燕麦生物沙障对青海湖流域沙地土壤碳氮磷含量的影响

李纪昀[1], 王 倩[2], 何克燕[1], 王佳豪[3], 魏小星[1]

(1.青海大学 畜牧兽医科学院 青海省青藏高原优良牧草种质资源利用重点实验室, 青海 西宁 810016; 2.青海大学 省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016; 3.中国农业科学院 草原研究所, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘 要: [目的]评估燕麦(*Avena sativa*)生物沙障在高寒沙地修复中的土壤改良潜力,明确其在2 a种植期内对土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征的调控机制,为高寒沙化草地的生态恢复提供理论依据和实践指导。[方法]以青海湖流域典型高寒流动沙丘为研究对象,设置燕麦生物沙障样带,在2 a连续生长周期内选择播种前(T_1)、首个生长季末(T_2)、第二年生长季初(T_3)及第二年生长季末(T_4),共4个关键时期开展土壤采样,测定不同生长阶段土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征的变化。[结果]燕麦生物沙障可以显著提升表层土壤(0—20 cm)的有机碳(SOC)和全氮(TN)含量,全磷(TP)含量提升较为缓慢,T_4时期表层土壤SOC和TN含量较T_1时期分别提高18.2%和29.3%,深层土壤(20—40 cm)分别提高56.8%和27.0%。表层土壤T_4时期速效氮(AN)和速效磷(AP)含量分别较T_1时期提高19.8%和72.7%,土壤pH值下降15.0%。随着种植时间增加,C/N和C/P呈先增加后降低的趋势,而N/P呈逐渐上升的趋势。SOC,TN,TP和pH值是影响计量特征的主要因子。[结论]燕麦生物沙障可有效提升土壤有机质水平与养分供给,促进了元素的循环。同时优化了C,N,P生态化学计量结构,缓解了元素限制问题,增强土壤生态功能,且修复效益在2 a内随种植时间延长而逐步积累,具备长期促进土壤质量恢复的潜力。

关键词: 燕麦; 高寒沙地; 土壤碳氮磷; 生物沙障; 生态化学计量特征

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2025)06-0023-10 **中图分类号:** S153.6, S812.2

文献参数: 李纪昀, 王倩, 何克燕, 等.燕麦生物沙障对青海湖流域沙地土壤碳氮磷含量的影响[J].水土保持通报,2025,45(6):23-32. Li Jiyun, Wang Qian, He Keyan, et al. Effects of *Avena sativa* biological sand barriers on soil carbon, nitrogen, and phosphorus contents in alpine sandy land of Qinghai Lake basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2025,45(6):23-32.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.025 **CSTR:32312.14.stbctb.2025.06.025**

Effects of *Avena sativa* biological sand barriers on soil carbon, nitrogen, and phosphorus contents in alpine sandy land of Qinghai Lake basin

Li Jiyun[1], Wang Qian[2], He Keyan[1], Wang Jiahao[3], Wei Xiaoxing[1]

(1.*Academy of Animal Science and Veterinary, Qinghai University/Key Laboratory of Superior Forage Germplasm in the Qinghai-Xizang Plateau, Xining, Qinghai* 810016, *China*; 2.*State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining, Qinghai* 810016, *China*; 3.*Institute of Grassland Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot, Inner Mongolia* 010018, *China*)

Abstract: [Objective] The soil improvement potential of oat (*Avena sativa*) biological sand barriers in the restoration of alpine sandy land were evaluated in order to clarify their regulatory mechanisms on soil carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) nutrients and their ecological stoichiometric characteristics during a two-year planting period, and provide theoretical and practical guidance for the ecological restoration of desertified grassland in alpine regions. [Methods] Typical alpine mobile sand dunes in Qinghai Lake basin were selected as the study

收稿日期:2025-05-15 **修回日期:**2025-08-20 **采用日期:**2025-08-21

资助项目:青海省科技厅—青海省中央引导地方科技发展资金项目"青海湖流域高寒沙地综合治理技术集成与示范"(2024ZY034)

第一作者:李纪昀(2000—),男(汉族),山西省运城市人,硕士研究生,研究方向为荒漠化防治。Email:1424560423@qq.com。

通信作者:魏小星(1985—),男(汉族),陕西省绥德县人,博士,副研究员,主要从事牧草育种、抗逆境机理研究。Email:wuiko@163.com。

area, where oat biological sand barrier plots were established. Soil samples were collected at four key time points over a two-year continuous growing period: before sowing (T_1), at the end of the first growing season (T_2), at the beginning of the second growing season (T_3), and at the end of the second growing season (T_4). Soil carbon, nitrogen, phosphorus contents and their ecological stoichiometric characteristics were determined at different growth stages. [Results] The oat biological sand barriers significantly increased the soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) contents in the surface soil (0—20 cm), while the increase in total phosphorus (TP) was relatively slow. In the T_4 period, the SOC and TN in the surface soil increased by approximately 18.2% and 29.3%, respectively, compared to the T_1 period, and the SOC and TN in the deep soil (20—40 cm) increased by 56.8% and 27.0%, respectively. The available nitrogen (AN) and available phosphorus (AP) contents in the surface soil increased by 19.8% and 72.7%, respectively, in T_4 compared to T_1, while soil pH value decreased by approximately 15.0%. With increasing planting duration, the C/N and C/P ratios showed a trend of first increasing and then decreasing, while the N/P ratio showed a gradually increasing trend. Mantel test results indicated that SOC, TN, TP, and pH value were the main factors influencing the stoichiometric characteristics. [Conclusion] The oat biological sand barriers effectively enhance soil organic matter level and nutrient supply, promoting the cycling of elements. Additionally, they optimize the ecological stoichiometric structure of C, N, and P, alleviate nutrient limitations, and enhance soil ecological functions. Furthermore, the restoration benefits accumulate progressively over the two-year planting period, demonstrating potential for long-term soil quality restoration.

Keywords: *Avena sativa*; alpine sandy land; soil carbon, nitrogen, and phosphorus; biological sand barriers; ecological stoichiometric characteristics

青海湖流域地处青藏高原东北缘,属高寒地区。该地气候寒冷、干旱且多风,加之植物生长周期短,生态系统恢复能力弱,使得草地生态系统对气候变化及人类活动极为敏感,易发生退化与沙化[1-2]。同时,青海湖流域维系着青藏高原东北部的生态安全,是遏制沙漠化向东蔓延的天然屏障[3],因此基于其脆弱敏感的生态环境以及重要的屏障作用,理解其沙化过程及恢复机制尤为重要。

在高寒沙地生态系统中,广泛分布的裸露地表斑块不仅是风蚀与土壤退化的主要发生源,还显著抑制了植物种子的萌发和幼苗的生长。裸斑区域由于缺乏植被覆盖,土壤易受风蚀影响,其表层种子库丧失,从而显著降低了自然植被恢复的潜力[4]。此外,裸露地表在持续风力作用下,加剧了沙化过程,阻碍了生态系统的恢复与稳定[5]。因此,遏制风蚀源,提高植物定植率,成为遏制高寒沙地退化的重要突破口[6]。

近年来,生物沙障作为一种"以植物构建地表生态屏障"的生态工程措施,在青藏高原等高寒沙化地区被广泛应用。生物沙障通过构建以固沙植物为核心的生态缓冲带,既能改善土壤结构与微环境条件,又能稳定地表,提升水分与养分利用效率,表现出良好的生态修复潜力。已有研究表明,生物沙障能提升土壤有机碳、全氮和全磷含量,改善酶活性和微生物群落结构[7],从而促进沙化草地土壤质量的提升和生态系统功能的恢复。Zhong Linfen等(2024)[8]通过研究中国北部4个不同沙漠的生物沙障长期治理效果,发现生物沙障在养分供给、防风固沙等方面都具有良好的效果。生物沙障作为一种良好的治沙途径,其沙障类型的选择尤为重要。现阶段高寒地区应用较为广泛的生物沙障有燕麦(*Avena sativa*)、披碱草(*Elymus nutans*)、中华羊茅(*Festuca sinensis*)等,沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)等乔、灌木常被用于构建组合式生物沙障,以达到更加良好的治理效果。其中,燕麦作为一种重要的饲草植物,因其根系发达、抗逆性强等特性,成为该区域生态恢复中常用的植物之一。燕麦能够在短期内迅速覆盖地表,显著改善沙地水热条件,并促进土壤团粒结构的形成,其根系不仅具有较强的固定土壤能力,还能够有效减缓风蚀及水蚀的发生及发展,具有良好的防风固沙功能[9-10]。在青藏高原高寒沙化草地的恢复实践中,郎山鑫等[11]发现以燕麦为核心的生物沙障能显著提高土壤有机碳含量与地上生物量,从而增强生态系统的固碳能力与生产潜力。

土壤中的碳(C)、氮(N)、磷(P)及其生态化学计量比(C/N, C/P, N/P)是衡量土壤养分平衡与生态系统稳定性的重要指标。通过分析这些元素的比例关系,可以揭示土壤养分的限制因素及其对生态过程的影响,从而为生态系统管理提供科学依据[12],具有揭示养分限制与恢复生态系统稳态的关键意义。生物沙障在提升土壤养分及促进碳、氮、磷循环方面

已获得一定的研究进展。然而,生物沙障的生态修复效果通常存在时间滞后性,其对土壤养分积累与养分循环过程的影响,随着种植年限的增加而发生变化[13]。因此,探究燕麦沙障土壤C, N,P及其计量特征的时序变化和演变规律,有助于深入理解高寒沙地生态恢复中元素耦合过程及其生态功能重建机制。

本研究以青海湖流域典型高寒沙地为研究对象,通过为期2 a的燕麦沙障连续试验,系统评估其对不同种植时长,不同土层土壤C, N,P含量及计量结构的调控效应,揭示其计量特征的时序演变及关键驱动因子。同时,研究燕麦沙障在恢复初期对沙地土壤C, N,P含量及其计量特征的影响,分析不同土层计量结构的差异性表现,明确土壤养分计量结构变化的关键因子,有助于深化通过建植生物沙障可以对高寒沙化草地生态恢复中元素循环与功能重建之间关系的理解,为高寒沙化草地的生态修复提供理论依据和实践指导。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

2022年4月在青海湖湖东沙区典型流动沙丘区建立试验样地,地理坐标为37°12′34″—37°12′58″N,101°18′02″—101°18′59″E,海拔3 010 m。研究区位于青海湖环湖沙化核心带,属青藏高原高寒风蚀沙丘典型地貌类型,是青藏高原高寒沙化草地的典型区域,具有明显的地域代表性。试验区地表以流动—半固定—固定沙丘镶嵌形式分布,地貌起伏小。试验区设置的流动沙丘是区域内沙化程度最严重、生态系统最不稳定的土地类型,能够反映青藏高原高寒沙化草地的极端退化特征。同时,沙丘类型分布连续,有利于沙地生态恢复过程对比与系统研究。该地属于高寒半湿润气候,年均气温0.3～1.1 ℃,年降水量441.5 mm。原始植被覆盖度较低,仅为5%～6%[14-15],流动沙丘脊线以1 a生种虫实(*Corispermum declinatum*)、圆头沙蒿(*Artemisia sphaerocephala*)为主;半固定沙丘坡面生长着青海固沙草(*Orinus kokonorica*)与大穗委陵(*Calamagrostis macrolepis*);固定沙丘及沙间低地则形成沙蒿(*Artemisia ordosica*)、柠条(*Caragana jubata*)等灌草混合群落,并伴有沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、砂地柏(*Sabina vulgaris*)。各生境植物群落沿沙丘稳定度体现出"短命草—丛生禾—灌草丛"渐进演替序列。

研究区的土壤类型为风沙土,土壤有机质含量为1.64 g/kg,土壤全氮含量为0.15 g/kg,土壤全磷含量为1.26 g/kg。目前,青海湖流域沙漠化土地面积达1.17×10^5 hm^2,其中,流动沙地占42.74%,半固定沙地占5.98%,固定沙地占14.53%,沙化草地占36.75%。

1.2　试验设计

在开究区域内设置一条6 m×50 m的样带,样带布设于区域内风蚀最强、退化最严重的流动沙丘中,样带方向与区域主导风向(西北风)一致,涵盖迎风西北方向和背风西南方向的沙丘,具有一定的代表性(图1)。样地布设采用规格为1 m×1 m的草方格结构,播种燕麦品种为加燕2号,播种深度5 cm,播后覆土镇压。土壤采样时间设置为4个阶段,分别为播种前(2022年4月,T_1)、播种后第一个生长季末(2022年10月,T_2)、第二年生长季初(2023年4月,T_3)以及第二年生长季末(2023年10月,T_4),采用随机采样法,每个阶段在样带中随机选择20个取样点,用土钻采集0—20 cm和20—40 cm 2个土层的土样,用于测定土壤理化指标。土壤容重测定的样品采用100 cm^3环刀进行采集。采样点间距大于2.5 m,避免样点间数据干扰。

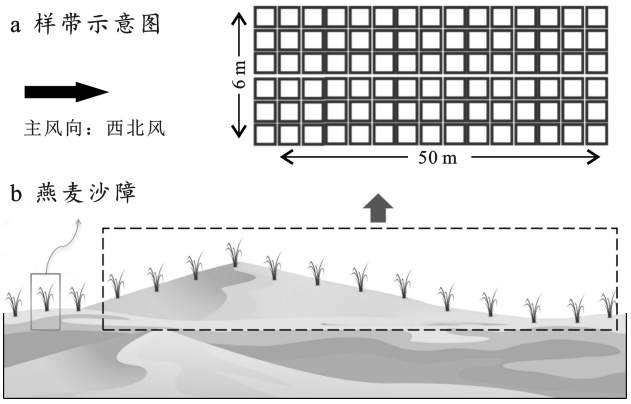


图1　青海湖流域燕麦生物沙障试验样地示意图
Fig.1　Schematic diagram of experimental plots of oat biological sand barriers in Qinghai Lake basin

1.3　测定方法

采集的土样去除植物残体和石块,封装在自封袋中带回实验室,土样在室外进行风干。风干后,部分土样过0.15 mm的筛,用于测定土壤有机碳、全氮、全磷含量,另一部分土样过2 mm筛后用于测定氨态氮、硝态氮、速效磷、pH值等指标。测定土壤容重的土壤样品放入烘箱内于105 ℃烘干至恒重,称样,并记录重量。土壤理化指标测定参考《土壤农化分析》[16],其中,土壤pH值采用土壤电极法测定;土壤容重采用环刀法测定;土壤有机碳(SOC)含量采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定;土壤全氮(TN)含量采用半微量凯氏定氮法测定;土壤全磷(TP)采用$HClO_4$-H_2SO_4消煮-钼锑抗比色法测定;土壤速效磷(AP)采用$NaHCO_3$浸提-钼锑抗比色法测定;土壤

铵态氮和硝态氮采用氯化钾流动注射法测定。计算得出土壤C/N, C/P, N/P。

1.4 数据分析

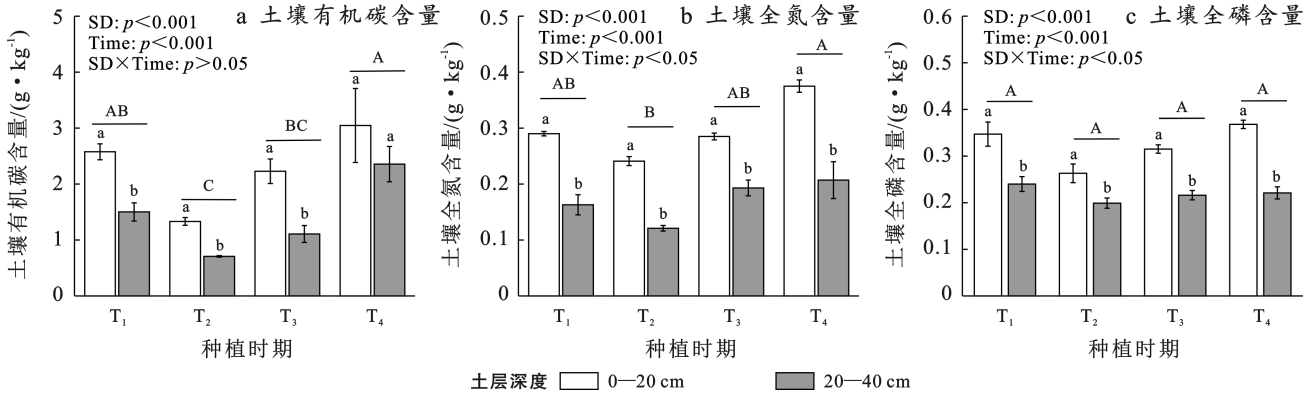
利用Shapiro-Wilk正态性检验对各土壤指标(SOC,TN,TP,AN,AP,C/N,C/P,N/P比值及pH值)进行正态分布检验。对不满足正态分布的SOC,TP相关数据进行对数转换,以满足后续分析要求。各土壤理化性质的主效应及其交互作用采用双因素方差分析(two-way ANOVA),以种植时期(T_1,T_2,T_3,T_4)和土层深度(0—20,20—40 cm)为固定因子,SOC,TN,TP,AN,AP,C/N,C/P,N/P为响应变量。差异性检验采用LSD多重比较法,显著性水平设定为$p<0.05$。采用Mantel test分析土壤理化性质(SOC,TN,TP,AN,AP,pH)与养分比值指标(C/N,C/P,N/P)的相关性,以识别影响生态化学计量比的关键因子。上述分析均在R 4.1.1中完成。

2 结果与分析

2.1 燕麦生物沙障对高寒沙化草地土壤C,N,P含量的影响

燕麦生物沙障显著影响高寒沙化草地不同土层与不同时期的SOC, TN和TP含量($p<0.001$),其中TN和TP还受种植年限与土层的交互作用显著影响($p<0.05$)。3类养分元素均呈T_2降至最低、T_4升至最高的变化趋势。

图2a表明,不同时期、不同土层土壤SOC含量表现为:$T_4>T_1>T_3>T_2$,在T_4时期,0—20 cm和20—40 cm土层SOC含量分别达到3.05 g/kg和2.36 g/kg,分别较T_1时期提高18.2%和56.8%。T_1—T_3时期不同土层差异显著($p<0.05$),T_4不同土层差异不显著($p>0.05$)。不同时期、不同土层土壤TN含量表现为:$T_4>T_1>T_3>T_2$(图2b),其中T_4时期2个土层的土壤TN含量分别为0.36 g/kg和0.21 g/kg,较T_1时期土壤TN含量分别提升29.3%和27%,4个不同时期中,不同土层土壤TN含量差异显著($p<0.05$)。图2c表明,不同时期0—20 cm土层中土壤TP含量表现为:$T_4>T_1>T_3>T_2$,T_4时期达到最大,为0.368 g/kg,并且4个时期土壤TP含量彼此差异不显著($p>0.05$),20—40 cm土层中,T_4时期相较于T_1时期土壤TP含量增加的并不显著。在4个时期中,不同土层土壤TP含量差异显著($p<0.05$)。综合上述结果,燕麦沙障能显著增强土壤碳氮含量,改善程度在深层土壤中更为明显;磷元素因受环境限制,其积累速率相对滞后。



注:①不同大写字母表示在不同时期下差异显著,不同小写字母表示在不同土层下差异显著。②SD代表土层,Time为时期。下同。

图2 燕麦生物沙障对土壤C, N,P含量的影响

Fig.2 Effects of oat biological sand barriers on soil C, N and P contents

2.2 燕麦生物沙障对高寒沙化草地土壤生态化学计量比的影响

研究结果(图3)表明,不同土层(0—20 cm,20—40 cm)土壤N/P存在显著差异($p<0.05$)。燕麦生物沙障的种植时长对土壤C/N, C/P, N/P有着极显著的影响($p<0.001$),不同土层和种植时长的交互作用对土壤C/N, C/P有显著影响($p<0.05$),对N/P没有显著影响。其中C/N和C/P在4个不同的时期呈现先减后增的变化趋势,而N/P呈现逐年缓慢增加的趋势,说明在2 a的植物生长过程中,土壤SOC和TN得到有效提升,从而使C/N和C/P升高。由图3a可知,不同时期和不同土层土壤C/N分别表现为:$T_1>T_4>T_3>T_2$和$T_4>T_1>T_3>T_2$,0—20 cm土层中T_4时期C/N相较于T_1时期降低4.8%,20—40 cm土层中T_4时期C/N较T_1时期增大18.8%,T_4时期中不同土层深度土壤C/N差异显著($p<0.05$)。不同时期、不同土层土壤C/P表现为(图3b):$T_4>T_1>T_3>T_2$,不同土层T_4时期C/P相较于T_1时期分别提高15.3%和85.5%,4个时期土壤C/P彼此差异均显著($p<0.05$)。不同时期、不同土层土壤N/P表

现为(图 3c):T_4>T_3>T_2>T_1,不同土层 T_4时期土壤 C/P 较 T_1时期分别提高 28.1% 和 61.4%。这表明燕麦沙障对不同土层土壤的元素积累与循环作用提升显著。

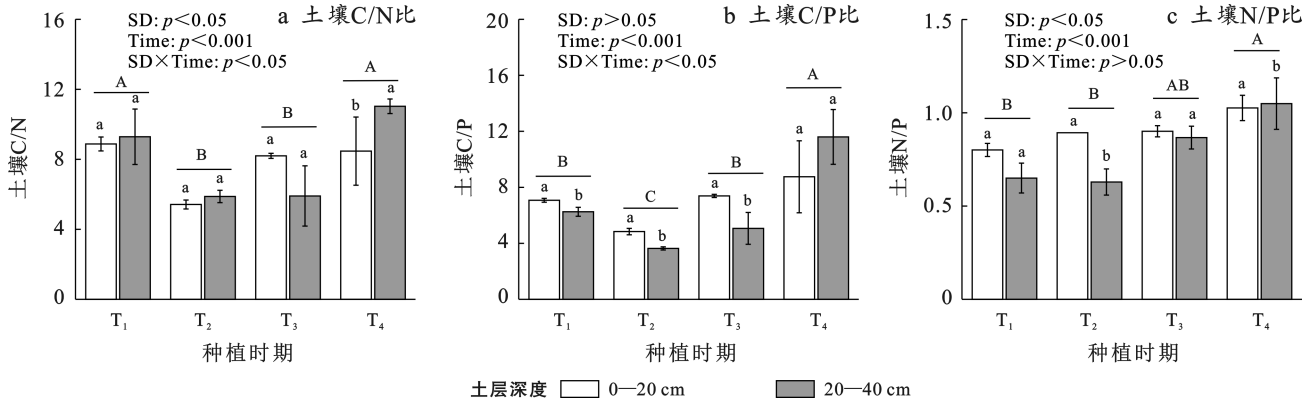


图 3　燕麦生物沙障对土壤生态化学计量比的影响

Fig.3　Effects of oat biological sand barriers on soil ecological stoichiometric ratios

2.3　燕麦生物沙障对高寒沙化草地土壤 pH 值及速效养分含量的影响

燕麦生物沙障治理高寒沙化草地的过程中,不同土层(0—20 cm,20—40 cm)土壤的 pH 值, AN, AP 含量存在极显著差异(p<0.001),种植时长对土壤 pH, AN, AP 含量具有极显著影响(p<0.001),不同土层和种植时长的交互作用对土壤 pH 值和 AN 含量有极显著影响(p<0.001)。图 4a 表明,不同时期,不同土层土壤 pH 值表现为 T_1>T_3>T_2>T_4,0—20 cm 土层 T_4时期土壤 pH 值最低,为 7.57,较 T_1时期降低 15.0%,20—40 cm 土层中 T_4时期土壤 pH 值达到最低,为 7.73,较 T_1时期降低 16.0%,4 个时期不同土层土壤 pH 值差异显著(p<0.05),表明燕麦沙障能够有效改善不同土层土壤的碱性状况。不同时期、不同土层土壤 AN 含量表现为(图 4b):T_4>T_3>T_1>T_2,0—20 cm 土层 T_4时期土壤 AN 含量达到 98.66 mg/kg,较 T_1时期提高 19.8%,20—40 cm 土层 T_4时期土壤 AN 含量达到 76.26 mg/kg,较 T_1时期提高 52.7%。不同时期、不同土层土壤 AP 含量表现为(图 4c):T_4>T_3>T_2>T_1,0—20 cm 土层 T_4时期土壤 AP 含量达到 4.18 mg/kg,较 T_1时期提高 72.7%,20—40 cm 土层 T_4时期土壤 AP 含量为 2.65 mg/kg,较 T_1时期提高 123.3%。

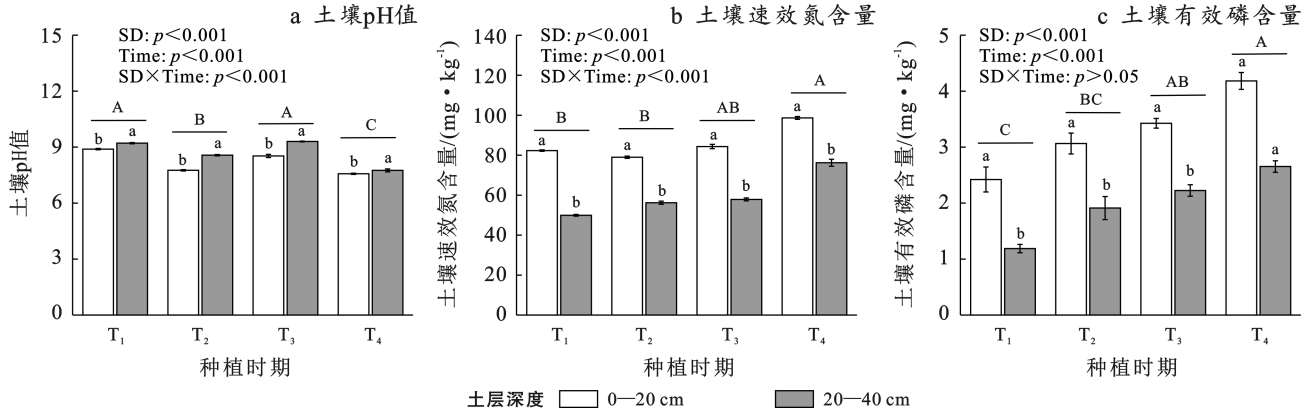


图 4　燕麦生物沙障对土壤 pH, AN, AP 的影响

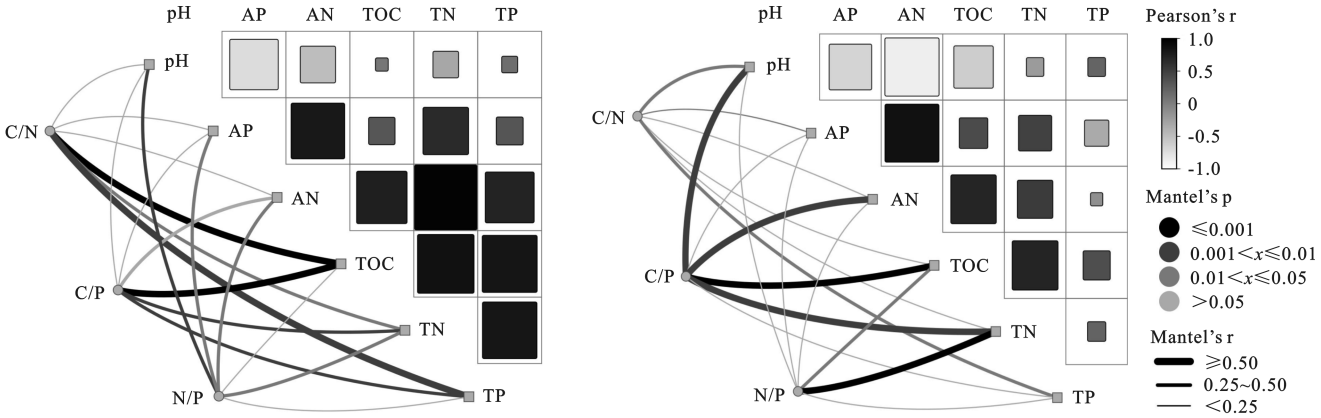
Fig.4　Effects of oat biological sand barriers on soil pH, AN, and AP

2.4　燕麦生物沙障对高寒沙地土壤碳氮磷计量特征与土壤性质间关系的影响

图 5 表明,在 0—20 cm 土层中,土壤 C/N 与土壤 SOC, TP, TN 含量和 pH 值均呈显著相关(p<0.05)。其中,C/N 与 SOC,TP 含量存在显著的正相关(p<0.001)。此外,土壤 C/P 与 SOC, TP, TN 含量亦表现出显著正相关(p<0.05 或 p<0.01)。土壤 N/P 与 AP, AN, TN 含量及 pH 也呈现显著相关(p<0.05)。这些结果表明,燕麦生物沙障通过改善土壤碳氮磷的循环,进而促进土壤养分的提高。

在 20—40 cm 土层中,土壤 C/N 与 SOC 表现出极显著正相关(p<0.001),表明燕麦生物沙障对土壤有机碳的积累具有良好的促进作用;C/P 与 SOC 含量和 pH 表现出显著的正相关(p<0.05),表明燕麦生

物沙障能够调节土壤酸碱性，改善深层土壤的营养状态，促进土壤的矿化过程。此外，土壤N/P与TN含量显著相关（$p<0.001$），表明燕麦生物沙障对较深层土壤的碳氮磷生态化学计量同样有显著影响。



a 土层0—20 cm　　b 土层20—40 cm

注：pH代表土壤酸碱度，AP代表土壤速效磷含量，AN代表土壤速效氮含量，SOC代表土壤有机碳含量，TN代表土壤全氮含量，TP代表土壤全磷含量，C/N代表土壤有机碳含量和全氮含量的比值，C/P代表土壤有机碳含量和全磷含量的比值，N/P代表土壤全氮含量和全磷含量的比值。

图5　土壤C，N，P计量特征与土壤性质的Mantel test分析

Fig.5　Mantel test analysis of soil C，N and P stoichiometric characteristics，and soil properties

3　讨　论

本研究基于燕麦生物沙障在青海湖流域高寒沙地中的实践应用，探讨其对土壤C，N，P及其生态化学计量比，以及对土壤pH值、速效养分的影响，发现燕麦生物沙障不仅显著改善了土壤的养分状态和理化性质，降低了土壤pH值，还显著改善了土壤中元素间的计量关系，促进生态系统向稳定状态演替。

3.1　生物沙障对土壤C，N，P含量的影响

土壤有机碳（SOC）、全氮（TN）和全磷（TP）是维持植物生长和生态系统功能的基础元素，其含量直接表明土壤养分水平与恢复状态[17-18]。燕麦沙障种植初期（T_1），研究区表层土壤SOC平均含量为2.58 g/kg，TN平均含量为0.29 g/kg，TP平均含量为0.34 g/kg，其中SOC，TN含量显著低于准噶尔沙漠表层土壤的SOC（5.73±0.49 g/kg）和TN（0.347±0.004 g/kg）含量，TP含量略高于准噶尔沙漠（0.207±0.009 g/kg）[19]，进一步印证了青海湖流域高寒沙地土壤整体贫瘠，且存在严重的养分缺失和生境劣势。这种土壤养分的亏缺是制约高寒沙地植被恢复和生态功能重建的关键限制因子。

本研究发现，随着燕麦生物沙障种植时间的增加，土壤中的有机碳（SOC）和全氮（TN）含量显著增加，表现为先降低后增加的趋势。初期养分含量下降可能与种植初期燕麦快速生长阶段对养分的高需求以及微生物尚未形成稳定的群落有关，造成土壤中的SOC，TN，TP含量暂时减少[20]。而在T_4时期，0—20 cm和20—40 cm土层SOC含量和TN含量分别比T_1时期提高18.2%，56.8%和29.3%，27%，表明燕麦沙障具有短期内快速改善土壤养分状况的潜力。这种植物恢复初期“养分先消耗后积累”的规律符合恢复生态系统中养分重建之后于植物重建的特征，也与Jiang Haodong等[14]对西南高寒区植被恢复研究结论一致。此外，高寒沙地环境下的低温和短生长期可能导致植物残体的分解速率较慢，土壤有机质的积累时间较长，短期内未能显现明显的养分提升效果[21]。在20—40 cm土层中，土壤SOC，TN，TP含量也有明显增高，燕麦沙障促进深层土壤养分的同步积累，表明燕麦的根系活动不仅局限于表层，其深层的穿透与养分的输入更有助于增加深层土壤的肥力，增强整体土壤的供养能力，这与Zhou Wenxin等[22]在腾格里沙漠中随着人工植被生长年限增加，土壤SOC和TN含量增加的结果趋同，说明燕麦生物沙障在治理沙化土壤过程中的长期效益。但是，T_4时期的土壤TP含量较T_1时期的提升并不显著，其原因可能是由于土壤中磷的来源主要依靠土壤母质分化以及微生物分解，严格受到高寒地区的低温及干旱的影响，由此造成土壤TP提升速率缓慢。因此，燕麦沙障虽然在初期促进土壤有机质的积累和氮素输入，初步改善土壤养分条件，能够在恢复早期激活土壤养分循环，验证了燕麦沙障是高寒沙地生态建设的重要干预措施，但磷的积累仍然受到较大限制。

3.2　生物沙障对土壤生态化学计量比的影响

土壤的C/N，C/P，N/P是生态系统养分状态与

元素循环效率的重要指标,能够表明有机质分解过程中土壤养分矿化与固化时间的动态平衡状况[23]。本研究结果表明,燕麦生物沙障的种植时长对土壤C/N,C/P,N/P均具有显著影响,说明其对土壤生态化学计量比具有明显的调控作用。而不同深度土层仅对N/P存在显著影响,表明土壤生态化学计量比不仅受到时间积累的影响,还受到土壤垂直分布差异的制约。

从时间趋势上,土壤C/N和C/P均呈先降低后升高的趋势。初期种植阶段可能因燕麦快速生长期对土壤养分的强烈吸收,打破了原有的养分平衡,尤其是土壤有机碳的大量消耗未能同步伴随足够的氮素和磷素积累,C/N和C/P比值短期内下降,导致土壤碳源与氮、磷元素吸收不平衡,从而造成计量比下降。随着种植时间的增加,燕麦植物残体的输入与根际碳释放逐步增加,土壤有机碳含量逐步增加,促使C/N和C/P不断增大,从而进入较为稳定的生态状态。此外,Rocci K S等[24]的研究指出,随着种植时间增加,植物根系释放碳源数量增多,能够激发微生物—矿物质协同作用,可以显著提升土壤C/N与矿化速率。

本研究中,燕麦根系通过释放碳源,形成根际与微生物的相互反馈,有效地促进有机质的分解,增加土壤C/N。在不同土层中,0—20 cm土壤的C/N在T_4时期较T_1时期略有下降(约4.8%),而20—40 cm土壤C/N在T_4时期较T_1时期却上升了18.8%,且T_4时期不同土层间C/N差异显著。说明燕麦沙障的种植能够影响深层土壤的元素循环,对下层土壤具有一定的改良作用。C/N的动态变化表明沙障干预下土壤碳氮循环从“快速消耗”与“不平衡”逐渐转为“养分积累”与“趋于平衡”的过程,表明燕麦生物沙障在促进高寒沙地养分循环机制建立中具有重要作用。

对C/P而言,与T_1时期相比,T_4时期C/P在0—20 cm和20—40 cm土层中分别提高了15.3%和85.5%,其中在T_4时期不同土层间差异并不显著,但在整体种植过程中,各时期差异显著。表明C/P对种植时长的响应更敏感,而土层间的分异不如C/N明显。C/P在T_4时期的增加说明虽然燕麦沙障显著促进有机碳积累,但由于高寒地区的磷主要来自母质风化和微生物的矿化,能够释放的磷元素较低,从而使得C/P在T_2—T_4时期迅速增长,这说明燕麦沙障恢复系统中碳积累效率显著高于磷的释放速率。C/P的升高不仅表明本研究区土壤碳的输入能力逐渐增强,也表明土壤存在磷限制的问题,在之后的恢复过程中可能会面临碳素积累而磷素不足的失衡问题。

与C/N和C/P不同,N/P在沙障种植的2 a中呈现逐渐缓慢上升趋势,其中T_4时期N/P显著高于T_1时期,而T_1—T_3时期N/P均没有明显差异。N/P的变化相对缓慢,表明土壤氮素供应能力在燕麦生物沙障的干预后逐渐增强,氮素限制有所缓解,但受微生物转化效率与环境条件的限制,致使N/P比值变化较为滞后。此外,氮素虽相对于碳的积累速率较慢,却快于由母质释放的磷素,导致N/P表现出缓慢递增的趋势。在不同土层中,N/P没有明显差异,这与氮素具有较高的活性且易迁移,而磷素积累位置更稳定有关,从而导致N/P在土壤垂直方向上逐渐趋同。

C/N, C/P和N/P的变化表明,随着燕麦沙障种植时间的增加,高寒沙地土壤碳、氮、磷循环由早期输入不足和养分失衡的状态,逐渐转向养分积累和结构稳定。其中,C/P的显著升高说明磷限制是目前土壤养分系统恢复的主要限制因素,而C/N与N/P的改善则表明养分循环效率正逐步增强。

3.3　燕麦生物沙障对土壤pH值及速效养分调节作用的影响

本研究结果表明,高寒区沙地种植燕麦生物沙障、土层和种植时间长短能够显著影响土壤pH值、速效氮和速效磷含量。T_4时期土壤的pH值由T_1时期的8.9下降至7.57,可能是因为燕麦其根系活动通过释放氢离子、有机酸,促进土壤酸化,有利于打破养分固定,提升氮磷的有效性。速效氮(AN)和速效磷(AP)含量显著上升,主要是因为燕麦根系释放的分泌物和有机酸改变沙地土壤的微环境,从而促进土壤中氮矿化,同时加速矿质养分的溶解以及磷的活化,这一结论与Lu Peina等[25]和Hinsinger P[26]的研究结果一致。Qian Hongyu等[27]等研究表明,在高寒沙地的恢复过程中,3 a后的土壤AP含量相较于第一年提升约45%,而在本研究中燕麦沙障栽植第二年土壤AP含量提升约52%,提升效果更为显著。同时,苟小林等[2]对川西北高寒沙地的研究结果表明植物沙障可以使植被得到恢复,从而增加土壤生物的活性以及有机质的输入,使得养分的利用率得到提升。在本研究中,T_4时期土壤的速效氮、速效磷较T_1时期都有显著的提升,可能首先得益于燕麦沙障能够增加表层土壤枯落物的堆积量,从而为土壤提供更丰富的腐殖质,其次土壤微生物的多样性与活性增加,加速有机物的分解以及无机化过程。pH值下降促进AN和AP释放,有助于改善土壤磷—氮配比,这也是调控C/P与N/P的重要路径之一。这一变化从生态恢复机制角度说明生物沙障通过改善根际环境、激活土壤养分循环、优化养分可利用性,在高寒

沙化草地生态修复中具有重要作用。因此,燕麦生物沙障可能通过根际酸化作用及其微生物-养分变化机制,调节高寒沙地土壤pH值与速效养分供给,改善养分可利用性。这一过程强化土壤—植物二者的正反馈循环,为退化沙地养分循环功能的重建提供支撑。

3.4 燕麦生物沙障对高寒沙地土壤碳氮磷计量特征与土壤性质间关系的影响

Mantel test分析结果表明,燕麦生物沙障的治理可以显著改变高寒沙地土壤碳氮磷及其生态化学计量特征与土壤性质的相关程度。

在0—20 cm土层中,土壤C/N与土壤SOC,TN,TP,pH具有显著的相关性。首先,土壤C/N的提升主要依赖于土壤SOC与TN的积累,其次也受到土壤pH的调节作用的影响。在20—40 cm土层中,C/N主要与SOC和AN显著相关,说明深层C/N更依赖于根系向下延伸带来的有机质输入和可矿化氮素的供应。这表明燕麦沙障的根际调节功能不仅作用于表层土壤,也在一定程度上改善深层土壤的碳氮循环状态,这与李彦林等[28]的研究结果一致,表明植物根系活动以及有机质的输入是影响土壤C/N变化的重要因素。在0—20 cm土层中,土壤C/P与土壤SOC,TN,TP含量呈显著的正相关,表明土壤C/P是在土壤SOC,TN,TP的共同作用下而变化的,土壤C/P的变化可能是由于有机质的输入从而促进有机质的矿化过程,进而影响土壤养分的再分配以及土壤的C/P,这一结果与Yang Xueyun[29]的研究结果一致。

在20—40 cm土层中,土壤C/P与pH值呈极显著正相关($p<0.001$)。pH值下降有助于磷酸盐释放,从而缓解因碳输入快速上升带来的C/P不平衡的情况。C/P与pH值的强相关性也表明pH值的变化是沙障影响土壤计量结构的关键路径。0—20 cm土层中,土壤N/P与土壤AP,AN,TN含量呈显著正相关($p<0.05$),这与前文所提到土层N/P可以判断土壤N和P的限制情况,而本研究中土壤低N/P表明土壤受到了N限制的结论一致,土壤pH值与土壤N/P呈极显著正相关($p<0.01$),表明土壤的酸碱环境在调控土壤N/P方面具有关键作用。陶冬雪等[30]的研究表明,pH值下降有助于增强氮素矿化速率,同时提高磷的可利用性,从而改变N与P的相对供给关系。此外,土壤N/P与土壤pH值的正相关关系进一步表明,土壤酸碱性在调控土壤氮磷供给方面发挥重要作用。而TN在不同土层多个计量比中都起到重要的作用,尤其在C/P与N/P中呈显著的正相关关系,表明燕麦生物沙障能够显著促进土壤的氮素积累,同时缓解土壤氮限制的状况。

综上所述,燕麦生物沙障不仅通过促进土壤有机质积累和氮素输入有效地改善土壤的养分状况,而且通过调节土壤的碳氮磷计量特征,优化土壤中各元素的循环机制。Mantel test分析结果表明,SOC,TN,AN和pH是影响土壤生态化学计量特征的主要因素,这些因素通过促进有机质输入、养分转化速率和微环境条件的改变,共同推动土壤生态化学计量比的改善。燕麦生物沙障不仅提升土壤的基础养分水平,而且促进土壤-植物系统的正反馈循环,推动高寒沙地生态系统的恢复和稳定。

4 结 论

本研究以青海湖流域高寒沙地为对象,分析燕麦生物沙障对土壤理化性质及碳氮磷生态化学计量特征的调节作用,揭示其主要驱动因子及作用路径。

(1)燕麦沙障能够在短期内显著提升表层(0—20 cm)土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量,同时深层(20—40 cm)土壤也表现出明显的养分积累趋势。燕麦沙障具备良好的养分输入与积累功能,显著提升高寒沙地土壤的养分含量,有助于改善高寒沙地土壤贫瘠状态。

(2)随燕麦沙障种植年限增加,土壤C/N,C/P值呈先降低后增加的变化趋势,而N/P呈逐渐增加的趋势,说明种植时间越长,土壤碳源输入和氮磷释放过程逐渐协调,缓解了土壤中存在的元素限制问题,计量比趋于稳定。

(3)燕麦沙障显著降低土壤pH值,并提升速效氮、磷等养分含量,说明植物根系分泌与微生物活性增强共同促进养分活化,对C/P与N/P比的平衡调节发挥关键作用。

(4)SOC,TN,TP及pH值是影响土壤计量特征变化的主要因子。燕麦沙障通过增强有机质输入、调节土壤微环境(如酸碱度)及促进氮素累积,驱动土壤C,N,P计量结构的变化。

燕麦生物沙障在高寒沙化草地生态修复的早期阶段,展现出显著的土壤改良和生态系统功能恢复效能。其作用不仅体现在提升养分含量,更在于加快碳氮磷循环效率,优化土壤生态化学结构,推动高寒沙地生态系统向健康稳态演替。该研究为进一步理解高寒生态系统恢复机制,优化沙地治理策略提供科学依据与理论支持。

参考文献(References)

[1] Xu Yudan, Dong Shikui, Shen Hao, et al. Degradation

significantly decreased the ecosystem multifunctionality of three alpine grasslands: Evidences from a large-scale survey on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Journal of Mountain Science, 2021,18(2):357-366.

[2] 苟小林,刘文辉,陈有军,等.植物沙障不同种植模式对川西北沙地的恢复效应[J].草业学报,2019,28(6):33-44.
Gou Xiaolin, Liu Wenhui, Chen Youjun, et al. Effect of different vegetation planting patterns in restoration of degraded sandy land in northwest Sichuan [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019,28(6):33-44.

[3] 崔腾宇,赵君,管梦鸾,等.基于生态评价的生态保护修复分区研究:以青海湖流域为例[J].环境工程技术学报,2024,14(2):592-600.
Cui Tengyu, Zhao Jun, Guan Mengluan, et al. Study on zoning of ecological protection and restoration based on ecological assessment: Taking Qinghai Lake basin as an example [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024,14(2):592-600.

[4] Tian Lihua, Yang Wen, Ji-Shi A, et al. Artificial reseeding improves multiple ecosystem functions in an alpine sandy meadow of the eastern Tibetan Plateau [J]. Land Degradation & Development, 2023,34(7):2052-2060.

[5] 郑玉琪,严佳玥,李博元,等.新疆针茅传播体形态及埋深对种子萌发出苗的影响[J].草业学报,2025,34(5):64-73.
Zheng Yuqi, Yan Jiayue, Li Boyuan, et al. Dispersal unit morphology, and effects of burial depth on seed germination and emergence of *Stipa sareptana* [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025,34(5):64-73.

[6] 贺丽,陈德朝,吴科君,等.川西北高寒区流动沙地植被恢复过程中物种组成及空间格局变化[J].四川林业科技,2022,43(6):87-93.
He Li, Chen Dechao, Wu Kejun, et al. Dynamics of species composition and spatial distribution pattern during vegetation restoration processes on mobile sandy land in alpine region of northwest Sichuan [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2022,43(6):87-93.

[7] Li Yiran, Hu Sijia, Lang Shanxin, et al. Soil quality and ecological benefits assessment of alpine desertified grassland following different ecological restoration measures [J]. Frontiers in Plant Science, 2023,14:1283457.

[8] Zhong Linfei, Feng Xiangyan, Zhao Wenzhi. Fixing active sand dune by native grasses in the desert of Northwest China [J]. Ecological Processes, 2024,13(1):77.

[9] 陈冬冬,田丽慧,张登山,等.青藏高原土地沙化研究进展[J].青海农林科技,2023(4):42-46.
Chen Dongdong, Tian Lihui, Zhang Dengshan, et al. Research progress of land desertification in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2023(4):42-46.

[10] 周青平,胡晓炜,汪辉,等.燕麦在维护国家粮食安全中的重要作用[J].草业学报,2024,33(10):171-182.
Zhou Qingping, Hu Xiaowei, Wang Hui, et al. The important role of oat in reinforcing the foundation of food security [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(10):171-182.

[11] 郎山鑫,胡嗣佳,李梦,等.生态恢复措施提升高寒沙化草地的固碳效应[J].环境科学与技术,2021,44(4):149-157.
Lang Shanxin, Hu Sijia, Li Meng, et al. Ecological restoration measures improved carbon sequestration of desertification grassland ecosystem in alpine area [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(4):149-157.

[12] Zhou Yao, Ma Jingli, Ma Jing, et al. Extending grazing time during the warm season can reduce P limitation and increase the N cycling rate in arid desert steppes [J]. Science of the Total Environment, 2024,941:173664.

[13] Xiao Jian, Zhang Jianglin, Li Peng, et al. Enhancing phosphorus transformation in typical reddish paddy soil from China: Insights on long-term straw return and pig manure application *via* microbial mechanisms [J]. Science of the Total Environment, 2024,940:173513.

[14] Jiang Haodong, Yang Nairui, Qian Hongyu, et al. Effects of different ecological restoration pattern on soil organic nitrogen components in alpine sandy land [J]. Agronomy, 2024,14(4):680.

[15] 金耀涛,田丽慧,张登山,等.高寒沙地地表风沙沉积物粒度特征的时空变化[J].青海农林科技,2024(4):82-90.
Jin Yaotao, Tian Lihui, Zhang Dengshan, et al. Spatiotemporal variation of particle size characteristics of surface aeolian sediments in alpine desert [J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2024(4):82-90.

[16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
Bao Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[17] Thapa M, Li Tianyang, He Binghui, et al. Soil C, N, and P stoichiometry in response to different land uses in an agroforestry hillslope of southwest China [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2022,68(5):615-629.

[18] He Mingzhu, Dijkstra F A, Zhang Ke, et al. Leaf nitrogen and phosphorus of temperate desert plants in response to climate and soil nutrient availability [J]. Scientific Reports, 2014,4:6932.

[19] 陶冶,刘耀斌,吴甘霖,等.准噶尔荒漠区域尺度浅层土

壤化学计量特征及其空间分布格局[J].草业学报,2016,25(7):13-23.
Tao Ye, Liu Yaobin, Wu Ganlin, et al. Regional-scale ecological stoichiometric characteristics and spatial distribution patterns of key elements in surface soils in the Junggar desert, China [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016,25(7):13-23.

[20] Turner B L, Mahieu N, Condron L M, et al. Quantification and bioavailability of scyllo-inositol hexakisphosphate in pasture soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005,37(11):2155-2158.

[21] 王安林,马瑞,马彦军,等.复合型治沙措施对土壤细菌群落结构及功能的影响[J].草业学报,2024,33(3):46-60.
Wang Anlin, Ma Rui, Ma Yanjun, et al. Effects of compound sand control measures on soil bacterial community structure and function [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024,33(3):46-60.

[22] Zhou Wenxin, Li Changjia, Wang Shuai, et al. Effects of vegetation restoration on soil properties and vegetation attributes in the arid and semi-arid regions of China [J]. Journal of Environmental Management, 2023,343:118186.

[23] Huo Chunlin, Zhang Zhonghua, Luo Yinghua, et al. Altitudinal patterns of soil and microbial C:N:P stoichiometry in subtropical forests in Daming Mountain, south China [J]. Frontiers in Earth Science, 2025,13:1569387.

[24] 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.

[25] Lu Peina, Yang T, Li Lijun, et al. Response of oat morphologies, root exudates, and rhizosphere fungal communities to amendments in a saline-alkaline environment [J]. PLoS One, 2020,15(12):e0243301.

[26] Hinsinger P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review [J]. Plant and Soil, 2001,237(2):173-195.

[27] Qian Hongyu, Yang Nairui, Jiang Haodong, et al. Effects of artificial vegetation restoration pattern on soil phosphorus fractions in alpine desertification grassland [J]. Plants, 2025,14(10):1429.

[28] 李彦林,陈杨洋,杨霜溶,等.植物根系分泌的有机酸对土壤碳氮矿化的影响[J].生态环境学报,2024,33(9):1362-1371.
Li Yanlin, Chen Yangyang, Yang Shuangrong, et al. Study on the effects of organic acids in plant root exudates on soil organic carbon and nitrogen mineralization [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024, 33(9):1362-1371.

[29] Yang Xueyun. Effect of supplying C and N on the mineralization and priming effect of organic matter in loessial soil [J]. Plant Nutrition and Fertilizing Science, 2007, 13(3) 423-429.

[30] 陶冬雪,高英志.土壤解磷微生物促进植物磷素吸收策略研究进展[J].生态学报,2023,43(11):4390-4399.
Tao Dongxue, Gao Yingzhi. Advances on the strategies of soil phosphate solubilizing microorganisms to promote plant phosphorus uptake [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(11):4390-4399.

(上接第22页)

[26] Parihar C M, Nayak H S, Rai V K, et al. Soil water dynamics, water productivity and radiation use efficiency of maize under multi-year conservation agriculture during contrasting rainfall events [J]. Field Crops Research, 2019,241:107570.

[27] 刘乐,孙宏义,蔡忠兰,等.兰州新区黄土工程开挖边坡植被重建初期土壤水分初步研究[J].冰川冻土,2020,42(3):1007-1016.
Liu Le, Sun Hongyi, Cai Zhonglan, et al. Preliminary study on the soil moisture of slopes of loess in Lanzhou New Area formed by engineering excavation in the early stage of revegetation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020,42(3):1007-1016.

[28] 高兵兵,刘晓曼,熊锦芳.生态阈值的研究综述与展望[J].草业学报,2025,34(7):210-218.
Gao Bingbing, Liu Xiaoman, Xiong Jinfang. A review and prospect of ecological threshold [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025,34(7):210-218.

[29] 李宏林,周浪敏,薛静,等.高寒沼泽化草甸群落常见种对土壤水分条件的响应研究[J].生态科学,2023,42(4):1-8.
Li Honglin, Zhou Langming, Xue Jing, et al. Responses of common species from alpine swamp meadow to different soil water condition [J]. Ecological Science, 2023,42(4):1-8.