腾格里沙漠东北缘花棒群落土壤 C,N,P 的化学计量特征

郑晓霞[1], 葛 楠[2,3], 刘艳萍[2,3], 唐国栋[2,3], 高 永[1]

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2.中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 北京 100038; 3.水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘　要:[目的] 研究干旱区植被恢复过程中土壤 C,N,P 含量的变化规律及其生态化学计量特征,为准确评估固沙植被对干旱环境土壤养分影响提供科学依据。[方法] 以腾格里沙漠东北缘 1992 年飞播造林区花棒群落为研究对象,以原生植被油蒿群落以及未进行植被恢复措施的流沙地作为对照(CK),分析花棒群落的土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量及其生态化学计量比的剖面特征。[结果] ①恢复约 30 a 的花棒群落土壤 SOC,TN,TP 含量分别为 0.71,0.03 和 0.27 g/kg,较未经飞播的流沙地均显著提高,分别提高了 73.2%,50%和 145.5%,且土壤 SOC 已恢复到原生植被油蒿群落的 58.6%。花棒群落的土壤 SOC,TN,TP 含量剖面分布规律表现为随土层深度减小,0—10 cm 土层显著高于其余土层深度($p<0.05$)。②花棒群落的土壤 C∶P 为 0.57,N∶P 为 0.13,较裸沙分别降低了 30.5%,48%,C∶N 为 22.41,较裸沙提高了 73.2%。花棒群落的土壤 C∶P,N∶P 随土层深度的增加而降低,C∶N 呈先增加后降低的趋势。花棒群落 0—200 cm 深度土壤 N∶P 均值为 0.13,远小于 14。[结论] 研究区随着固沙植被的恢复,土壤养分积累明显。花棒群落生长主要受到 N 元素的限制,建议在后期花棒群落恢复过程中,增施氮肥。花棒群落的土壤有机质矿化速率较低,SOC 分解速率小于积累速率,研究区土壤环境有利于花棒群落 C 的积累。

关键词:土壤养分;化学计量特征;腾格里沙漠;飞播造林

文献标识码:A　　**文章编号:**1000-288X(2025)01-0074-08　　**中图分类号:**S728.4, S714.2

文献参数:郑晓霞, 葛楠, 刘艳萍, 等.腾格里沙漠东北缘花棒群落土壤 C,N,P 的化学计量特征[J].水土保持通报,2025,45(1):74-81. Zheng Xiaoxia, Ge Nan, Liu Yanping, et al. C, N, and P stoichiometry characterization in soil of *Hedysarum scoparium* community at northeastern edge of Tengger Desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(1):74-81. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.009; CSTR:32312.14.stbctb.2025.01.009.

C, N, and P stoichiometry characterization in soil of *Hedysarum scoparium* community at northeastern edge of Tengger Desert

Zheng Xiaoxia[1], Ge Nan[2,3], Liu Yanping[2,3], Tang Guodong[2,3], Gao Yong[1]

(1.*College of Desert Control Science and Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Hohhot*, *Inner Mongolia* 010018, *China*; 2.*Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National Observation and Research Station*, *China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100038, *China*; 3.*Institute of Water Resources for Pastoral Area Ministry of Water Resources*, *Hohhot*, *Inner Mongolia* 010020, *China*)

Abstract: [Objective] The variation patterns of C, N, and P contents in soil and their ecological stoichiometric characteristics during the process of vegetation restoration in arid zones was analysed in order to provide a scientific basis for accurately assessing the impacts of sand-fixing vegetation on soil nutrients in arid environments. [Methods] A *Hedysarum scoparium* community in the 1992 aerial seeding afforestation area at the northeastern edge of the Tengger Desert was taken as the research object. The native vegetation *Artemisia oleifera* as well as a quicksand land without vegetation restoration measures were used as the control (CK). The soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) levels across

收稿日期:2024-08-16　　**修回日期:**2024-11-13　　**采用日期:**2024-11-14

资助项目:内蒙古自治区科技计划项目"黄河流域腾格里沙漠飞播造林区水资源高效利用新业态技术研究"(2022YFHH0096); 阿拉善左旗 2020 年飞播造林科技支撑项目(MK0199B012021)

第一作者:郑晓霞(1998—),女(汉族),内蒙古自治区乌兰察布市人,硕士研究生,研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email:272303349@qq.com。

通信作者:刘艳萍(1975—),女(汉族),内蒙古自治区鄂尔多斯市人,硕士,正高级工程师,主要从事草地水土保持与生态修复等研究。Email:mkslpy@126.com。

a soil profile in the *H. scoparium* community and their eco-chemometric characteristics were analyzed. [Results] ① The SOC, TN, and TP contents of the soil from the *H. scoparium* community, which was established more than 30 years ago, were 0.71, 0.03, and 0.27 g/kg, respectively. These were all significantly higher than those of the unseeded quicksand land by 73.2%, 50%, and 145.5%, respectively. The SOC was restored to 58.6% of that of the native vegetation *A. oleifera*. The distributions of SOC, TN, and TP content in the *H. scoparium* soil decreased with soil depth and were significantly higher in the 0—10 cm soil layer than in the other soil layers ($p<0.05$). ② The soil C∶P and N∶P ratios of the *H. scoparium* community were 0.57, and 0.13, which were 30.5% and 48% lower than those of the bare sand, respectively. The C∶N ratio was 22.41, which was 73.2% higher than that of the bare sand. The soil C∶P and N∶P ratios decreased with increasing soil depth, whereas the C∶N ratio showed an increasing followed by a decreasing trend. The average N∶P ratio in the *H. scoparium* community at a soil depth of 0—200 cm was 0.13, which was much smaller than 14 in the control groups. [Conclusion] The accumulation of soil nutrients in the study area became evident as sand-fixing vegetation was restored. The growth of the *H. scoparium* community was mainly limited by N. Thus, it is recommended to apply increased amounts of N fertilizer in the later stages of the *H. scoparium* community establishment. In addition, the *H. scoparium* community was observed to have a low soil organic matter mineralization rate, a lower rate of SOC decomposition than SOC accumulation, and a favorable soil environment for C accumulation.

Keywords: soil nutrients; stoichiometric characterization; Tengger Desert; aerial-seeding afforestation

土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)元素不仅是植物生长发育的养分来源,也是植物赖以生存的物质基础[1],影响植物群落的生长与稳定。生态化学计量特征则是反映 C, N, P 等多种化学元素能量的平衡和耦合关系,其定量的变化能够反映植物的生态适应策略。N 和 P 是陆地植被生长的主要养分限制因子,其有效性是调节凋落物分解速率和生态系统养分平衡的主要因素之一,因此研究土壤 C, N, P 化学计量特征在反映养分可获得性及 C, N, P 元素的循环和平衡机制方面具有重要的科学意义[2]。

荒漠生态系统土壤养分匮乏,生态环境脆弱,人工固沙植被的栽植与恢复过程导致土壤理化性质及化学计量特征发生显著变化[3]。刘源等[4]通过对库布齐沙漠采取不同人工建植措施发现,植被恢复可以改善土壤理化性状,显著影响土壤化学计量特征,提高荒漠生态系统 C, N 固存能力。淑敏等[5]对科尔沁沙地土壤的生态化学计量特征研究发现,樟子松人工林的种植增加了土壤碳、氮、磷养分含量,各林龄樟子松林土壤同时受氮、磷养分的限制,随土层加深受氮的限制更为显著。高君亮等[6]对乌兰布和沙漠土壤养分及化学计量特征的研究发现,绿洲化过程中土壤 C∶N, C∶P, N∶P 的变化趋势总体上呈先增大后减小,但达到最大值的时间各不相同。可以看出,在干旱半干旱地区固沙植被的恢复有效地提高了土壤养分,改变了化学计量特征。

飞播造林是干旱荒漠区生态修复与植被重建最直接有效的措施,腾格里沙漠东北缘 20 世纪 80 年代开始实施飞播造林,研究显示飞播造林有效遏制了沙漠边缘的扩张,飞播区植被盖度迅速提高,超过 10 a 的飞播植被盖度大多达到 15%以上,沙丘也由流动沙丘发育为固定沙丘[7],且花棒是众多飞播植物中恢复成效最为显著的固沙灌木之一。随着固沙植被的恢复土壤 C,N,P 含量及生态化学计量特征发生了怎样的变化,及其生长过程中所受何种土壤养分限制元素有待进一步深入研究。基于此,本研究主要以腾格里沙漠东北缘 1992 年飞播花棒植物群落为研究对象,以原生植被油蒿群落以及未进行植被恢复措施的流沙地为对照(CK),分析花棒群落飞播 30 a 后土壤 C, N,P 含量及其生态化学计量比随土层深度(0—200 cm)的变化规律。探讨花棒群落土壤养分的循环、平衡及限制状况,旨在揭示干旱沙区恢复飞播花棒人工林对土壤养分及化学计量比的影响,以期为后续开展飞播造林工作提供参考。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

研究区位于腾格里沙漠东北缘,行政区划隶属于阿拉善左旗(39°11′—39°18′N,104°53′—104°57′E),地形由东南向西北倾斜,属贺兰山洪积扇边缘,地势开阔,衔接起伏的沙丘,地表风蚀作用强,主要以固定、半固定沙地为主;土壤类型以非地带性风沙土为主,土壤质地均为砂土。自 1992 年实施禁牧飞播以来研究区内流动沙丘与固定沙地的面积逐渐减少,高盖度灌丛面积逐渐增多。该研究区属于大陆性干旱

荒漠气候，具有冬季寒冷、夏季炎热、风大沙多和干旱少雨的气候特征。年平均降水量在100～200 mm，降水主要集中在6—9月；年平均气温为9.1 ℃，最高气温可达36.1 ℃，最低气温为－22.4 ℃；该地区风力强劲，风沙活动强烈，年平均风速为1.9 m/s，主风向为西北风。主要群落组成有花棒（*Hedysarum scoparium*）、油蒿（*Artemisia ordosica*）、沙拐枣（*Calligonum mongolicum*），伴生有蒙古韭（*Allium mongolicum*）、针茅（*Stipa capillata*）、雾冰藜（*Bassiadasyphylla*）、沙米（*Agriophyllum squarrosum*）等旱生草本。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集 本试验于2022年7月选择阿拉善左旗境内的1992年飞播造林区作为研究样地，并选取一处未飞播裸沙作为对照样地（CK），在研究样地内选择目标荒漠植物群落（花棒、油蒿），每种植物群落以及裸沙样地内设置1个50 m×50 m的样方，共3个50 m×50 m的样方，并在样方内进行植被调查。采用全挖法对花棒群落样方中一株花棒整株挖出，测量其根系分布，结果详见表1，最深根分布于地下两米左右，由此确定采集土壤样品深度为0—200 cm。根据植被调查结果，在花棒、油蒿群落的样方内各选择3株生长状况良好的标准株，在标准株下以及裸沙样地内挖取地下深度为200 cm的土壤剖面，按照0—10 cm，10—20 cm，20—30 cm，30—60 cm，60—100 cm，100—150 cm，150—200 cm分7层，每层用6号塑封带采集土样作为一份土壤样品。将花棒群落的标准株下相同土层土壤进行编号H_1（0—10 cm），H_2（0—10 cm），H_3（0—10 cm），为3次重复处理，油蒿、裸沙样地同上。3个样地共计9个土壤剖面，63份土壤样品，带回进行土壤化学性质测定。

表1 标准株根系分布特征

Table 1 Characteristics of root distribution of standardized plants

植物	深度/cm	根数/条	基径/cm	根长密/（m·m^{-3}）	根系生物量	垂直分布深度/cm
花棒	63.33±88.46	11.78±15.7	3.33±4.58	1.55±2.19	1 066.41±1 505.54	0—200
油蒿	3.56±5.03	5.56±7.37	0.67±1.00	74.2±96.4	10.04±13.72	0—100

注：表中数据为平均值±标准差。下同。

1.2.2 样品的处理与分析 将土样样本放置于干燥、无风的环境自然风干，对风干后的土壤样本进行人为筛查，清除碎屑后，通过0.15 mm筛，存放在密封袋中。采用重铬酸钾—稀释热法测定土壤有机质[8]，根据有机质（SOM）与有机碳（SOC）转化公式，即SOM(g/kg)＝SOC(g/kg)×1.724[9]，计算出有机碳含量。采用硫酸—高氯酸消煮—靛酚蓝比色法测定土壤全氮（TN）含量[10]，采用钼锑抗比色法测定土壤全磷（TP）含量[11]，采用玻璃电极法测定土壤pH值[12]。

1.2.3 数据分析 利用Microsoft Excel（2023）统计不同指标间的平均值和标准差，在SPSS 26.0软件中采用单因素方差分析（one-factor analysis of variance）比较不同种植群落对土壤理化性质、土壤化学计量特征的影响；最小显著差异法（LSD）在多重比较检验中比较植物群落的土壤C，N，P含量和生态化学计量特征在不同土层深度之间的差异。对于不满足正态分布和齐性检验的指标进行LOG数据转化使其能够满足方差分析的要求，用Origin 2017软件进行作图。在SPSS 26.0中进行研究区土壤化学计量之间的相关性分析，同时在Excel 2023中作土壤C，N，P与化学计量比的函数关系图。如非特殊说明，本研究中所有的显著性水平均设为$\alpha=0.05$。

2 结果与分析

2.1 土壤C，N，P含量变化特征

飞播区恢复约30 a的花棒群落土壤理化性质详见表2。由表2可知，土壤pH整体介于8.53～8.75，花棒、油蒿、裸沙样地土壤pH值分别为8.66，8.74和8.54，属于碱性土壤。花棒SOC，TN和TP含量相较于裸沙地均显著提高。花棒SOC含量与原生植被油蒿及未飞播的流沙地有显著性差异（$p<0.05$），较裸沙提高73.2%，已恢复到原生植被油蒿群落的58.6%。花棒TN含量已恢复到原生植被油蒿的25%（$p<0.05$），较裸沙样地提高50%。飞播区固沙灌木的土壤TP含量总体较低属于极缺水平，花棒群落最高，为0.27 g/kg，较裸沙和油蒿分别提高了145.5%，145.2%（$p<0.05$）。

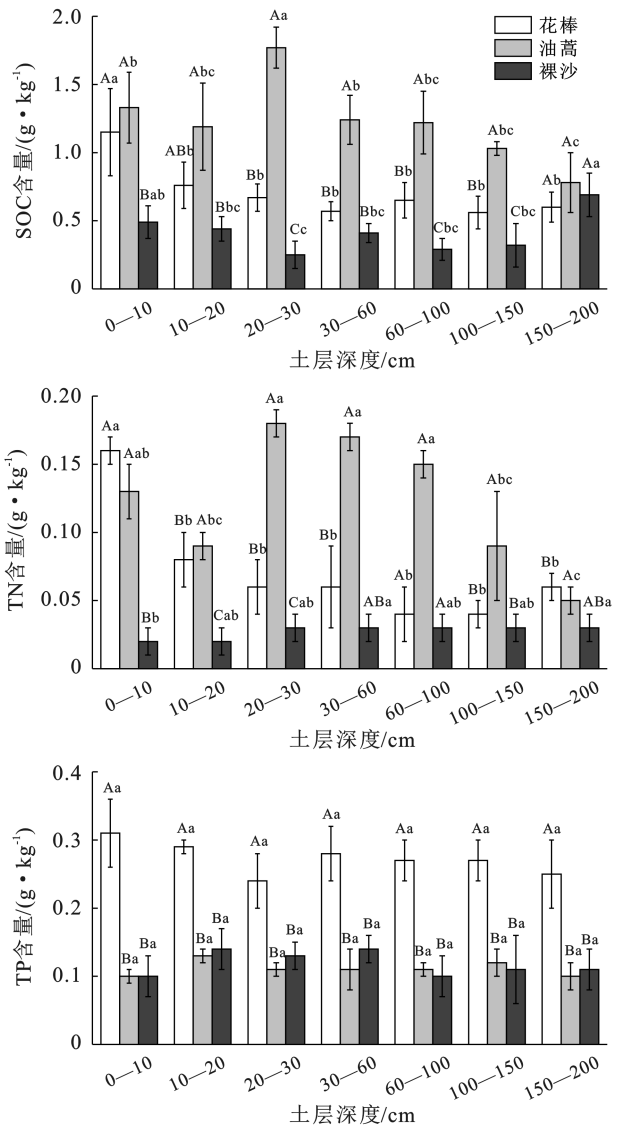
表2 研究区土壤理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of soils in study area

样地名称	SOC/（g·kg^{-1}）	TN/（g·kg^{-1}）	TP/（g·kg^{-1}）	pH值
花棒	0.71±0.14^b	0.03±0.01^b	0.27±0.03^a	8.66±0.01^b
油蒿	1.21±0.08^a	0.12±0.01^a	0.11±0.01^b	8.74±0.01^a
裸沙	0.41±0.11^c	0.02±0.01^b	0.11±0.03^b	8.54±0.01^c

注：同列数据后不同小写字母表示不同样地间差异显著（$p<0.05$）。下同。

由图 1 可以看出,研究区固沙花棒林下(0—200 cm)土壤 SOC 含量较裸沙显著提高($p<0.05$),在 0—150 cm 土层范围内花棒群落是裸沙样地的 1.98 倍,在 150—200 cm 土层处略低于裸沙。花棒群落的土壤 SOC 含量随土层深度增加而减小,0—10 cm 深度土壤 SOC 含量显著高于其余各层土壤($p<0.05$);花棒群落在 0—200 cm 土层范围内土壤 TN 含量较未飞播的流沙地均有所增加,随土层深度呈现降低趋势,其中 0—30 cm 增加幅度达 328.6%($p<0.05$),深层(150—200 cm)土壤中 TN 含量较裸沙提高了 100%;花棒 0—200 cm 深度土壤 TP 含量均显著高于裸沙样地以及油蒿样地($p<0.05$),是裸沙的 2.45 倍,是油蒿的 2.42 倍,且花棒群落的土壤 TP 含量随土层深度的增加而缓慢减小。



注:不同小写字母表示同一样地不同土层间差异显著($p<0.05$),不同大写字母表示同一土层不同样地间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 1　研究区土壤 C, N,P 含量垂直分布特征

Fig.1　Vertical distribution characteristics of soil C,N and P contents in study area

2.2　土壤 C, N,P 化学计量特征

由表 3 可知,研究区土壤 C∶P 在 2.34～13.65 变化,花棒较裸沙降低 30.5%;土壤 N∶P 的变化范围在 0.11～1.50,花棒较裸沙降低 48%($p<0.05$);土壤 C∶N 含量的变化范围是 10.32～24.6,花棒 C∶N 含量最高,是裸沙的 1.3 倍,是油蒿的 2 倍($p<0.05$)。

表 3　研究区土壤 C, N,P 化学计量特征统计

Table 3　Statistics of C, N and P stoichiometric characteristics of soils in study area

样地名称	C∶P	N∶P	C∶N
花棒	2.57±0.22[b]	0.13±0.01[b]	22.41±2.42[a]
油蒿	11.13±2.22[a]	1.15±0.31[a]	11.22±0.45[b]
裸沙	3.70±1.00[b]	0.25±0.08[a]	17.03±6.25[ab]

由图 2 可知,飞播植被花棒群落,原生植被油蒿群落以及未飞播流沙地的土壤 C∶N, N∶P 和 C∶P 在不同土层间无明显变化规律。花棒群落的土壤 C∶P 在 0—200 cm 土层范围内,显著低于油蒿群落($p<0.05$),在 20—30 cm 土层深处高于裸沙样地,且 C∶P 随土层深度增加呈下降趋势;花棒群落的土壤 N∶P 在 0—10,20—60,100—200 cm 土层处均显著低于油蒿群落($p<0.05$),在 0—10 cm 土层深处,高于裸沙样地,且 N∶P 随土层深度增加而降低;0—200 cm 土层范围内,花棒群落的土壤 C∶N 呈先增加后降低的趋势,在 20—150 cm 土层深处显著高于油蒿群落和裸沙样地($p<0.05$)。

2.3　土壤化学计量间的关系特征

由表 4 可知,研究区土壤 SOC 含量与 TN, C∶P, N∶P 间均存在极显著正相关关系($p<0.01$),与 TP, C∶N 无显著相关性($p>0.05$);土壤 TN 与 TP, C∶N 存在极显著负相关关系($p<0.01$),与 C∶P, N∶P 存在极显著正相关关系($p<0.01$);土壤 TP 与 C∶P, N∶P 均具有极显著负相关关系($p<0.01$),与 C∶N 存在极显著正相关关系($p<0.01$)。

由图 3 可知,花棒群落的土壤化学计量特征间存在不同的函数关系,且其化学计量比控制因素也不同。土壤 SOC, TN 含量均与 C∶N 存在显著的二次函数关系($p<0.05$),且土壤 TN 含量与 C∶N 的函数拟合系数($R^2=0.64$)高于 SOC 含量($R^2=0.32$),说明土壤 TN 含量是土壤 C∶N 的主要控制因素。土壤 N∶P 与土壤 TN 含量存在显著的线性关系($p<0.05$),与土壤 TP 含量无显著线性关系($p>0.05$),且土壤 TN 含量与 N∶P 的函数拟合系数($R^2=0.93$)高于 TP 含量($R^2=0.08$),说明土壤 TN 是土壤 N∶P 的主要控制因素。土壤 SOC 含量与土壤 C∶P 存在显

著线性关系($p<0.05$),且土壤 SOC 含量与 C∶P 的函数拟合系数($R^2=0.86$)高于 TP 含量($R^2=0.13$),说明土壤 SOC 含量是土壤 C∶P 的主要控制因素。

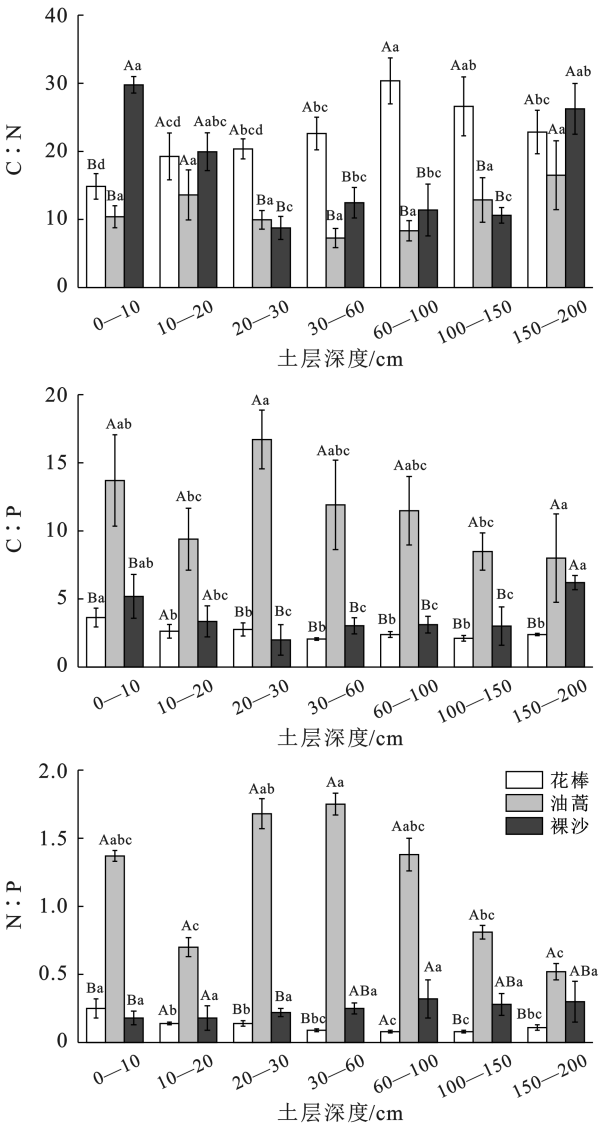


图 2 研究区土壤 C, N,P 化学计量比垂直分布

Fig.2 Vertical distribution of soil C, N and P stoichiometric ratios in study area

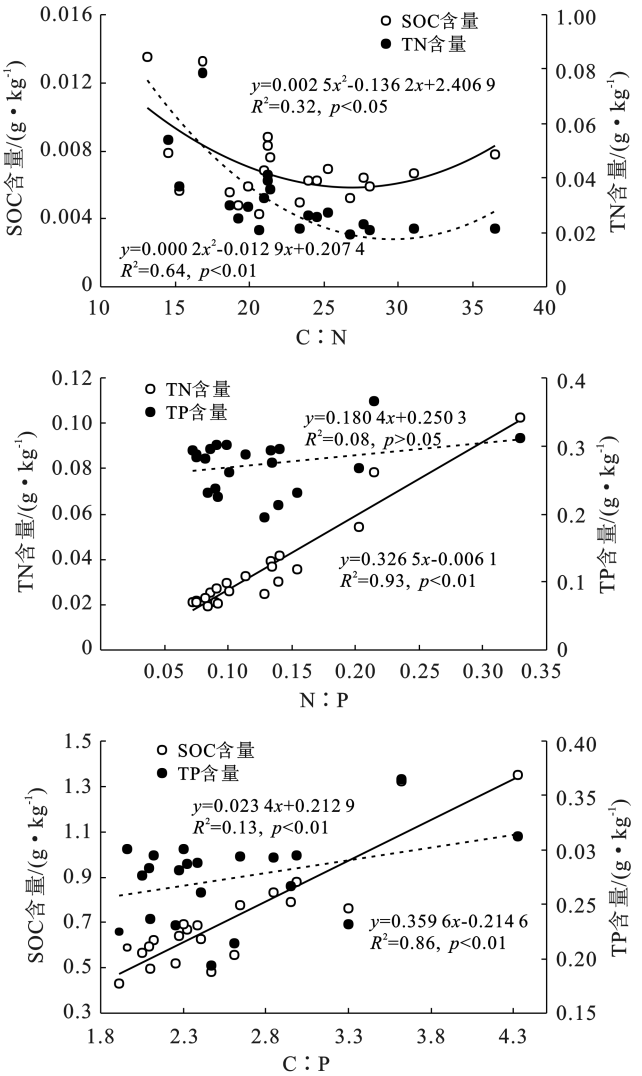


图 3 研究区土壤化学计量特征间的关系

Fig.3 Relationship between soil stoichiometric characteristics in study area

3 讨论

3.1 土壤 C, N,P 含量变化

腾格里沙漠东北缘 1992 年飞播造林区经过 30 a 的恢复,花棒群落对土壤养分的恢复效果具有明显的促进作用。本研究结果显示土壤 SOC, TN, TP 含量较未进行飞播的流沙地均有较大的提升,分别提高 73.2%,50%和 145.5%,这与刘丽丹等[13]对毛乌素沙地花棒人工林土壤养分变化研究的结果相一致,其原因主要是豆科植物的固氮作用及枯落物的腐烂、积存作用所致。

土壤 SOC, TN 和 TP 含量在不同土层剖面上的分布差异主要是由其来源不同所决定的。SOC, TN 的含量主要受地上枯落物的养分归还和分解产生的有机质所影响, TP 主要受土壤母质风化的影响[14]。本研究中花棒 SOC, TN 含量均随土层深度的增加而减小,这与汪汉驹等[15]研究急尖长苞冷杉林线过渡带土壤 SOC, TN 含量均随深度递减的结果一致,这主要是由于随着花棒群落的恢复,枯落物覆盖于土壤表层形成"肥岛效应",使得表层有机质含量显著增大,淋溶作用下由表层向深层迁移,但研究区降雨稀少,导致有机质存在较强的表聚性。本研究中花棒 TN 含量随土层深度的变化规律与 SOC 含量基本一致,但表聚现象不及 SOC 明显,陈闻等[16]在毛乌素沙地对人工固沙植被的土壤养分效应进行研究时也得到同样的结果,这是因为 SOC 是影响 TN 水平的重要因素[17],TN 的含量主要取决于 SOC 的积累及分解

作用的相对强度。花棒 TP 含量的垂直分布无明显变化规律,这与顾振宽等[18]认为全磷含量随土层增加无明显规律性的研究结果一致,但与黄雅茹等[19]对乌兰布和沙漠固沙林土壤有机质、全 N、全 P 等随着土层深度增加呈下降趋势的结果相悖。这是因为研究区土壤主要为风沙土,其发育程度低,对 P 的吸附能力也低,且 P 是一种沉积性元素,迁移能力低,扩散较慢[20],土壤中 TP 含量不受影响,处于一种动态平衡状态,缺乏规律性,因此花棒土壤 TP 含量在不同土层间的变化较小。

表 4　研究区土壤化学计量特征剖面分布的相关分析

Table 4　Correlation analysis on profile distribution of soil chemometric characteristics in study area

土壤指标	SOC/(g·kg^{-1})	TN/(g·kg^{-1})	TP/(g·kg^{-1})	C∶P	N∶P	C∶N
SOC/(g·kg^{-1})	1	—	—	—	—	—
TN/(g·kg^{-1})	0.844**	1	—	—	—	—
TP/(g·kg^{-1})	−0.053	−0.334**	1	—	—	—
C∶P	0.830**	0.874**	−0.545**	1	—	—
N∶P	0.704**	0.941**	−0.512**	0.906**	1	—
C∶N	−0.202	−0.582**	0.460**	−0.378**	−0.574**	1

注:** 表示在 $p<0.01$ 水平上存在极显著相关。

3.2　土壤 C, N,P 化学计量比变化

土壤 C∶N∶P 生态化学计量不仅反映土壤有机质组成和质量程度,还反映土壤内部 C, N,P 的循环和平衡特征[21]。C∶N 可用来表示土壤微生物分解有机质的速率,较低的 C∶N 表明土壤有机质具有更快的矿化速率。本研究中 C∶N 变化范围为 10.32～24.6,其值<25,说明研究区土壤 C 较为缺乏,且有机质积累速率和分解速率处于较低水平。这与魏亚娟等[22]对干旱荒漠区人工梭梭林土壤 C, N,P 化学计量特征的研究结果一致。花棒 C∶N 高于油蒿和裸沙,说明花棒土壤的有机质矿化速率较低,SOC 分解速率小于积累速率,研究区土壤环境以及气候条件有利于花棒土壤养分,特别是 C 含量的积累。C∶P 被认为是土壤 P 素矿化能力的标志,也是衡量微生物矿化土壤有机物质释放 P 或从环境中吸收固持 P 素潜力的一个指标,C∶P 比值越高反映土壤 P 的有效性越低。本研究中 C∶P 在 2.34～13.65 变化,远低于全国平均水平[23],这与陶冶等[24]对准格尔荒漠区的研究结果一致。花棒 C∶P 低于油蒿和裸沙,说明花棒土壤的有效磷含量较高,这是因为低 C∶P 有助于有机物分解过程中释放养分,从而增加土壤中的有效磷含量。花棒群落的土壤 SOC 含量与 C∶P 的函数拟合系数高于 TP, SOC 含量为土壤 C∶P 主要的控制因素,这可能是由于土壤微生物分解有机质释放 C 元素较多,P 元素较少[25]。N∶P 可用作评估土壤对植物生长所需营养元素供应状态的指标,并用于确定养分限制阈值。N∶P 小于 14 时,该生态系统受 N 的限制,当 N∶P 大于 16 时,则受 P 的限制。本研究中,花棒的 N∶P 仅为 0.13,远小于 14,说明土壤 P 对花棒群落生长的限制作用小于 N,且随土层深度增加 N 的限制作用增强。土壤 TN 与 N∶P 存在显著的线性关系,花棒群落的土壤 N∶P 较低时,TN 也呈现出较低的水平,此结果与刘帅楠等[26]对黄土丘陵区不同植被土壤化学计量比的研究结论一致。这是因为花棒群落的土壤 TN 含量随土层深度的增加呈下降趋势,且 TP 含量在 0—200 cm 深度范围内的各土层之间无显著差异,应在后期花棒固沙造林过程中适当增施氮肥利于氮素积累,促进花棒群落生长。

有研究发现,土壤层次对 C, N,P 化学计量比有影响[27],本研究中 C∶P, N∶P 随土层深度增加而降低,C∶N 呈先增加后降低的趋势,这与董雪等[28]对乌兰布和沙漠典型灌木土壤化学计量特征研究结果一致。恢复 30 a 的花棒冠幅较大,大量的枯落物覆盖于土壤表层逐渐分解产生大量的有机物,其释放出的 C, N 等土壤养分富集于表层土壤,随土层深度的增加,有机质输入能力下降,土壤 SOC, TN 含量随土层深度增加而减小。下层土壤 P 含量除有机质输入外,母岩风化过程也会不断补充,使 TP 含量的垂直递减速率慢于 SOC, TN 含量,垂直分布相对稳定,导致花棒群落土壤 C∶P, N∶P 随土层深度增加而降低。而气候、植被、土壤类型等因素均会随土层深度的变化不同程度地影响土壤 C∶N,使其呈现出复杂的变化规律[29]。

4　结 论

腾格里沙漠东北缘飞播花棒人工林经过 30 a 的恢复,土壤养分状况明显改善。土壤 SOC, TN, TP 含量达到 0.71,0.03 和 0.27 g/kg,较未飞播流沙地分

别提高了 73.2%，50%，145.5%，垂直分布具有较强的表聚性。花棒群落土壤 C∶P 与 SOC，N∶P 与 TN 均存在显著的正相关关系且 SOC 是 C∶P 主要控制因素，TN 是 N∶P，C∶N 主要控制因素。花棒群落土壤 C∶N 较高，SOC 的积累能力较好，且花棒群落生长主要受 N 的限制，随土层深度限制作用增强，今后营建花棒人工固沙林过程中应适当增施氮肥。

参考文献(References)

[1] 孙小东，宁志英，杨红玲，等.中国北方典型风沙区土壤碳氮磷化学计量特征[J].中国沙漠，2018，38(6)：1209-1218.
Sun Xiaodong, Ning Zhiying, Yang Hongling, et al. The stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus in soil in typical desertified regions, North China [J]. Journal of Desert Research, 2018,38(6):1209-1218.

[2] 朱秋莲，邢肖毅，张宏，等.黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J].生态学报，2013，33(15)：4674-4682.
Zhu Qiulian, Xing Xiaoyi, Zhang Hong, et al. Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hillygully region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(15):4674-4682.

[3] 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.

[4] 刘源，李晓晶，段玉玺，等.库布齐沙漠东部植被恢复对土壤生态化学计量的影响[J].干旱区研究，2022，39(3)：924-932.
Liu Yuan, Li Xiaojing, Duan Yuxi, et al. Effects of vegetation restoration on soil stoichiometry in the eastern Hobq Desert [J]. Arid Zone Research, 2022,39(3):924-932.

[5] 淑敏，姜涛，王东丽，等.科尔沁沙地不同林龄樟子松人工林土壤生态化学计量特征[J].干旱区研究，2018，35(4)：789-795.
Shu Min, Jiang Tao, Wang Dongli, et al. Soil ecological stoichiometry under the planted of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forests with different stand ages in the Horqin sandy land [J]. Arid Zone Research, 2018,35(4):789-795.

[6] 高君亮，罗凤敏，段娜，等.绿洲化对土壤养分及化学计量特征的影响[J].水土保持研究，2019，26(4)：50-55.
Gao Junliang, Luo Fengmin, Duan Na, et al. Soil nutrient and stoichiometry characteristics in process of oasisization in the Ulan Buh Desert Oasis, Inner Mongolia [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(4):50-55.

[7] 唐国栋，葛楠，张铁军，等.腾格里沙漠东北缘飞播植物群落土壤水分特征[J].水土保持通报，2023，43(6)：10-17.
Tang Guodong, Ge Nan, Zhang Tiejun, et al. Soil water characteristics of different aerial-seeded plant communities at northeastern edge of Tengger Desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(6):10-17.

[8] 朱奕豪，刘晓丽，陈为峰，等.黄河三角洲废弃盐田复垦土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J].水土保持学报，2020，34(6)：352-360.
Zhu Yihao, Liu Xiaoli, Chen Weifeng, et al. Ecostoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in reclaimed area of abandoned salt pan in the Yellow River Delta [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(6):352-360.

[9] 王飞，秦方锦，吴丹亚，等.土壤有机质和有机碳含量计算方法比较研究[J].农学学报，2015，5(3)：54-58.
Wang Fei, Qin Fangjin, Wu Danya, et al. Comparative study on the calculation method of soil organic matter and organic carbon [J]. Journal of Agriculture, 2015,5(3):54-58.

[10] 李佳佳，樊妙春，上官周平.黄土高原南北样带刺槐林土壤碳、氮、磷生态化学计量特征[J].生态学报，2019，39(21)：7996-8002.
Li Jiajia, Fan Miaochun, Shangguan Zhouping. Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus of the *Robinia pseudoacacia* forest on the north-south strip of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(21):7996-8002.

[11] 何高迅，王越，彭淑娴，等.滇中退化山地不同植被恢复下土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征[J].生态学报，2020，40(13)：4425-4435.
He Gaoxun, Wang Yue, Peng Shuxian, et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks and ecological stoichiometry characteristics of different vegetation restorations in degraded mountainous area of Central Yunnan, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(13):4425-4435.

[12] 王瑞琨.用电位法测定土壤 pH 值[J].山西化工，2018，38(3)：64-65.
Wang Ruikun. Determination of soil pH by potentiometry [J]. Shanxi Chemical Industry, 2018,38(3):64-65.

[13] 刘丽丹.花棒人工林植物群落组成及土壤养分的变化研究[J].安徽农业科学，2010，38(17)：9321-9323.
Liu Lidan. Research on the composition of the artificial plantation of the *Hedysarum scoparium* and variation of soil nutrient [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010,38(17):9321-9323.

[14] 陶冶，吴甘霖，刘耀斌，等.古尔班通古特沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征及其影响因素[J].中国沙漠，

2017,37(2):305-314.
Tao Ye, Wu Ganlin, Liu Yaobin, et al. Soil stoichiometry and their influencing factors in typical shrub communities in the Gurbantunggut Desert, China [J]. Journal of Desert Research, 2017,37(2):305-314.

[15] 汪汉驹,李江荣,郑维列,等.色季拉山急尖长苞冷杉林线过渡带土壤化学计量特征[J].西部林业科学,2022,51(2):161-168.
Wang Hanju, Li Jiangrong, Zheng Weilie, et al. Soil stoichiometric characteristics in the timberline ecotone of *Abies georgei* var. *smithii* Forest in Sejila Mountain [J]. Journal of West China Forestry Science, 2022,51(2):161-168.

[16] 陈闻,杨晶晶,袁媛,等.毛乌素沙地人工固沙植被的土壤养分效应[J].干旱区研究,2020,37(6):1447-1456.
Chen Wen, Yang Jingjing, Yuan Yuan, et al. Effects of artificial sand-fixing vegetation on soil nutrients in Mu Us sandy land [J]. Arid Zone Research, 2020,37(6):1447-1456.

[17] Gao Yang, Dang Pengfei, Zhao Qingxia, et al. Effects of vegetation rehabilitation on soil organic and inorganic carbon stocks in the Mu Us Desert, Northwest China [J]. Land Degradation & Development, 2018,29:1031-1040.

[18] 顾振宽,杜国祯,朱炜歆,等.青藏高原东部不同草地类型土壤养分的分布规律[J].草业科学,2012,29(4):507-512.
Gu Zhenkuan, Du Guozhen, Zhu Weixin, et al. Distribution pattern of soil nutrients in different grassland types and soil depths in the Eastern Tibetan Plateau [J]. Pratacultural Science, 2012,29(4):507-512.

[19] 黄雅茹,郝玉光,董礼隆,等.乌兰布和沙漠东北缘典型固沙林土壤养分特征研究[J].西北林学院学报,2018,33(2):1-9.
Huang Yaru, Hao Yuguang, Dong Lilong, et al. Comparative study on soil chemical properties of typical sand-fixing forests in Ulanbuh desert [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018,33(2):1-9.

[20] 刘少华,赵敏,王亚娟,等.黄土丘陵区林分密度对人工刺槐林土壤理化性质及酶活性影响[J].水土保持研究,2024,31(5):123-129.
Liu Shaohua, Zhao Min, Wang Yajuan, et al. Effects of stand density on soil physicochemical properties and enzyme activities in *Robinia seudoacacia* plantations in the loess hilly-gully region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(5):123-129.

[21] Cleveland C C, Liptzin D. C: N: P stoichiometry in soil: Is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. Biogeochemistry, 2007,85(3):235-252.

[22] 魏亚娟,汪季,党晓宏,等.干旱荒漠区人工梭梭林土壤碳氮磷密度与生态化学计量特征[J].水土保持学报,2022,36(3):259-266.
Wei Yajuan, Wang Ji, Dang Xiaohong, et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus densities and ecological stoichiometry characteristics of *Haloxylon ammodendron* plantations in arid desert area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(3):259-266.

[23] 魏红,满秀玲.中国寒温带不同林龄白桦林碳储量及分配特征[J].植物生态学报,2019,43(10):843-852.
Wei Hong, Man Xiuling. Carbon storage and its allocation in *Betula platyphylla* forests of different ages in cold temperate zone of China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019,43(10):843-852.

[24] 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.

[25] Zhang Yanlin, Li Ying, Wang Shuzhen, et al. Soil phosphorus fractionation and its association with soil phosphate-solubilizing bacteria in a chronosequence of vegetation restoration [J]. Ecological Engineering, 2021,164:106208.

[26] 刘帅楠,李广,杨传杰,等.植被类型对黄土丘陵区土壤碳氮磷化学计量特征的季节变异[J].水土保持学报,2021,35(6):343-349.
Liu Shuainan, Li Guang, Yang Chuanjie, et al. Seasonal variation of soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry under different vegetation types in loess hilly region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(6):343-349.

[27] 黄丽,范兴科.磷肥和钾肥不同配施方式对其养分在土壤中迁移的影响[J].水土保持学报,2018,32(2):184-190.
Huang Li, Fan Xingke. The effects of phosphate and potash fertilizers in diffierent facilities on soil nutrient migration [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(2):184-190.

[28] 董雪,辛智鸣,黄雅茹,等.乌兰布和沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征[J].生态学报,2019,39(17):6247-6256.
Dong Xue, Xin Zhiming, Huang Yaru, et al. Soil stoichiometry in typical shrub communities in the Ulan Buh Desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(17):6247-6256.

[29] Callesen I, Raulund-Rasmussen K, Westman C J, et al. Nitrogen pools and C : N ratios in well-drained Nordic forest soils related to climate and soil texture [J]. Boreal Environment Research, 2007,12(6):681-692.