

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.025

引用格式:高树林,陈楠,杜梦寅,等.不同植被类型对陇中黄土高原土壤质量的影响及关键驱动因素[J].草地学报,2026,34(9):3412—3425

GAO Shu-lin, CHEN Nan, DU Meng-yin, et al. Effects of Different Vegetation Types on Soil Quality in the Central Loess Plateau and the Key Driving Factors[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3412—3425

不同植被类型对陇中黄土高原土壤质量的影响 及关键驱动因素

高树林¹, 陈楠^{1,2*}, 杜梦寅¹, 姚瑶¹, 李婉婷¹, 杜俊¹, 庞婧^{1,5}, 马维伟¹,
李广^{1,3,4}, 袁建钰^{3,4*}

(1. 甘肃农业大学林学院, 甘肃兰州 730070; 2. 武山县生产力促进中心, 甘肃天水 741000; 3. 甘肃农业大学草业学院, 甘肃兰州 730070; 4. 干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃兰州 730070;
5. 甘肃省水土保持科学研究所, 甘肃兰州 730070)

摘要:明确不同植被类型对土壤质量的影响,对于维持黄土丘陵沟壑区生态稳定具有重要意义。本研究以甘肃省定西市安家坡流域为例,选取云杉林地、沙棘林地、苜蓿草地、小麦地及撂荒裸地,测定其0~20 cm土层的18项土壤指标,基于总数据集、最小数据集和修正后的最小数据集,结合线性与非线性评分方法计算土壤质量指数。结果表明:云杉林地的土壤质量指数最高,为0.53,相较于撂荒裸地提升了35.9%;基于修正后的最小数据集结合线性评分模型(SQI-LRM)的解释能力最强。偏最小二结构方程模型反映出,不同植被类型主要通过影响土壤化学性质进而作用于生物性质;随机森林结合多元线性回归分析则揭示不同植被类型主要通过调控土壤pH来影响蛋白酶活性,最终驱动土壤质量。综上,云杉林地可以显著提升土壤质量;SQI-LRM模型可以为研究区域土壤质量提升与生态系统的可持续发展提供量化依据。

关键词:黄土高原;不同植被类型;修正后的最小数据集;土壤质量评价;评分方法

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3412-14

Effects of Different Vegetation Types on Soil Quality in the Central Loess Plateau and the Key Driving Factors

GAO Shu-lin¹, CHEN Nan^{1,2*}, DU Meng-yin¹, YAO Yao¹, LI Wan-ting¹, DU Jun¹, PANG Jing^{1,5},
MA Wei-wei¹, LI Guang^{1,3,4}, YUAN Jian-yu^{3,4*}

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu Province 730070, China; 2. Wushan County Productivity Promotion Center, Tianshui, Gansu Province 741000, China; 3. Science Pratacultural College, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu Province 730070, China; 4. State Key Laboratory of Aridland Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu Province 730070, China;
5. Gansu Institute of Soil and Water Conservation Science, Lanzhou, Gansu Province 730070, China)

Abstract: Clarifying the effects of different vegetation types on soil quality is of great significance for maintaining ecological stability in the hilly-gully region of the Loess Plateau. This study was conducted in the Anjiapo watershed, Dingxi City, Gansu Province as an example. Five vegetation types were selected, including spruce forestland, sea-buckthorn forestland, alfalfa grassland, wheat cropland and abandoned bare land. A total of 18 soil indicators were measured in the 0-20 cm soil layer. Soil quality indices were calculated based on the total

收稿日期:2025-11-18;修回日期:2026-03-04

基金项目:国家自然科学基金(32160416);甘肃省青年科技基金(25JRRA370);甘肃省拔尖领军人才项目(GSBJLJ-2023-09);甘肃省博士后科学基金(GSAU-BH-2025-09);甘肃农业大学博士后科研启动金(GSAU-BH-2025-10);甘肃省高校研究生“创新之星”(2025CXZX-832)资助

作者简介:高树林(2000-),男,裕固族,甘肃肃南人,硕士研究生,主要从事土壤质量评价研究,E-mail:3158526966@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:32744785@qq.com, yuanjianyu@gsau.edu.cn

data set, minimum data set, and revised minimum data set, combined with linear and non-linear scoring methods. The results showed that spruce forestland had the highest SQI of 0.53, which was 35.9% higher than that of abandoned bare land. The revised minimum data set combined with the linear scoring model (SQI-LRM) exhibited the strongest explanatory power. Partial least squares structural equation modeling revealed that different vegetation types primarily affected soil biological properties through their influence on soil chemical properties. Random forest combined with multiple linear regression analysis revealed that different vegetation types mainly drove soil quality by regulating soil pH, which in turn influenced protease activity. In conclusion, spruce forestland can significantly improve soil quality, and the SQI-LRM model can provide a quantitative basis for soil quality improvement and sustainable ecosystem development in the study area.

Key words: Loess Plateau; Different vegetation types; Revised minimum dataset; Soil quality assessment; Scoring method

土壤质量是指土壤在生态系统和土地利用的范围内维持生物生产力、保护环境质量及促进动植物健康的能力,其内涵涵盖土壤肥力质量、土壤环境质量及土壤健康质量^[1]。土壤质量直接关联着自然生态和人类社会的可持续发展。以林草复合系统为核心的植被恢复措施通过提高植被覆盖度,有效遏制了黄土高原地区土壤退化,生态修复效益显著。近年来,围绕不同植被类型对土壤质量的影响,国内外学者开展了大量研究,巩杰等^[2]在评估黄土高原小流域不同植被类型的土壤质量时指出,在半干旱地区增加林草植被覆盖度,建设基本农田可有效改善土壤质量,增强生态系统的稳定性;任启文等^[3]的研究进一步表明,不同植被类型对土壤质量的影响主要体现在两个方面,一是通过凋落物的归还和根系分泌物输入来改变有机质含量和养分循环过程;二是植被的根系结构差异及根系生长分布的物理作用影响土壤容重、孔隙度、团聚体稳定性等物理性质。值得一提的是,单钰洁等^[4]的研究发现,土壤酶活性是制约黄土高原土壤质量提升的主要限制因子,因此,在黄土高原,生物学性质普遍对土壤质量起着关键调节作用。然而,土壤质量的变化并非由单一土壤指标所驱动,而是多种土壤理化、生物特性之间的耦合作用逐级传递。现有研究多侧重于植被类型作用于土壤质量的差异比较,而对于不同植被类型下土壤质量的综合评价及其驱动机制的系统解析却仍显不足。鉴于此,深入评估不同植被类型对土壤质量的影响并揭示其关键驱动因素,对于指导土壤资源的合理利用和生态系统的可持续发展意义重大。

目前,土壤质量评价工作广泛应用主成分分析法结合相关性分析及 Norm 值法降维优选关键指标以构建最小数据集^[5]。该方法能够剔除相关性较高的指标,最大限度降低数据冗余,并保留指标的主

体信息。然而,该方法存在一定的局限性;当筛选结果仅保留有限的指标,缺乏涵盖与土壤息息相关的物理、化学、生物指标时,会降低土壤质量指数的敏感性,导致评价结果产生偏差。例如, Mihoub 等^[6]在埃塞俄比亚北部进行土壤质量评价时,仅有三个物理指标和一个化学指标选入最小数据集。鉴于此, Yu 等^[7]在传统最小数据集构建思路的基础上,采用了改进的指标选择方法构建修正后的最小数据集。该方法则保留了至少包含一个物理、化学、生物指标在内的 4 项指标,而最小数据集仅保留了 2 项指标,额外的指标不仅保留了土壤功能的完整性,还有效降低了数据的冗余,显著提高了土壤质量评价的精确度和综合性。在土壤质量指数计算中,指标评分方法的选择同样至关重要。当前,国际上主流的方法有线性和非线性两种评分函数^[8];线性评分模型通过简单直接的线性变换对指标进行评分,但异常值可能会对其产生影响;相比之下,非线性评分法虽然结构复杂,但是对于土壤指标临界值的反映更为敏感。然而,不同方法在特定区域的适用性仍存在差异,因此,有必要通过系统比较不同指标选择和评分方法,以期构建兼顾土壤功能完整性与陇中黄土高原区域适配性的土壤质量评价模型。

陇中黄土高原因其独特的梁峁、沟壑丘陵黄土地貌,加之尖锐的人地矛盾及干旱的气候条件,是世界上水土流失最严重的区域之一。近年来,已有大量土壤质量研究在黄土高原展开。周瑶等^[9]基于隶属度函数结合因子分析法定量评价黄土丘陵区 3 种生态恢复措施下典型草原土壤质量;王淑琴等^[10]基于最小数据集评价黄土高原半干旱区不同种植年限的苜蓿草地土壤质量,发现速效磷和全氮是影响该区域土壤质量提升的主要限制因子。综合现阶段的研究发现,针对于该区域的土壤质量评价已

从早期的单一指标或定性评价,逐步发展到包含生物特性的综合指数定量评价阶段。但仍存在以下几个问题有待进一步探讨:其一,在指标选择的方法上依然以最小数据集为主,缺乏不同方法的系统比较;其二,鲜有研究同时比较线性与非线性评分方法在该区域的适用性;其三,对于影响土壤质量的驱动机制解析方面仍处于探索阶段。基于此,本研究以陇中黄土高原5种典型植被类型为研究对象,基于总数据集(Total dataset)、最小数据集(Minimum dataset)和修正后的最小数据集(Revised minimum dataset),分别采用线性和非线性评分方法计算土壤质量指数,系统比较不同数据集和评分方法的评价效果,揭示不同植被类型影响土壤质量的关键路径和主控因子,旨在探索适宜陇中黄土高原及相似区域的土壤质量评价体系提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省定西市安定区安家坡流域水土保持监测站(103°52′~105°13′E,34°26′~35°35′N),流域面积为8.56 km²,海拔从2100~2500 m不等。土壤为典型的黄绵土,土层深厚且质地疏松。该流域属典型中温带干旱、半干旱气候,年温差大,年均温6.3℃,年平均降水量为390.99 mm,主要集中在7—9月,年际变异大,年均太阳辐射141.6×1.48

kJ·cm⁻²,日照时间2476.6 h,无霜期140 d^[11]。土壤类型以黄绵土为主,土层深厚,质地均匀,土壤有机质含量为12.01 g·kg⁻¹,全氮为0.61 g·kg⁻¹,全磷为1.77 g·kg⁻¹,土壤容重为1.27 g·cm⁻³。

1.2 实验设计

前期在研究区实地调查及文献资料的基础上,综合考虑取样规模和样地代表性,本研究于2021年7月在陇中黄土高原典型黄绵土分布区开展。所选样地具有一致的土壤发育背景(退耕前均为坡耕地),且弃耕年限均为20年以上,从而有效控制背景空间变异。为系统评估不同植被恢复类型对土壤质量的影响,研究采用完全随机区组设计,以撂荒地作为对照,选取人工乔木林地(云杉林地)、人工灌木林地(沙棘林地)、人工草地(紫花苜蓿)及农田(小麦地)等4种典型的植被类型。为最大限度削弱地形因素的潜在影响,所有样地均选择在坡度、坡向和海拔相近的毗邻地段。基于各植被类型的生态学特征及野外调查规范,研究采用差异化样方设计^[12]:云杉林地布设20 m×20 m样方以适应其冠幅特征,沙棘林地采用10 m×10 m样方,苜蓿草地、小麦地和撂荒地统一布设4 m×6 m样方。每种植被恢复类型随机布设3个重复样方,相邻样方之间保留≥5 m的缓冲带,以降低空间自相关性的影响。为确保生态恢复起点的可比性,所有植被均建立在相同土壤本底条件下。各样地详细资料见(表1)。

表1 各样地基本资料

Table 1 Basic information of the sample plot

植被 Vegetation	样地面积 Area size	盖度 Coverage/ %	株高 Height	经度 Latitude	纬度 Area size	优势种 Dominant species	管理历史 Management history
PA	20 m×20 m	79.46	7.11 m	35°35′10″N	104°37′7″E	<i>Picea asperata</i> , <i>Bupleurum chinense</i> , <i>Gentiana macrophylla</i> , <i>Leontopodium leontopodioides</i>	2002年通过实施“退耕还林还草工程”恢复为云杉林地,此后未采取任何进一步管理措施
HR	10 m×10 m	89.28	1.64 m	35°34′55″N	104°38′1″E	<i>Hippophae rhamnoides</i> , <i>Leontopodium leontopodioides</i> , <i>Artemisia annua</i>	2002年通过实施“退耕还林还草工程”恢复为沙棘灌丛,没有采取任何进一步管理措施
MS	4 m×6 m	90.08	0.41 m	35°34′48″N	104°39′2″E	<i>Medicago sativa</i> , <i>Leymus secalinus</i> , <i>Artemisia lavandulaefolia</i>	2015年在耕地的基础上弃耕,种植苜蓿并围封,成活后未采取进一步管理措施
AL	4 m×6 m	66.79	0.36 m	35°34′54″N	104°37′57″E	<i>Stipa bungeana</i> , <i>Plantago asiatica</i> , <i>Setaria viridis</i>	1999年被弃耕,自然恢复为撂荒地,有少量杂草分布,没有采取任何进一步的管理措施
WF	4 m×6 m	70.14	0.89 m	35°34′45″N	104°39′1″E	Spring wheat	2015年,在荒地的基础上开垦为农田,种植了春小麦,采用传统耕作制度,每年播种时施入62.5 kg·hm ⁻² N的尿素(含N 46%)和150 kg·hm ⁻² 的过磷酸钙(含P ₂ O ₅ 14%)作为基肥直到现在

1.3 样地选择依据

乔木林、灌木林和草地按1:2:7比例种植。在造林初期,通过适度人工灌溉和补种措施来提高成活率。云杉具有抗风、耐寒耐旱、生长迅速和适应性强等特点,是当地广泛采用的造林树种;沙棘因其耐旱、抗风沙、耐盐碱等特性,在西北地区被大量用于水土保持与荒漠化防治;紫花苜蓿是作为多年生草本植物,具有较强的抗旱能力和对贫瘠土壤的适应性,是研究区草地恢复的主要物种。此外,研究区地处陇中黄土高原典型雨养农业区,春小麦长期为当地主要的旱作作物被广泛种植。

1.4 土壤样品采集与实验室分析

采样点设置在样方内植被分布相对均匀区域,土壤采样前,统一清除采样点枯落物和未分解植物残体。林地和林下冠幅投影范围内取样,避开树干基部、明显根系集中及人为扰动位置。小麦地定期进行杂草清除。在每个样方内采用“S”型五点混合取样法采集0~20 cm土层土壤样品,以有效降低微地形变异带来的误差。采集的样品首先剔除可见根系和石砾后装入自封袋,并置于装有冰袋的样品箱低温运输至实验室。样品带回后于4℃条件下冷藏保存,一部分用于土壤含水量的测定,其余样品过2 mm筛并进一步剔除细根后,即刻测定土壤微生物量碳、氮及酶活性等指标。此外,使用体积为100 cm³的环刀采集原状土样以测定土壤容重和孔隙度。在样地内挖出一定的土壤剖面,依据对角线三点法采集0~20 cm层的原状土壤。

土壤容重(BD)采用环刀法测定;土壤含水量(SWC)采用铝盒干燥法测定;土壤pH值采用电位法(土壤水土比=1:2.5)测定^[13];土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化滴定法进行测定;土壤全氮(TN)消煮后采用凯氏定氮法测定;土壤全磷(TP)采用钼锑抗比色法测定;土壤可溶性有机碳(DOC)采用重铬酸钾外加热法测定^[14];土壤硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)含量采用MgO-戴氏合金蒸馏法测定;土壤可溶性全氮(DTN)采用碱性过硫酸钾氧化-紫外风光光度计法测定;土壤可溶性有机氮(DON)采用DTN-(NO₃⁻-N+NH₄⁺-N)的差值测定;土壤微生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸+K₂SO₄提取法测定;土壤微生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸-H₂SO₄浸提法测定^[15]。土壤脲酶活性(URE)采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定;土壤蛋

白酶活性(PRO)采用酪干素比色法测定;土壤硝酸还原酶活性(NR)和亚硝酸还原酶活性(NIR)采用苯磺酸-醋酸-α萘胺比色法测定。

1.5 数据处理

本研究选取影响土壤生产力和可持续性的18个指标构建TDS,具体研究方法如下。为降低数据维度采用MDS和RMDS两种方法分别进行指标筛选。

根据MDS筛选步骤,将TDS的指标主成分分析(PCA),以确定关键土壤指标。RMDS则分别对物理、生物和化学三类土壤性质独立进行PCA,确保RMDS至少包含每类性质中的一个,其余步骤与MDS一致。在指标筛选的过程中,将特征值≥1的主成分中的指标进行分组;随后计算各组内指标的Norm值,仅保留Norm值最高值10%以内的指标。若某指标在多个主成分中的载荷均>0.5,则进一步进行指标间的相关性分析,并将该指标归入与其他指标相关性较低的主成分组。当同一主成分中存在多个高载荷指标时,且它们之间相关性较低($r<0.6$),均可入MDS。标准计算公式如下:

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{j=1}^k (u_{ik}^2 e_k)} \quad (1)$$

式中: N_{ik} 为*i*指标在全部*k*个主成分的累加因子荷载; u_{ik}^2 为第*i*个指标的单因子荷载; e_k 为第*k*个主成分的特征值。

1.6 建立土壤质量评分模型

鉴于各土壤指标存在量纲差异,为消除指标间单位的差异并使其具有可比性,就需要对指标数据进行明确定义和归一化处理为0~1的无量纲值。

1.6.1 线性函数评价法 不同指标对土壤质量的影响方式存在差异,在土壤中,并非所有指标都对土壤都有积极的促进作用,还有土壤容重等对土壤功能有着消极抑制作用的土壤指标。因此,根据不同指标对土壤质量的影响情况,分别采用式(2)“越大越好”和式(3)“越小越好”两种评分公式进行计算。对于“抛物线”指标,则根据其最佳范围选用相应的评分公式^[17]。

$$S_L = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

$$S_L = \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (3)$$

式中: S_L 表示指标标准化后的线性隶属度(0~1);

X 为该指标实测值; $X_{\max}$ 为该指标的最大值; $X_{\min}$ 为该指标的最小值。

1.6.2 非线性函数评价法 非线性评分模型则通过非线性函数来实现数据的标准化,计算公式如下:

$$S_{NL} = \frac{a}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^b} \quad (4)$$

式中: S_{NL} 是非线性得分值,取值为0~1; a 取1,表示最大得分值; x 是各指标实测值; x_0 是各指标均值; b 为方程斜率,“越大越好”指标取值为-2.5,“越小越好”指标取值为2.5。

1.6.3 计算土壤质量指数 把各项指标线性得分与权重因子进行加权求和,计算土壤质量指数(SQI),公式如下:

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i \times S_i \quad (5)$$

式中: SQI 为土壤质量指数; W_i 和 S_i 分别为第 i 种评价指标所对应的权重系数和指标得分; n 为数据集中土壤指标总数, SQI 越高,表示土壤质量越好。

1.6.4 土壤质量指数的验证 为验证MDS和RMDS的合理性,将基于TDS计算得出的SQI-TDS分别与基于MDS和RMDS计算的SQI-MDS和SQI-RMDS进行比较,并通过线性回归分析评估MDS与RMDS所得SQI的准确性。

1.7 数据分析

采用Excel 2016和Origin 2024软件进行数据处理绘制图表。使用IBM SPSS 26软件对数据进行正态性、主成分及相关性等统计学分析,数据分布的正态性采用Shapiro-Wilk检验,用方差分析(One-way ANOVA)和Duncan检验比较不同数据组之间的差异,显著性水平为 $P < 0.05$ 。使用Pearson相关分析法检验各指标和六种土壤质量指数间的相关性。使用R 4.5.1中的随机森林(Random Forest, RF)方法来确定各指标对土壤质量指数(SQI)的贡献度。利用多元线性回归分析确定影响蛋白酶(PRO)活性的主要因素。应用R软件包(R-4.5.1)“plsrm”中的“innerplot”函数构建了偏最小二乘路径建模(PLS-PM),以确定不同植被类型对土壤理化、生物性质和土壤质量的影响途径,不同植被类型作为一个外生潜变量纳入模型中,通过分类变量数值化后仅用于区分不同植被类型。土壤

物理性质分别用容重、孔隙度和含水量表示,土壤化学性质分别用土壤pH、有机碳、可溶性有机碳、全氮、可溶性全氮、可溶性有机氮、硝态氮、铵态氮和全磷表示,土壤生物性质分别用微生物量生物量碳、微生物量生物量氮、蛋白酶、脲酶、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶表示。模型输入数据为各指标对应的实测值,并在建模进行标准化处理。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型下土壤理化性质差异

本研究共测定18个土壤指标作为总数据集的预备指标,通过主成分分析筛选关键指标,以减少SQI计算过程中的冗余。单因素方差分析结果显示(表2),不同植被类型下对土壤理化和生物性质具有显著影响,其中包括3项物理指标,分别是容重(BD)、孔隙度(SP)、含水量(SWC)、8项化学指标pH、有机碳(SOC)、全氮(TN)、硝态氮(NO_3^- -N)、铵态氮(NH_4^+ -N)、可溶性全氮(DTN)、可溶性有机氮(DON)、可溶性有机碳(DOC)及6项生物指标微生物量氮(MBN)、微生物量碳(MBC)、脲酶(URE)、蛋白酶(PRO)、硝酸还原酶(NR)和亚硝酸还原酶(NIR),这些指标在不同植被类型下均存在显著差异($P < 0.05$)。具体来看,云杉林地(PA)的SP,SWC,SOC,MBN,DTN,DON,MBC,DOC和PRO均达到最高,表现出最优的土壤特性;小麦地(WF)的BD、pH、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、NR和NIR最高。沙棘地(HR)和苜蓿草地(MS)仅有URE和TN分别达到最高。

2.2 最小数据集和修订后的最小数据集的建立

主成分分析结果显示(表3),提取特征值大于1的4个主成分累积方差贡献率达到90.07%,表明前4个主成分能够较好地解释全部指标。根据各主成分的因子载荷,选择绝对值 ≥ 0.5 的指标为一组,所以MBC、PRO、SWC、DON、MBN、SOC、pH、SP、BD、DOC、NIR、DTN和 NO_3^- -N为第一组。其次,将 NH_4^+ -N、NR和TP归入第二组;然后,将URE归入第三组;最后,将TN归入第四组。虽然NIR、DTN在多个主成分上的载荷均 ≥ 0.5 ,但由于与其他主成分组相关性较高(图1),因此未将其纳入MDS。

根据MDS指标筛选原则,首先选择Norm值处于最高值10%范围内指标,随后分析其相关性,第

表 2 不同植被类型下土壤性质差异

Table 2 The differences of soil properties in different vegetation types.

指标 Indicators	云杉林地 PA	沙棘林地 HR	苜蓿草地 MS	撂荒裸地 AL	小麦地 WF	ANOVA 单因素方差分析	
						F 值 F value	P 值 P value
容重 BD/(g·cm ⁻³)	1.16±0.01 ^c	1.17±0.01 ^{bc}	1.18±0.01 ^b	1.17±0.01 ^{bc}	1.19±0.01 ^a	9.51	0.002
孔隙度 SP/%	56.08±0.14 ^a	55.76±0.22 ^{ab}	55.68±0.26 ^b	55.99±0.17 ^{ab}	55.19±0.17 ^c	9.51	0.002
含水量 SWC/%	19.42±1.34 ^a	12.69±0.93 ^{bc}	13.41±1.28 ^b	11.32±0.28 ^{cd}	9.75±0.33 ^d	45.40	0.000
pH 值	7.22±0.02 ^e	7.40±0.03 ^d	7.63±0.04 ^c	7.71±0.01 ^b	7.94±0.01 ^a	369.69	0.000
有机碳 SOC/(g·kg ⁻¹)	11.82±0.49 ^a	10.26±0.56 ^b	9.22±1.09 ^b	6.59±0.21 ^c	6.06±0.03 ^c	49.90	0.000
全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	0.66±0.02 ^b	0.61±0.01 ^c	0.81±0.02 ^a	0.56±0.01 ^d	0.62±0.01 ^c	92.51	0.000
全磷 TP(g·kg ⁻¹)	0.41±0.03 ^a	0.41±0.01 ^a	0.43±0.04 ^a	0.42±0.02 ^a	0.39±0.03 ^a	1.35	0.319
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/(mg·kg ⁻¹)	22.16±2.36 ^c	21.40±1.32 ^c	23.02±1.20 ^{bc}	25.57±2.12 ^b	29.08±0.17 ^a	11.03	0.001
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/(mg·kg ⁻¹)	15.29±0.60 ^a	13.53±0.21 ^b	11.36±0.19 ^c	11.20±0.27 ^c	15.84±0.26 ^a	118.23	0.000
可溶性有机碳 DOC/(g·kg ⁻¹)	0.75±0.02 ^a	0.68±0.02 ^b	0.56±0.01 ^d	0.61±0.02 ^c	0.48±0.01 ^e	108.76	0.000
可溶性全氮 DTN/(mg·kg ⁻¹)	107.78±3.06 ^a	87.03±0.65 ^c	91.39±2.20 ^b	86.78±1.39 ^c	93.16±0.36 ^b	66.30	0.000
可溶性有机氮 DON/(mg·kg ⁻¹)	70.33±1.98 ^a	52.10±0.78 ^c	57.02±1.11 ^b	50.01±1.49 ^{cd}	48.25±0.53 ^d	143.96	0.000
微生物量碳 MBC/(mg·kg ⁻¹)	462.72±8.14 ^a	369.46±25.21 ^b	338.53±10.72 ^c	296.37±8.40 ^d	256.49±9.28 ^e	95.16	0.000
微生物量氮 MBN/(mg·kg ⁻¹)	52.86±1.56 ^a	45.03±2.70 ^b	40.21±1.53 ^c	33.40±2.64 ^d	34.68±1.42 ^d	45.33	0.000
脲酶 URE/(mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	1.17±0.02 ^b	1.39±0.06 ^a	1.26±0.09 ^b	1.04±0.05 ^c	1.23±0.05 ^b	15.60	0.000
蛋白酶 PRO/(mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	9.53±0.07 ^a	6.90±0.08 ^c	7.77±0.09 ^b	6.35±0.07 ^d	5.91±0.32 ^e	240.08	0.000
硝酸还原酶 NR/(μg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	5.46±0.07 ^a	5.47±0.27 ^a	4.89±0.01 ^b	5.13±0.41 ^{ab}	5.33±0.18 ^{ab}	3.20	0.062
亚硝酸还原酶 NIR/(mg·g ⁻¹ ·d ⁻¹)	0.55±0.01 ^c	0.61±0.02 ^{ab}	0.55±0.01 ^c	0.60±0.02 ^b	0.63±0.01 ^a	17.34	0.000

注:不同字母的标注表示表示 Duncan 多重比较结果,不同字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。相同字母表示差异不显著

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments based on Duncan's multiple range test at $P<0.05$. The same letter indicates no significant difference

一组中,MBC 的 Norm 值最高(3.15),其余指标均处于其 10% 的范围内,但由于 MBC 与其他指标均显著相关,最终保留 MBC 进入 MDS。第二组中,NH₄⁺-N 的 Norm 值最高(1.53),NR 处于其 10% 的范围内,但二者显著相关(图 1),因此保留 NH₄⁺-N。第三组和第四组中,仅包含 URE 和 TN,因此均直接入选(表 3)。

最终确定 MBC、NH₄⁺-N、URE 和 TN 作为建立 MDS 的核心指标。

分别对物理、化学、生物指标进行主成分分析。物理指标中,仅提取 1 个特征值大于 1 的主成分,累积方差贡献率为 93.13%,其中 SP、BD 和 SWC 的因子载荷的绝对值 ≥ 0.5 。化学指标中,提取 3 个特征值大于 1 的主成分,累计方差贡献率为 87.56%,其中 pH、SOC、DON、DOC、NO₃⁻-N、DTN、NH₄⁺-N、TP 和 TN 的因子载荷的绝对值 ≥ 0.5 。生物指标中,提取 2 个特征值大于 1 的主成分,累积贡献率达为 81.82%,其中 MBC、PRO、MBN、NIR、NR 和 URE 因子载荷绝对值 ≥ 0.5 (表 4)。

根据 MDS 筛选原则,选择 Norm 值处于最高值 10% 范围内的指标,随后分析其相关性(图 1),最终确定 SP、pH、NH₄⁺-N、TN、PRO 和 NR 作为 RMDS 的参选指标(表 4)。

2.3 土壤质量指数

采用线性和非线性评分法分别计算 TDS、MDS 和 RMDS 各土壤指标的隶属度,从而获得指标评分。对 MDS 进行主成分分析,以提取各指标的公因子方差,并据此计算各指标权重。各评分曲线类型、线性方程和非线性方程参数及所选指标的权重见(表 5)。

2.4 土壤质量评价方法的比较与筛选

为确定最优的土壤质量评价模型,本研究基于 TDS、MDS 和 RMDS,结合线性非线性评分方法,构建了 6 种 SQI 模型,结果如图 2 所示。无论采用 TDS、MDS 还是 RMDS 指标筛选方法,基于线性评分模型的 SQI 均表现出较高的 F 值和 CV 值(10.39%~17.86%),整体高于非线性评分模型(6.09%~10.84%)。表明其敏感性优于非线性 SQI。相关性分析结果表明,六种 SQI 模型之间均呈显著正相关(图 3),且 RMDS 比 MDS 的差异更小。SQI-LRM 模型的线性回归拟合精度 R² 达 0.9049(图 3)。因此,SQI-LRM 模型具有最高的精度,可作为替代 TDS 的方法用于土壤质量评价。

表 3 最小数据集的主成分分析结果

Table 3 Results of principal component analysis of the minimum data set

指标 Indicators	主成分组 (Principal component) 最小数据集 (MDS)						
	PC1	PC2	PC3	PC4	COM	Norm	Group
MBC	0.97	0.09	-0.11	-0.04	0.96	3.15	1
PRO	0.96	-0.08	0.20	0.04	0.98	3.13	1
SWC	0.96	0.05	0.18	-0.08	0.95	3.10	1
DON	0.94	0.02	0.30	0.01	0.97	3.06	1
MBN	0.93	0.26	-0.15	0.13	0.98	3.06	1
SOC	0.93	0.02	-0.23	0.16	0.94	3.03	1
pH	-0.93	-0.07	0.30	0.11	0.97	3.03	1
SP	-0.91	0.08	-0.10	0.06	0.85	2.95	1
BD	0.91	-0.08	0.10	-0.06	0.85	2.95	1
DOC	0.83	0.13	-0.34	-0.35	0.95	2.74	1
NIR	-0.73	0.55	-0.23	-0.01	0.89	2.56	1
DTN	0.72	0.37	0.56	0.06	0.98	2.52	1
NO ₃ ⁻ -N	-0.72	0.34	0.48	-0.02	0.87	2.48	1
NH ₄ ⁺ -N	0.19	0.84	0.25	0.22	0.84	1.53	2
NR	0.24	0.79	-0.24	-0.20	0.96	1.46	2
TP	0.22	-0.68	-0.18	-0.30	0.64	1.35	2
URE	0.11	0.20	-0.61	0.73	0.96	0.93	3
TN	0.34	-0.54	0.26	0.69	0.95	1.45	4
特征值 Eigenvalue	10.46	2.69	1.67	1.38			
方差 (%) Variance	58.12	14.96	9.28	7.72			

注: PC, 主成分; COM, 公因子方差; Group, 主成分组; 所有土壤指标均采用表 1 中的相同单位表示。

Note: PC, principal component; COM, communality; Group, principal component group. All soil indicators are expressed in the same units as shown in Table 1.

2.5 不同植被类型下土壤质量的变化

基于上述筛选确定的 SQI-LRM 模型, 各植被类型的土壤质量由高到低依次为: 云杉林地 (0.53) > 沙棘林地 (0.45) > 苜蓿草地 (0.44) > 小麦地 (0.43) > 撂荒裸地 (0.39), 云杉林地的 SQI 显著高于其他植被类型 ($P < 0.001$)。沙棘林地、苜蓿草地和小麦地之间差异不显著, 但三者均显著高于撂荒裸地。以撂荒裸地为对照, 云杉林地、沙棘林地、苜蓿草地和小麦地的 SQI 分别提高了 35.9%, 15.4%、12.8% 和 10.3%, 表明植被恢复在改善研究区土壤质量方面具有积极作用, 其中云杉林地的改善效果最为显著。

2.6 不同植被类型下土壤理化性质和土壤质量的关系

为进一步阐明不同植被类型下土壤质量的驱动机制, 本研究采用 PLS-PM 分析土地利用方式及

土壤理化性质对 SQI 的影响。模型整体拟合度良好 ($GOF = 0.876$), 说明其能够较好地解释 SQI 的变异 (图 4)。

结果显示 (图 4a), 植被类型对 SQI 的直接影响不显著, 但对土壤物理性质和化学性质均具有显著的负向作用。其中, 不同植被类型主要通过改变土壤化学性质对 SQI 产生间接正向影响, 土壤物理性质与化学性质之间存在显著正相关, 物理性质对生物性质有显著正向作用, 而化学性质对生物性质的正向作用更强。尽管植被类型对生物性质的直接作用不显著, 但生物性质对 SQI 的直接路径系数高达 0.939, 且其总效应在所有因子中最大, 表明不同植被类型主要是通过影响土壤化学性质进而影响生物性质, 最终影响 SQI。模型可解释 SQI 变异的 93%, 表明其拟合效果较好。

总效应分解结果进一步表明 (图 4b), 化学性质对 SQI 的贡献次于生物性质, 而物理性质的总效应相对较弱。

随机森林分析表明, pH、PRO 和 TN 是影响土壤质量的关键指标 (图 5a), 其中 pH 值在各化学性质中对土壤质量指数 (SQI) 的贡献最大。多元线性回归分析进一步验证了 pH 对 PRO 具有显著的调控作用 (图 5b)。

3 讨论

3.1 不同植被类型对土壤质量相关指标的影响

不同植被类型因其根系特征与植被覆盖度的差异, 导致土壤微环境发生变化, 进而显著影响土壤理化性质。本研究区 pH 值普遍偏高, 土壤整体呈弱碱性, 小麦地常年耕作形成犁地层破坏表层土壤结构, 导致土壤压实造成容重增加而孔隙度降低, 加之作物蒸腾需水量大导致土壤水分消耗增加不利于土壤水分的积累^[18]。此外, 小麦地长期施用尿素作为氮肥导致土壤盐分积累而土壤 pH 值升高^[19], 但施肥也在短期内激增了土壤无机氮含量, 在本研究中, NR 和 NIR 活性在小麦地达到最高值。这是由于 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 是硝化反硝化作用的底物, 而 NR 和 NIR 又是硝化反硝化作用关键酶, 其活性随底物的变化而变化。

相比之下, 林木茂密的根系在土壤中的机械穿插一定程度上可以增加土壤孔隙度并显著提升水分入渗速率, 而较高的有机碳含量以及较少的人为

表 4 修正后的最小数据集的主成分分析结果

Table 4 Results of principal component analysis of the revised minimum data set.

指标 Indicators	主成分(Principal component)修正后的最小数据集(Revised minimum dataset)														
	物理 Physical				化学 Chemical						生物 Biological				
	PC1	COM	Norm	Group	PC1	PC2	PC3	COM	Norm	Group	PC1	PC2	COM	Norm	Group
SP	−0.98	0.97	1.65	1											
BD	0.98	0.97	1.65	1											
SWC	0.93	0.86	1.55	1											
pH					−0.96	0.06	0.22	0.97	2.08	1					
SOC					0.96	−0.04	0.02	0.92	2.06	1					
DON					0.91	0.19	0.25	0.93	2.00	1					
DOC					0.88	−0.06	−0.44	0.96	1.96	1					
NO ₃ [−] -N					−0.77	0.46	0.16	0.83	1.79	1					
DTN					0.67	0.60	0.31	0.90	1.71	1					
NH ₄ ⁺ -N					0.16	0.88	−0.04	0.80	1.31	2					
TP					0.19	−0.77	0.10	0.63	1.17	2					
TN					0.29	−0.27	0.88	0.93	1.21	3					
MBC											0.96	0.02	0.93	1.79	1
PRO											0.96	−0.23	0.98	1.81	1
MBN											0.96	0.25	0.98	1.80	1
NIR											−0.73	0.56	0.84	1.51	1
NR											0.31	0.74	0.65	1.07	2
URE											0.19	0.71	0.54	0.93	2
特征值 Eigenvalue	2.79				4.63	2.05	1.21				3.44	1.47			
方差 Variance/%	93.13				51.38	22.72	13.45				57.3	24.52			

注:所有土壤指标均采用表 1 中的相同单位表示
Note: All soil indicators are expressed in the same units as shown in Table 1

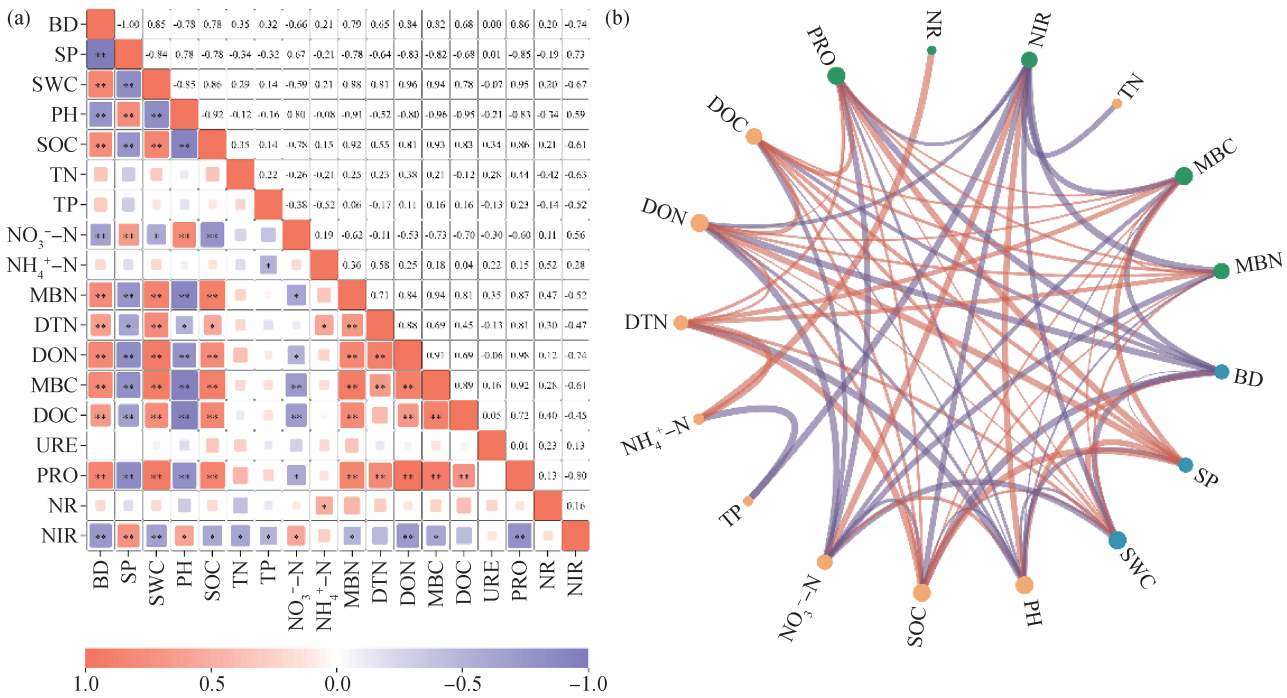


图 1 总数据集中各土壤指标的 Pearson 相关性分析

Fig. 1 The Pearson correlation of soil indicators of the total data set

注:**表示 $P < 0.01$, *表示 $P < 0.05$
Note:respectively: ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

表 5 不同评分曲线的类型,线性、非线性方程的参数和总数据集、最小数据集、修正后的最小数据集中各指标计算权重

Table 5 Types of scoring curves, parameters for linear and non-linear equations, and calculated weights for indicators in the TDS, MDS, and RMDS

指标 Indicators	评分曲线 Scoring curve	非线性 Non-linear		线性 Linear		权重 Weight		
		均值 Mean	斜率 Slope	最大值 $X_{\max}$	最小值 $X_{\min}$	总数据集 TDS	最小数据集 MDS	修正后的最小数据集 RMDS
BD	越少越好	1.17	2.5	1.8	0.6	0.052		
SP	越多越好	55.74	-2.5	65	45	0.052		0.33
SWC	越多越好	13.32	-2.5	26	6	0.059		
pH	越少越好	7.58	2.5	10	4.5	0.060		0.12
SOC	越多越好	8.79	-2.5	16	4	0.058		
TN	越多越好	0.65	-2.5	1.0	0.3	0.059	0.31	0.10
TP	越多越好	0.41	-2.5	0.6	0.2	0.039		
NO_3^- -N	越多越好	24.25	-2.5	40	9	0.054		
NH_4^+ -N	越多越好	13.44	-2.5	20	8	0.052	0.32	0.10
MBN	越多越好	41.24	-2.5	72	16.3	0.060		
DTN	越多越好	93.23	-2.5	150	60	0.060		
DON	越多越好	55.54	-2.5	86	40	0.060		
MBC	越多越好	344.71	-2.5	610	180	0.059	0.17	
DOC	越多越好	0.62	-2.5	1.1	0.3	0.058		
URE	越多越好	1.22	-2.5	1.8	0.6	0.059	0.21	0.17
PRO	越多越好	7.29	-2.5	13.6	3	0.060		0.17
NR	越多越好	5.26	-2.5	8	3	0.043		
NIR	越多越好	0.59	-2.5	1	0.2	0.055		

注:所有土壤指标均采用表1中的相同单位表示

Note: All soil indicators are expressed in the same units as shown in Table 1

干扰有利于改善土壤孔隙结构^[20]。林地丰富的植被多样性、发达的根系分布和快速的群落演替过程有利于枯落物的积累,为微生物活性提供了适宜的生境,可以减少土壤水分的蒸发并显著提升SWC和酶活性^[21]。而大量枯枝落叶及腐殖质经根际微生物分解后,其根系分泌物和残留物为土壤氮素循环过程提供了丰富的底物,从而加速有机质的输入的并促进氮素的富集^[22],同时,枯落物分解过程中释放的大量有机酸向土壤中提供氢离子,导致土壤pH值下降^[23]。此外,围封草地可以通过截留和减少水分蒸发来提高酶活性从而增强氮素转化能力,加之紫花苜蓿的强大的固氮效应积累了大量的氮素。因此,苜蓿草地的土壤TN含量显著高于其他处理,Zhou等^[24]在宁夏典型黄土丘陵区的研究也印证了这一观点。

3.2 不同植被类型的土壤质量评价

6种SQI之间均呈现显著正相关且变化趋势一致(图3)。在定量评估不同植被类型对土壤质量的影响时表现出高敏感性和精准度。前人在黄土高原的研究所构建的MDS在一定程度上存在指标冗余或土壤功能覆盖不完整的情况,这是由于传统MDS仅保留部分土壤功能而导致评价结果偏

差^[25]。为了提高评价结果的客观性和准确性,本研究通过RMDS所建立的数据集有效整合了土壤的整体功能,确保全覆盖理化 and 生物性质,特别是额外筛选出的关键生物指标PRO在土壤氨基酸和蛋白质等有机化合物的转化过程中发挥着至关重要的作用,是土壤氮素循环的重要生物组成^[26],Roy等^[27]的研究也为RMDS的可靠性提供了理论支撑。通过进一步对比不同评分方法可知,线性评分方法具有更高的F值和CV值,在黄土丘陵地区,线性评分方法可能对土壤质量的响应更为敏感。Lu等^[28]在黄土高原的研究中也表明,线性评分方法在转化和归一化土壤质量指标方面具有一定的优势。本研究结果发现,基于RMDS和线性评分方法计算的SQI-LRM具有最高的拟合精度(图3),不仅能够有效代表所有指标构建的TDS,并且在进行陇中黄土高原和相似区域的土壤质量评价工作时具有一定的适用性和参考价值。

综合来看,不同植被类型的土壤质量存在着显著差异。无论采用哪种计算方法,SQI最高值均出现在云杉林地,不同植被类型的SQI整体呈现出PA>HR>MS>WF>AL的趋势,该结果与张嘉宁^[29]在黄土高原丘陵区的研究结论一致。沙棘林地和苜蓿草地虽然土壤质量略低于云杉林地,但沙

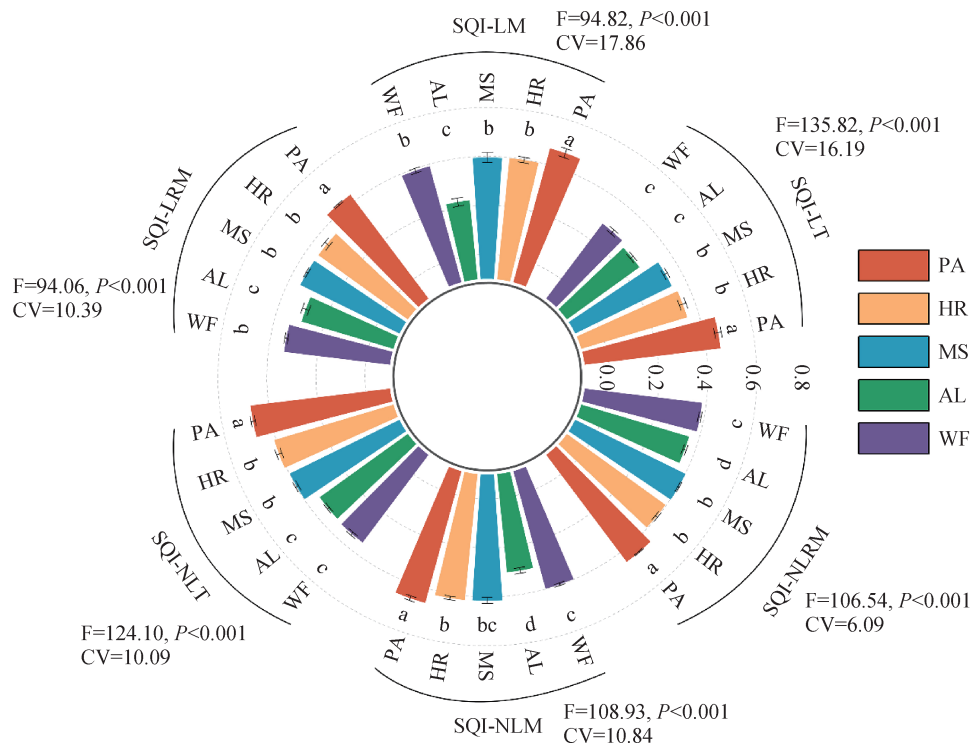


图 2 不同植被类型下土壤质量指数的比较

Fig. 2 Comparison of the Soil quality index under different vegetation types.

注:本研究比较了六种土壤质量指数(SQI):线性评分-总数据集(SQI-LT)、线性评分-最小数据集(SQI-LM)、线性评分-修订最小数据集(SQI-LRM)、非线性评分-总数据集(SQI-NLT)、非线性评分-最小数据集(SQI-NLM)和非线性评分-修正后最小数据集(SQI-NLRM)。较高的SQI值表示更好的土壤功能和土壤过程,反映出不同植被类型对土壤健康的积极影响

Note: This study compared six soil quality indices (SQI): linear scoring-total dataset (SQI-LT), linear scoring-minimum dataset (SQI-LM), linear scoring-revised minimum dataset (SQI-LRM), nonlinear scoring-total dataset (SQI-NLT), nonlinear scoring-minimum dataset (SQI-NLM), and nonlinear scoring-revised minimum dataset (SQI-NLRM). Higher SQI values indicate better soil functions and soil processes, reflecting the positive effects of different vegetation types on soil health

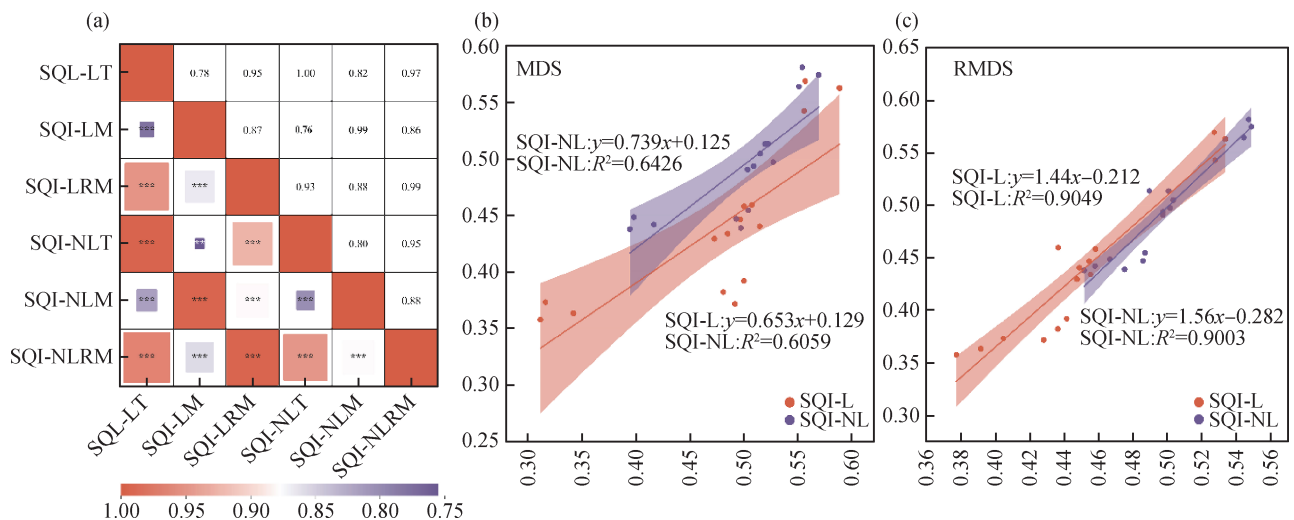


图 3 在两种评分模型 SQI-NL 和 SQI-L 下,不同数据集(MDS、RMDS 与 TDS)之间的相关矩阵及线性拟合指数

Fig. 3 Correlation matrices and linear fitting relationships among MDS, RMDS and TDS under SQI-NL and SQI-L models

注:**, $P<0.01$;*, $P<0.05$

Note:**, $P<0.01$;*, $P<0.05$

棘和苜蓿对黄土高原干旱胁迫的适应能力较强,在拦蓄水土和固氮方面发挥着不可替代的作用。相比之下,小麦地由于较高的 pH 值,加之人为干扰频

繁破坏了土壤团聚体结构,加速了有机质的矿化分解,即使每年大量施入肥料也仅能补偿部分损失。撂荒裸地因植被覆盖度低,枯落物归还少,且缺乏

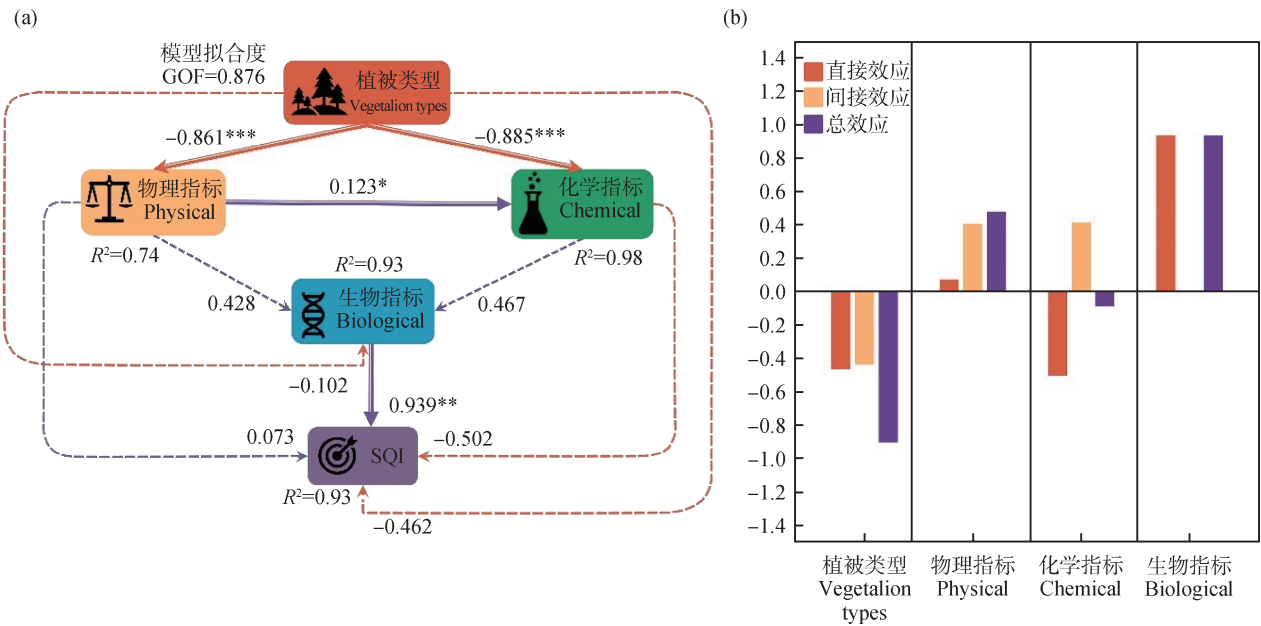


图4 偏最小二乘路径分析揭示植被类型变化对土壤质量影响的作用路径

Fig. 4 Pathways exhibiting the impact of vegetation types change on soil quality by partial least squares route analysis

注:各预测变量的显著性阈值如图所示。 R^2 表示解释的方差百分比。箭头旁的数字为标准化路径系数。实线表示显著影响,虚线表示影响不显著。橙色和紫色分别表示负相关和正相关关系:***表示 $P<0.001$,**表示 $P<0.01$,*表示 $P<0.05$

Note: The significance thresholds of the predictor variables are shown in the figure. R^2 represents the percentage of explained variance. The numbers next to the arrows indicate standardized path coefficients. Solid lines indicate significant effects, whereas dashed lines indicate non-significant effects. Orange and purple represent negative and positive correlations, respectively. *** denotes $P<0.001$, ** denotes $P<0.01$, and * denotes $P<0.05$

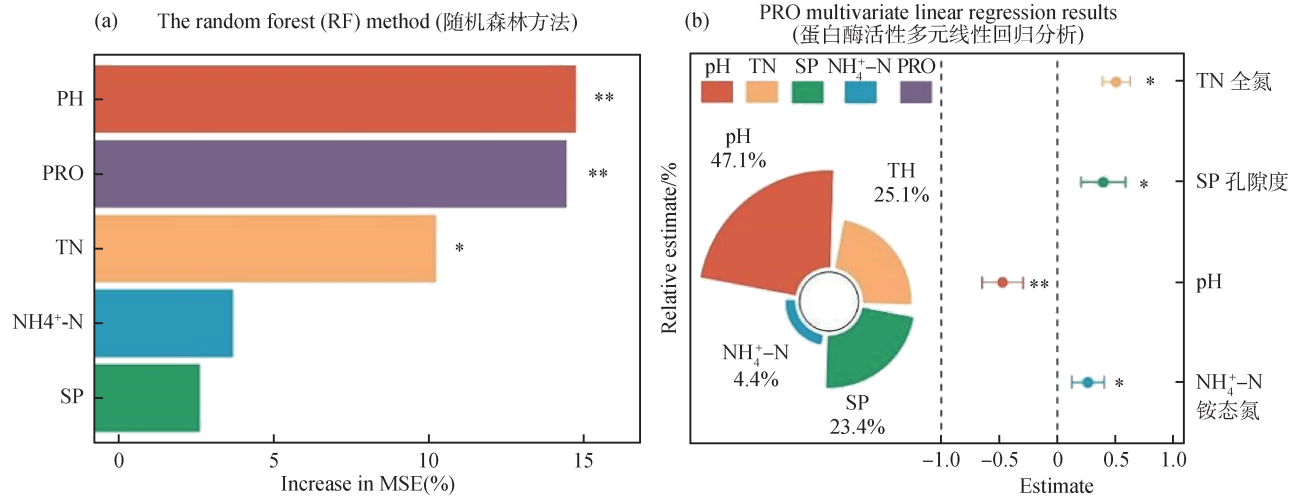


图5 各单项指标对土壤质量的贡献及PRO多元线性回归分析结果

Fig. 5 Individual indicators' contributions to soil quality and the results of the PRO multivariate linear regression

注**表示 $P<0.01$, *表示 $P<0.05$

Note: ** $P<0.01$, * $P<0.05$

人为培肥,土壤养分含量低,表层土壤呈板结硬化现象,对不良土壤结构的调节能力有限,故土壤质量低于林地和草地^[30]。然而,在黄土丘陵区,小麦和玉米仍是主要的农作制度。尽管小麦地的土壤质量明显低于云杉林地,但在保障区域粮食生产功能的前提下,通过保护性耕作等措施有助于缓解农田土壤质量下降趋势^[31],并兼顾生态与经济效益。

3.3 不同植被类型影响土壤质量的关键驱动机制

本研究采用偏最小二乘结构方程模型(PLS-PM)进行分析,结果表明(图4),土壤物理性质和化学性质对生物学性质均具有显著的正向影响,说明良好的理化性质有助于改善土壤结构、提高养分有效性并促进微生物活性。不同植被类型通过影响土壤化学性质进而调控生物性质,最终影响土壤质

量。其中,土壤pH、TN及PRO是驱动研究区土壤质量变化的关键影响因子。pH通过影响土壤肥力深刻影响着土壤养分有效性,被视为化学性质中最综合的因素^[32]。土壤酶活性在调节养分循环和转化及有机质输入方面至关重要,能够准确的反映土壤健康,其中土壤PRO作为氮循环过程中的重要生物组成,已被广泛应用于土壤质量评价中^[33]。这与Xiao等^[34]基于PLS-PM模型在紫鹊界古代梯田不同土地利用方式对土壤质量的影响路径总体较吻合,但在驱动因素方面存在明显差异。这可能与区域成土母质和气候背景有关。已有研究指出^[35],该区域土壤养分含量低,水土流失严重,抗侵蚀能力有限,pH偏高、氮素匮乏及酶活性受限是制约黄土高原土壤质量提升的重要限制因素。

多元线性回归分析结果显示,pH值主要通过影响酶促反应速率作用于土壤质量。部分酶促反映对pH的变化较为敏感,仅能在较窄的pH范围内保持活性。pH值一方面通过改变酶空间构象和氨基酸残基微环境来影响酶催化活性,另一方面,通过改变酶与土壤颗粒之间的结合状态来影响酶活性。无论是偏碱性还是酸性土壤,均会对PRO活性产生抑制作用^[36]。因此,pH值被认为是调控蛋白酶活性的重要因子,本研究的结果进一步验证了这一观点。土壤pH主要受气候和成土母质影响,通过人为管理措施对pH的调节收效甚微。因此,实施科学合理的耕作和适当增加林草地的占比不仅可以优化植被群落结构,提高有机质含量并增强微生物活性^[37],还可以为改善土壤质量和维持陇中黄土高原区域生产力提供理论支持。综上所述,本研究揭示了不同植被类型通过调控土壤化学性质中的pH值并影响生物性质中的PRO来驱动土壤质量变化,为陇中黄土高原土壤质量评价和植被恢复管理提供了科学依据。本研究仍存在一定的局限性,仅采集了0~20 cm表层土壤,采样深度单一,未能反映深层土壤质量的变化特征。未来研究可结合多深度采样、长期定位监测及分子生物学手段,进一步揭示不同植被类型影响土壤质量的微观机制。

4 结论

本研究基于RMDS从18个土壤指标中筛选出SP,pH,TN,NH₄⁺-N,PRO,NR六项关键指标,并结合线性评分方法的SQI-LRM模型可有效替代基

于TDS建立的模型,在保证准确的反映土壤质量变化的同时,显著降低了评价成本。不同植被类型对土壤质量的改善效果差异显著,其中云杉林地的提升效果最为突出,这种提升主要归因于不同植被类型通过影响土壤化学性质,尤其是pH,进而影响土壤生物学性质(如PRO活性),最终驱动土壤质量的整体改善。建议未来应采用林农间作或秸秆还田等措施,以定向改善土壤化学与生物学性质,实现土地可持续利用。

参考文献

- [1] DORAN J W, PARKIN T B. Defining and assessing soil quality [J]. Defining soil quality for a sustainable environment, 1994, 35: 1-21
- [2] 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, (12): 2292-2296
GONG J, CHEN L D, FU B J, et al. Effects of land use and vegetation restoration on soil quality in a small watershed of the Loess Hilly Region, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(12): 2292-2296
- [3] 任启文, 毕君, 李联地, 等. 冀北山地3种森林植被恢复类型对土壤质量的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(10): 1818-1824
REN Q W, BI J, LI L D, et al. Effects of three forest vegetation restoration types on soil quality in mountainous areas of northern Hebei [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(10): 1818-1824
- [4] 单钰洁. 黄土高原不同土地利用类型土壤质量评价及障碍因子分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2023: 15-20
SHAN Y J. Soil quality assessment and obstacle factor analysis under different land use types on the Loess Plateau [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2023: 15-20
- [5] 李鑫, 张文菊, 邬磊, 等. 土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J]. 中国农业科学, 2021, 54(14): 3043-3056
LI X, ZHANG W J, WU L, et al. Advance in indicator screening and methodologies of soil quality evaluation [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(14): 3043-3056
- [6] MIHOUB A, KOULL N, HELIMI S, et al. Developing scoring functions for soil quality to assess land suitability for irrigated wheat in Southern Algeria [J]. Soil Use and Management, 2022, 38(1): 262-276
- [7] YU P, HAN D, LIU S, et al. Soil quality assessment under different land uses in an alpine grassland [J]. Catena, 2018, 171: 280-287
- [8] BÜNEMANN E K, BONGIORNO G, BAI Z, et al. Soil quality-A critical review [J]. Soil biology and biochemistry, 2018, 120: 105-125
- [9] 周瑶, 马红彬, 贾希洋, 等. 不同生态恢复措施下宁夏黄土丘陵典型草原土壤质量评价[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 102-110

- ZHOU Y, MA H B, JIA X Y, et al. Soil quality evaluation of typical steppe under different ecological restoration measures in loess hilly region of Ningxia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(18):102-110
- [10] 王淑琴, 罗珠珠, 牛伊宁, 等. 基于最小数据集的黄土高原半干旱区苜蓿地土壤质量评价[J]. 中国草地学报, 2023, 45(07):81-90
- WANG S Q, LUO Z Z, NIU Y N, et al. Soil quality evaluation of alfalfa land in semi-arid region of Loess Plateau based on minimum data set[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(07):81-90
- [11] 姚瑶, 李广, 王钧, 等. 不同耕作措施下旱作春小麦农田二氧化碳排放模拟及敏感性分析[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(3):171-178
- YAO Y, LI G, WANG J, et al. Simulation and sensitivity analysis of carbon dioxide emissions under different tillage systems in dryland spring wheat fields[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(3):171-178
- [12] YUAN J, YAO Y, GUAN Y, et al. Effects of land use patterns on soil properties and nitrous oxide flux on a semi-arid environmental conditions of Loess Plateau China[J]. Global Ecology and Conservation, 2024, 51:e02899
- [13] 吕奕彤, 于爱忠, 吕汉强, 等. 绿洲灌区玉米农田土壤团聚体组成及其稳定性对绿肥还田方式的响应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(7):1194-1204
- LYU Y T, YU A Z, LYU H Q, et al. Composition and stability of soil aggregates in maize farmlands under different green manure utilization patterns in an oasis irrigation area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(7):1194-1204
- [14] CHADDY A, MELLING L, ISHIKURA K, et al. Soil N₂O emissions under different N rates in an oil palm plantation on tropical peatland[J]. Agriculture, 2019, 9(10):213
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 20-30
- GUAN S Y. Soil Enzymes and Their Research Methods[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986:20-30
- [16] 朱鸣鸣, 徐镀涵, 陈光燕, 等. 基于最小数据集的喀斯特不同利用方式下土壤质量评价[J]. 草地学报, 2021, 29(10):2323-2331
- ZHU M M, XU D H, CHEN G Y, et al. Assessment on soil quality under different land use patterns in karst area based on minimum data set[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(10):2323-2331
- [17] 黄梦真, 鲁瑞洁, 赵瑾, 等. 柴达木盆地典型风蚀区土壤质量评价[J]. 中国沙漠, 2023, 43(3):199-209
- HUANG M Z, LU R J, ZHAO J, et al. Assessment of soil quality in typical wind erosion area of Qaidam Basin[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(3):199-209
- [18] 金慧芳, 史东梅, 钟义军, 等. 红壤坡耕地耕层土壤质量退化特征及障碍因子诊断[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20):84-93
- JIN H F, SHI D M, ZHONG Y J, et al. Diagnosis of obstacle factors and degradation characteristics of cultivated-layer quality for red soil sloping farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(20):84-93
- [19] 邱巡巡, 曹广超, 赵青林, 等. 基于最小数据集的祁连山南坡不同土地利用方式土壤质量评价[J]. 草地学报, 2024, 32(9):2952-2961
- QIU X X, CAO G C, ZHAO Q L, et al. Assessment of soil quality under different land use practices on the southern slope of Qilian Mountains based on minimum data set[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(9):2952-2961
- [20] GAN F L, SHI H L, YAN Y J, et al. Soil quality assessment of karst trough valley under different bedrock strata dip and land-use types, based on a minimum data set[J]. Catena, 2024, 241:108048
- [21] 刘畅, 张建军, 张海博, 等. 晋西黄土区退耕还林后土壤入渗特征及土壤质量评价[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5):101-107
- LIU C, ZHANG J J, ZHANG H B, et al. Characteristics of soil infiltration and soil quality evaluation after conversion of farmland to forest in loess region of western Shanxi Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5):101-107
- [22] YU P J, LIU J L, TANG H Y, et al. Establishing a soil quality index to evaluate soil quality after afforestation in a karst region of Southwest China[J]. Catena, 2023, 230:107237
- [23] QIANG F F, SHENG C C, ZHANG J Q, et al. Soil quality variation under different land use types and its driving factors in Beijing[J]. Forests, 2024, 15(6):993
- [24] ZHOU Y, MA H B, XIE Y Z, et al. Assessment of soil quality indexes for different land use types in typical steppe in the loess hilly area, China[J]. Ecological Indicators, 2020(118):106743
- [25] BAKHSHANDEH E, HOSSIENI M, ZERAATPISHEH M, et al. Land use change effects on soil quality and biological fertility: A case study in northern Iran[J]. European Journal of Soil Biology, 2019(95):103119
- [26] 叶子壮, 王松燕, 陆潇, 等. 秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(4):2292-2303
- YE Z Z, WANG S Y, LU X, et al. Effects of straw retention, film mulching, and nitrogen input on soil quality in dryland wheat field[J]. Environmental Science, 2024, 45(4):2292-2303
- [27] ROY D, DATTA A, JATH S, et al. Impact of long term conservation agriculture on soil quality under cereal based systems of North West India[J]. Geoderma, 2022, 405:115391
- [28] LU H, CHEN X, MA K, et al. Soil health assessment under different soil and irrigation types in the agro-pastoral ecotone of northern China[J]. Catena, 2024, 235:107655
- [29] 张嘉宁. 黄土高原典型土地利用类型的土壤质量评价研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015:92-94
- ZHANG J N. Research on soil quality evaluation in the Loess Plateau under different land use type[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2015:92-94
- [30] 马芊红, 张光辉, 耿韧, 等. 黄土高原纸坊沟流域不同土地利用类型土壤质量评价[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4):30-

- 35,42
MA Q H, ZHANG G H, GENG R, et al. Evaluation on soil quality of different land use types in Zhifanggou watershed of the Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(4):30-35,42
- [31] 杜梦寅,袁建钰,李广,等. 保护性耕作对黄土高原半干旱区农田土壤 N_2O 排放的影响[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(2): 493-501
DU M Y, YUAN J Y, LI G, et al. Effects of protective measures on N_2O emission from farmland soil in a semi-arid area of the Loess Plateau [J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(2): 493-501
- [32] 朱家晟,秦富仓,李龙,等. 黄土丘陵区人工林典型林分土壤肥力综合评价[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(2):9-16
ZHU J Z, QIN F C, LI L, et al. Comprehensive evaluation on soil fertility of typical plantations in Loess Hilly Region [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(2):9-16
- [33] FAN Y N, ZHANG C, HU W Y, et al. Development of soil quality assessment framework: A comprehensive review of indicators, functions, and approaches [J]. *Ecological Indicators*, 2025, 172:113272
- [34] XIAO P Y, HAO Y Y, LIU Y J, et al. Mechanisms of land use change effects on soil quality in ancient terraces based on the minimum data set approach [J]. *Catena*, 2025, 254:108990
- [35] 欧阳硕,庞国伟,袁笑甜,等. 黄土高原土壤质量评价及其主导影响因素[J]. *土壤学报*, 2025, 62(5):1635-1650
OUYANG S, PANG G W, YUAN X T, et al. Soil quality evaluation and its dominant influencing factors on the Loess Plateau [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(5):1635-1650
- [36] 王涵,王果,黄颖颖,等. pH变化对酸性土壤酶活性的影响[J]. *生态环境*, 2008, 17(6):2401-2406
WANG H, WANG G, HUANG Y Y, et al. The effects of pH change on the activities of enzymes in an acid soil [J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(6):2401-2406
- [37] 蒋丛泽,受娜,高玮,等. 青藏高原东北缘不同土地利用类型土壤质量综合评价[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(12):3279-3286
JIANG C Z, SHOU N, GAO W, et al. Comprehensive evaluation of soil quality of different land use types on the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(12):3279-3286

(责任编辑 彭露茜)