3A)主要处在

1~2 kg/m² 区间,而生草果园(图 3B)则提升至 2~3 kg/m²,其中灵台、泾川等县区出现超过 3 kg/m² 的高值区。TN 密度空间异质性明显:生草措施使礼县及庆阳(正宁、宁县、合水)片区 TN 密度提升较高,而天水、会宁、泾川、灵台等区域增幅较小,庄浪、静宁等局部区域甚至呈现降低趋势(图 3C、D)。

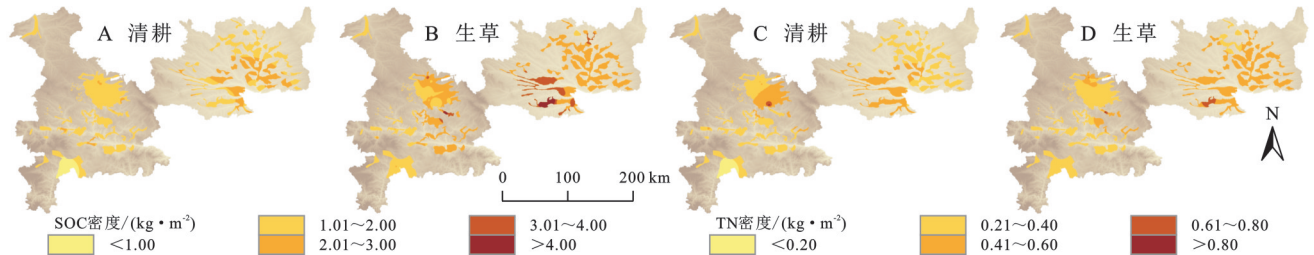


图 3 生草与清耕果园土壤 SOC 和 TN 密度的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil SOC and TN densities in grass-planting and clean-tillage orchards

甘肃省经济作物技术推广站提供的苹果产业提质增效优势区计划表显示,2025 年甘肃省果园种植面积预计达到 3 728.02 km²,其中平凉、天水、庆阳三市占比超 80%(表 2)。计算各采样点生草和清耕果园的土壤 SOC 与 TN 密度,对于已采样的县(区),计算各采样点的 SOC 和 TN 密度,并按县(区)取平均值;未采样县(区)则根据其所在市域已采样县(区)的 SOC 和 TN 密度平均值进行估算,结果表明(表 2),在 0—20 cm 土层中,土壤 SOC 密度的平均值分别为 1.78 kg/m² 和 2.24 kg/m²,生草比清耕果园提高

25.84%, TN 密度则表现为为生草果园(0.39 kg/m²)比清耕果园(0.36 kg/m²)提高 8.33%(表 2)。

进一步计算甘肃省果园种植区内 0—20 cm 土壤 SOC 与 TN 储量发现,生草果园土壤 SOC 和 TN 储量均高于清耕果园(表 2)。具体来说,生草和清耕果园的 SOC 总储量分别为 8 449.44 kt 和 6 684.73 kt,生草果园比清耕果园增加 1 762.72 kt,增幅为 26.40%。TN 储量分别为 1 422.59 kt(生草)和 1 324.95 kt(清耕),增量为 97.64 kt,增幅为 7.37%。然而,在庄浪、秦州等局部区域,果园生草使土壤碳氮储量降低。

表 2 生草和清耕果园土壤 SOC、TN 密度及储量
Table 2 Soil SOC and TN densities and stocks in grass-planting and clean-tillage orchards

市域	县区	面积/km ²	SOC 密度/ (kg·m ⁻²)		TN 密度/ (kg·m ⁻²)		SOC 储量/k t		TN 储量/k t	
			清耕	生草	清耕	生草	清耕	生草	清耕	生草
平凉	静宁	545.34	1.79	2.31	0.37	0.42	978.23	1258.48	202.72	229.05
	庄浪	243.33	1.83	1.73	0.60	0.31	445.92	421.52	146.27	74.31
	泾川	121.33	1.87	2.51	0.46	0.41	226.72	304.18	56.36	50.21
	灵台	63.33	1.98	3.48	0.42	0.52	125.35	220.46	26.65	32.68
	崆峒	18.67	1.87	2.51	0.46	0.41	34.88	46.80	8.67	7.72
	崇信	15.33	1.87	2.51	0.46	0.41	28.65	38.44	7.12	6.35
天水	秦安	409.34	1.91	3.19	0.33	0.47	783.11	1304.52	134.44	191.75
	麦积	276.00	1.66	2.10	0.31	0.35	459.00	580.68	84.31	97.12
	甘谷	240.00	1.09	1.54	0.23	0.27	261.61	370.00	54.72	65.75
	秦州	207.33	2.13	2.07	0.34	0.34	441.98	429.09	70.37	70.27
	清水	110.67	1.66	2.10	0.31	0.35	184.05	232.83	33.80	38.94
	武山	26.67	1.52	1.62	0.33	0.33	40.46	43.13	8.69	8.70
庆阳	宁县	300.00	2.22	2.42	0.41	0.42	666.21	727.33	122.17	127.23
	庆城	166.67	1.67	2.46	0.31	0.41	278.34	410.54	51.91	68.11
	西峰	166.67	1.95	2.44	0.36	0.42	324.23	407.31	59.89	69.40
	镇原	93.33	1.95	2.44	0.36	0.42	181.57	228.09	33.54	38.86
	正宁	73.33	1.95	2.44	0.36	0.42	142.66	179.22	26.35	30.53
	合水	73.33	1.95	2.44	0.36	0.42	142.66	179.22	26.35	30.53
陇南	礼县	406.67	1.67	1.94	0.30	0.34	678.98	787.25	123.58	136.49
	西和	29.33	1.67	1.94	0.30	0.34	48.98	56.79	8.91	9.85
定西	通渭	102.67	1.47	1.59	0.27	0.27	151.30	163.42	27.71	28.12
白银	会宁	38.67	1.55	1.56	0.27	0.27	59.86	60.14	10.41	10.61
合计		3728.02					6684.73	8449.44	1324.95	1422.59

2.5 果园土壤 SOC 和 TN 密度变化率的影响因素分析

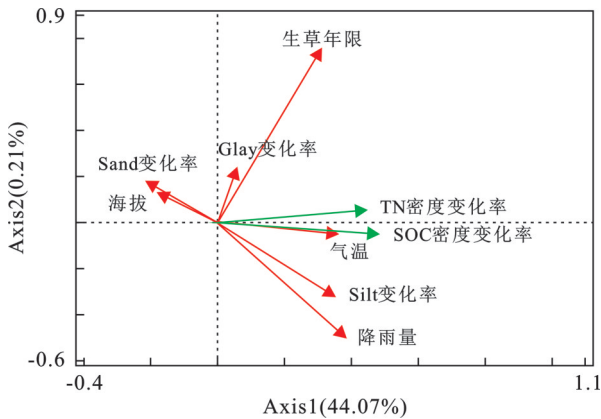
对各环境因子(海拔、年降雨量、气温)、土壤质地(砂粒、粉粒、黏粒)变化率及生草年限与土壤 SOC 和 TN 密度的变化率进行冗余分析(RDA)(图 4)。Axis1 和 Axis2 的解释率分别为 44.07% 和 0.21%，共解释 44.28% 的差异信息。Silt 变化率、降雨量、生草年限对 SOC 和 TN 密度变化率变异的解释度分别为 20.90%、11.50% 和 8.1%。根据 RDA 质心原理和距离法则, SOC 和 TN 密度变化率与降雨量、生草年限、气温、粉粒和黏粒变化率呈正相关, 与海拔和砂粒变化率呈负相关。

3 讨论

3.1 果园生草对土壤 SOC、TN 含量及质地的影响机制

在全球气候变化和土壤退化问题日益突出的背景下, 果园管理策略的优化对提升土壤碳汇和生态系统服务功能具有重要意义。本研究结果表明, 生

草果园土壤 SOC 和 TN 含量高于清耕果园, 这一结果与前人研究一致^[20], 生草措施通过增加土壤有机质输入、优化土壤结构以及促进微生物活性等多重机制, 有效提升了土壤碳氮含量。基于反距离权重(IDW)插值分析, 除会宁县外, 生草处理整体上提高了土壤 SOC 含量(图 1A)。该现象与区域降雨量密切相关, 会宁县年降雨量约为 340 mm, 依据 Zheng 等^[21]的研究, 低水分条件下草种与果树间可能存在水分竞争, 进而影响土壤水分状况及植物根系生长, 最终制约土壤有机质的积累。本研究还发现, 生草果园的土壤 BD 增加 1.63%, 此结果与大部分实验相反^[22], 该差异可能源于研究设计的多尺度空间异质性, 覆盖了不同地形-气候梯度的县域单元。空间插值(图 1C)结果表明, 生草处理下土壤 BD 响应呈现空间分异: 会宁、礼县等区域 BD 值高于清耕对照, 而静宁、庄浪等地则降低。表明生草措施对土壤 BD 含量的影响具有区域尺度效应, 其作用方向与强度可能受制于地形因子、水热条件及成土母质等环境要素的交互影响。



注:绿色箭头表示响应变量,红色箭头表示解释变量。

图4 环境因子和土壤质地对土壤SOC和TN密度变化的冗余分析(RDA)

Fig. 4 Redundancy analysis (RDA) of environmental factors and soil texture on variations in soil SOC and TN densities

从土壤质地角度分析,相较清耕果园,生草果园整体上表现出砂粒含量降低、粉粒与黏粒比例增加的特征。这种改良效应主要与以下因素有关:一是草类根系在生长过程中会对土壤产生穿插和挤压作用,破坏原有较大的砂粒结构,促使其破碎,细小颗粒增多;二是果园增加了土壤有机质的输入,其分解产生的腐殖质等黏性物质可促进土壤颗粒团聚,这种团聚作用使得砂粒被包裹在团聚体中,相对含量降低,而粉粒和黏粒因团聚作用相对增加^[23];三是生草覆盖有效减少了水土流失^[24],使得细颗粒(如粉粒和黏粒)得以在土壤中沉积。但进一步分析发现在礼县、静宁及灵台等部分果园区域,生草果园的土壤砂粒含量却高于清耕果园(图2),这表明生草措施在甘肃省果园种植区对土壤质地改良具有整体正向效应,不同区域间存在差异。

3.2 果园土壤SOC和TN密度的空间差异性分析及影响因素

土壤SOC和TN密度是衡量土壤肥力和生态系统功能的核心参数,其变化不仅影响果园的生产力,还对区域碳氮循环和生态环境产生深远影响。本研究采用IDW空间插值法,揭示了甘肃省不同区域果园中生草与清耕管理对土壤SOC与全氮TN密度的影响及其区域差异。具体而言,生草果园在多数区域的土壤有机碳SOC和TN密度高于清耕果园(图3),表明生草管理可有效提升果园土壤碳氮固存能力。然而,这种提升效果并非在所有区域都表现一致,而是受到区域气候条件、土壤质地和具体管理措施的显著影响。从气候条件来看,冗余分析(RDA)结果表明,降雨量与SOC和TN密度的变化率呈正相关(图4),降雨量增加能够提高果树和草种的生长速率,增

加植物生物量和根系分泌物的输入^[25],此外,降雨量的增加还能改善土壤水分条件,促进土壤微生物的生长和代谢活动,加速有机残体的分解,从而提高了土壤SOC和TN密度。例如,灵台、泾川等县区的降雨量相对较高,果园生草后该区域SOC和TN密度增加量较大。相反,在庄浪、通渭等干旱区域,生草措施的效果不明显,甚至出现降低趋势(图2)。本研究发现气温与SOC和TN密度的变化率也呈正相关关系,这与许煜麟等^[26]的研究结论一致,但与张亦凡等^[11]的研究结论相反。黄土高原地区(甘肃境内)年均气温普遍低于12℃,处于光合-温度响应曲线的上升阶段,此时温度升高通过增强RuBisCO酶活性显著C₃植物光合作用效率^[27],进而促进凋落物输入及根系分泌物通量;而华南地区气温普遍高于20℃且有极端高温,已接近或超过多数植被的光合适宜温度阈值,导致光呼吸作用增强及碳同化效率下降。

生草措施改变土壤颗粒组成,影响了碳氮储量的空间分布格局。本研究发现土壤质地变化率与SOC、TN密度变化率存在显著关联(图4),其中粉粒变化率对SOC和TN变化率的变异解释度最高(20.90%),表明土壤质地是调控土壤碳氮固存能力的关键因素。其原因可能与其独特的表面特性有关,粉粒具有适中的比表面积和电荷密度,既能通过吸附作用固定可溶性有机碳,又可维持适度的孔隙结构以支持微生物活性^[28]。粉粒与降雨量的协同效应(RDA中降雨量解释度11.50%)表明,在水热条件优越区域(如灵台县年均降水>550mm)能够放大土壤碳氮的累计效应,这与Lu等^[29]研究结果一致。然而,砂粒比例较高的区域(如礼县北部)呈现相反趋势。砂质土壤松散的结构加剧了风蚀驱动的细颗粒流失,导致有机质暴露于矿化环境中,抑制碳氮积累。此外,黏粒的过度富集(如武山黏粒增幅超过20.00%)(图2)可能因土壤板结限制气体交换与根系穿透,反而不利于长期固存,需通过深松耕等管理措施优化黏粒分布。综上,土壤质地变化通过调控有机质稳定性、微生物活性及侵蚀风险,从而影响土壤碳氮动态变化,但其效应受气候和母质系统的双重约束。

3.3 生草和清耕果园土壤碳氮密度及储量分析

甘肃省苹果园生草措施提升了土层土壤SOC与TN密度及储量(表2)。生草(2.24 kg/m²)和清耕果园(1.78 kg/m²)SOC密度均值在解究丽等^[30]研究的全国0—20 cm深度的土壤有机碳密度范围(0.27~53.46 kg/m²)内,但明显低于于东升等^[9]测定的全国土壤平均碳密度(9.60 kg/m²),表明黄土高原半干旱区土壤碳本底值较低,生草措施的提升效应仍受区

域水热条件与土壤质地的限制。对比付传城等^[12]对滨海胶东苹果园的研究(SOC:2.81 kg/m²; TN:0.37 kg/m²),甘肃省清耕果园 SOC(1.78 kg/m²)与 TN(0.36 kg/m²)密度偏低,而生草措施使 TN 密度(0.39 kg/m²)高于胶东均值, SOC 密度(2.24 kg/m²)也接近其水平(差异缩小至 19.57%),这一结果表明,生草管理可有效缓解黄土高原半干旱区与典型温带果园带(如胶东半岛)土壤碳氮密度的差异。本研究还发现,果园生草使区域 SOC 总储量增加 1 762.72 kt, TN 储量增加 97.64 kt,说明生草措施不仅提升了单位面积土壤碳氮密度,还通过规模化应用在区域尺度上提高了碳氮库增量,为生草栽培技术助力果园生态系统碳氮固存,为实现土壤质量提升与可持续发展提供了关键数据支撑。

从甘肃省苹果园种植的区域特征来看,平凉、天水、庆阳三市(面积占比超 80%)是碳氮增储的核心区域(表 2)。其中,灵台县 SOC 密度增幅最大,达 75.76%,这可能与高降雨量与黏粒吸附协同效应有关。庄浪县 SOC 和 TN 密度分别降低 5.46% 和 48.33%,反映砂质土区(砂粒占比 63.85%)低保肥性削弱了碳氮固定^[31]。而秦州区生草处理未明显改变 SOC 密度(2.13→2.07 kg/m²),且 TN 密度不变(0.34→0.34 kg/m²),这可能与该区域土壤微生物群落结构的稳定性和土壤初始肥力水平较高有关。因此,未来需针对区域特征制定差异化策略:水热优越区(灵台、泾川)推广豆科草种全覆盖,强化碳氮协同固存;砂质土区(庄浪、礼县)配套有机肥与防风林网,通过提升土壤胶体含量降低氮素迁移风险;秦州等肥力饱和区引入功能微生物菌剂,激活有机质转化路径。

此外,需要指出的是,本研究对部分未采样县(区)的土壤 SOC 和 TN 密度采用了所在市域已采样县(区)平均值的估算方法。这种处理方式虽然能够基于区域相似性原则(如同属一个市域的地形、气候和母质背景相对接近)进行初步推算,并确保在数据缺失情况下完成大区域储量评估,但也可能引入一定的不确定性。未来可通过增加采样点或精细空间模型降低不确定性。尽管如此,本研究采用的方法是在现有数据和资源条件下进行大尺度土壤碳氮储量评估合理且可行的策略。基于区域相似性原则的推算有效地填补了关键数据空白,确保了评估的完整性,能够为甘肃省果园生草管理对土壤碳氮储量的影响提供一定参考。

4 结论

(1) 果园生草提升了 0—20 cm 土层土壤 SOC 和

TN 含量,较清耕模式分别增加 31.73% 和 10.82%,而土壤 BD 含量变化(1.63%)表现为区域异质性,在会宁、礼县等县区含量提高,静宁、庄浪等部分区域降低。

(2) 从甘肃省果园种植区总体情况来看,生草处理使土壤中砂粒含量减少 7.03%,粉粒和黏粒含量分别增加 0.15% 和 2.65%,但具体到各县(区)果园种植区时,其影响效果存在差异。

(3) 生草模式下 SOC 密度由清耕的 1.78 kg/m² 增至 2.24 kg/m²,在灵台、泾川等水热优越区增幅最大; TN 密度由 0.36 kg/m² 增至 0.39 kg/m²,在庆阳(正宁、宁县、合水)等片区增幅最大,庄浪、静宁等局部区域降低。

(4) 粉粒变化率(解释率 20.90%)、年降雨量(11.50%)及生草年限(8.10%)是驱动生草果园土壤碳氮密度变化的核心因子,三者通过增强有机质吸附、植物生产力及微生物活性,共同促进土壤碳氮累积。

(5) 区域储量估算显示,生草模式下果园土壤 SOC 和 TN 总储量分别达 8 449.44 kt 和 1 422.59 kt,较清耕模式增加 26.40% 和 7.37%,其中平凉、天水、庆阳三市为果园土壤碳氮增储的核心区域。

参考文献(References):

- [1] Borken W, Matzner E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(4): 808-824.
- [2] 徐丽,于贵瑞,何念鹏. 1980s—2010s 中国陆地生态系统土壤碳储量的变化[J]. *地理学报*, 2018, 73(11): 2150-2167. Xu L, Yu G R, He N P. Changes of soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(11): 2150-2167.
- [3] Wang Y T, Ji X H, Wu Y S, et al. Research progress of cover crop in Chinese orchard[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1892-1900.
- [4] Repullo-Ruibérriz de Torres M A, Moreno-García M, Ordóñez-Fernández R, et al. Cover crop contributions to improve the soil nitrogen and carbon sequestration in almond orchards (SW Spain)[J]. *Agronomy*, 2021, 11(2): 387.
- [5] USDA Natural Resources Conservation Service. The potential for legume cover crops in Washington apple orchards[S]. Washington: USDA Natural Resources Conservation Service, 2014.
- [6] 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[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(10): 1792-1805. 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 [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(10):1792-1805.
- [7] 薛欣欣, 王文斌, 茶正早, 等. 不同绿肥覆盖对幼龄橡胶园土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J/OL]. *环境科学*, 2025; 1-13. (2025-02-07). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjlx.202409244>.
Xue X X, Wang W B, Cha Z Z, et al. Effects of different green manure covering on soil organic carbon and size distribution of aggregates in a Young Rubber Plantation [J/OL]. *Environmental Science*, 2025; 1-13. (2025-02-07). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjlx.202409244>.
- [8] Zhou X B, Zhang S H, Chen Y S, et al. Environmental drivers of soil carbon and nitrogen accumulation in global drylands[J]. *Geoderma*, 2024, 451:117075.
- [9] 于东升, 史学正, 孙维侠, 等. 基于1:100万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(12):2279-2283.
Yu D S, Shi X Z, Sun W X, et al. Estimation of China soil organic carbon storage and density based on 1:1000000 soil database [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12):2279-2283.
- [10] 蔡文良, 谢艳云, 唐雯. 海南尖峰岭热带山地雨林土壤有机碳储量和垂直分布特征[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(8):1514-1521.
Cai W L, Xie Y Y, Tang W. Vertical distribution of soil organic carbon storage of tropical mountain rainforest in Jianfengling, Hainan [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(8):1514-1521.
- [11] 张亦凡, 王海燕, 高子滢, 等. 华南地区森林土壤有机碳和全氮密度及储量估算[J]. *中国土壤与肥料*, 2024(12):17-26.
Zhang Y F, Wang H Y, Gao Z Y, et al. Estimation of forest soil organic carbon and total nitrogen density and storage in South China [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024(12):17-26.
- [12] 付传城, 章海波, 涂晨, 等. 滨海苹果园土壤碳氮空间分布及动态变化研究[J]. *土壤学报*, 2018, 55(4):857-867.
Fu C C, Zhang H B, Tu C, et al. Spatial distribution and dynamics of soil organic carbon and total nitrogen in apple orchards in coastal regions [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(4):857-867.
- [13] 李子阳, 陈露, 赵鹏, 等. 紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征[J]. *环境科学*, 2024, 45(1):343-353.
Li Z Y, Chen L, Zhao P, et al. Spatial distribution characteristics of soil carbon and nitrogen in *Citrus* orchards on the slope of purple soil hilly area [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(1):343-353.
- [14] 方青青, 张思远, 王国强, 等. 半干旱流域水热变化规律及植被响应[J]. *生态学报*, 2024, 44(16):7198-7212.
Fang Q Q, Zhang S Y, Wang G Q, et al. Water and thermal conditions variation and the vegetation response at semi-arid Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(16):7198-7212.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
Lu R K. *Methods of soil agrochemical analysis* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [16] 王飞, 秦方锦, 吴丹亚, 等. 土壤有机质和有机碳含量计算方法比较研究[J]. *农学学报*, 2015, 5(3):54-58.
Wang F, Qin F J, Wu D Y, et al. Comparative study on the calculation method of soil organic matter and organic carbon [J]. *Journal of Agriculture*, 2015, 5(3):54-58.
- [17] 苏文, 郭学兵, 初玉, 等. 2005—2020年中国西北干旱区典型生态系统土壤有机碳密度数据集[J]. *中国科学数据*, 2024, 9(3):42-55.
Su W, Guo X B, Chu Y, et al. A dataset of soil organic carbon density of typical ecosystems in the arid areas of Northwest China from 2005 to 2020 [J]. *China Scientific Data*, 2024, 9(3):42-55.
- [18] 颜金彪, 段晓旗, 郑文武, 等. 顾及空间异质性的自适应IDW插值算法[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2020, 45(1):97-104.
Yan J B, Duan X Q, Zheng W W, et al. An adaptive IDW algorithm involving spatial heterogeneity [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1):97-104.
- [19] Nielsen D R, Bouma J. *Soil spatial variability* [M]. Wageningen: Pudoc, 1985.
- [20] 靳旭妹, 王莹莹, 刘崇义, 等. 生草对关中地区有机猕猴桃园土壤养分及细菌群落的影响[J]. *草业学报*, 2022, 31(10):53-63.
Jin X M, Wang Y Y, Liu C Y, et al. Effects on soil nutrients and bacterial communities of different cover crops in an organic kiwifruit orchard in the Guanzhong region of China [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(10):53-63.
- [21] 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 [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 246:106656.
- [22] 胡雯, 张朋朋, 庄丽萍, 等. 不同品种三叶草覆盖对旱地苹果园土壤理化特性和叶片生理特征的影响[J/OL]. *中国农业科技导报*, 2025; 1-11. (2025-04-01). <https://link.cnki.net/doi/10.13304/j.nykjdb.2024.0255>.
Hu W, Zhang P P, Zhuang L P, et al. Effects of clover mulch on soil physical and chemical properties and leaf physiological characteristics in dryland apple orchards [J/OL]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2025; 1-11. (2025-04-01). <https://link.cnki.net/doi/10.13304/j.nykjdb.2024.0255>.
- [23] 周明星, 樊军, 王茜, 等. 免耕覆盖与生物炭对黑垆土团聚体稳定性和腐殖质性质的影响[J]. *植物营养与肥料*

- 学报, 2023, 29(5): 848-859.
- Zhou M X, Fan J, Wang X, et al. Effects of no-tillage mulching and biochar application on the stability and humus properties of black loam soil aggregate[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(5): 848-859.
- [24] 李惟婕, 王立, 马景永, 等. 黄土旱塬区苹果园生草覆盖对深层土壤水分和根系分布特征的影响[J]. 草业学报, 2023, 32(1): 63-74.
- Li W J, Wang L, Ma J Y, et al. Effects of a cover crop on deep soil water and root characteristics in a dryland apple orchard on the Loess Plateau [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(1): 63-74.
- [25] Hou F B, Hinojosa L, Enderle E, et al. Root exudates from drought-affected plants increase soil respiration across a range of grassland species[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2025, 203: 109731.
- [26] 许煜麟, 赵雅萍, 赵雨晴, 等. 黄土高原退耕还林(草)前后土壤有机碳密度变化及其对气候变化和人类活动的响应[J]. 环境科学, 2024, 45(8): 4696-4708.
- Xu Y L, Zhao Y P, Zhao Y Q, et al. Changes in soil organic carbon density and its response to climate change and human activities before and after the grain for green project on the Loess Plateau [J]. Environmental Science, 2024, 45(8): 4696-4708.
- [27] Gregory L M, Scott K F, Sharpe L A, et al. Rubisco activity and activation state dictate photorespiratory plasticity in *Betula papyrifera* acclimated to future climate conditions[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 26340.
- [28] Thabit F N, El-Shater A H, Soliman W. Role of silt and clay fractions in organic carbon and nitrogen stabilization in soils of some old fruit orchards in the Nile floodplain, Sohag Governorate, Egypt[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2023, 23(2): 2525-2544.
- [29] Lu J N, Feng S, Wang S K, et al. Patterns and driving mechanism of soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry across northern China's desert-grassland transition zone[J]. Catena, 2023, 220: 106695.
- [30] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 35-43.
- Xie X L, Sun B, Zhou H Z, et al. Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(1): 35-43.
- [31] 李倩, 李晓秀, 吴会军, 等. 不同气候和施肥条件下保护性耕作对农田土壤碳氮储量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1539-1549.
- Li Q, Li X X, Wu H J, et al. Effects of conservation tillage practices on soil carbon and nitrogen stocks in farmland under different climatic types and fertilization conditions[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(6): 1539-1549.
-
- (上接第 140 页)
- [23] 李文龙, 刘美英, 张有新, 等. 采煤沉陷区不同复垦林型土壤团聚体碳氮磷化学计量特征[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(8): 188-193.
- Li W L, Liu M Y, Zhang Y X, et al. Stoichiometric characteristics of carbon nitrogen and phosphorus in soil aggregates of different planted forests in coal-mining subsidence area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(8): 188-193.
- [24] 王琴, 蒙仲举, 汪季, 等. 希拉穆仁草原近自然恢复状态下植被-土壤响应特征[J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1159-1167.
- Wang Q, Meng Z J, Wang J, et al. Response of the vegetation soil under almost-natural restoration in the Xilamuren grassland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(4): 1159-1167.
- [25] 李洪义, 贺任彬, 谢模典, 等. 自然和人为因素对耕地土壤有机质含量影响的研究[J]. 土壤通报, 2023, 54(5): 1050-1059.
- Li H Y, He R B, Xie M D, et al. Influence of natural and anthropogenic factors on soil organic matter content in farmland [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(5): 1050-1059.
- [26] 芦月, 杨静, 李仕辉, 等. 黄河三角洲不同经济林土壤有机碳分布特征及改良土壤效应[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2025, 23(2): 180-189.
- Lu Y, Yang J, Li S H, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and soil improvement effects of different economic forests in the Yellow River Delta [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025, 23(2): 180-189.
- [27] 杨冲, 王春燕, 王文颖, 等. 青藏高原黄河源区高寒草地土壤营养特征变化及质量评价[J]. 生态环境学报, 2022, 31(5): 896-908.
- Yang C, Wang C Y, Wang W Y, et al. Soil nutrient characteristics and quality evaluation of alpine grassland in the source area of the Yellow River on the Qinghai Tibet Plateau [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(5): 896-908.
- [28] 王东丽, 徐源, 于百和, 等. 黄土区排土场复垦初期不同恢复模式下土壤生态化学计量特征[J]. 生态科学, 2024, 43(4): 166-175.
- Wang D L, Xu Y, Yu B H, et al. Soil ecological stoichiometry characteristics under different restoration models in the initial reclamation stage of dump in Loess Area [J]. Ecological Science, 2024, 43(4): 166-175.