

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.03.015

引用格式:刘梦迪,张振杰,王红梅,等.灌丛引入对荒漠草原土壤碳氮磷化学计量及其与水分权衡的影响[J].草地学报,2026,34(3):905-916

LIU Meng-di, ZHANG Zhen-jie, WANG Hong-mei, et al. Effects of Shrub Introduction on Soil C-N-P Stoichiometry and Their Trade-off with Water in a Desert Steppe[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(3):905-916

灌丛引入对荒漠草原土壤碳氮磷化学计量及其与水分权衡的影响

刘梦迪¹, 张振杰¹, 王红梅^{1,2*}, 赵亚楠¹, 李傲天¹

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏 银川 750021)

摘要:为探讨灌丛引入对荒漠草原土壤水分、碳氮磷化学计量及其权衡关系的影响,本研究以宁夏东部荒漠草原不同引入年限(8年、17年和27年)的灌丛地和17年封育草地为对象,分析0~100 cm土层的土壤水分、有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量及化学计量比特征,并采用均方根偏差(RMSD)量化土壤水分与养分间的权衡关系。结果表明,随灌丛引入年限增加显著降低了土壤含水量($P<0.05$),土壤全氮呈显著增加趋势($P<0.05$),土壤全磷呈先增后减趋势,均始终高于封育草地,其中土壤有机碳和全氮具较强耦合关系;氮磷比、碳磷比随土层深度增加呈波动降低趋势。权衡分析表明,封育草地RMSD均值为0.55,灌丛引入后RMSD均值为0.39,伴随土壤水分降低,0~100 cm土壤水分-养分协同效应消失。综上所述,近30年灌丛引入改善了0~100 cm土壤养分含量,但仍保持其化学计量相对稳定,并可能出现水分胁迫。

关键词:荒漠草原;灌丛引入;化学计量;土壤水分;权衡

中图分类号:S812.2

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)03-0905-12

Effects of Shrub Introduction on Soil C-N-P Stoichiometry and Their Trade-off with Water in a Desert Steppe

LIU Meng-di¹, ZHANG Zhen-jie¹, WANG Hong-mei^{1,2*}, ZHAO Ya-nan¹, LI Ao-tian¹

(1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2. Key Cultivation Laboratory of Ecosystem Restoration and Reconstruction, Ministry of Education, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: To investigate the effects of shrub introduction on soil moisture, C-N-P stoichiometry, and their trade-off relationships in a desert steppe, this study was conducted in the desert steppe of eastern Ningxia. The research compared sites with shrubs introduced for different durations (8, 17 and 27 years) with a site enclosed for grassland restoration for 17 years. Soil water, soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) contents, and their stoichiometric ratios in the 0-100 cm soil layer were analyzed. The root mean square deviation (RMSD) was used to quantify the trade-off between soil water and nutrients. The results showed that soil water content significantly decreased with increasing shrub introduction years ($P<0.05$). Soil TN showed a significant increasing trend ($P<0.05$), while TP initially increased and then decreased; both were consistently higher than those in the enclosed grassland. SOC and TN exhibited a strong coupling relationship. The soil N:P and C:P ratios fluctuated and decreased with increasing soil depth. Trade-off analysis revealed that the mean RMSD was 0.55 in the enclosed grassland, compared to 0.39 in the sites of shrub introduction. As soil water decreased, the synergistic effect between soil water and nutrients disappeared in the 0-

收稿日期:2025-04-03;修回日期:2025-09-03

基金项目:宁夏自然科学基金项目(2024AAC03127);国家自然科学基金项目(32401433;31860677);宁夏高等学校一流学科建设项目(NXYLXK2017A01)资助

作者简介:刘梦迪(2000-),女,汉族,河北邢台人,硕士研究生,主要从事草地生态、资源与环境研究,E-mail:1604365928@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:whm_826@163.com

100 cm layer. In summary, nearly 30 years of shrub introduction improved the nutrient content in the 0~100 cm soil layer while maintaining relatively stable soil stoichiometric ratios. However, water stress might emerge as a consequence.

Key words: Desert steppe; Shrub introduction; Chemical stoichiometry; Soil water; Trade-off

在过去的半个世纪中,全球干旱、半干旱地区许多以草本植物为主的生态系统经历了以木本植物密度和丰度增加为特征的灌丛化过程^[1]。灌丛化的驱动机制复杂多样,既包括全球气候变化因素,如大气中二氧化碳浓度的持续上升、干旱程度的加剧和火灾频率的降低,又涉及人类活动的影响,如过度放牧和人为灌木引入等^[2]。在中国西北地区部分荒漠草原生态系统中,灌丛化主要由旱生灌木人为引入^[3]。灌丛化会加剧本本植物与草本植物对水土资源的竞争,使得木本植物逐渐取代草本植物,进而引发生态系统结构与功能的变化^[4],表现为土地裸露面积增加、风蚀加剧、草地退化以及草原植被景观破碎化,最终可能使得草地生态系统向灌丛生态系统发生根本性稳态转变^[5],从而对区域生态系统功能造成持续而深远的影响。

灌丛化过程不仅改变土壤水分含量及水物理特性^[6],而且还通过调控植被群落结构和凋落物输入,影响着土壤养分状况及其化学计量关系^[7]。土壤含水量是干旱和半干旱区生物活动的重要影响因子^[8],干旱半干旱区灌丛化对土壤含水量会产生显著的影响。在全球气候变化下,灌丛化导致土壤深层水分利用消耗加剧,造成土壤含水量的亏缺^[9],空间异质性和破碎化程度增强^[10],加速土壤干旱。研究发现,荒漠草原人为植被恢复后,生态系统耗水量增加,土壤储水量降低^[11],土壤含水量分配模式改变,影响草本生长。有研究表明,内蒙古荒漠草原灌木入侵加剧了物种间对水资源的竞争,存在明显的水文生态位重叠,造成群落稳定性降低^[12]。此外,灌丛扩张也对土壤入渗、持水量、电导率、孔隙度、容重等水物理特性产生影响^[13],中国北方草原的研究表明,放牧条件下灌丛扩张降低土壤容重,提高入渗能力^[14],其根系造成土壤孔径分布的变化^[15]。灌丛化在影响生态水文过程的同时^[16],也作用于土壤碳、氮矿化,影响着土壤无机碳的流失和组分变化^[17]。碳(C)、氮(N)和磷(P)是生态系统各组分的重要组成元素^[18],参与自然界中大部分生化过程。生态化学计量比是预测生态系统结构和生物地球化学循环的主要指标^[19-20]。C、N、P元素之间的相互作用和平衡约束,可揭示植被-土壤的相

互作用和养分循环关系,并用于评估生态系统的可持续性^[21]。研究表明,荒漠草地灌丛扩张对土壤养分及其化学计量影响显著^[22],一方面,灌木通常形成“沃岛效应”^[23],提供丰富的土壤有机质,促进土壤养分积累。另一方面,灌丛化造成的植被类型转变也可能改变根系对不同养分的吸收强度,导致土壤化学计量差异。研究表明,灌丛化加剧了有土壤有效磷和氮的消耗^[24],固氮灌木入侵还可能使得土壤氮含量增加。这些土壤养分和化学计量的变化反过来会对植被的结构和组成产生影响^[25]。此外,荒漠草原灌丛扩张驱动的生态系统演变在改变土壤水分和养分的同时,还可能会对二者之间的权衡关系产生影响。例如,黄土高原的研究表明,伴随人工刺槐林龄的增加,土壤碳氮等生态系统服务的积累是以消耗水分为代价的^[26]。

宁夏东部荒漠草原地处半干旱气候带,上个世纪中后期受人为活动影响,荒漠化严重^[27]。为减缓荒漠化进程,柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)因其抗旱防风固沙的特性被引入用于植被恢复^[28]。然而,随着灌丛生长年限的增加,出现了深层次土壤水分消耗,草本群落退化^[29]、土壤质量下降^[30]及微生物群落结构改变^[31]等一系列草原生态系统退化的现象。为了解这一植被变化过程中土壤水分与养分的关联特征,本研究选取宁夏东部荒漠草原封育草地(17 a)及不同年限灌丛地(8 a, 17 a, 27 a),探究土壤理化性质、碳氮磷化学计量的响应及其与土壤水分的权衡特征,以期对灌丛引入的荒漠草原可持续管理提供科学理论依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于宁夏东部盐池县(37°05′~38°10′N, 106°03′~107°39′E),毛乌素沙漠南缘,陕、甘、宁、内蒙古四省(区)交错地带,南高北低,南部为黄土丘陵区,北部为鄂尔多斯缓坡丘陵区,平均海拔1450米。该区属于典型中温带大陆性气候,干旱少雨,日照充足,平均气温8.1℃,冬夏两季平均温差28℃左右,年积温为3430℃;年降水量289 mm,主要

集中在7—9月份,年蒸发量2132 mm,无霜期162 d;地带性植被类型为荒漠草原,地带性土壤为灰钙土。主要植物种类有猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、白草(*Pennisetum flaccidum*)、赖草(*Leymus secalinus*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)和人工种植的柠条锦鸡儿等。自20世纪70年代以来,该地区种植了大量灌木进行生态重建,近50年,灌丛引入改变了当地的植物类型。

1.2 样地设置

为了解不同年限灌丛引入过程荒漠草原土壤水物理特性、土壤有机碳(SOC)、土壤全氮(TN)、土壤全磷(TP)和化学计量比的变化,在前期研究的基础上,于2021年8月展开野外调查。选取封育草地(Enclosed grassland, EG)和引入年限为8年(8 years shrubland, SY8)、17年(17 years shrubland, SY17)、27年(27 years shrubland, SY27)的三种灌木林为研究对象,每个灌丛地建立3个30 m×30 m的典型样地作为重复,间隔100 m。EG样地已封育近17年,主要植物为猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、虫实(*Corispermum hyssopifolium*)和白草(*Pennisetum centrasiaticum*)等。所有灌丛样地的灌木均为柠条锦鸡儿,并采用行带种植,间隔为6 m。其中,SY8样地灌木盖度和生物量分别为29.71%和795.23 g·m⁻¹,主要草本植物为蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)、白草、猪毛蒿和猪毛菜(*Salsola collina*)。SY17样地灌木盖度和生物量分别为45.48%和

1243.68 g·m⁻¹,草本植物主要为牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、猪毛蒿、短花针茅(*Stipa breviflora*)和白草。SY27样地灌木盖度和生物量分别为39.33%和119.97 g·m⁻¹,主要草本植物为牛枝子和猪毛蒿。4个取样点的海拔均在1450 m左右,土壤类型主要为灰钙土和风沙土,地形平坦,无明显坡度。

1.3 样品采集及分析

在每个样地(EG, SY8, SY17和SY27)各设立3个10×10 m的地块进行取样。在EG地块随机设置3个1 m×1 m样方。在其余三个灌丛样地内分微生境进行取样(草下和灌下),草下和灌下各随机设置3个1 m×1 m的成对样方,如图1所示。

设置完毕之后,在每个样地的各1 m×1 m样方内,采用直径3 cm的土钻3个0~100 cm深度的土壤样本,分为5层,每层为20 cm。将每个样地内同一微生境且同一土层的土样进行混合,去除土样中植物根系等非土样部分,然后风干,均匀混合后经0.149 mm筛孔过筛后,分别用重铬酸钾氧化法、凯氏定氮法和钼锑抗法开展土壤有机碳(SOC, g·kg⁻¹)、全氮(TN, g·kg⁻¹)、全磷(TP, g·kg⁻¹)的测定。同时,在每个样地随机选取一个样方,对上述每层土壤进行水物性特征测量。土壤含水量(SW, %)、土壤容重(BD, g·cm⁻³)、田间持水量(FC, %)、毛管孔隙度(CP, %)和非毛管孔隙度(NP, %)采用环刀法测定。土壤电导率(EC, μS·cm⁻¹)和pH值分别采用电导率仪和pH计(1:5土-水悬浮液)测定。

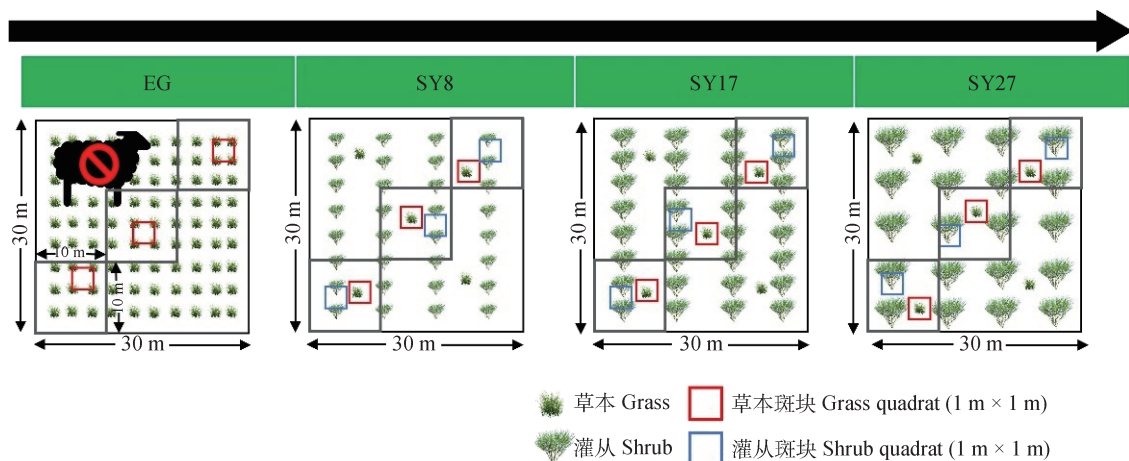


图1 样地设置及取样示意图

Fig. 1 Diagram of plot setting and sampling

1.4 数据处理

对于每个灌丛样地的土壤指标,取草下和灌下的加权平均值代表该样地的整体水平。采用单因

素方差分析(One-way ANOVA)来检验土壤水物理特性及土壤有机碳、全氮、全磷、碳氮比(C:N)、碳磷比(C:P)和氮磷比(N:P)在不同引种年限处理下

的差异。如果在方差分析中发现显著的因子效应 ($P < 0.05$), 则采用LSD检验进行多重比较。使用Pearson相关性分析不同土层之间土壤有机碳、全氮、全磷与水物理特性之间的关系。此外, 利用R 4.3.2构建偏最小二乘路径模型(PLS-PM), 得出土壤含水量-养分权衡特征对引入年限和土壤深度变化的响应路径, 结合均方根偏差法(RMSD)^[32]量化灌丛引入过程水分-养分的权衡关系。 $RMSD = \sqrt{\sum_{i=1}^n (ES1(i) - ES2(i))^2 / (n-1)}$, n 为观测值的个数, $ES1(i)$ 和 $ES2(i)$ 分别为生态系统功能1和生态系统功能2的标准化值。图表绘制利用Origin 2025软件。

2 结果与分析

2.1 荒漠草原不同年限灌丛引入过程土壤水分物理特性

如图2所示, 土壤含水量随灌丛引入年限的增

长先降低后略有增加, 变化范围为2.38%~8.77%, 但灌丛地显著低于封育草地 ($P < 0.05$); 灌丛引入显著提高了荒漠草原土壤电导率 ($P < 0.05$), 其变化范围为1.05~1.29 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$; 土壤容重随着灌丛引入年限先增加后减少, 在引入17年时达到最大值, 为1.54 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 而田间持水量和毛管孔隙度则随着灌丛引入年限先减少后增加, 均在引入17年时达到最小值, 分别为17.47%和30.20%。此外, 随着土壤深度的增加, 封育草地土壤含水量始终高于灌丛地, 而电导率始终低于灌丛地。

2.2 荒漠草原不同年限灌丛引入过程土壤C, N, P含量及其化学计量

如图3所示, 随着灌丛引入年限的增加, 土壤有机碳、全氮均呈上升趋势, 但土壤有机碳变化并不显著, 而土壤全氮变化范围为0.14~0.18 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在灌丛引入27年时相比封育草地显著增加 ($P < 0.05$)。土壤全磷随着灌丛引入先上升然后略微下降, 变化范围为0.28~0.39 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且3个灌丛地均

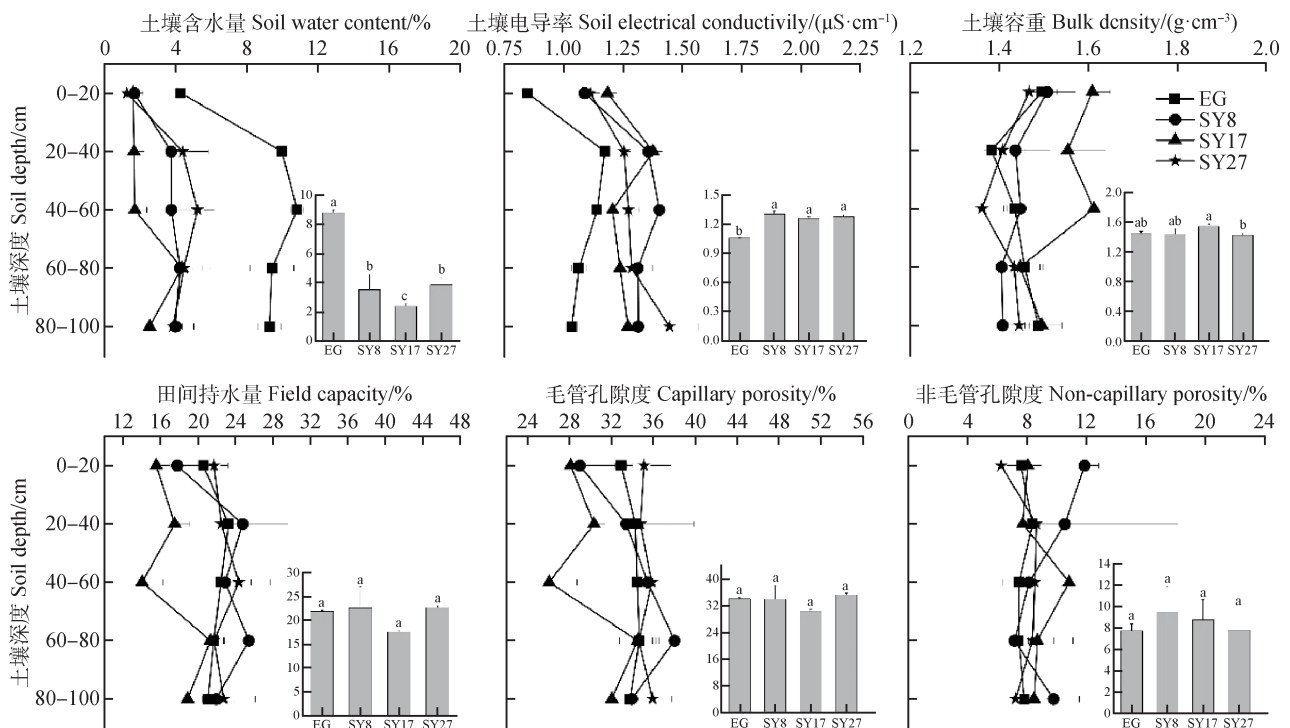


图2 灌丛引入过程中0~100cm土壤水物理特性变化

Fig. 2 Changes in soil water physical properties at the 0-100 cm depth during the shrub introduction

注: EG表示封育草地, SY8表示引入年限为8年的灌丛地, SY17表示引入年限为17年的灌丛地, SY27表示引入年限为27年的灌丛地。不同小写字母代表样地之间差异显著 ($P < 0.05$); 主图(点线图)表示0~100 cm不同土层的实测值, 副图(柱状图)表示0~100 cm深度的平均值, 下同
Note: EG represents the enclosed grassland, SY8 represents the shrubland introduced for 8 years, SY17 represents the shrubland introduced for 17 years, and SY27 represents the shrubland introduced for 27 years. Different lowercase letters represent the significant differences among differences plots at 0.05 level. The main plot (point-line diagram) displays measured values across 0-100 cm soil layers, while the inset (bar chart) represents mean values at 0-100 cm depth. The same as below

显著高于封育草地($P<0.05$),在引入8年时达到最高值。此外,土壤有机碳和全氮随土层深度的增加呈波动性下降的趋势,仅在封育草地和27年的灌丛地的20~40 cm土层中略有增加。

如图4,5所示,C:N,C:P和N:P随灌丛引入年限的增长均无明显差异,其变化范围分别为

18.10~18.60,9.60~10.54和0.32~0.41。土壤C:N在0~100 cm土层无显著的变化趋势,随土层变化波动为16.94~19.78;与C:N不同,土壤C:P和N:P随土层深度增加逐渐降低,并有局部波动,变化范围分别为0.32~0.79。

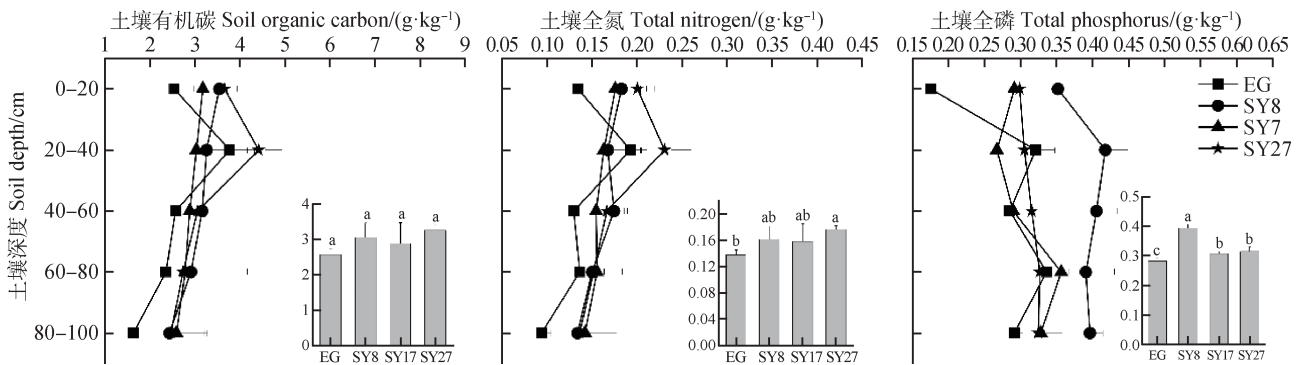


图3 灌丛引入过程中0~100cm土壤C,N,P化学计量变化

Fig. 3 Changes in soil C, N and P content at the 0-100 cm depth during the shrub introduction

注:不同小写字母代表样地之间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters represent the significant differences among differences plot at 0.05 level

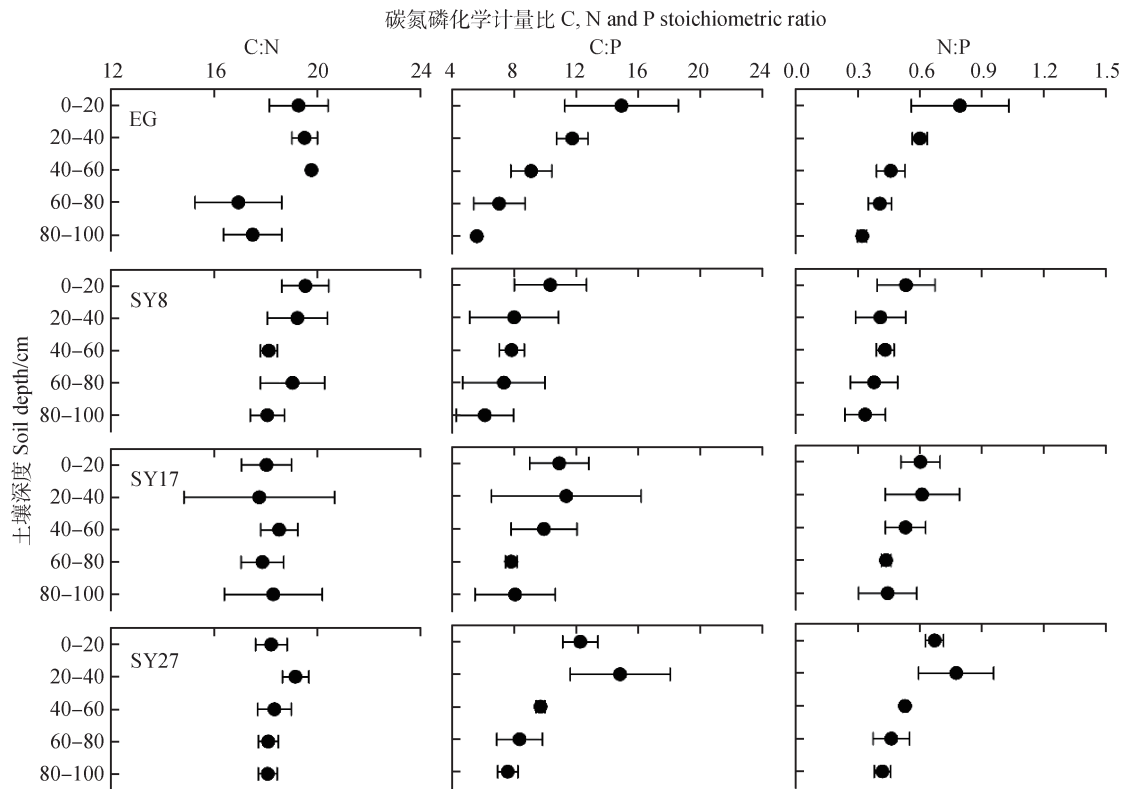


图4 灌丛引入过程中0~100 cm土壤C,N,P化学计量变化

Fig. 4 Changes in soil C, N and P stoichiometric at the 0-100 cm depth during the shrub introduction

2.3 荒漠草原不同年限灌丛引入过程土壤水分物理特性与C,N,P含量相关性分析

由表1可知,随着灌丛引入年限的增长,0~

100 cm土层,土壤含水量对养分特性产生影响。0~20 cm和60~80 cm土层中,土壤含水量与全氮呈显著负相关($P<0.05$),80~100 cm土层中呈极

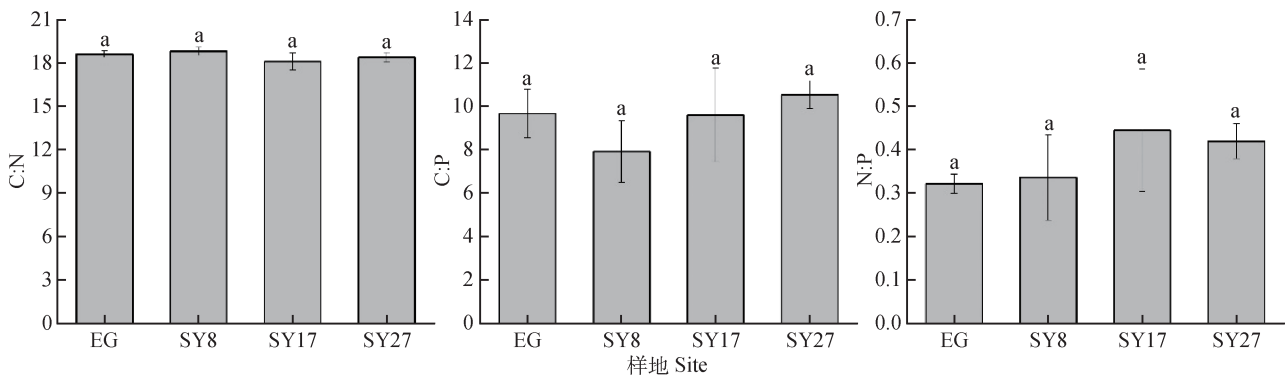


图5 灌丛引入过程中不同年限土壤C,N,P化学计量变化

Fig. 5 Changes in soil C, N, and P stoichiometric at different years during the shrub introduction

注:不同小写字母代表样地之间差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters represent the significant differences among differences plots at 0.05 level

显著负相关($P < 0.01$)。在60~80 cm土层中,土壤含水量与有机碳呈显著负相关($P < 0.05$),80~100 cm土层中呈极显著负相关($P < 0.01$)。土壤含水量与电导率仅在60~80 cm土层呈显著负相关($P < 0.05$),而在其他土层无显著相关性。土壤电导率分别与全磷和有机碳在40~60 cm和60~80 cm土层呈显著正相关($P < 0.05$)。土壤容重分别与田间持水量和毛管孔隙度在20~40 cm和20~60 cm土层呈显著负相关($P < 0.05$)。田间持水量和毛管孔隙度在0~20 cm土层呈显著正相关($P < 0.05$),在40~80 cm土层呈极显著正相关($P < 0.01$)。土壤有机碳与全氮耦合关系较好,呈显著正相关($P < 0.05$),仅在60~80 cm土层无显著相关性。

2.4 灌丛引入年限对荒漠草原土壤水养权衡的影响

由图6可得,数据点大多偏离1:1线且偏离程度存在差异,RMSD值范围为0.23~0.67,表明不同年限灌丛引入荒漠草原过程中,0~100 cm土层土壤水分与养分及其化学计量比之间存在明显权衡关系。在封育草地中,RMSD均值为0.55,除SW-TP均为最大值,土壤水分与化学计量的RMSD值高于土壤水分与养分的RMSD值,且土壤水分的生态效益权重高于养分及其化学计量。3个灌丛地的RMSD均值为0.39,土壤养分生态效益权重均高于水分,且土壤水分与养分的权衡相较于化学计量更明显,土壤水分与养分的RMSD值是土壤水分与化学计量的1.15倍。RMSD值的变化与灌丛引入年限相关,SW-SOC和SW-TN,SW-C:P和SW-N:P的权衡波动几乎一致,呈升高趋势,在引入27年RMSD有最大值分别为0.45,0.46,0.43,

0.43;而SW-TP和SW-C:N的权衡则呈相反趋势,在引入27年RMSD有最小值分别为0.33和0.30。图7结构方程模型进一步表明,土壤水分和养分受灌丛引入年限变化的差异性,土壤物理特性是影响土壤有机碳、全氮和全磷及其化学计量的关键因素。结合图6得到的土壤水分-养分权衡关系,养分的优势伴随灌丛引入年限的增加而增加。土壤含水量直接受到引入年限和物理特性(电导率、容重、田间持水量、毛管孔隙度、非毛管孔隙度)的负向影响,而受到土壤深度的正向影响;土壤深度对物理特性也具有直接正相关性。其中灌丛引入年限对有机碳和全氮形成直接正相关性,影响路径系数分别为 $R^2 = 0.27$ 、 $R^2 = 0.37$,而对全磷则形成直接负相关,影响路径系数为 $R^2 = 0.26$;土壤深度对有机碳和全氮呈直接负相关性;土壤物理特性对土壤养分也同样具有直接正作用。此外,土壤物理特性通过碳氮磷对其化学计量也形成间接影响。氮磷比除受到全磷的负向影响和全氮的正向影响,同时受到有机碳的直接促进作用;碳磷比除受到全磷的负向影响和有机碳的正向影响,同时受到全氮的直接负作用。氮磷比和碳磷比作为被解释变量,在灌丛引入过程中主要受到土壤养分的直接影响,也受引入年限、土壤深度和物理特性的间接调控作用,95%的氮磷比和碳磷比能够被上述因素解释。

3 讨论

3.1 不同年限灌丛引入对土壤有机碳、全氮和全磷的影响

植被主要通过凋落物分解、根系分泌、土壤矿化、土壤动物和微生物群落的贡献等方式影响土壤

表 1 土壤水物理特性和 C,N,P 含量在各土壤深度的相关系数

Table 1 Correlation coefficient between soil water physical properties and C, N and P contents at each soil depth

土壤深度 Soil depth/cm	指标 Index	SW	EC	BD	FC	CP	NP	SOC	TN
0~20	EC	-0.95							
	BD	-0.19	0.49						
	FC	0.30	-0.54	-0.92					
	CP	0.22	-0.42	-0.81	0.97*				
	NP	-0.13	0.11	0.13	-0.50	-0.69			
	SOC	-0.93	0.77	-0.15	-0.03	-0.01	0.21		
	TN	-0.96*	0.84	-0.07	-0.04	0.03	0.03	0.98*	
	TP	-0.90	0.82	0.12	-0.39	-0.41	0.54	0.91	0.85
20~40	EC	-0.92							
	BD	-0.79	0.81						
	FC	0.52	-0.41	-0.86					
	CP	0.65	-0.74	-0.97*	0.83				
	NP	-0.04	0.23	-0.37	0.79	0.38			
	SOC	0.41	-0.69	-0.72	0.39	0.82	-0.09		
	TN	0.32	-0.64	-0.63	0.28	0.75	-0.16	0.99**	
	TP	0.10	0.13	-0.42	0.83	0.39	0.98*	-0.13	-0.22
40~60	EC	-0.52							
	BD	-0.53	-0.23						
	FC	0.55	0.33	-0.98*					
	CP	0.53	0.38	-0.95*	0.99**				
	NP	-0.79	-0.10	0.82	-0.89	-0.91			
	SOC	-0.72	0.92	-0.16	0.18	0.20	0.17		
	TN	-0.74	0.91	-0.13	0.15	0.18	0.20	0.99***	
	TP	-0.33	0.96*	-0.25	0.39	0.46	-0.28	0.77	0.76
60~80	EC	-0.96*							
	BD	0.65	-0.81						
	FC	-0.32	0.50	-0.91					
	CP	-0.34	0.51	-0.90	0.99**				
	NP	-0.41	0.19	0.42	-0.73	-0.71			
	SOC	-0.96*	0.96*	-0.81	0.56	0.58	0.16		
	TN	-0.96*	0.85	-0.42	0.09	0.11	0.62	0.87	
	TP	-0.42	0.47	-0.74	0.86	0.88	-0.48	0.65	0.30
80~100	EC	-0.82							
	BD	0.28	-0.55						
	FC	0.16	0.40	-0.74					
	CP	0.12	0.47	-0.53	0.94				
	NP	-0.28	-0.01	-0.51	-0.16	-0.45			
	SOC	-0.99**	0.85	-0.33	-0.10	-0.06	0.28		
	TN	-0.99**	0.86	-0.32	-0.09	-0.05	0.26	0.99***	
	TP	-0.56	0.49	-0.83	0.24	-0.01	0.84	0.58	0.57

注: *, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ***, $P<0.001$. FC,田间持水量;BD,土壤容重;SW,0~100 cm 土壤含水量;CP,毛管孔隙度;NP,非毛管孔隙度;EC,土壤电导率;SOC,土壤有机碳;TN,土壤全氮;TP,土壤全磷

Note: *, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ***, $P<0.001$. FC, Field capacity;BD, Bulk density;SW, Soil water content(0-100 cm);CP, Capillary porosity;NP, Non-capillary porosity;EC, Soil electric conductivity;SOC, Soil organic carbon;TN, Total nitrogen;TP, Total phosphorus

的碳、氮和磷^[33]。本研究结果表明,随着灌丛引入年限的增长,土壤有机碳和全氮含量逐渐增加,而有机碳增加不显著。在0~100 cm随着土层深度增加,土壤有机碳和全氮总体呈下降趋势,与其他研究中观察到的结果一致^[34]。土壤有机碳和全氮的固存主要是由于凋落物的积累所致,随着灌丛引

入,植物生物量的增加创造了大量的净初级生产力(NPP),从而向土壤提供了有机质和凋落物,促进了土壤有机碳和全氮向土壤的输入^[35]。由于表层含有大量的凋落物和有机物,因此表层土壤有机碳和全氮含量较高。此外,灌木的固氮能力也有助于灌木群落中氮含量的积累。本研究结果还表明,随

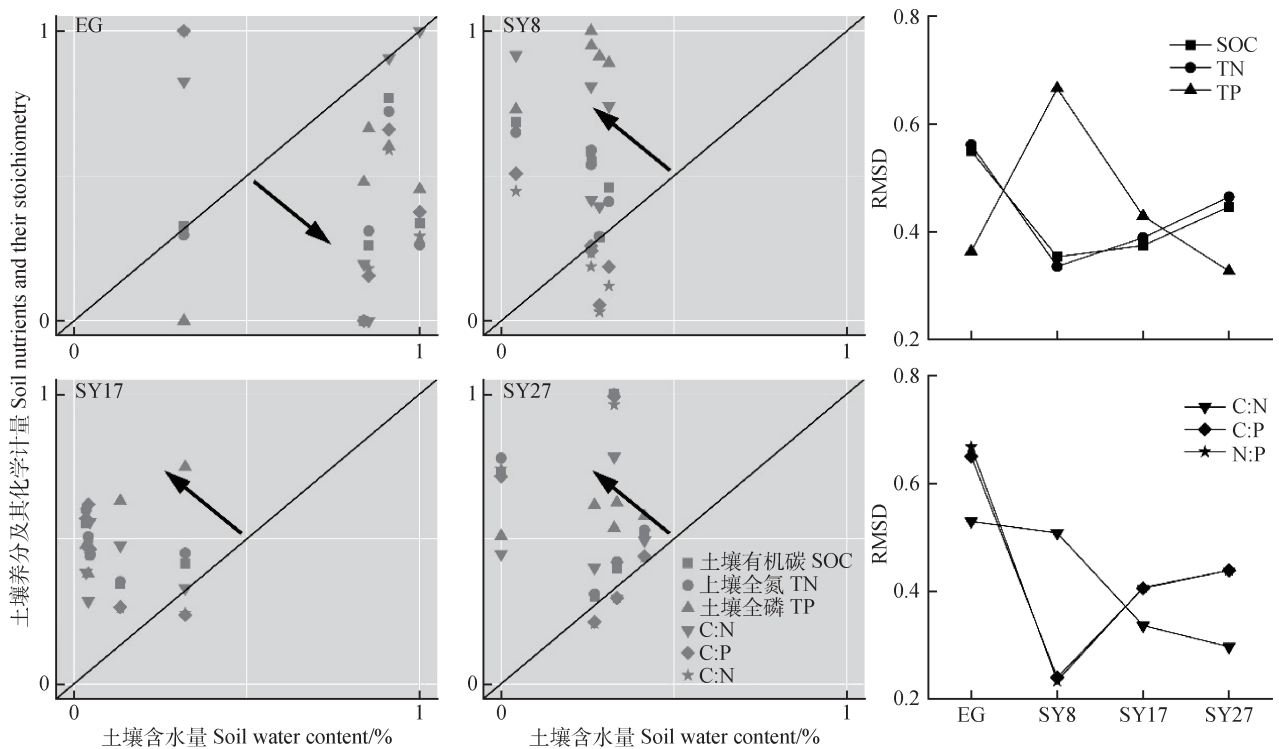


图6 土壤碳氮磷及化学计量与水分的权衡特征

Fig. 6 Trade-offs between soil carbon, nitrogen, phosphorus, and their stoichiometric and soil water

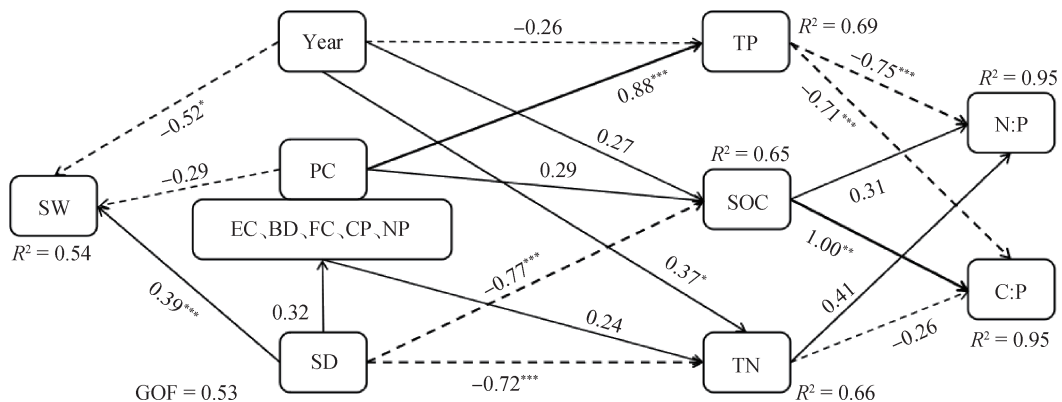


图7 灌丛引入过程中土壤含水量和养分权衡特征对年限和土壤深度的响应

Fig. 7 Responses of soil moisture and nutrient trade-offs to grow years and soil depth during shrub introduction

注: * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$. SD, 土壤深度; PC, 物理特性; SW, 土壤含水量; FC, 田间持水量; SOC, 土壤有机碳; TN, 土壤全氮; TP, 土壤全磷。图中箭头上的数字为相关性系数, R^2 为该因子被其他因子解释的程度

Note: * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$. SD, Soil depth; PC, Physical characteristics; SW, Soil water; FC, Field capacity; SOC, Soil organic carbon; TN, Total nitrogen; TP, Total phosphorus. The numbers on the arrows in the figure are the correlation coefficients, and R^2 is the degree to which the factor is explained by the other factors

着灌丛引入年限的增长,全磷呈现先增加后减少的趋势。这可能是因为灌丛引入增强了土壤对磷的固定和活化导致了0~100 cm土层磷含量的增加,但灌丛引入后期,生物量增加,导致对磷的需求增加,从而降低了土壤磷含量^[36]。总体而言,灌木对土壤全磷仍有促进作用,与其他研究结果一致^[37]。同时,本研究结果表明,土壤有机碳和全氮

具有高度耦合性,与之前的研究结果相似^[38]。土壤有机碳和全氮的来源主要是植物凋落物和根系分泌物,具有相对稳定的碳氮比^[39]。其次,微生物代谢过程同时对有机质进行碳矿化和氮矿化,对碳氮具有协同调控的作用^[40]。因此,土壤碳氮耦合是植物-土壤-微生物密切联动的结果。

本研究中,灌丛引入显著降低了土壤含水量,

与之前的研究一致^[41],这是由于灌木对土壤深层水分的消耗。土壤含水量与有机碳和全氮呈显著负相关,结合土壤含水量-养分权衡分析结果,进一步表明有机碳和全氮的增加伴随水分的减少。本研究结果还显示,灌丛引入显著提高了土壤电导率,这可能是因为土壤含水量减少导致盐分在土壤中浓缩。然而,本研究仅有土壤电导率数据,没有得到可溶性盐阳离子和阴离子含量,因此需进一步的探索。此外,土壤水物理特性与化学性质之间的关系主要集中在40~100 cm较深层土壤上,这可能是由于表层土壤更容易受到环境因素、植物根系、微生物活动和凋落物的影响。路径模型表明,土壤物理特性对有机碳、全氮和全磷具有调控作用,这是可能因为土壤含水量的降低造成草本植物的减少,促进土壤沙化,造成了田间持水量下降和土壤孔隙度的增大。土壤孔隙度的增大会作用于植物根系和微生物的生长,可能是促进土壤养分增加的原因,灌木根系分泌物和凋落物的增加也提供了有机质,对土壤团聚体的形成有积极影响,有利于土壤养分的积累^[42]。

3.2 不同年限灌丛引入对土壤化学计量的影响

土壤碳氮反映土壤氮矿化能力,较低的碳氮比预示较高的氮矿化能力^[43]。在本研究中,不同年限灌丛地的土壤碳氮比与封闭草地无显著差异,随土壤深度无明显变化。本研究的碳氮比为16.94~19.78,高于全国(10.46)和全球(13.33)的平均值^[44],表明该地区的矿化能力较低,这可能是由于灌木对碳和氮的消耗增加以及荒漠草原极端的气候条件所致^[45]。土壤有机碳和全氮是影响碳氮比的主要因素,本研究结果表明,有机碳和全氮高度耦合,这也可能导致碳氮比无显著变化。土壤碳磷比是表明土壤微生物通过矿化释放磷或通过土壤环境吸收固定磷能力的重要指标,大多数陆地生态系统中土壤碳磷比在10.06~503.5之间^[46]。本研究土壤碳磷比为5.59~14.91,远低于全国(52.70)和全球(72.00)平均值^[44],表明有机质中释放磷的潜力高,磷的有效性高。此外,土壤氮磷比是反映植物生长状况受氮、磷营养元素限制的重要指标。本研究中的氮磷比值为0.32~0.79,远低于中国(5.9)、全球(3.9)和中国温带荒漠(1.2)的平均值^[44],表明该地区受到氮的限制。此外,土壤碳磷比和氮磷比随灌丛引入年限的变化而变化,但无显

著差异。随着灌丛引入时间的推移,灌木产生更多的凋落物和根系,为土壤提供大量的有机碳和全氮,增强了土壤对磷的固定和活化^[47]。这些因素共同影响着土壤有机碳、全氮和全磷,也是碳氮比、碳磷比和氮磷比均未发生显著变化的原因,这表明在灌丛引入的27年中,生态系统通过养分利用等策略保持了一定的化学计量平衡。

在垂直方向上,在0~100 cm土层中,土壤化学计量主要受有机碳、全氮和全磷含量的直接影响,土壤的碳磷比和氮磷比逐渐下降,这与其他研究结果一致^[48]。土壤全磷主要受土壤母质的影响,随土壤深度的变化不大,而有机碳和全氮不仅受土壤母质的影响,还受凋落物分解和植物吸收利用的影响^[49],受到土壤植物根系和地表凋落物养分返回的作用,导致地表土壤中有机碳和全氮的浓度增加^[50]。然而,在深层土壤中,有机质输入减少,微生物和植物根系活性受限,导致有机碳和全氮降低^[51]。因此,伴随土壤深度的增加,有机碳和全氮的降低导致碳磷比和氮磷比的降低,而碳氮比的变化较小,与得到的土壤深度对碳磷比和氮磷比调控路径相符。

3.3 灌丛引入的权衡关系与可持续性

本研究发现灌丛引入促进了土壤养分含量的提高,并且在灌丛引入的27年中,虽然有机碳和全氮呈现出高度耦合,但土壤固碳效果并不显著。同时,在灌丛引入的27年中,土壤化学计量虽有波动,但无显著差异,这可能是由于植被利用自身的养分策略来调节土壤资源的化学计量,以维持其平衡,从而保持相对稳定的状态。本研究还发现,灌丛引入显著降低了土壤含水量。土壤含水量是干旱地区的重要资源,在植被生长发育中具有不可替代的作用,持续的水分消耗可能会导致灌木未来的生长受限^[52]。伴随灌丛引入年限的增加,0~100 cm土层中,土壤含水量和大多数土壤养分呈负相关,并存在明显权衡关系,土壤水分从驱动因子退化为限制因子,养分从循环变量升级为主导资源。封育草地较高的土壤水分权重可能与其主要利用浅层水分有关,水分存储利于维持草本根区水势,驱动养分矿化。灌丛地权衡关系的转变可能是由于其长时间消耗深层次水分影响了浅层水分的积累,且产生的“沃岛效应”使养分富集,造成水分-养分的失衡。土壤水分与养分元素的RMSD值普遍高于与

化学计量比,说明灌丛化主要通过对元素生物地球化学循环的直接影响加剧水分-养分的不平衡。研究表明土壤水分与有机碳和土壤水分与全氮的权衡在灌丛引入早期较低,这可能与灌丛不同生长发育阶段和不同植被类型对资源的特殊利用策略相关^[53]。此外,随着土壤深度的增加,养分的积累效果下降^[54],造成权衡关系减弱。由于在干旱和半干旱地区,水分对植物的生产力有重要影响,因此,一旦土壤含水量耗竭突破植物生长所需水量的临界值,可能威胁到土壤养分积累和引种灌木的生长^[55]。本研究主要围绕0~100 cm的土壤理化特性开展,灌丛引入造成的水分-养分的非协同现象,是否会对自身生长造成影响还需进一步明确。总之,在灌丛引入的近30年中,灌丛利用自身的养分循环策略和对土壤含水量的利用,暂时没有改变荒漠草原土壤化学性质的相对平衡。然而,随着水资源的枯竭,这种平衡可能会打破,从而影响干旱地区植被恢复的可持续性。

4 结论

本研究中,荒漠草原灌丛引入近30年,0~100 cm土壤养分与含水量存在权衡关系。生态系统的资源配置发生变化,封育草地主要由水分供给驱动,而灌丛地则更受养分有效性的支配,并伴随灌丛引入年限增长加剧了土壤水分与养分的不平衡现象。因此,灌丛引入的荒漠草原生态系统可持续性面临潜在挑战,仍待进一步研究并制定应对策略。研究结果为该区域未来灌丛引入的优化调控与可持续管理提供了科学依据。

参考文献

- [1] MAESTRE F T, BOWKER M A, PUCHE M D, et al. Shrub encroachment can reverse desertification in semi-arid Mediterranean grasslands[J]. Ecology Letters, 2009, 12(9): 930-941
- [2] 张译文, 常小峰, 张玉薇. 黄土高原云雾山长期封育草地灌丛化空间分布格局[J]. 草地学报, 2023, 31(12): 3802-3808
ZHANG Y W, CHANG X F, ZHANG Y W. Spatial pattern of shrub patches in a grassland fenced for a long-term in Yunwu Mountain on the Loess Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(12): 3802-3808
- [3] 郭天斗, 于露, 孙忠超, 等. 宁夏东部荒漠草原向灌丛地人为转变过程中土壤胞外酶活性响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2541-2548
GUO T D, YU L, SUN Z C, et al. Responses of soil extracellular enzyme activities to the anthropogenic transition from desert grassland to shrubland in eastern Ningxia, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8): 2541-2548
- [4] 于露, 王红梅, 郭天斗, 等. 荒漠草原-灌丛镶嵌体的植被稳态转变特征[J]. 生态学报, 2021, 41(24): 9773-9783
YU L, WANG H M, GUO T D, et al. Bistable-state of vegetation shift in the desert grassland-shrubland anthropogenic Mosaic area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(24): 9773-9783
- [5] SCHOLTZ R, POLO J A, TANNER E P, et al. Grassland fragmentation and its influence on woody plant cover in the southern Great Plains, USA[J]. Landscape Ecology, 2018, 33(10): 1785-1797
- [6] QU Z R, LI X Y, ZHOU S, et al. Global potential for regime shifts among shrubland, grassland, and forest[J]. Global and Planetary Change, 2025, 250: 104798
- [7] YU S H, LIU X L, CHEN X L, et al. Effects of shrub encroachment on grassland community and soil nutrients among three typical shrubby grasslands in the alpine subhumid region of the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2022, 10: 1068200
- [8] REYNOLDS J F, SMITH D M S, LAMBIN E F, et al. Global desertification: building a science for dryland development[J]. Science, 2007, 316(5826): 847-851
- [9] ZHOU H, FENG X Y, HE Z B, et al. Age-related water use pattern of the introduced species *Atriplex canescens* was influenced by root distribution in desert[J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2025, 11: 298
- [10] 赵亚楠, 王红梅, 李志丽, 等. 荒漠草原灌丛转变过程土壤水分亏缺空间特征及影响因素[J]. 草业学报, 2024, 33(4): 22-34
ZHAO Y N, WANG H M, LI Z L, et al. Responses of spatial pattern and driving factors for soil water deficit of desert grassland-shrubland transition sites[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(4): 22-34
- [11] DU L T, ZENG Y J, MA L L, et al. Effects of anthropogenic revegetation on the water and carbon cycles of a desert steppe ecosystem[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 300: 108339
- [12] LIU X, ZHUANG Q L, LAI L M, et al. Soil water use sources and patterns in shrub encroachment in semiarid grasslands of Inner Mongolia[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 308/309: 108579
- [13] 孙忠超, 郭天斗, 于露, 等. 宁夏东部荒漠草原向灌丛地人为转变过程土壤粒径分形特征[J]. 草业学报, 2021, 30(4): 34-45
SUN Z C, GUO T D, YU L, et al. Changes in soil particle size distribution and fractal characteristics across an anthropogenic transition from desert steppe grassland to shrubland in eastern Ningxia[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(4): 34-45
- [14] CAI Y R, YAN Y C, WANG C, et al. Effect of shrubs on soil saturated hydraulic conductivity depends on the grazing regime in a semi-arid shrub-encroached grassland[J]. Catena, 2021,

- 207:105680
- [15] GAO Z, HU X, LI X Y. Changes in soil water retention and content during shrub encroachment process in Inner Mongolia, northern China[J]. *Catena*, 2021, 206:105528
- [16] 胡健, 曹全恒, 刘小龙, 等. 草灌植被转变对草地生态系统及其水碳过程的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2022, 42(11): 4324-4333
- HU J, CAO Q H, LIU X L, et al. Research progress on the effect of the transition between shrub and grass vegetation on grassland ecosystem and its water-carbon processes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(11): 4324-4333
- [17] WEN H, SULLIVAN P L, MACPHERSON G L, et al. Deepening roots can enhance carbonate weathering by amplifying CO₂-rich recharge[J]. *Biogeosciences*, 2021, 18(1): 55-75
- [18] MARSCHNER H. Marschner's mineral nutrition of higher plants[M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 1995
- [19] 吴宇萍, 丁明军, 张华, 等. 高寒草甸重度退化阶段土壤碳氮磷生态化学计量特征及驱动因素[J]. *环境科学*, 2024, 45(10): 6050-6060
- WU Y P, DING M J, ZHANG H, et al. Characteristics and drivers of soil carbon, nitrogen, and phosphorus ecological stoichiometry at the heavy degradation stage of the alpine meadow[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(10): 6050-6060
- [20] ELSER J J, FAGAN W F, KERKHOFF A J, et al. Biological stoichiometry of plant production: metabolism, scaling and ecological response to global change[J]. *New Phytologist*, 2010, 186(3): 593-608
- [21] CHEN M Y, YANG X, SHAO M A, et al. Changes in soil C - N - P stoichiometry after 20 years of typical artificial vegetation restoration in semiarid continental climate zones[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 852: 158380
- [22] MEYER S E, PENDLETON B K. Seedling establishment in a masting desert shrub parallels the pattern for forest trees[J]. *Acta Oecologica*, 2015, 65/66: 1-10
- [23] 郭倩, 王博, 樊勇明, 等. 半灌木扩张草原土壤细菌群落特征及其影响因素[J]. *草地学报*, 2024, 32(5): 1410-1419
- GUO Q, WANG B, FAN Y M, et al. Characteristics and influencing factors of soil bacterial communities in subshrub encroachment grasslands[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(5): 1410-1419
- [24] ZHANG C C, WANG Y Q, JIA X X, et al. Impacts of shrub introduction on soil properties and implications for dryland revegetation[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 742: 140498
- [25] GAO X L, LI X G, ZHAO L, et al. Shrubs magnify soil phosphorus depletion in Tibetan meadows: conclusions from C: N: P stoichiometry and deep soil profiles[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 785: 147320
- [26] LU N, FU B J, JIN T T, et al. Trade-off analyses of multiple ecosystem services by plantations along a precipitation gradient across Loess Plateau landscapes[J]. *Landscape Ecology*, 2014, 29(10): 1697-1708
- [27] 李傲天, 李志丽, 王红梅, 等. 荒漠草原不同植物群落土壤氮矿化对水分梯度的响应[J]. *生态学报*, 2025, 45(2): 757-768
- LI A T, LI Z L, WANG H M, et al. Response of soil nitrogen mineralization of different plant communities in desert grassland to different moisture gradients[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(2): 757-768
- [28] 吴凤燕, 吴永胜, 陈晓涵, 等. 鄂尔多斯高原3种固沙灌木水分利用效率的时空变化特征[J]. *植物生态学报*, 2024, 48(9): 1180-1191
- WU F Y, WU Y S, CHEN X H, et al. Spatial-temporal variation of water use efficiency in three species of sand-fixing shrubs on the Ordos Plateau[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2024, 48(9): 1180-1191
- [29] 于露, 周玉蓉, 赵亚楠, 等. 荒漠草原土壤种子库对灌丛引入和降水梯度的响应特征[J]. *草业学报*, 2020, 29(4): 41-50
- YU L, ZHOU Y R, ZHAO Y N, et al. Responses of the soil seed bank to simulated rainfall levels and anthropogenically introduced shrub encroachment in the desert steppe[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(4): 41-50
- [30] ZHAO Y N, WANG H M, LI Z G, et al. Anthropogenic shrub encroachment has accelerated the degradation of desert steppe soil over the past four decades[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 946: 174487
- [31] LI Z L, ZHAO Y N, LI Z G, et al. Nearly 30a shrub introduction in desert steppes has led to an increase in saprotrophic fungi, accelerating the degradation of carbon compounds and nitrate reduction[J]. *Environmental Research*, 2025, 264: 120402
- [32] BRADFORD J B, D'AMATO A W. Recognizing trade-offs in multi-objective land management[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, 10(4): 210-216
- [33] ZHANG A L, YIN J F, LI X Y, et al. Plant community characteristics and responses of C, N, and P to different water gradients in northern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 24(1): 483-496
- [34] LIU J B, ZHANG Y Q, WU B, et al. Changes in soil carbon, nitrogen, and phosphorus along a chronosequence of *Caragana microphylla* plantation, northwestern China[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2014, 23(2): 385-391
- [35] 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: 104213
- [36] GAO X L, LI X G, ZHAO L, et al. Regulation of soil phosphorus cycling in grasslands by shrubs[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 133: 1-11
- [37] HOU H Y, ZHANG Y Z, ZHOU J W, et al. Aridity and soil properties drive the shrub - herb interactions along drought gradient in desert grassland in Inner Mongolia[J]. *Agronomy*, 2024, 14(11): 2588
- [38] CHAI Q L, MA Z Y, AN Q Q, et al. Does *Caragana* Korshinskii plantation increase soil carbon continuously in a water-limited landscape on the Loess Plateau, China?[J]. *Land Degradation*

- tion & Development, 2019, 30(14): 1691-1698
- [39] ZHU N, YAN Y C, BAI K Y, et al. Conversion of croplands to shrublands does not improve soil organic carbon and nitrogen but reduces soil phosphorus in a temperate grassland of northern China[J]. *Geoderma*, 2023, 432: 116407
- [40] 李志丽, 王红梅, 赵亚楠, 等. 荒漠草原灌丛引入过程中土壤氮矿化的季节动态及其影响因子[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(8): 2161-2170
- LI Z L, WANG H M, ZHAO Y N, et al. Seasonal dynamics of soil nitrogen mineralization and their influencing factors during shrub anthropogenic introduction in desert steppe[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(8): 2161-2170
- [41] ZHANG Z J, ZHAO Y N, LI Z G, et al. Vegetation drives soil microbial metabolic limitation through modifications of soil properties and microbial biomass during desert grassland-shrubland state anthropogenic transition[J]. *Applied Soil Ecology*, 2024, 202: 105609
- [42] LIU J, WANG J, MORREALE S J, et al. Contributions of plant litter to soil microbial activity improvement and soil nutrient enhancement along with herb and shrub colonization expansions in an arid sandy land[J]. *Catena*, 2023, 227: 107098
- [43] GUO X, WEI T X, CHEN Y X, et al. Characteristics of soil ecological stoichiometry in typical fallow-restored vegetation in the loess hilly areas[J]. *Arid Land Geography*, 2022, 45(6): 1899-1907
- [44] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1): 139-151
- [45] 李志丽, 王红梅, 孙忠超, 等. 宁夏东部荒漠草原-灌丛地转变过程土壤氮素响应[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(4): 1230-1240
- LI Z L, WANG H M, SUN Z C, et al. Response of soil nitrogen in the process of desert grassland-shrub land transition in eastern Ningxia[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(4): 1230-1240
- [46] ZHANG G Q, ZHANG P, PENG S Z, et al. The coupling of leaf, litter, and soil nutrients in warm temperate forests in north-western China[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 11754
- [47] 周磊, 孙宗玖, 聂婷婷, 等. 凋落物添加对蒿类荒漠草地土壤碳氮磷含量及其化学计量特征的影响[J]. *草地学报*, 2024, 32(2): 462-469
- ZHOU L, SUN Z J, NIE T T, et al. Effects of litter additions on soil carbon, nitrogen and phosphorus contents and their stoichiometric characteristics in sagebrush desert grassland[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(2): 462-469
- [48] 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): 27
- [49] KOOCH Y, SOHRABZADEH Z. Soil quality indicators are clearly plant species-specific: implication for ecosystem management in a semi-arid landscape[J]. *Ecological Engineering*, 2024, 207: 107357
- [50] BERDUGO M, DELGADO-BAQUERIZO M, SOLIVERES S, et al. Global ecosystem thresholds driven by aridity[J]. *Science*, 2020, 367(6479): 787-790
- [51] CLEMMENSEN K E, BAHR A, OVASKAINEN O, et al. Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest[J]. *Science*, 2013, 339(6127): 1615-1618
- [52] LIU Y F, FANG H, SHI J J, et al. Climate change-induced shrub encroachment changes soil hydraulic properties and inhibits herbaceous growth in alpine meadows[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 340: 109629
- [53] SU B Q, SU Z X, SHANGGUAN Z P. Trade-off analyses of plant biomass and soil moisture relations on the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2021, 197: 104946
- [54] 王子寅, 刘秉儒, 李子豪, 等. 不同发育阶段柠条灌丛堆土壤生态化学计量学特征[J]. *中国草地学报*, 2023, 45(5): 9-19
- WANG Z Y, LIU B R, LI Z H, et al. Soil ecological stoichiometric characteristics of *Caragana korshinskii* shrubs at different developmental stages[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(5): 9-19
- [55] D'ODORICO P, OKIN G S, BESTELMEYER B T. A synthetic review of feedbacks and drivers of shrub encroachment in arid grasslands[J]. *Ecohydrology*, 2012, 5(5): 520-530

(责任编辑 彭露茜)