

许正强,王兴东,万仲武,等.柠条(*Caragana korshinskii*)固沙林恢复过程中表层土壤有机碳累积特征及其驱动机制[J].中国沙漠,2026,46(4):343-353.

柠条(*Caragana korshinskii*)固沙林恢复过程中 表层土壤有机碳累积特征及其驱动机制

许正强¹,王兴东²,万仲武²,王瑞霞²,杨学龙²

(1.兰州植物园,甘肃 兰州 730070; 2.宁夏灵武白芨滩国家级自然保护区管理局/宁夏白芨滩森林生态定位观测研究站,宁夏 灵武 750400)

摘要: 植被恢复是提升荒漠化地区土壤碳汇功能的重要途径,但其土壤有机碳(SOC)积累过程及驱动机制尚不明确。以毛乌素沙地西南缘不同恢复年限(0、15、28、54、70年)人工柠条(*Caragana korshinskii*)固沙林为对象,系统分析植被恢复过程中凋落物蓄积、土壤理化性质、生态化学计量特征及SOC储量的变化规律,并结合多元回归和偏最小二乘路径模型(PLS-PM)解析SOC储量形成机制。结果表明:随着植被恢复,凋落物蓄积量、土壤含水量、pH值、全氮(TN)含量显著提高($P<0.05$),其中凋落物蓄积量和土壤含水量增幅最大;土壤全磷(TP)含量呈先升后降趋势,并在第28年达到峰值。SOC含量和储量均随恢复年限显著增加($P<0.05$),第70年分别较流沙阶段提高14.56倍和14.97倍。SOC储量积累速率呈单峰型变化趋势,在第54年达到最大值($0.0061\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。土壤化学计量比随植被恢复显著增加($P<0.05$)。线性回归表明,凋落物蓄积量、土壤含水量、pH值、TN及化学计量比与SOC储量显著正相关($P<0.05$)。多元回归结果显示,土壤化学计量特征、TN和凋落物蓄积量分别解释SOC储量变异的30.06%、27.09%和13.64%,其中C:N、C:P和N:P化学计量比是影响土壤有机碳积累的重要预测因子。PLS-PM进一步表明,植被恢复通过直接提高TN含量,并通过TN与凋落物协同调控土壤化学计量特征,间接促进SOC储量积累。固沙植被恢复显著增强沙地生态系统土壤碳汇能力,SOC积累具有明显阶段性特征,其形成受养分累积与化学计量调控共同驱动。

关键词: 植被恢复; 土壤有机碳储量; 生态化学计量; 柠条(*Caragana korshinskii*)灌丛; 毛乌素沙地

文章编号: 1000-694X(2026)04-343-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00077

中图分类号: S15

文献标志码: A

0 引言

在全球气候变化与土地退化加剧的背景下,通过生态恢复措施提升陆地生态系统碳汇功能已成为可持续发展研究的核心议题^[1]。中国北方沙区作为典型的生态脆弱带,土壤贫瘠、有机碳本底匮乏,且风蚀等过程易导致显著的碳损失。在该区域实施的固沙植被恢复(如人工造林、封禁保护)虽被广泛认为能增加土壤有机碳储量^[2-3],但植被恢复究竟如何调控土壤有机碳积累过程,尤其是土壤碳、氮、磷等元素之间的化学计量平衡在其中扮演何种角色,其内在机制尚缺乏系统认识。

土壤元素化学计量比(C:N:P)是调控土壤有机

碳固存过程的重要因素^[4]。土壤化学计量特征通过影响有机质分解、转化与稳定等关键过程,在生态系统养分循环和功能维持中发挥重要作用,因此被认为是理解生态系统动态变化及预测其对全球环境变化响应的重要土壤属性^[5]。植被恢复作为改善退化生态系统结构与功能的重要措施,能够显著调节土壤化学计量特征并提升养分水平。大量研究表明,无论是人工造林还是自然封育,均可有效促进土壤有机碳和全氮储量的积累,从而增强土壤养分保持能力与生态系统碳汇功能^[6-7]。然而,土壤养分的增加并非线性过程,碳、氮、磷等关键元素在恢复过程中的积累速率并不同步,导致其化学计量关

收稿日期:2026-05-23; 改回日期:2026-06-22

资助项目:银川市白芨滩防沙治沙用沙科技创新团队项目(2023CXTD03);宁夏重点研发计划项目(2025BEG01008)

作者简介:许正强(1970—),男,甘肃镇原人,高级工程师,主要从事园林植物栽培应用研究。E-mail: xzq006@126.com

系发生深刻变化。科尔沁沙地的长期恢复研究显示,土壤有机碳和全氮含量显著提升,而全磷含量变化微弱或略有下降,致使土壤碳磷比与氮磷比随恢复年限显著升高^[8]。类似现象在黄土高原自然植被恢复序列中亦有报道,表现为恢复后期土壤可能由早期的氮限制转变为磷限制^[9-10]。这些化学计量比的变化不仅表征生态系统潜在的养分限制格局,更可能通过调控微生物活性与群落结构,深刻影响土壤有机质的转化与稳定过程。

植被恢复引起的化学计量比变化,可通过多种途径调控土壤有机碳的积累过程。首先,化学计量比(如C:N:P)直接决定了微生物分解有机质时面临的资源供给环境。较低的C:N比通常促进有机质矿化,而较高的C:P和N:P则反映磷有效性限制,可减缓微生物分解速率,从而有利于碳的积累^[11]。其次,长期化学计量比的变化会筛选微生物群落的生活史策略。在恢复后期,寡营养型细菌的相对丰度增加,这类微生物具有较高的碳利用效率,能促进微生物残体碳以一种稳定的有机碳形态积累^[12-13]。此外,土壤团聚体的形成与稳定也与包裹其中的有机质C:N:P计量比密切相关,进而影响碳的物理保护能力^[14-15]。综上,植被恢复通过改变土壤化学计量平衡,从微生物分解速率、群落组成及团聚体保护等多个层面共同调控有机碳的固存。尽管上述机制揭示了化学计量平衡在碳积累中的关键调控作用,但当前研究多分别探讨植被恢复对土壤养分含量、化学计量或有机碳储量的单一影响,将三者置于统一框架下,系统阐释植被恢复通过调整土壤化学计量进而促进有机碳储量积累的机制与驱动路径的研究仍显不足。尤其在中国北方沙区这一关键生态恢复区,不同恢复年限下化学计量响应的差异如何调控有机碳储量积累,尚需深入探究。为此,选取具有长期恢复序列的典型沙区开展系统研究,是阐明上述研究问题的关键。

毛乌素沙地作为中国北方四大沙地之一,是遏制荒漠化和构筑北方生态安全屏障的重要区域^[16-18]。位于其西南边缘的白芨滩国家级自然保护区自20世纪50年代开始大规模实施人工柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)固沙工程,形成了保存完整、跨度近70年的植被恢复序列,为揭示干旱沙区长期生态恢复过程中土壤碳、氮、磷循环及其耦合关系提供了独特的天然实验平台。然而,目前关于

长期植被恢复过程中SOC积累是否存在阶段性特征,以及土壤C:N化学计量变化在SOC积累中的调控作用仍缺乏系统认识。基于此,本研究以白芨滩国家级自然保护区不同恢复年限的人工柠条固沙林为研究对象,系统分析恢复过程中土壤碳、氮、磷含量及其化学计量特征的变化规律,量化SOC储量的动态变化,并探究恢复年限、土壤养分积累与SOC储量之间的作用关系及驱动路径。重点关注干旱沙区长期植被恢复背景下表层土壤C:N:P耦合特征及其对SOC积累阶段性的影响。本研究提出以下假设:(1)随着柠条锦鸡儿固沙林恢复年限的增加,表层土壤SOC含量和储量显著提高,但其积累速率呈现阶段性变化特征;(2)植被恢复通过增加凋落物归还和土壤养分积累,促进土壤碳、氮、磷含量协同提升,并显著改变土壤C:N:P化学计量特征;(3)土壤化学计量特征是连接植被恢复与SOC储量变化的重要中介因素,通过调控养分平衡和有机质积累过程影响SOC固存。研究结果将有助于深化对于干旱沙区生态恢复碳汇形成机制的认识,并为基于养分平衡调控的固碳增汇管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏灵武市白芨滩国家级自然保护区(37°49′—38°20′N, 106°20′—106°37′E),地处毛乌素沙地西南边缘,具有显著的大陆性季风气候特征。该区域平均海拔1 288 m,年降水量206.2~255.2 mm,主要发生在7—9月;年潜在蒸发量1933.3 mm;年均气温8.8℃^[19]。自20世纪50年代起,该区域陆续实施荒漠化防治措施,分别于1954、1970、1996、2009年营建固沙灌木林。植被栽植后实行禁牧与人为干扰管控,自然恢复演替,由此形成涵盖15、28、54、70年林龄的70年恢复时间序列。该序列内各样地地貌、母质、坡度相近,海拔分布范围狭窄(1 180~1 346 m),环境异质性较低,可保证不同恢复阶段样地间具有良好可比性,为开展长期生态学的研究提供了天然的试验平台。研究区优势灌木为柠条,常见草本包括沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、虫实(*Corispermum hyssopifolium*)和猪毛菜(*Kali collinum*)。土壤类型以风沙土为主。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与土壤样品采集

本研究采用空间代时间的方法,根据人工柠条固沙林的建植年代,选择恢复年限分别为 15、28、54、70 年的样地(图 1),并以流沙地(0 年)作为对照,构建植被恢复序列,以表征长期恢复过程中土壤性质的动态变化。于 2024 年 8 月,在研究区对不同植被恢复年限(15、28、54、70 年)及流沙样地(0 年)进行野外采样。

各恢复阶段样地均随机设置 5 个独立样地(100 m×100 m)作为生物学重复,样地间最小间距不小于 150 m,以降低空间自相关性干扰。在每个样地内随机布设 5 个 10 m×10 m 小样方,以兼顾空

间异质性。采样前先进行凋落物采集,采用 1 m×1 m 样方,在每个 10 m×10 m 小样方内随机设置 3 个凋落物采集样方,收集样方内所有地表凋落物(包括枯枝、落叶和植物残体等),去除石块及杂质后装袋保存。随后采用直径 5 cm 的不锈钢土钻,按照“S”形布点法在每个 10 m×10 m 小样方内采集 0~5 cm 表层土壤。每个小样方采集 5 个土芯,同一样地内 5 个小样方获得的土样进一步混合均匀,形成 1 个代表该样地的复合样品,以降低小尺度空间异质性的影响。因此,每个 100 m×100 m 样地对应 1 个复合样品,最终共获得 25 个复合样品(5 个恢复阶段×5 个生物学重复)。将每个复合样品充分混匀后自然风干,过 2 mm 筛后,用于土壤理化性质分析。

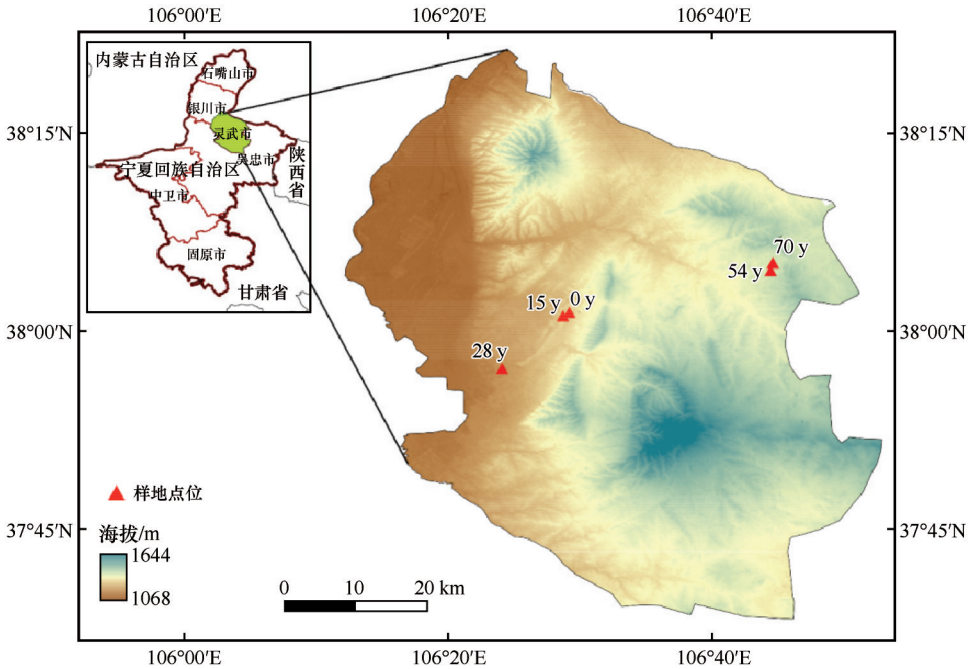


图1 研究区概况

Fig.1 Geographic location of the study area and distribution of sampling plots

1.2.2 土壤理化性质测定

土壤理化性质的测定参照鲍士旦^[20]的测定方法。土壤含水量采用烘干法测定,将铝盒装样于 105 °C 烘箱中干燥至恒重,计算质量差以获得质量含水率(%);土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)根据烘干后环刀样的干土质量与体积计算;土壤 pH 值采用电位法测定,取过筛后土样与蒸馏水按 1:2.5(质量体积比)混合,搅拌均匀后静置 30 min,使用 pH 计测定上清液 pH 值;土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化外加加热法测定;全氮(TN)采用半微量凯氏定氮法测

定;全磷(TP)采用 NaOH 碱溶—钼锑抗比色法测定。

1.3 数据分析

有机碳储量($\text{SOC}_{\text{stock}}$)的测定参照 Li 等^[21]的计算方法。

$$\text{SOC}_{\text{stock}}=(\text{SOC}\times\text{BD}\times D)/100 \tag{1}$$

式中: SOC 是 SOC 含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); BD 是土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); D 是样本层深度(cm)。

采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)比较

不同恢复年限下土壤理化性质、有机碳储量及土壤化学计量特征的差异。在进行方差分析前,采用 Shapiro-Wilk 检验对数据进行正态性检验,采用 Levene 检验对方差齐性进行检验;对于不满足正态分布或方差齐性要求的数据,进行适当的数据转换后再开展统计分析。事后多重比较采用 Duncan 法,显著性水平设定为 $P < 0.05$ 。

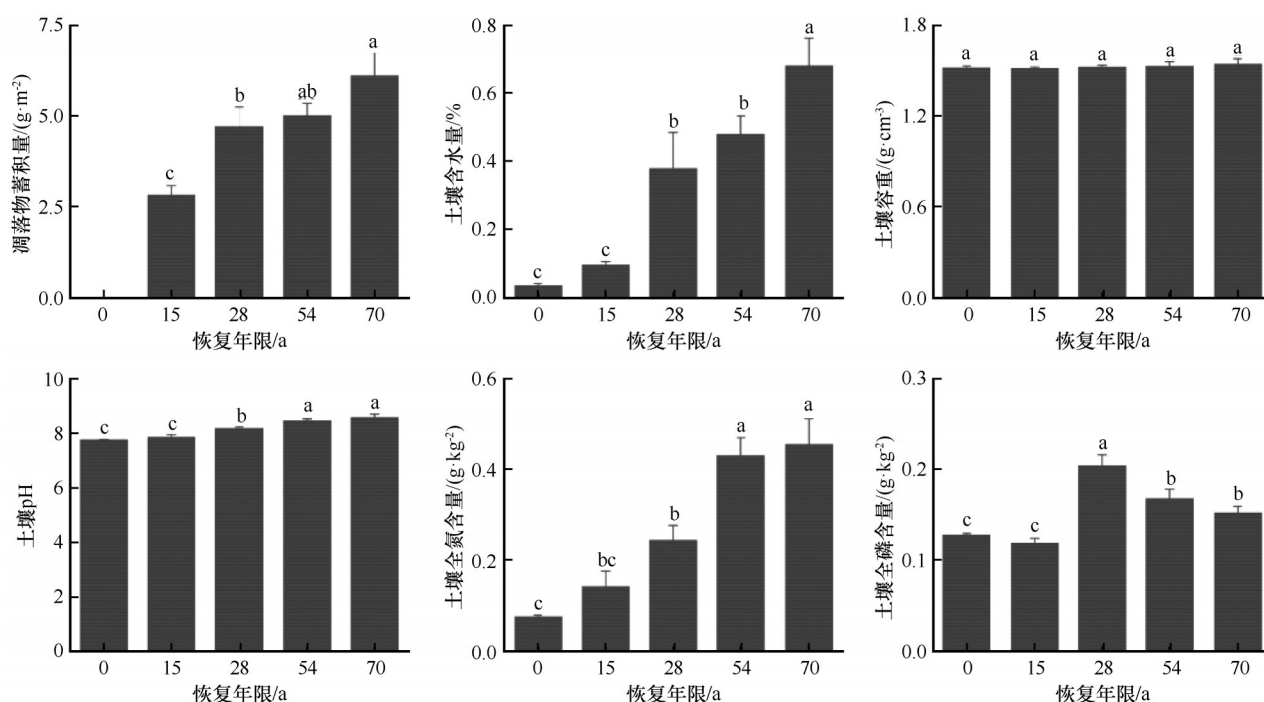
凋落物蓄积量、土壤理化性质及土壤化学计量特征对土壤有机碳储量的影响采用线性回归模型进行分析,所有回归拟合曲线均基于 95% 置信区间构建,以明确各因子与有机碳储量的量化关系。为消除各影响因子间的共线性干扰,首先对所有候选因子进行共线性诊断,剔除方差膨胀因子(VIF) > 8 的因子;同时,对土壤化学计量特征进行主成分分析(Principal component analysis, PCA),简化变量维度并提取关键综合指标。为进一步识别影响的关键环境因子,采用多元线性回归模型(Multiple linear regression model)解析凋落物蓄积量、土壤理化性质与土壤化学计量特征对有机碳储量的影响;同时采用偏最小二乘模型(Partial least squares pathway model, PLS-PM)解析土壤有机碳储量积累的级联驱动关系。单因素方差分析在 SPSS 22.0 软件中完成;数据可视化、线性回归分析在 Origin 2024

软件及 R 语言中实现;主成分分析、多元线性模型及偏最小二乘模型均基于 R 4.4.2 版本平台,借助“vegan”“dplyr”“pls”等 R 包完成。所有统计结果均以平均值±标准误表示。

2 研究结果

2.1 柠条固沙林恢复过程中凋落物蓄积量和土壤理化性质

柠条固沙林恢复过程显著促进了凋落物蓄积量及土壤理化性质的改善,具体表现为凋落物蓄积量、土壤含水量、pH 值、全氮及全磷含量的不同程度提升(图 2, $P < 0.05$)。其中,凋落物蓄积量从流沙阶段逐步增加至 70 年恢复阶段的 $6.12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$;土壤含水量从流沙阶段(0 年)的 0.04% 升至 70 年阶段的 0.68%。土壤 pH 值和全氮含量随植被恢复呈现稳步递增态势,增幅相对平缓,其中 pH 值从 7.77 升至 8.58,增幅为 10.49%,全氮含量从 $0.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增至 $0.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,增幅达 487.77%。土壤全磷含量随植被恢复呈现先升后降的动态变化趋势,在 28 年恢复阶段达到峰值,其含量为 $0.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。此外,土壤容重变化幅度最小,在不同恢复年限之间无显著差异,整体维持相对稳定状态。



注:不同小写字母表示不同年限之间差异显著($P < 0.05$)

图2 不同恢复年限凋落物蓄积量和土壤理化特征

Fig.2 Litter accumulation and soil physicochemical properties under different restoration years

2.2 柠条固沙林恢复过程中土壤有机碳含量和储量特征

柠条固沙林恢复显著促进了有机碳含量和储量的提升,二者均随植被恢复呈现出显著递增的趋势(图 3, $P<0.05$)。土壤有机碳含量从流沙阶段的 $0.29\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增至 70 年阶段的 $4.56\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,较初始阶段增幅达 1 456.08%;土壤有机碳储量从流沙阶段的 $0.02\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 增至 70 年阶段的 $0.35\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,较初始阶段增幅达 1497.30%;土壤有机碳储量积累速率随着植被恢复呈现出先增加后减小的趋势,其积累速率在植被恢复 54 年时达到峰值,为 $0.0061\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,

15 年最小,为 $0.0036\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

2.3 柠条固沙林恢复过程中土壤生态化学计量特征

不同恢复年限下,柠条固沙林土壤生态化学计量比差异显著(表 1, $P<0.001$)。土壤碳氮比在前 28 年保持相对稳定,随后在 54 年和 70 年显著升高,分别达到 10.11 与 10.10。土壤碳磷比随恢复年限延长呈持续上升趋势,从流沙阶段的 2.29 逐步增至 28 年的 9.59,并在 70 年达到峰值(29.73)。氮磷比的变化模式与碳磷比相似,由流沙阶段的 0.61 上升增至 70 年的 2.97。

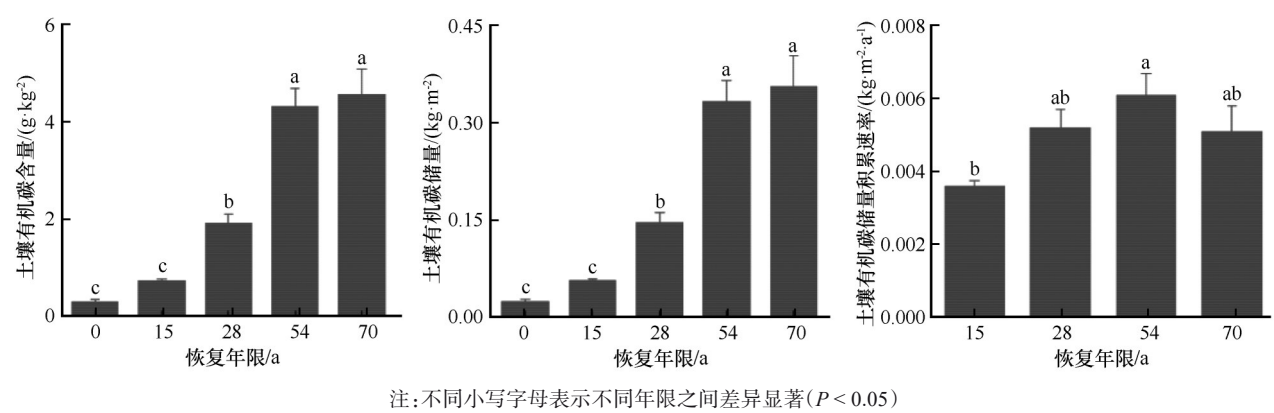


图3 不同恢复年限土壤有机碳含量、储量及其积累速率变化特征

Fig.3 Changes in soil organic carbon content, storage and accumulation rate under different restoration years

表 1 不同恢复年限土壤化学计量特征

Table 1 Soil ecological stoichiometric characteristics across different restoration year

土壤化学计量特征	恢复年限/a				
	0	15	28	54	70
土壤碳氮比 C:N	3.86±0.67 ^c	5.83±0.87 ^c	7.94±0.47 ^b	10.11±0.43 ^a	10.10±0.89 ^a
土壤碳磷比 C:P	2.29±0.32 ^c	6.06±0.47 ^c	9.59±1.31 ^b	25.72±1.14 ^a	29.73±2.80 ^a
土壤氮磷比 N:P	0.61±0.02 ^b	1.17±0.24 ^b	1.23±0.20 ^b	2.55±0.12 ^a	2.97±0.27 ^a

注:不同小写字母表示不同恢复年限土壤化学计量特征差异显著($P<0.05$)。

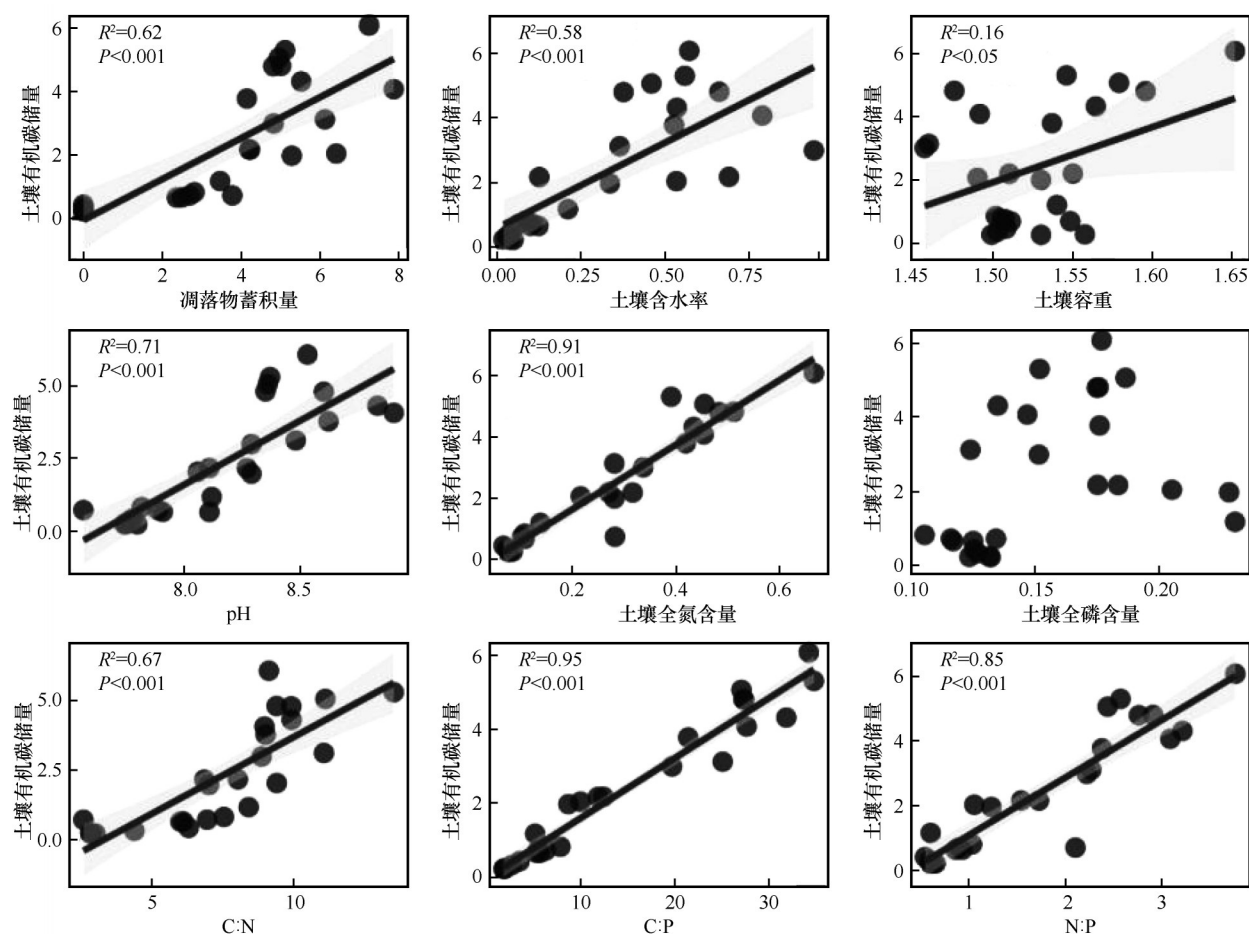
2.4 柠条固沙林恢复过程中土壤有机碳储量影响因素

线性回归结果表明(图 4):凋落物蓄积量($R^2=0.62$, $P<0.001$)、土壤含水率($R^2=0.58$, $P<0.001$)、土壤容重($R^2=0.16$, $P<0.05$)、pH($R^2=0.71$, $P<0.001$)、碳氮比($R^2=0.67$, $P<0.001$)、碳磷比($R^2=0.95$, $P<0.001$)、全氮($R^2=0.91$, $P<0.001$)及氮磷比($R^2=0.85$, $P<0.001$)与有机碳储量均呈显著正相关关系。土壤全磷含量和有机碳储量无显著关系($P>0.05$)。

2.5 土壤有机碳储量积累的主要调控机制

为消除化学计量指标(C:N、C:P、N:P)间的共线性并提取综合信息,本研究对其进行了主成分分析。结果表明(图 5),前两个主成分(PC1 和 PC2)分别解释了总方差的 87.20%和 12.20%。基于 PC1 得分,后续分析中将 PC1 作为化学计量综合指数纳入回归模型,以评估其对土壤有机碳储量的整体影响。

进一步使用多元线性回归模型来探明环境因子对有机碳储量的影响,模型拟合良好(调整后 $R^2=$



注:图中灰色阴影部分代表95%置信区间

图4 土壤有机碳储量与影响因素相关性的拟合分析

Fig.4 Regression analysis of soil organic carbon storage and its influencing factors

0.96, $P<0.001$),表明所选因子可解释有机碳储量变异的96%以上。土壤化学计量特征、土壤全氮含量以及凋落物蓄积量对有机碳储量均有显著贡献,其相对解释度分别为30.06% ($P<0.001$)、27.09% ($P<0.001$)、13.64% ($P<0.05$)。其中,土壤化学计量特征的相对贡献超其他因子,是调控有机碳储量的最主要预测变量。

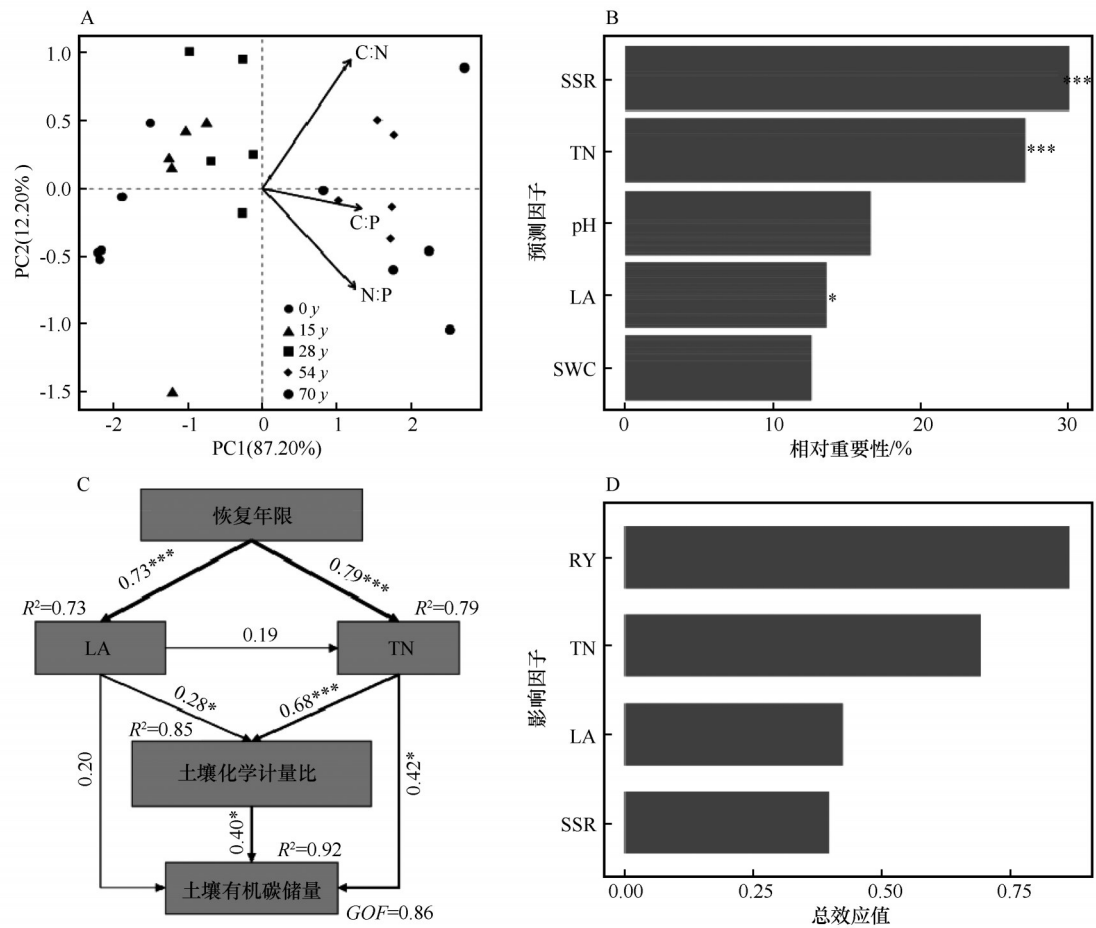
基于偏最小二乘路径模型(PLS-PM)解析有机碳储量调控的级联效应,结果显示,本研究构建的模型拟合度优良($GOF=0.86$),对土壤有机碳储量变异具备较强的解释能力。植被恢复对土壤全氮含量产生极显著的正向直接驱动作用($\beta=0.79$, $P<0.001$),并可通过提升土壤全氮水平,间接正向促进土壤有机碳储量积累($\beta=0.42$, $P<0.05$)。同时,凋落物蓄积量与土壤全氮通过共同调控土壤化学计量特征,显著驱动土壤有机碳储量的提升($\beta=0.40$, $P<0.05$),揭示了柠条固沙林恢复下有机碳积累的多级

联、多途径调控机制。

3 讨论

3.1 土壤有机碳储量积累的动力学特征

旱地植被重建不仅被认为是遏制和逆转土地荒漠化的有效途径,而且由于其巨大的碳固存潜力^[22],也是减缓全球气候变化的重要途径^[23-24]。本研究表明,柠条固沙林恢复显著促进了土壤有机碳储量的提升,这与Li等^[25]在腾格里沙漠的研究一致。这也进一步证实了植被重建与恢复是提升有机碳储量的关键措施^[26]。然而,这种储量的提升并不与其积累速率同步,土壤有机碳(SOC)积累速率呈现先增加后降低的单峰型变化趋势,并在植被恢复54年时达到峰值。这一结果表明,SOC积累并非持续线性增长,而是受到生态系统发育阶段及资源供给能力动态调控^[27-28]。



注:LA:凋落物蓄积量;TN:土壤全氮;C:N:土壤碳氮比;C:P:土壤碳磷比;N:P:土壤氮磷比;RY:恢复年限;SSR:土壤化学计量比;GOF:拟合优度。*,***分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.001$ 显著性水平下具有统计学意义。

图5 土壤有机碳储量积累的机制分析

Fig.5 Mechanistic analysis of soil organic carbon storage accumulation

柠条固沙林恢复初期,随着植被建立和地表覆盖度提高,土壤结构、水分保持能力及养分可利用性逐步改善,碳、氮、磷等资源供给相对协调,微生物受到的单一资源限制较弱。在此阶段,微生物能够较高效地将植物源有机碳转化为微生物生物量及稳定性土壤有机碳^[29-31],因此SOC积累速率随植被生物量增加而持续升高。进入恢复中期,凋落物输入持续增加,土壤微生物生物量和胞外酶活性通常达到较高水平,生态系统碳输入与养分供给处于较优匹配状态,使SOC净积累速率达到峰值。此阶段可视为资源供需平衡的“最优窗口期”,即有机碳输入增加尚未受到关键养分短缺的显著制约^[31]。进入恢复后期,植被群落逐渐成熟,生态系统对养分和水分的消耗及固持能力持续增强,而外源资源输入(如母质风化、大气沉降和降水补给)相对有限,资源再供给速率难以满足生物需求增长,导致限制因子逐渐显现^[32-33]。特别是在干旱和半干旱生

态系统中,土壤有效磷、有效氮及水分常成为制约植物生产力和微生物代谢的关键因子。当资源供应无法匹配生态系统需求时,植物净初级生产力下降,凋落物输入增速减缓,微生物碳利用效率降低,最终导致SOC净积累速率下降^[34-36]。这一结果与资源限制理论中生态系统功能受最稀缺资源控制的观点一致。同时,长期植被恢复促进的氮积累还可能加剧土壤C:P和N:P失衡,进一步强化磷限制效应^[37-38],最终导致有机碳积累速率下降。本研究,恢复后期C:P和N:P升高,提示系统可能存在磷限制增强的趋势(表1)。

总体而言,本研究揭示了干旱沙区柠条固沙林恢复过程中SOC积累存在显著阶段性特征:早期受碳输入增加促进,中期达到资源匹配最优状态,后期则受养分(尤其磷)和水分限制而减缓。因此,在长期恢复管理中,应在植被恢复后期适度采取养分调控措施(如磷活化、有机物返还或水分管理),

以延长生态系统高效固碳阶段并提升持续碳汇能力。

3.2 土壤有机碳储量的化学计量调控机制

植被恢复通常被视为提升退化生态系统土壤有机碳(SOC)储量的重要途径^[2]。传统观点认为,恢复植被主要通过增加地上凋落物和地下根系生物量输入,为土壤碳库提供底物来源^[7]。然而,本研究表明,柠条灌丛恢复并非主要依赖凋落物的直接输入促进SOC积累,而是通过凋落物输入与土壤全氮(TN)的协同增加,调节土壤化学计量特征,进而提升SOC储量。该结果表明在干旱沙区分解过程受限的生态环境中,凋落物对碳积累的贡献更可能取决于其引发的土壤生物地球化学过程,而非输入量本身。柠条作为豆科固氮灌木,在增加凋落物输入的同时,还可通过生物固氮持续扩充土壤氮库^[39]。碳、氮资源的同步增加并未导致土壤C:N比下降,反而可能推动系统形成一种高碳输入、高氮供给的资源状态。在此背景下,土壤具有较充足的氮缓冲能力,可避免大量碳输入后因氮限制引发的微生物分解受阻或代谢失衡^[40]。因此,凋落物与TN并非独立作用因子,而是共同塑造了有利于碳积累的初始化学计量环境。

土壤化学计量特征的改变,尤其是C:N比升高,可能进一步调控微生物碳转化过程。在碳相对丰富且氮供应充足的条件下,微生物往往具有更高的碳利用效率(CUE),能够将更多凋落物来源碳分配至生物量合成而非呼吸损失,从而增加微生物残体碳积累,并最终促进SOC形成^[29,41]。同时,长期处于该资源环境下,微生物群落结构可能发生适应性演替:快速利用易分解底物的r-策略者与善于利用复杂底物、具有较高CUE的K-策略者(尤其是真菌类群)共同发展^[12,42]。此外,土壤化学计量变化还可能优化胞外酶投资策略,协调碳降解与养分获取过程,提高系统整体碳保留效率^[43-45]。除生物化学机制外,化学计量改善还可能通过促进团聚体形成增强SOC物理保护作用。扩大的土壤氮库,尤其是有机氮组分,是团聚体形成的重要胶结物质^[46];而凋落物输入及根系活动则提供了必要的碳源和结构基础。在二者共同作用下,大团聚体形成增加,新生成的微生物残体碳及部分植物源有机质被包埋

于团聚体内部,从而降低分解者可及性并延长周转时间^[14-15]。这表明,土壤化学计量调控产生的稳定有机碳,可进一步通过物理保护机制实现长期保存。需要指出的是,本研究未直接测定微生物残体、胞外酶活性及团聚体组成等关键指标,因此上述机制推断仍需进一步验证。未来研究应结合微生物代谢特征、团聚体分级及同位素示踪等方法,以明确凋落物输入、氮积累与化学计量调控共同促进SOC积累的作用路径。

总体而言,在柠条灌丛恢复过程中,柠条兼具“凋落物供给者”和“氮库构建者”的双重功能,凋落物和全氮共同调控化学计量比进而促进SOC积累。这也解释了为何固氮植物在干旱沙区生态恢复中往往具有较高的碳汇潜力^[47]。然而,柠条对土壤磷的提升作用相对有限^[39]。本研究中,随着碳、氮持续积累,土壤C:P和N:P比可能持续升高,生态系统养分限制格局可能由氮限制逐渐转向磷限制^[47]。短期内,轻度磷限制可能减缓有机质周转并有利于碳滞留,但长期严重缺磷将抑制植物生产力和微生物活性,进而限制碳汇功能持续提升。因此,在恢复实践中,可利用柠条等固氮植物促进早期碳氮积累,并在恢复中后期配套采取磷活化或补给措施,以维持合理的C:N:P平衡,保障生态系统碳汇功能的长期稳定。

4 结论

本研究揭示了干旱沙区柠条灌丛恢复显著提升土壤有机碳(SOC)储量,但其积累速率并非线性增长,而呈现先升高后降低的阶段特征,并在恢复54年左右达到峰值,阐明了生态系统碳汇能力存在最佳恢复窗口期。恢复初中期,植被建立通过促进有机质输入和资源供给协调加快SOC积累;恢复后期,养分(尤其磷)限制可能增强,导致SOC积累速率下降。研究进一步表明,柠条恢复促进SOC增加并非仅依赖凋落物输入,而是通过凋落物与土壤全氮协同增加,调节土壤化学计量关系,进而促进有机碳储量积累。研究明确了干旱沙区植被恢复固碳的阶段规律及化学计量调控机制,研究结果可为毛乌素沙地及类似干旱半干旱沙区柠条固沙林恢复过程中的表层土壤碳累积评估和养分管理提供参考。

参考文献:

- [1] Lange M, Eisenhauer N, Sierra C A, et al. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage[J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 6707.
- [2] Li Y, Piao S, Chen A, et al. Local and teleconnected temperature effects of afforestation and vegetation greening in China[J]. National Science Review, 2020, 7(5): 897–912.
- [3] Yang H, Li X, Wang Z, et al. Carbon sequestration capacity of shifting sand dune after establishing new vegetation in the Tengger Desert, northern China[J]. Science of the Total Environment, 2014, 478: 1–11.
- [4] Luo L, Sun T, Pan Z, et al. Rethinking organic carbon sequestration in agricultural soils from the elemental stoichiometry perspective[J]. Global Change Biology, 2025, 31(7): 1–16.
- [5] Rocci K S, Cleveland C C, Eastman B A, et al. Aligning theoretical and empirical representations of soil carbon-to-nitrogen stoichiometry with process-based terrestrial biogeochemistry models[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2024, 189: 109272.
- [6] Cao W J, Li Y Q, Chen Y, et al. Grazing exclusion is more beneficial for restoring soil organic carbon and nutrient balance than afforestation on degraded sandy land[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1–12.
- [7] Xu H W, Qu Q, Li P, et al. Stocks and stoichiometry of soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus after vegetation restoration in the loess hilly region, China[J]. Forests, 2019, 10(1): 1–15.
- [8] Wang X Y, Yao B, Yang H L, et al. Microbial drivers of soil C:N:P stoichiometry dynamics during ecological restoration in sandy ecosystems[J]. Applied Soil Ecology, 2025, 213: 1–17.
- [9] Ma R T, Hu F N, Liu J F, et al. Shifts in soil nutrient concentrations and C:N:P stoichiometry during long-term natural vegetation restoration[J]. PeerJ, 2020, 8: 1–16.
- [10] Yang S B, Feng C, Ma Y H, et al. Transition from N to P limited soil nutrients over time since restoration in degraded subtropical broadleaved mixed forests[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 494: 1–11.
- [11] Guan H L, Fan J W, Lu X K. Soil specific enzyme stoichiometry reflects nitrogen limitation of microorganisms under different types of vegetation restoration in the karst areas[J]. Applied Soil Ecology, 2022, 169: 1–20.
- [12] Yang T, Zhang H R, Zheng C H, et al. Bacteria life-history strategies and the linkage of soil C-N-P stoichiometry to microbial resource limitation differed in karst and non-karst plantation forests in southwest China[J]. Catena, 2023, 231: 1–18.
- [13] Rebi A, Wang G, Yang T, et al. Stoichiometric and bacterial eco-physiological insights into microbial resource availability in karst regions affected by clipping-and-burning[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 370: 1–18.
- [14] Du Z, Zhou R, Chen Y, et al. Effects of long-term vegetation restoration on soil aggregate and aggregate-associated nutrient stoichiometry of desertified grassland on the eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2025, 388: 1–20.
- [15] Zang Z F, Zhang Y, Deng S J, et al. Depth-dependent effects of aggregate-associated organic, inorganic carbon, and stoichiometry on soil structural stability following farmland abandonment[J]. Catena, 2025, 252: 1–11.
- [16] 冯佳新, 吴月茹, 乔硕, 等. 毛乌素沙地沙漠化逆转过程中土壤组分及微量元素含量变化特征[J]. 中国沙漠, 2024, 44(1): 218–227.
- [17] 李家敏, 朱永华, 梁丽娥, 巢妍, 王晓寒, 王超, 夏必胜. 基于生态系统服务和地下水脆弱性的生态安全格局构建: 以毛乌素沙地为例[J]. 生态学报, 2026, 46(4): 1931–1947.
- [18] 刘涵文, 郝洪剑, 郑芳欣, 等. 毛乌素沙地不同植被类型对土壤微生物群落及生态系统多功能性的影响[J]. 生态学报, 2026, 46(6): 3045–3061.
- [19] 于双, 李小伟, 杨学霞, 等. 灵武白芨滩柠条固沙林演替过程中林下草本植物多样性特征[J]. 草业科学, 2024, 41(9): 2084–2093.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] Li Y, Xie T, Yang H, et al. Revegetation enhances soil organic carbon mineralization and its temperature sensitivity in the Tengger Desert, North China[J]. Catena, 2022, 218: 106541.
- [22] Zhao F, Wu Y, Yin X, et al. Toward sustainable revegetation in the Loess Plateau using coupled water and carbon management[J]. Engineering, 2022, 15: 143–153.
- [23] Lewis S L, Wheeler C E, Mitchard E T, et al. Restoring natural forests is the best way to remove atmospheric carbon[J]. Nature, 2019, 568(7750): 25–28.
- [24] Bastin J F, Finegold Y, Garcia C, et al. The global tree restoration potential[J]. Science, 2019, 365(6448): 76–79.
- [25] Li Y, Zhang X, Wang B, et al. Revegetation promotes soil mineral-associated organic carbon sequestration and soil carbon stability in the Tengger Desert, northern China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2023, 185: 109155.
- [26] Piao S, Wang X, Park T, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(1): 14–27.
- [27] Zhang Q, Hu Y, Shao M, et al. Revegetation re-carbonizes soil: patterns, mechanisms, and challenges[J]. Fundamental Research, 2026, 6(1): 1–17.
- [28] Wardle D A, Walker L R, Bardgett R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences[J]. Science, 2004, 305(5683): 509–513.
- [29] Manzoni S, Taylor P, Richter A, et al. Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils[J]. New Phytologist, 2012, 196(1): 79–91.
- [30] Shi J, Deng L, Wu J, et al. Soil organic carbon increases with de-

- creasing microbial carbon use efficiency during vegetation restoration[J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(12): e17616.
- [31] Sinsabaugh R L, Manzoni S, Moorhead D L, et al. Carbon use efficiency of microbial communities: stoichiometry, methodology and modelling[J]. *Ecology Letters*, 2013, 16(7): 930–939.
- [32] Zhu X, Fang X, Wang L, et al. Regulation of soil phosphorus availability and composition during forest succession in subtropics [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 502: 119706.
- [33] Wang H, Wang H, Crowther T W, et al. Metagenomic insights into inhibition of soil microbial carbon metabolism by phosphorus limitation during vegetation succession[J]. *ISME Communications*, 2024, 4(1): ycae128.
- [34] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, et al. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions [J]. *Ecological Applications*, 2010, 20(1): 5–15.
- [35] Peñuelas J, Poulter B, Sardans J, et al. Human-induced nitrogen-phosphorus imbalances alter natural and managed ecosystems across the globe[J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 2934.
- [36] Duan P, Wang C, Wanek W, et al. Soil microbial phosphorus limitation constrains carbon use efficiency in subtropical forests [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2025, 210: 109937.
- [37] Wu J, Zhao H, Chen F, et al. Reduced soil organic carbon sequestration driven by long-term nitrogen deposition-induced increases in microbial biomass carbon-to-phosphorus ratio in alpine grassland[J]. *Agriculture*, 2025, 16(1): 1–16.
- [38] Ma Z, Liang T, Fu H, et al. Long-term green manuring increases soil carbon sequestration via decreasing qCO₂ caused by lower microbial phosphorus limitation in a dry land field[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 374: 109142.
- [39] Yang Y, Liu B R. Effects of planting *Caragana* shrubs on soil nutrients and stoichiometries in desert steppe of Northwest China[J]. *Catena*, 2019, 183: 1–20.
- [40] Kang B, Huang R, Yan X, et al. Microbial lifestyles driven by C:N stoichiometric imbalance govern responses of carbon metabolism to nitrogen addition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2026: 110162.
- [41] Wang B R, Ao D, Liang C, et al. Soil stoichiometric C/N and nitrogen availability jointly shape fungal and bacterial necromass carbon accumulation across ecosystems[J]. *Soil & Tillage Research*, 2026, 258: 1–17.
- [42] Cao T, Luo Y, Shi M, et al. Microbial interactions for nutrient acquisition in soil: miners, scavengers, and carriers[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, 188: 109215.
- [43] Moorhead D L, Sinsabaugh R L, Hill B H, et al. Vector analysis of ecoenzyme activities reveal constraints on coupled C, N and P dynamics[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 93: 1–7.
- [44] Abay P, Gong L, Luo Y, et al. Soil extracellular enzyme stoichiometry reveals the nutrient limitations in soil microbial metabolism under different carbon input manipulations[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 913: 169793.
- [45] Wang X, Li Y, Wang L, et al. Soil extracellular enzyme stoichiometry reflects microbial metabolic limitations in different desert types of northwestern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 874: 162504.
- [46] Qiao L L, Li Y Z, Song Y H, et al. Effects of vegetation restoration on the distribution of nutrients, glomalin-related soil protein, and enzyme activity in soil aggregates on the Loess Plateau, China[J]. *Forests*, 2019, 10(9): 1–18.
- [47] Li Y Q, Cao W J, Chen Y, et al. Responses of soil carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry to afforestation of severely desertified land in northern China [J]. *Ecological Indicators*, 2025, 175: 1–12.

Accumulation characteristics and driving mechanisms of topsoil organic carbon during the restoration of *Caragana korshinskii* sand-fixing shrublands

Xu Zhengqiang¹, Wang Xingdong², Wan Zhongwu², Wang Ruixia², Yang Xuelong²

(1.Lanzhou Botanic Garden, Lanzhou 730070, China; 2.Ningxia Lingwu Baijitan National Nature Reserve Management Bureau / Ningxia Baijitan Forest Ecological Positioning Observation and Research Station, Lingwu 750400, Ningxia, China)

Abstract: Vegetation restoration is a critical strategy for enhancing soil carbon sequestration in desertified regions; however, the patterns of soil organic carbon (SOC) accumulation and their underlying driving mechanisms remain insufficiently understood. In this study, a restoration chronosequence (0, 15, 28, 54, and 70 years) of artificial *Caragana korshinskii* sand-fixing shrublands on the southwestern margin of the Mu Us Sandy Land was selected using a space-for-time substitution approach. We systematically investigated the dynamics of litter accumulation, soil physicochemical properties, ecological stoichiometric characteristics, and SOC storage along the restoration gradient. Multiple linear regression and partial least squares path modeling (PLS-PM) were employed to elucidate the mechanisms driving SOC accumulation during vegetation restoration. The results showed that litter accumulation, soil moisture content (SMC), pH, and total nitrogen (TN) increased significantly with restoration age ($P < 0.05$). Among these variables, litter accumulation and SMC exhibited the largest increases, reaching levels 6.12-fold and 17.92-fold higher, respectively, in the 70-year restoration stage than in the active sand dune (0-year) stage. Soil total phosphorus (TP) exhibited a unimodal pattern, peaking at 28 years of restoration. Both SOC content and SOC storage increased significantly along the restoration chronosequence ($P < 0.05$), with the 70-year stage showing 14.56-fold and 14.97-fold increases, respectively, compared with the active sand dune stage. The accumulation rate of SOC storage also followed a unimodal pattern and reached a maximum of $0.0061 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ at 54 years. Soil stoichiometric ratios (C:N, C:P, and N:P) increased significantly with restoration age ($P < 0.05$). Linear regression analyses revealed significant positive relationships between SOC storage and litter accumulation, SMC, pH, TN, and soil stoichiometric ratios ($P < 0.05$). Multiple regression analysis further indicated that the combined effects of soil C:N, C:P, and N:P ratios, TN, and litter accumulation explained 30.06%, 20.09%, and 13.64% of the variation in SOC storage, respectively. PLS-PM demonstrated that vegetation restoration directly increased TN content and indirectly promoted SOC accumulation by regulating soil stoichiometric characteristics through the synergistic effects of TN and litter accumulation. In conclusion, long-term restoration of *Caragana korshinskii* sand-fixing vegetation substantially enhanced the soil carbon sink capacity of sandy ecosystems. SOC accumulation exhibited clear stage-specific patterns and was jointly regulated by nutrient enrichment and shifts in soil C-N-P stoichiometry. These findings provide new insights into the mechanisms of long-term carbon sequestration in arid sandy ecosystems and offer a theoretical basis for optimizing vegetation restoration and carbon management strategies in desertified regions.

Key words: vegetation restoration; soil organic carbon storage; ecological stoichiometry; *Caragana korshinskii* shrubland; Mu Us Sandy Land