文章编号:1000-7601(2025)06-0238-10 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.06.23

传统耕地转为枸杞园地对土壤质量的影响

——以甘肃枸杞主产区靖远县为例

郭 皓[1],张 强[1],田瑞斌[1],吴 佩[1],樊欣瑶[1],孙丽坤[2],路永莉[1]

(1.甘肃农业大学资源与环境学院,甘肃 兰州 730070; 2.甘肃农业大学动物科学技术学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:为探究西北干旱半干旱区传统耕地向枸杞园地转变对土壤质量的影响,以甘肃省靖远县五合镇为研究区,采集耕地(n=18)与枸杞园地(n=28)0~20 cm 土层土壤样品,测定 14 项理化指标;通过主成分分析构建最小数据集(MDS),计算土壤质量指数(*SQI*),并采用土壤障碍因子模型诊断土壤质量的主要限制因素。结果表明:与传统耕地相比,枸杞园地容重较耕地增加 8.9%,总孔隙度与田间持水量分别减少 15.7%和 22.5%;速效磷(45.4 mg·kg^{-1})与速效钾(382.84 mg·kg^{-1})大量积累,碱解氮(33.77 mg·kg^{-1})缺乏,电导率升高(229.21 μS·cm^{-1}),表明枸杞果园盐渍化风险加剧。基于 MDS 的 *SQI* 结果显示,园地土壤质量(0.489)显著低于耕地(0.531),物理结构退化是核心限制因素,导致土壤质量整体下降。因此,果园长期化肥施用过量及频繁人为活动可导致土壤物理结构退化、盐分表层聚积及土壤质量下降。

关键词:枸杞;土地利用方式;土壤理化性质;土壤质量指数

中图分类号:S158 **文献标志码**:A

Impact of traditional cropland conversion to *Lycium barbarum* plantations on soil quality: a case study in the major production region of Gansu Province

GUO Hao[1], ZHANG Qiang[1], TIAN Ruibin[1], WU Pei[1], FAN Xinyao[1], SUN Likun[2], LU Yongli[1]

(1. *College of Resources and Environment*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*;
2. *College of Animal Science and Technology*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*)

Abstract: To investigate the effects of traditional cropland conversion to wolfberry (*Lycium barbarum*) orchards on soil quality in the arid and semi-arid regions of Northwest China, this study selected Wuhe Town in Jingyuan County, Gansu Province, as the study area. Soil samples (0 ~ 20 cm depth) were collected from cropland (n = 18) and wolfberry orchards (n = 28), and 14 physicochemical properties were analyzed. A minimum dataset (MDS) was constructed using principal component analysis, and the soil quality index (*SQI*) was calculated. Additionally, a soil obstacle factor model was applied to diagnose key limiting factors for soil quality improvement. The results showed that compared to cropland, wolfberry orchards exhibited an 8.9% increase in bulk density, along with 15.7% and 22.5% reductions in total porosity and field capacity, respectively. Chemically, available phosphorus (45.4 mg·kg^{-1}) and available potassium (382.84 mg·kg^{-1}) accumulated substantially, while alkaline hydrolysis nitrogen (33.77 mg·kg^{-1}) was deficient. The electrical conductivity (229.21 μS·cm^{-1}) increased significantly, indicating heightened salinization risk. The *SQI* based on MDS revealed that orchard soil quality (0.489) was significantly lower than that of cropland (0.531), with physical structure degradation identified as the primary limiting factor. Consequently, prolonged overuse of chemical fertilizers and frequent human activities result in soil physical structure degradation, surface layer salt accumulation, and diminished soil quality.

Keywords: *Lycium barbarum*; agricultural land use type; soil physicochemical properties; soil quality index

收稿日期:2025-03-07 **修回日期**:2025-06-23

基金项目:国家自然科学基金项目(32260809);甘肃农业大学青年导师扶持基金项目(GAU-QDFC-2024-17)

作者简介:郭皓(1999-),男,甘肃武山人,硕士研究生,研究方向为果园养分优化管理与土壤质量提升。E-mail:guohao5073@163.com

通信作者:路永莉(1987-),女,甘肃靖远人,副教授,主要从事农田和果园养分资源高效利用与管理研究。E-mail:yongli1210@126.com

土地利用变化作为全球环境变化研究的重要维度,通过改变地表覆被结构和生态系统过程对土壤质量产生深远影响[1]。近 30 年来,随着农业产业结构调整和市场需求驱动,我国西北干旱半干旱区出现了大规模传统耕地向高附加值经济作物种植园转变的趋势。甘肃省靖远县作为黄河上游特色农业示范区,枸杞种植面积从 2010 年的 0.8 万 hm^2 快速增长至 2022 年的 2.3 万 hm^2,占全县耕地面积的 31.6%[2],形成了典型的土地利用转型模式。这种转变在提升经济效益的同时,也通过改变地表覆盖、耕作管理和物质循环过程深刻影响着土壤质量,随着传统耕作体系向园艺化管理体系的转变,使得土壤扰动频率降低但化肥投入强度增加[3],这些复合效应如何影响土壤质量已成为区域农业可持续发展的关键科学问题。

国内外学者在土地利用变化对土壤质量影响方面已开展了大量研究。国际研究案例呈现明显的区域分异特征,例如热带地区重点关注天然林向人工林的转化过程[4],温带地区则以传统农业转型为主要研究对象[5];而近年来的研究热点正逐步向干旱半干旱区转移,着重探究该区域独特气候背景下土地利用变化的土壤环境效应。研究表明,不同气候区土地利用变化对土壤质量和生态系统功能的影响具有显著差异。在巴西半干旱地区,Ferreira 等[6]发现原生植被转为农业用地后,土壤生物量碳、总有机碳和全氮含量均显著降低 10%~30%,表明该转变过程导致土壤有机质快速耗竭。在我国黄土丘陵区,Tang 等[7]长期定位监测显示,天然林向经济林的转变引发了严重的水分胁迫效应,不仅降低了枣树产量和经济收益,更威胁到该地区生态经济复合系统的可持续性。目前,在西北干旱区针对传统耕地转变为灌木经济作物后对土壤质量影响的研究尚显不足。

枸杞作为一种典型的旱生灌木,其根系具有独特的生物学特性,加之集约化的管理模式,共同促成了一个特殊的土壤-植物互作体系[8-9]。与传统浅根系作物耕作模式相比,耕地转为枸杞种植园后,其深层根系分布特征与高强度人为管理共同作用,通过以下途径显著改变土壤理化性质:(1)根系空间分布重构土壤剖面物质循环;(2)高频踩踏改变土壤孔隙结构;(3)高量施肥扰动土壤养分平衡。这种土地利用方式的转变对土壤质量的影响深度和广度均显著超过传统耕作系统。因此,探究从传统耕地转变为枸杞果园对土壤质量的影响具有重要意义。然而现有研究多采用单一指标评价土地利用方式转变对土壤质量的影响,难以全面反映土壤质量的综合变化。为克服这一局限性,最小数据集(MDS)方法通过主成分分析(PCA)筛选关键指标,可有效识别主导土壤质量变异的关键因子,在保证评价准确性的同时显著降低评价成本[10-11]。其适用性前人在干旱区葡萄园土壤肥力评价中已得到验证,该区域土壤指标变异系数普遍高于湿润区,PCA 方法能有效识别主导土壤质量变异的关键因子[11]。本研究对 14 个土壤指标进行 Bartlett 球形检验,确保数据适用于降维分析;基于特征值>1 和累积方差贡献率>85%提取主成分;通过 Norm 值法筛选载荷权重>0.5 的指标构建 MDS。该方法在类似研究中表现出良好的适用性,如杨家强等[12]基于 MDS 评估了广西油茶人工林主产区的土壤肥力质量,揭示了该区域土壤肥力状况的差异及其对油茶生长的影响。张恒等[13]利用 MDS 对四川省 274 块植烟田土壤质量进行了评价,验证了该方法的区域适用性。李桂林等[14]建议对 MDS 进行优化,将各因素对主成分的综合载荷作为筛选标准,通过 Norm 值法筛选载荷权重>0.5 的指标构建 MDS。基于前人研究基础,采用多指标系统的 MDS 方法计算土壤质量指数(*SQI*),能够科学、高效地评价不同土地利用方式下的土壤综合质量。这一方法不仅整合了土壤质量的多维信息,而且通过关键指标的筛选优化了评价体系,可为土地利用管理决策提供可靠依据。

鉴于此,本研究以西北半干旱区甘肃省靖远县五合镇枸杞集中种植区为对象,采集传统耕地(n=18)和典型枸杞园地(n=28)0~20 cm 土层土壤样品,测定 14 项关键土壤理化指标,基于 MDS 建立土壤质量综合评价体系,旨在揭示研究区耕地转变为枸杞果园后对土壤质量的影响,该结果可为研究区土地可持续利用及协调生态安全与特色产业优化布局提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于甘肃省白银市靖远县五合镇(105°07′~105°12′E,36°48′~37°00′N,海拔 1 700~2 480 m),地处黄土高原西北缘,属于温带大陆性半干旱气候。黄土高原丘陵沟壑区地势东部高西部低,年均气温为 7~8℃,年均降水量 200~300 mm,年均潜在蒸发量 1 657 mm,年无霜期 150 d,全年日照时数 2 700 h。五合镇作为靖远枸杞核心产区已形成规模化种植格局。截至 2024 年,五合镇枸杞种植总面

积达 5.3×10^3 hm^2[2],凭借其突出的产业集聚效应被冠以“枸杞小镇”称号。

1.2 养分投入现状调查

于2023年8—9月枸杞果实采收结束后进行调研。采用实地走访的方式调研了五合镇14个自然行政村共计28个不同树龄‘宁杞7号’(主栽品种)枸杞果园和18个传统玉米耕地的情况。调研内容主要包括枸杞树龄、栽种密度、果园面积、施肥品种、施肥量、施肥时期、肥料有效养分含量等。化肥养分投入根据实际调查的枸杞果园施肥量、肥料种类及肥料产品包装袋上标注的实际养分含量进行计算,有机肥养分含量参照《中国有机肥料养分志》[15]中的参考数值进行计算。

1.3 样品采集与分析

于2023年8—9月枸杞全部采摘结束后,在靖远县五合枸杞小镇境内14个行政村选择典型的主栽品种‘宁杞7号’枸杞果园28个,传统耕地18块。采样点的具体空间分布如图1所示(见243页)。分别在果园中距离枸杞树体主干35 cm处和传统耕地内随机选取3个取样点,每个样点采集0~20 cm土层样品,用100 cm^3环刀采集原状土壤样品,带回实验室分析其物理特性;同一样地土样进行混合,利用四分法获取混合土样(≥1 kg),带回实验室自然风干,过1 mm和0.149 mm筛后测定土壤化学指标。测定的土壤物理性质包括土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、饱和持水量、毛管持水量以及田间持水量,均采用环刀法测定[16];全氮采用凯氏定氮法测定[16];有机碳采用湿烧法测定[16];碱解氮采用碱解扩散法测定[16];速效钾采用火焰光度计法测定[16];速效磷采用 $NaHCO_3$-钼锑抗比色法测定[16];pH采用酸度计测定[16];电导率采用电导率仪测定[16]。

1.4 土壤质量评价方法

土壤质量作为表征土壤系统物理结构、化学组分及生物活性的综合性指标,其科学评价需遵循代表性、可操作性和区域适用性原则[17]。本研究基于干旱半干旱区农业生态特征[18],结合国际通用土壤评价体系,从结构属性和养分特征两个维度构建指标体系:物理特性选取土壤容重、总孔隙度、毛细孔隙度、非毛细孔隙度、饱和含水率、毛管持水量及田间持水量等7项参数;化学特性选取土壤有机碳、全氮含量、碱解氮含量、速效磷含量、速效钾含量、酸碱度及电导率等7项指标。通过主成分分析筛选关键诊断因子构建最小数据集,运用土壤质量指数模型定量解析传统耕地转变为枸杞园地的土壤系统质量演变规律。

1.4.1 最小数据集(MDS)的确定

主成分分析法通过降维方法可有效克服多维数据冗余问题,能够提取表征土壤功能特征的核心因子[11]。本研究基于特征根阈值(≥1)筛选主成分,对载荷系数绝对值≥0.5的指标进行聚类分组。当单个指标在多个主成分中同时满足载荷阈值时,优先归入因子间Pearson相关系数较低的组别。进一步通过计算矢量常模值(Norm值),筛选各组内排序前10%的关键指标,最终综合确定土壤质量评价最小数据集(MDS)。

$$N_{ik}=\sqrt{\sum_{1}^{k}(u_{ik}^2\cdot\lambda_k)} \tag{1}$$

式中,N_{ik}是第 i 个指标在特征值≥1的前 k 个主成分上的综合载荷;u_{ik}是第 i 个指标在第 k 个主成分上的载荷值;λ_k是第 k 个主成分的特征值。

1.4.2 土壤质量指数(*SQI*)的计算

土壤质量指数(*SQI*)计算公式(记为 I_{sq})如下所示。*SQI* 值越大,表明土壤质量越好。

$$I_{sq}=\sum_{i=1}^{n}W_i\cdot N_i \tag{2}$$

式中,n 为土壤指标个数;W_i和 N_i分别为第 i 项土壤指标的权重和隶属度值。

土壤指标权重是通过数据集中各土壤指标的公因子方差占所有待评价指标公因子方差总和的比例来表示,各土壤指标所对应的隶属度由其相应的隶属函数来确定。对于每个评价指标,其隶属度函数的升型或降型,取决于指标的值是否高于或低于阈值。

$$\text{升型:}\quad N_i=\frac{x_i-x_{i\min}}{x_{i\max}-x_{i\min}}$$
$$\text{降型:}\quad N_i=\frac{X_{i\max}-x_i}{x_{i\max}-x_{i\min}} \tag{3}$$

式中,N_i表示第 i 个土壤指标的隶属度值,范围为0~1;x_i表示第 i 个土壤指标值。

1.4.3 最小数据集合理性验证

为保证土壤质量评价的准确性,需要对其在土壤质量评估中的可靠性进行检验。在本研究中,利用靖远县五合镇耕地和园地的土壤指标得分与相对应权重,分别计算基于最大数据集(TDS),进而得到的耕地与园地的*SQI*,以及基于MDS计算的*SQI*。采用线性回归分析对比基于TDS和MDS获得的*SQI*值,以此验证基于MDS获得的*SQI*的准确性。

1.4.4 障碍因子诊断方法

为了确定影响土壤质量提升的核心障碍因素,本研究应用障碍因子诊断

模型来筛选制约土壤质量提升的关键因素。所采用的障碍因子诊断模型如下所示:

$$M_{ji} = \frac{P_{ji} \cdot W_i}{\sum_{i=1}^{n} (P_{ji} \cdot W_i)} \quad (4)$$

$$M_i = \frac{\sum_{i=1}^{n} M_{ji}}{n} \quad (5)$$

式中,M_{ji}是第 j 个样地第 i 个指标的障碍度;M_i是 i 指标在 n 个取样点的平均障碍度;$P_{ji}=1-S_j$,表示土壤单项指标与隶属度值 1 的差距;S_{ji}是第 j 个样地第 i 个指标的得分值;w_i是第 i 指标权重。

1.5　数据分析

使用 Excel 2019 对数据进行初步处理,应用 SPSS 26.0 软件进行主成分分析和 Pearson 相关性分析,利用 Origin 2021 和 R 4.4.2 软件进行可视化处理。

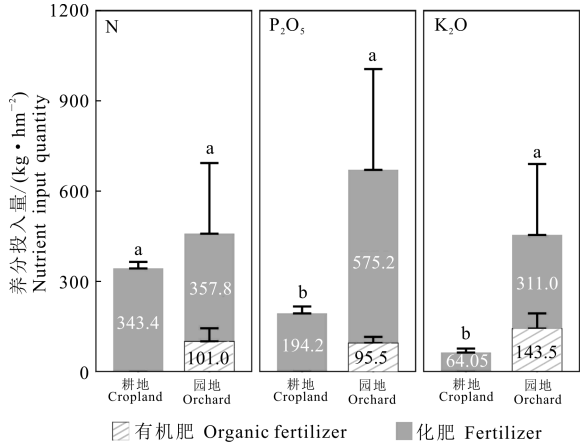
2　结果与分析

2.1　耕地与园地养分管理特征

由图 2 可知,研究区传统耕地氮、磷、钾养分投入仅依赖于施用化肥,果园养分投入主要以化肥为主、有机肥为辅,其中果园施用有机肥投入的 N、P_2O_5、K_2O 量分别占各自总投入量的 22.06%、14.15%、31.57%;与传统耕地 N、P_2O_5、K_2O 投入量相比,果园 P_2O_5和 K_2O 化肥养分投入显著增加,其中传统耕地和果园 N 的投入量分别为 343 kg·hm^{-2}和 357.8 kg·hm^{-2},P_2O_5的投入量分别为 194 kg·hm^{-2}和 575.2 kg·hm^{-2},K_2O 的投入量分别为 64 kg·hm^{-2}和 311 kg·hm^{-2}。与传统耕地相比,果园 N 化肥养分投入量间差异不显著,但果园 P_2O_5和 K_2O 的化肥投入量(575.2 kg·hm^{-2}和 311 kg·hm^{-2})显著高于传统耕地(194.15 kg·hm^{-2}和 64.05 kg·hm^{-2})。

2.2　耕地和园地土壤理化性质评价

耕地和园地土壤理化性质如表 1,土壤总孔隙度、田间持水量、毛管持水量、饱和持水量、电导率和速效钾在耕地与园地间存在显著差异,其中枸杞果园电导率和速效钾含量显著高于传统耕地。研究区内传统耕地和枸杞园地 pH 变化范围为 7.14 ~ 8.63,土壤呈偏弱碱性,变异系数最小(CV<0.1),属于弱变异。此外,根据第二次全国土壤普查土壤养分含量分级标准,研究区内园地土壤全氮含量、速效磷和速效钾含量极丰富,而碱解氮含量则相对偏低;耕地土壤速效钾含量极丰富,全氮和速效磷含量较为丰富;园地和耕地整体而言,土壤有机碳含量属于中下水平,土壤较为紧实。



注:不同小写字母表示化肥同一养分投入量间差异显著(P<0.05)。

Note: Different lowercase letters above the bars indicate statistically significant differences (P<0.05) in the same nutrient input levels of fertilizer treatments.

图 2　耕地和园地不同养分投入特征

Fig.2　Characteristics of nutrient input in cultivated and garden land

2.3　养分投入与土壤指标的相关性分析及冗余分析

由图 3A、B 可见,耕地与园地的不同养分投入与土壤理化指标间的相关性存在显著差异。在耕地中 N 和 P_2O_5的投入与土壤物理性状关系更为紧密,K_2O 投入主要与土壤化学指标关系更密切;而在园地中 N 和 P_2O_5投入主要与土壤化学指标关系更紧密。由冗余分析表明(图 3C、D),在耕地中各养分投入对土壤指标的影响较大的为 AP、NCP、pH、TN、EC、FC、TSP、CWC。RDA1 约束轴的解释率为 65.85%,RDA2 的解释率为 8.31%。在园地中各养分投入对土壤指标的关系中与大部分土壤物理指标呈负相关关系,其 RDA1 约束轴的解释率为 34.30%、RDA2 的解释率为 8.04%。

2.4　最小数据集(MDS)的确定

2.4.1　耕地 MDS 的确定　从表 2 可以看出,5 组主成分的特征值分别为 5.790、2.346、1.843、1.263、1.057,解释了耕地理化指标影响土壤质量 87.85% 的变异。在 5 组分组中,将每组中具有最大 Norm 值的土壤指标纳入 MDS,再根据每组 Norm 值变化范围的 10%和指标间相关性,作为其余指标是否纳入 MDS 的依据;最终确定了耕地 MDS 为毛管持水量、pH、有机碳、速效钾和碱解氮。

2.4.2　园地 MDS 的确定　从表 3 可以看出,5 组主成分的特征值分别为 5.018、2.874、1.656、1.196、1.062,说明了园地土壤各指标影响土壤质量 84.32% 的变

异。在分组 1 中,将具有最大 Norm 值的 pH 纳入 MDS,根据 Norm 值变化范围的 10% 和指标间相关性,将土壤总孔隙度也纳入 MDS;在分组 2 中,毛管持水量 Norm 值最大,且速效磷与毛管持水量的相关系数较低,均具有一定的代表价值,同时保留到 MDS 中;在剩余三个分组中,将 Norm 值最大的非毛管孔隙度、全氮和速效钾纳入到 MDS 中。最终确定了园地 MDS 为 pH、土壤总孔隙度、毛管持水量、速效磷、非毛管孔隙度、全氮和速效钾。

2.5 最小数据集的适应性验证与土壤质量指数

建立最小数据集计算的土壤质量指数与全量数据集的土壤质量指数之间表现出显著的正相关性(图 4),表明最小数据集能够有效反映全量数据集中与土壤质量评价相关的信息。通过进一步分析,计算了各指标的公因子方差并据此确定了各指标的权重值(表 4)。耕地土壤质量指数(*SQI*)的变化范围为 0.416~0.668,均值为 0.531,果园 *SQI* 变化范围为 0.419 ~ 0.580,均值为 0.489,且园地 *SQI* 显著低于耕地($P<0.05$)(图 5)。

2.6 土壤质量障碍因子诊断

障碍因子诊断模型计算结果显示(图 6),耕地和园地土壤理化性质均未构成制约因子。园地与耕地相比,土壤 BD、TSP、CP 和 EC 的障碍度大于耕地,而在耕地中土壤全氮含量及电导率的障碍度高于园地,在园地与耕地中土壤物理指标(BD、TSP、CP、NCP、FC、CWC、SMC)的障碍度整体相似。

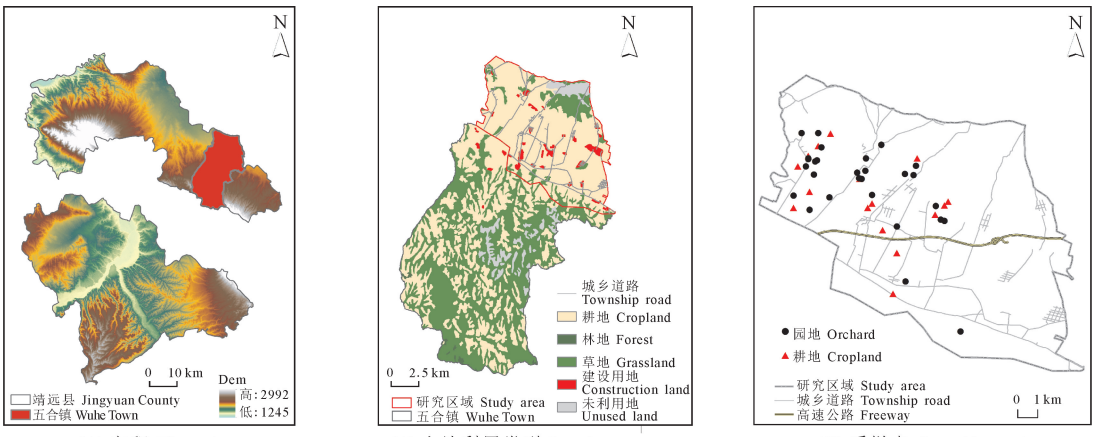
表 1 靖远县五合镇耕地和园地土壤理化指标的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of soil physical and chemical indexes of cultivated land and orchard land in Wuhe Town, Jingyuan County

土壤指标 Soil index	土地利用类型 Land use type	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	均值±标准差 Mean±SD	变异系数 Coefficient of variation
容重/(g·cm^{-3}) Bulk density	耕地 Cultivated	1.27	1.45	1.35±0.05a	0.04
	园地 Orchard	1.31	1.65	1.47±0.06a	0.04
土壤总孔隙度/% Total porosity	耕地 Cultivated	50.59	81.34	64.16±8.74a	0.14
	园地 Orchard	41.08	67.30	54.08±6.57b	0.12
毛管孔隙度/% Capillary porosity	耕地 Cultivated	44.96	77.69	60.21±8.93a	0.15
	园地 Orchard	37.36	63.17	50.27±6.63a	0.13
非毛管孔隙度/% Non-capillary porosity	耕地 Cultivated	2.92	6.37	3.95±0.85a	0.21
	园地 Orchard	1.43	5.75	3.80±1.01a	0.27
田间持水量/% Field capacity	耕地 Cultivated	37.40	61.23	47.85±7.55a	0.16
	园地 Orchard	28.13	50.01	36.96±5.26b	0.14
毛管持水量/% Capillary water capacity	耕地 Cultivated	32.87	58.48	44.90±7.56a	0.17
	园地 Orchard	25.67	47.15	34.35±5.01b	0.15
饱和持水量/% Saturated water content	耕地 Cultivated	37.40	61.23	47.85±7.55a	0.16
	园地 Orchard	28.34	50.23	36.95±5.08b	0.14
有机碳/(g·kg^{-1}) Organic carbon	耕地 Cultivated	4.00	8.07	6.03±1.23a	0.20
	园地 Orchard	4.67	8.11	6.64±0.83a	0.12
pH	耕地 Cultivated	7.84	8.63	8.41±0.18a	0.02
	园地 Orchard	7.14	8.35	7.98±0.26a	0.03
EC/(μS·cm^{-1})	耕地 Cultivated	130.00	315.00	185.06±52.28b	0.28
	园地 Orchard	120.00	648.00	229.21±101.26a	0.44
全氮/(g·kg^{-1}) Total nitrogen	耕地 Cultivated	0.65	2.76	1.58±0.55a	0.35
	园地 Orchard	1.45	3.46	2.51±0.48a	0.19
碱解氮/(mg·kg^{-1}) Alkali-hydrolyzale nitrogen	耕地 Cultivated	17.75	43.05	32.47±6.8a	0.21
	园地 Orchard	22.89	60.84	33.77±8.64a	0.26
速效磷/(mg·kg^{-1}) Available potassium	耕地 Cultivated	17.31	46.36	30.07±8.85a	0.29
	园地 Orchard	15.72	89.96	45.40±19.49a	0.43
速效钾/(mg·kg^{-1}) Available potassium	耕地 Cultivated	192.91	416.39	265.95±57.75b	0.22
	园地 Orchard	206.34	509.70	382.84±87.56a	0.23

注:不同小写字母表示同一指标不同土地利用类型差异显著($P<0.05$)。

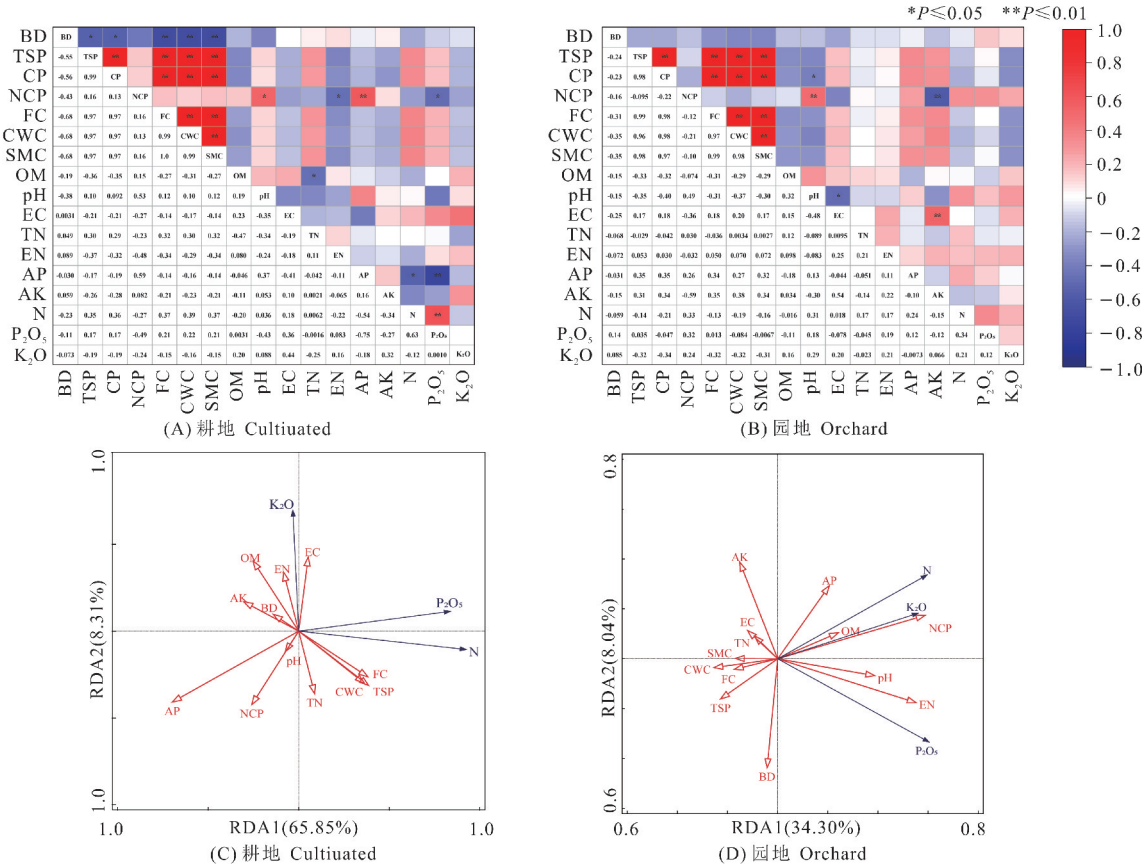
Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among land use types within each measured parameter.



(A) 高程 Elevation　　(B) 土地利用类型 Land use type　　(C) 采样点 Sampling points

图 1　靖远县五合镇高程图(A)、不同土地利用类型图(B)和采样点空间分布图(C)

Fig.1　Elevation map of Wuhe Town, Jingyuan County (A), land use map (B), and spatial distribution of sampling points (C)



(A) 耕地 Cultiuated　　(B) 园地 Orchard

(C) 耕地 Cultiuated　　(D) 园地 Orchard

注:BD:容重;TSP:土壤总孔隙度;CP:毛管孔隙度;NCP:非毛管孔隙度;FC:田间持水量;CWC:毛管持水量;SMC:饱和持水量;OM:有机碳;EC:电导率;EN:碱解氮;AP:速效磷;AK:速效钾;下同。

Note: BD: bulk density; TSP: total soil porosity; CP: capillary porosity; NCP: non-capillary porosity; FC: field capacity; CWC: capillary water holding capacity; SMC: saturated water holding capacity; OM: organic carbon; EC: conductivity; EN: available nitrogen; AP: available phosphorus; AK: available potassium. The same below.

图 3　不同养分投入与土壤指标的相关性分析及冗余分析

Fig.3　Correlation analysis and redundancy analysis of soil indicators with different nutrient inputs

表 2 耕地土壤指标主成分分析的结果及公因子方差和分组

Table 2 Results of principal component analysis of soil indexes of cultivated land, variance, and grouping of common factors

土壤指标 Soil index	主成分 Principal component					公因子方差 Communality	Norm 值 Norm value	分组 Group
	1	2	3	4	5			
土壤容重 BD	−0.631	−0.352	0.296	−0.125	−0.501	0.876	1.744	1
田间持水量 FC	0.992	0.077	−0.046	0.004	0.069	0.997	2.392	1
饱和持水量 SMC	0.992	0.077	−0.046	0.004	0.069	0.997	2.391	1
土壤总孔隙度 TSP	0.990	−0.008	0.011	−0.029	−0.052	0.984	2.383	1
毛管持水量 CWC	0.994	0.009	−0.032	−0.038	0.071	0.996	2.394	1
毛管孔隙度 CP	0.984	−0.080	0.022	−0.075	−0.041	0.982	2.373	1
非毛管孔隙度 NCP	−0.157	0.758	−0.125	0.488	−0.108	0.865	1.354	2
pH	0.010	0.845	0.240	−0.283	−0.096	0.861	1.376	2
EC	−0.141	−0.312	−0.808	0.006	−0.233	0.824	1.267	3
碱解氮 EN	−0.314	−0.396	0.384	−0.359	0.630	0.929	1.339	5
有机碳 OM	−0.410	0.259	−0.599	−0.182	0.359	0.756	1.404	3
全氮 TN	0.278	−0.404	0.545	0.283	−0.196	0.656	1.233	3
速效磷 AP	−0.284	0.603	0.470	0.086	0.119	0.686	1.323	2
速效钾 AK	−0.131	−0.260	0.008	0.819	0.365	0.889	1.116	4
特征值 Eigenvalue	5.790	2.346	1.843	1.263	1.057			
解释度 Explanation/%	41.357	16.757	13.164	9.022	7.552			
累计解释度/% Explained variation	41.357	58.113	71.277	80.299	87.851			

表 3 园地土壤指标主成分分析的结果及公因子方差和分组

Table 3 Results of principal component analysis of soil indexes of orchard, variance, and grouping of common factors

土壤指标 Soil index	主成分 Principal component					公因子方差 Communality	Norm 值 Norm value	分组 Group
	1	2	3	4	5			
土壤容重 BD	0.977	0.004	0.042	0.072	−0.011	0.962	2.189	1
田间持水量 FC	0.115	0.053	0.773	0.469	−0.040	0.835	1.033	3
饱和持水量 SMC	0.985	0.037	0.106	0.056	0.001	0.987	2.212	1
土壤总孔隙度 TSP	0.980	−0.096	0.125	0.059	−0.055	0.992	2.208	1
毛管持水量 CWC	−0.163	0.805	−0.141	−0.030	0.348	0.817	1.469	2
毛管孔隙度 CP	0.962	−0.118	−0.171	−0.129	−0.043	0.986	2.175	1
非毛管孔隙度 NCP	0.272	0.376	−0.604	0.275	−0.092	0.665	1.180	3
pH	0.952	0.018	−0.219	−0.148	0.017	0.978	2.152	1
EC	0.020	−0.422	−0.570	0.375	0.021	0.645	1.026	3
碱解氮 EN	0.100	0.717	0.053	0.043	−0.569	0.853	1.370	2
有机碳 OM	0.020	−0.777	−0.129	0.005	0.392	0.775	1.389	2
全氮 TN	0.100	−0.035	0.103	−0.839	−0.067	0.730	0.275	4
速效钾 AK	0.406	0.341	0.378	0.046	0.575	0.756	1.322	5
速效磷 AP	0.011	−0.801	0.265	0.035	−0.337	0.826	1.442	2
特征值 Eigenvalue	5.018	2.874	1.656	1.196	1.062			
解释度 Explanation/%	35.840	20.525	11.831	8.542	7.589			
累计解释度/% Explained variation	35.840	56.365	68.196	76.737	84.326			

表 4 最小数据集中土壤质量指标的公因子方差及权重

Table 4 Communalities and weights of soil quality indicators in the minimum data set

土地利用类型 Land use type	土壤指标 Soil index	公因子方差 Communality	权重 Weight
耕地 Cultivated	毛管持水量 CWC	0.996	0.225
	有机碳 OM	0.756	0.171
	pH	0.761	0.194
	碱解氮 EN	0.929	0.210
	速效钾 AK	0.889	0.200
园地 Orchard	土壤总孔隙度 TSP	0.987	0.168
	非毛管孔隙度 NCP	0.817	0.139
	毛管持水量 CWC	0.986	0.167
	pH	0.853	0.145
	全氮 TN	0.665	0.113
	速效磷 AP	0.756	0.128
	速效钾 AK	0.826	0.140

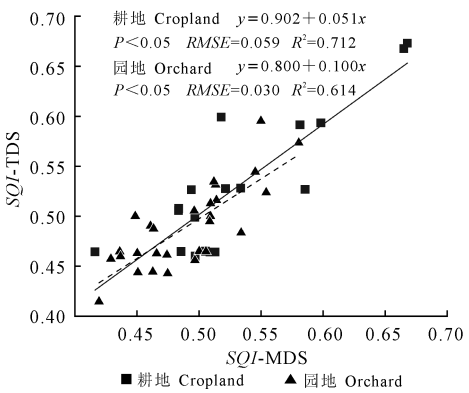
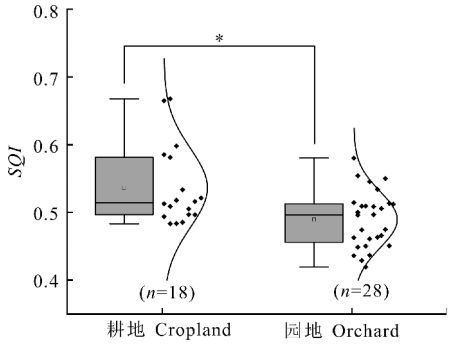


图 4 基于最小数据集(MDS)和最大数据集(TDS)土壤质量指数(*SQI*)相关性

Fig.4 Soil quality index (*SQI*) correlation based on minimum dataset (MDS) and maximum dataset (TDS)



注:* 表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。

Note: * indicates statistically significant differences at $P<0.05$.

图 5　耕地和园地土壤质量指数(*SQI*)

Fig.5　Soil quality index (*SQI*) of cultivated land and orchard land

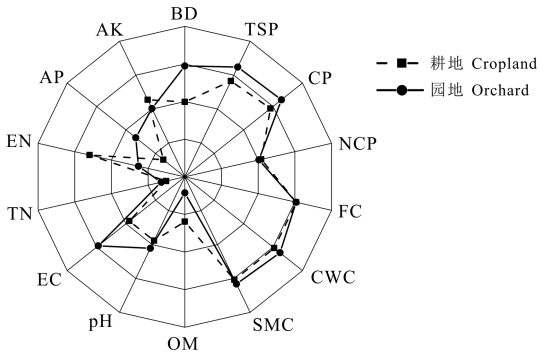


图 6　耕地和园地土壤质量指标障碍度

Fig.6　Degree of limitation of soil quality index indicators for cultivated land and orchard land

3　讨　论

3.1　耕地转变为果园对土壤养分积累和盐分表聚的影响

土地利用变化是驱动土壤质量演变的核心因素之一,其影响具有显著的时空异质性和多维度等特征[4]。在全球范围内,耕地转变为高复种指数的经济作物后,普遍导致土壤养分大量累积[1]。本研究揭示,靖远县耕地转变为枸杞果园后,由于化肥过量施用(园地 P_2O_5 投入量为耕地的 2.96 倍,K_2O 投入量为耕地的近 5 倍)导致果园土壤养分大量累积,土壤速效磷和速效钾含量分别达到 45.4 mg·kg^{-1}和 382.84 mg·kg^{-1},显著高于传统耕地,土壤容重较传统耕地增加 8.9%、总孔隙度下降 15.7%(表 1),这与牛昱涵等[19]对苏南地区农田转变为桃园的研究结果以及 Lu 等[20]探究耕地转为猕猴桃园的研究结果相呼应,共同揭示了经济作物种植中普遍存在的"高投入-低效率"的施肥模式。另外,研究结果显示,枸杞园地表层土壤电导率(229.21 μS·cm^{-1})较耕地升高了 23.8%,表明干旱半干旱环境下化肥残留盐分更易在表层聚集。这一现象可能由以下机制共同作用:(1)枸杞根系主要集中在 0~60 cm[8],其"避盐效应"导致盐分向表层迁移并滞留[21];(2)干旱半干旱区强烈的蒸发作用使土壤水分呈"蒸发-凝结"单向运移,盐分随毛管水上升至地表结晶,形成明显的盐分聚集层。对比湿润区土壤质量研究[22],凸显干旱半干旱区土壤退化的特殊性,这种盐分表层聚集的特征可能进一步影响土壤微生物活性和作物养分吸收,值得后续研究关注。

3.2　基于最小数据集评价干旱区土壤质量的可行性

本研究基于主成分分析构建了耕地和枸杞园地的最小数据集(MDS),结果表明基于 MDS 的土壤质量指数(*SQI*)与全量数据集(TDS)的 *SQI* 呈显著正相关关系(图 3),验证了该方法在土壤质量评价中的可靠性。研究结果显示,耕地 MDS 中毛管持水量(权重 0.225)和有机碳(权重 0.171)作为关键指标,分别表征土壤水分调控能力和有机质水平,这一结果与广西油茶人工林土壤肥力评价研究具有一致性[12]。值得注意的是,MDS 的构建需考虑区域环境特异性。本研究中园地 MDS 包含 pH(权重 0.145)和总孔隙度(权重 0.168)等指标,而张恒等[13]在四川植烟田研究中则将电导率和全氮作为核心指标,这种差异反映了干旱区(关注盐渍化风险)与湿润区(侧重氮素淋失)环境因子的分异特征[14]。研究还发现,速效钾在园地 MDS 中具有较高权重,但其指标稳定性可能受短期施肥影响[3],提示在 MDS 应用中需结合长期定位观测数据以提高评价准确性。未来研究应着重构建包含物理、化学和生物指标的多维度评价体系,通过加强长期定位观测数据支撑,并特别关注干旱区土壤生物因素的纳入,以更全面评估土壤健康状况,从而提升土壤质量评价的科学性和区域适用性。

3.3　耕地转果园驱动下土壤质量的演变特征及主控因素

研究结果显示,枸杞园地土壤质量指数(*SQI* = 0.489)显著低于传统耕地(*SQI* = 0.531)($P<0.05$),其中土壤物理性质(容重、孔隙度)是制约园地土壤质量提升的关键障碍因子(图 6),这一发现与 Andrews 等[17]关于物理指标对土壤退化敏感性突出的研究结论相吻合。造成这一现象的主要原因可归

纳为两方面:首先,果园管理措施导致土壤结构破坏,小型旋耕机的浅层耕作和频繁的采摘作业造成人为踩踏,显著改变了土壤孔隙结构和紧实度;其次,过量施肥加剧了土壤退化。数据显示,枸杞果园磷(P_2O_5)、钾(K_2O)施用量较耕地分别增加245.40%和609.61%(图2)。冗余分析表明,P_2O_5与土壤容重呈显著正相关关系(图3),再次证实过量磷肥通过钙离子固定加剧土壤板结[23],而钾肥的过度施用则导致盐分积累,进一步破坏土壤结构[24],这一结果与田英等[25]关于干旱区人工林土壤质量的研究发现具有一致性。基于上述研究结果,建议从四个维度优化果园管理措施:采用深松耕作结合有机肥施用和绿肥种植来改善孔隙状况[26];可配施土壤改良剂以降低盐渍化风险[27];建议建立基于叶片营养诊断的水肥一体化精准施肥体系[28];同时借助现代传感器技术构建土壤质量实时监测预警平台[29]。这些措施将有助于实现枸杞种植的可持续发展。

4 结 论

本研究基于最小数据集系统评估了甘肃省靖远县传统耕地转为枸杞果园对土壤质量的影响,发现土地利用转型显著改变了土壤养分分布格局,枸杞果园较传统耕地表现出更明显的养分表层聚集效应,并伴随盐分在表层土壤的累积,这可能加剧次生盐渍化风险。土壤质量指数计算得出,枸杞果园土壤综合质量(0.489)显著低于传统耕地(0.531),其中土壤物理性质退化(容重增加8.9%,孔隙度与持水量下降15.7%~22.5%)是制约质量提升的关键因素。总体而言,在干旱半干旱区耕地转变为果园后土壤物理结构劣化,成为土壤综合质量下降的关键因素,并加剧了盐分表层聚积的风险。

参 考 文 献:

[1] FOLEY J A, DEFRIES R, ASNER G P, et al. Global consequences of land use[J]. Science, 2005, 309(5734): 570-574.

[2] 宁夏回族自治区林业和草原局, 国家林业和草原局发展研究中心. 中国现代枸杞产业高质量发展报告-2024[M]. 北京: 中国林业出版社, 2024.
Ningxia Hui Autonomous Region Forestry and Grassland Bureau, Development Research Center of National Forestry and Grassland Administration. High-quality development report of modern Chinese wolfberry industry (2024)[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2024.

[3] 路永莉, 韩露, 郭皓, 等. 甘肃不同树龄枸杞果园养分投入现状与评价[J]. 应用生态学报, 2025, 36(3): 877-884.
LU Y L, HAN L, GUO H, et al. Current status and evaluation of nutrient inputs in wolfberry orchards of different ages in Gansu, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(3): 877-884.

[4] GUILLAUME T, DAMRIS M, KUZYAKOV Y. Losses of soil carbon by converting tropical forest to plantations: erosion and decomposition estimated by 13C[J]. Global Change Biology, 2015, 21(9): 3548-3560.

[5] RODRIGO C J, TEROL E, BREVIK E C, et al. Vineyard soils within the Mediterranean areas with distinct parent materials: their specific characteristics and potential ecosystem services[J]. Geoderma, 2020, 363: 114-126.

[6] FERREIRA M S M, SOUZA D A M, SILVA D A F X. Deforestation and conventional agriculture´s impact on soil quality in five Brazilian semi-arid soils[J]. Experimental Agriculture, 2025, 61(6): e6.

[7] TANG M, LIU R, LI H, et al. Optimizing soil moisture conservation and temperature regulation in rainfed jujube orchards of China´s loess hilly areas using straw and branch mulching[J]. Agronomy, 2023, 13(8): 2121.

[8] 胥生荣, 张恩和, 马瑞丽, 等. 不同种植年限对枸杞根系及土壤环境的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(11): 1725-1732.
XU S R, ZHANG E H, MA R L, et al. Effects of planting years on the root system and soil environment of *Lycium barbarum* L[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(11): 1725-1732.

[9] 刘朋召, 李孟浩, 宋仰超, 等. 滴灌水肥一体化对枸杞产量、水氮利用及经济效益的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(10): 1820-1828.
LIU P Z, LI M H, SONG Y C, et al. Effects of fertigation on yield, water and nitrogen utilization and economic productivity benefit of wolfberry (*Lycium barbarum* L.)[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2021, 27(10): 1820-1828.

[10] ASKARI M S, HOLDEN N M. Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 150: 57-67.

[11] 朱娟娟, 马海军, 李敏, 等. 基于最小数据集的贺兰山东麓葡萄园土壤肥力评价[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(3): 172-180, 187.
ZHU J J, MA H J, LI M, et al. Comprehensive evaluation of vineyards soil fertility in the eastern foothills of Helan mountain based on the minimum data set[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(3): 172-180, 187.

[12] 杨家强, 玉志鹏, 刘霜莲, 等. 基于最小数据集的桂西北油茶人工林主产区土壤肥力质量评价[J]. 桉树科技, 2024, 41(4): 66-72.
YANG J Q, YU Z P, LIU S L, et al. Soil fertility quality evaluation of *Camellia oleifera* plantations in the main production area of northwest Guangxi based on minimum data set[J]. Eucalypt Science & Technology, 2024, 41(4): 66-72.

[13] 张恒, 张艳玲, 许亚东, 等. 基于最小数据集的植烟土壤质量评价及障碍因子诊断[J]. 烟草科技, 2024, 57(2): 45-53.
ZHANG H, ZHANG Y L, XU Y D, et al. Quality assessment and obstacle factor diagnosis of tobacco planting soil based on minimum

data set[J]. Tobacco Science & Technology, 2024, 57(2): 45-53.

[14] 李桂林, 陈杰, 孙志英, 等. 基于土壤特征和土地利用变化的土壤质量评价最小数据集确定[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 2715-2724.
LI G L, CHEN J, SUN Z Y, et al. Establishing a minimum dataset forsoil quality assessment based on soil properties and land use change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(7): 2715-2724.

[15] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 2-194.
National Agricultural Technology Extension Service Center. Chinese organic fertilizer nutrient record[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999: 2-194.

[16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[17] ANDREWS S S, KARLEN D L, MITCHELL J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(4): 1312-1320.

[18] 高小峰, 闫本帅, 吴春晓, 等. 长期施肥对黄土丘陵坡地农田土壤质量和谷子产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(5): 76-83.
GAO X F, YAN B S, WU C X, et al. Effects of long-term fertilization on soil quality and millet yield on slope farmland in loess hilly areas[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(5): 76-83.

[19] 牛昱涵, 施曼, 王心怡, 等. 苏南地区农业土地利用方式改变对土壤理化及生物学性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1657-1668.
NIU Y H, SHI M, WANG X Y, et al. Influence of agricultural land use changes on soil physiochemical and biological characteristics insouthern Jiangsu province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(10): 1657-1668.

[20] LU Y L, CHEN Z J, KANG T T, et al. Land-use changes from arable crop to kiwi-orchard increased nutrient surpluses and accumulation in soils[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 223: 270-277.

[21] GALVAN-AMPUDIA C S, JULKOWSKA M M, DARWISH E, et al. Halotropism is a response of plantroots to avoid a saline environment[J]. Current Biology, 2013, 23(20): 2044-2050.

[22] 徐文娴, 郭鑫炜, 吴志祥. 不同施肥方式对海南橡胶园土壤质量的影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(9): 103-112.
XU W X, GUO X W, WU Z X. Effects of different fertilization methods on the soil quality of rubber plantation in Hainan province of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(9): 103-112.

[23] 宋红梅, 高玉, 员明鑫, 等. 长期施肥对旱塬麦田土壤大团聚体有机碳组分及冬小麦产量的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(7): 4187-4195.
SONG H M, GAO Y, YUN M X, et al. Effects of long-term fertilizations on the organic carbon components of soil macroaggregates and the yield of wheat in wheat fields on the loess plateau[J]. Environmental Science, 2024, 45(7): 4187-4195.

[24] RAHMAN E A M Z, SHABAN H A K, MOHASEB I M, et al. Effect ofboron, potassium sources and rates on soil fertility, sugar beet yield and quality cultivated in saline clay soil in Egypt[J]. International Journal of Plant & Soil Science, 2024, 36(12): 402-416.

[25] 田英, 许喆, 王娅丽, 等. 宁夏银川平原沙化土地不同人工林土壤质量评价[J]. 生态学报, 2023, 43(4): 1515-1525.
TIAN Y, XU Z, WANG Y L, et al. Soil quality evaluation for different forest plantation of sandy land in Yinchuan plain, Ningxia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1515-1525.

[26] 李洪兵, 赵西宁, 王娟, 等. 生草和树枝覆盖对果园土壤持水性能的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1): 136-141, 181.
LI H B, ZHAO X N, WANG J, et al. Effects of ground covers and mulches on soil water-holding capacity in jujube orchards[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(1): 136-141, 181.

[27] 黄浦江, 方昭, 余海龙, 等. 不同改良剂配施对河套灌区碱化土壤理化性质及枸杞生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(5): 121-129.
HUANG P J, FANG Z, YU H L, et al. Effects of combinations of modifiers on physical and chemical properties of alkaline soil and growth of *Lycium chinense* in Hetao irrigation area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(5): 121-129.

[28] 裴胜钊, 吕福泉, 邓新炜, 等. 果树地下滴灌技术研究进展与展望[J]. 干旱地区农业研究, 2025, 43(2): 302-310.
PEI S Z, LV F Q, DENG X W, et al. Progress and prospect of subsurface drip irrigation technology for fruit trees[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2025, 43(2): 302-310.

[29] 王梦樊, 吉艳芝, 刘娉妤, 等. 果园土壤氮损失监测方法研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(3): 553-572.
WANG M F, JI Y Z, LIU P Y, et al. Progress on monitoring methods in nitrogen losses from orchard soils[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(3): 553-572.