

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

魏亚娟¹, 汪季^{1,2}, 党晓宏^{1,2}, 韩彦隆¹, 高岩¹, 段晓婷¹, 金山³

(1.内蒙古农业大学沙漠治理学院,呼和浩特 010018;2.内蒙古杭锦荒漠生态系统国家定位观测研究站,内蒙古鄂尔多斯 017400;3.中盐内蒙古化工股份有限公司盐碱分公司资源保护站,内蒙古阿拉善 750336)

摘要:为了阐明人工梭梭林土壤碳氮磷密度及其生态化学计量特征演变规律,以吉兰泰荒漠区不同林龄(3,6,11,16年)人工梭梭林为研究对象,分析0—20,20—40,40—60 cm土层土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)密度和生态化学计量特征。结果表明:(1)4种林龄人工梭梭林0—60 cm土层SOC、TN含量及其密度随林龄增加而升高,而TP含量及其密度随林龄增加而降低。其中,3,6年梭梭林SOC、TN含量及其密度随土层深度增加而升高,TP含量及其密度则与之相反;11,16年梭梭林SOC、TN、TP含量及其密度随土层深度增加而降低。(2)4种林龄梭梭林土壤C:N、C:P、N:P分别为2.24~9.21,1.59~7.05,0.56~0.81,均属于中等变异水平,且变异系数随林龄和土层深度增加逐渐减小,说明土壤C:N、C:P、N:P趋于平稳状态。(3)林龄、土层深度及其交互作用显著影响SOC含量、SOC密度、C:N、C:P,对TN含量、TP含量、TN密度、TP密度、N:P无显著影响。(4)土壤孔隙度(STP)与SOC密度呈显著正相关关系($P<0.05$),说明土壤孔隙度增加有助于SOC密度增加,提高土壤肥力。在干旱荒漠区建植梭梭林有利于提高土壤肥力,改善干旱荒漠区土壤环境。

关键词:梭梭林;养分密度;生态化学计量特征;干旱荒漠区

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)03-0259-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2022.03.037

Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus Densities and Ecological Stoichiometry Characteristics of *Haloxylon ammodendron* Plantations in Arid Desert Area

WEI Yajuan¹, WANG Ji^{1,2}, DANG Xiaohong^{1,2},

HAN Yanlong¹, GAO Yan¹, DUAN Xiaoting¹, JIN Shan³

(1.College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural

University, Hohhot 010018; 2.Hangjin Desert Ecological Positioning Observation and Research

Station in Inner Mongolia, Ordos, Inner Mongolia 017400; 3.Resource Protection Station of Salt and Alkali

Branch of Sodium Factory of Zhongyan Inner Mongolia Chemical Co., Ltd., Alashan, Inner Mongolia 750336)

Abstract: To investigate the evolution of planting years on soil carbon, nitrogen, phosphorus densities, and eco-chemical stoichiometry in *Halaxylon ammodendron* plantations, an age sequence of *H. ammodendron* stands (3, 6, 11 and 16 years) were selected in desert area of Jilantai, densities and stoichiometry characteristics of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) at soil depths of 0—20, 20—40, 40—60 cm were measured. The results showed that: (1) The contents and densities of SOC and TN in 0—60 cm soil increased with the increase of stand age, whereas the content and density of TP decreased with the increase of stand age. The SOC and TN contents and densities increased with the increase of soil depth in 3-year and 6-year plantations, and the content and density of TP were moving in exactly the opposite direction. The contents and densities of SOC, TN and TP increased with the increase of soil depth in 11-year and 16-year plantations. (2) The C:N, C:P and N:P ratios were 2.24~9.21, 1.59~7.05 and 0.56~0.81 with moderate spatial variation, and the coefficient of variation decreased with the stand age and soil depth, indicating that soil C:N, C:P and N:P ratios tended to remain stable. (3) Stand age, soil depth, and

收稿日期:2021-11-04

资助项目:国家自然科学基金项目(4196700)

第一作者:魏亚娟(1994—),女,博士研究生,主要从事荒漠化防治研究。E-mail:weiyajuan0305@163.com

通信作者:汪季(1957—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事荒漠化防治研究。E-mail:wangji1957@163.com

their interaction had a significant effect on SOC content, SOC density, C : N and C : P ratios, but had no significant effect on the N : P ratio and the contents and densities of TN and TP. (4) Soil porosity (STP) had a significant positive correlation with SOC density ($P < 0.05$), indicating that the increase of soil porosity is helpful to increase SOC density and improve soil fertility. Plantation of *H. ammodendron* can improve soil fertility and soil environment in arid desert area.

Keywords: *Haloxylon ammodendron* plantation; nutrient density; ecological stoichiometry characteristics; arid desert area

土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)是表征土壤肥力和生产力的重要指标^[1]。三者不仅是植物生长发育的重要物质来源,而且影响植物对养分的吸收、利用等一系列生物生化过程^[2]。土壤作为植被生长发育的基础,其C、N、P密度和生态化学计量变化影响植物对土壤养分的利用策略^[3]。土壤C、N、P密度和生态化学计量空间异质性与土壤类型、植被类型、土壤物理因子、气候因子、人类活动和林龄密切相关^[4-5]。同时,其密度和生态化学计量比在探究土壤养分供给能力和内部循环过程中发挥着重要作用。因此,加强对土壤C、N、P密度及其化学计量特征的研究,对维系局域土壤质量、保护生态环境具有重要意义。

干旱荒漠生态系统占全球生态系统总面积的18.5%^[6]。由于蒸发强烈且降雨稀少,荒漠区水分收支失衡,加之植被稀疏,导致荒漠生态系统非常脆弱。人工造林是荒漠区生态恢复的有效措施之一,其不仅能防风固沙,改善局域内水热环境、恢复地表植被,还能有效改善土壤养分状况,提升荒漠生态系统固持碳氮的能力^[7]。梭梭(*Haloxylon ammodendron*)作为藜科梭梭属小乔木,因其耐干旱瘠薄,成为干旱荒漠区重要的防风固沙树种。自20世纪50年代以来,吉兰泰盐湖资源掠夺式开发导致盐湖周边天然梭梭林遭到大面积破坏,绿洲沙化面积不断扩大,严重影响盐湖正常的生产活动^[8]。为了改善盐湖周边环境,维持盐湖正常生产,先后营建人工梭梭林7 664 hm²,在当地防风固沙林中占有重要地位。近年来,学者们对吉兰泰人工梭梭林的研究主要集中于其枝系构型^[9]、生态与生理特性^[10]和土壤养分^[11]等方面。然而,对研究区梭梭土壤C : N : P密度及其生态化学计量的变化尚不清晰。

据此,本研究以吉兰泰干旱荒漠区4种林龄(3, 6, 11, 16年)的人工梭梭林作为研究对象,分析人工梭梭林不同深度土壤C : N : P密度及其生态化学计量比随林龄的变化特征,探讨不同林龄人工梭梭林土壤养分的循环、平衡及限制状况,以期为干旱荒漠区人工林的建设和管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于乌兰布和沙漠西南缘荒漠区(105°47'08"—105°47'38"E, 39°46'58"—39°47'40"N),海拔960~979 m。年均气温8.6℃,绝对最高温40.9℃,绝对最低温-31.2℃,年均地温10.5℃。年均降水量125.7 mm,主要集中在6—7月,占全年降水量的52.75%以上。年均潜在蒸发量3 005.2 mm,年均风速3.5 m/s,最大风速15 m/s,全年大风日数在34天左右,且以西北风为主。常见植物以灌木、半灌木为主,建群种为梭梭,并分布少量白刺(*Nitraria tangutorum*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、红砂(*Reaumuria soongarica*)和沙米(*Agriophyllum squarrosum*)等。研究区土壤类型以风沙土为主,土壤养分贫瘠。

1.2 植被调查与采样

于2019年8月中旬,选择立地条件基本一致3, 6, 11, 16年人工梭梭林,每种林龄分别设立3个20 m×20 m标准样地,共设置12个标准样地。样地之间相距不足1 km;对样地内所有梭梭株高、基径、冠幅进行调查;然后按照“品”字形设置3个1 m×1 m的样方,调查样方内草本,并收集样方内地表枯落物(表1)。然后用土钻自上而下分别采集0—20, 20—40, 40—60 cm土层的土壤样品,将同一样地相同土层土壤均匀混合装入塑封袋,带回实验室备用。同时,用环刀取每一土层深度原状土进行土壤容重(BD)、含水量(SM)和孔隙度(STP)的测定。

1.3 土壤理化性质测定

将枯落物和土壤样品带回实验室,枯落物置于80℃烘箱烘干至恒重。土壤样品经自然风干,去除砾石、枯落物、根系等杂物,研磨后分别过1.000, 0.149 mm土壤筛,用于土壤pH、SOC、TN和TP的测定。土壤pH、SOC采用重铬酸钾—外加热法测定, TN采用高氯酸—硫酸消化法测定, TP采用酸溶—钼锑抗比色法测定,土壤含水量采用烘干法测定,土壤容重采用环刀法测定,具体方法参照文献[12]。土壤孔隙度计算公式为:

$$\text{土壤孔隙度} = \frac{\text{土壤容重}}{2.65} \times 100\%$$

表 1 样地基本情况

林龄/ a	平均 树高/cm	分枝 基径/mm	林分密度/ (株·hm ⁻²)	盖度/%	物种 数量	群落 类型	地表枯落物/ (g·m ⁻²)
3	62.71±24.45	10.52±3.48	1111	6.45±2.13	4	梭梭、红砂、沙蒿、沙米	—
6	95.35±35.17	13.87±3.58	625	9.25±2.47	4	梭梭、白刺、沙蒿、沙米	12.14±4.36
11	140.44±48.32	24.56±5.32	625	16.32±2.88	4	梭梭、白刺、沙蒿、沙米	23.27±3.11
16	159.99±57.69	34.23±8.65	500	23.57±5.74	5	梭梭、白刺、红砂、沙蒿、沙米	32.11±7.24

注:表中数据为平均值±标准误;—表示未收集到地表枯落物。下同。

1.4 土壤碳氮磷密度测定

第*i*层土壤 SOC、TN、TP 密度^[13]计算方法为:
 $SOCS_i = SOC_i \times D_i \times H_i \times (1 - 0.01G_i) \times 100$
 $TNS_i = TN_i \times D_i \times H_i \times (1 - 0.01G_i) \times 100$
 $TPS_i = TP_i \times D_i \times H_i \times (1 - 0.01G_i) \times 100$

式中:SOCS_{*i*}、TNS_{*i*}、TPS_{*i*}分别为第*i*层土壤碳、氮、磷密度(g/m²);SOC、TN、TP 分别为土壤有机碳、全氮、全磷含量(g/kg);*D_i*为土壤容重(g/cm³);*H_i*为土层深度(cm);*G_i*为>2 mm 砾石质量百分含量(%). 本研究显示>2 mm 的砾石含量为 0,因此 *G_i* 忽略不计。

1.5 数据处理

使用 Excel 2007 软件处理数据,使用 SPSS 20.00 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和双因素方差分析(Two-way ANOVA)。利用 Origin 2017 软件进行作图和最优拟合分析。利用变异系数表示不同林龄和土层深度土壤 SOC、TN、TP 及其生态化学计量比的变异情况。其公式为:

$$CV = \frac{SD}{MV} \times 100\%$$

式中:CV 为变异系数;SD 为标准偏差;MV 为平均值。根据 Jobbage 等^[13]的划分标准,将变异系数分为 3 级:<10%为弱变异,10%~100%为中等变异,≥100%为强变异。

2 结果与分析

2.1 不同林龄人工梭梭林土壤容重、总孔隙度、含水量和 pH 的变化

由图 1 可知,对同一土层而言,梭梭林土壤 pH 随林龄增大而增加,而土壤孔隙度、含水量和容重变化各异。而且,各林龄土壤容重、总孔隙度和 pH 差异不显著(*P*>0.05),表明在吉兰泰建植梭梭林并未显著改善 0—60 cm 土层的土壤物理性质。在 40—60 cm 土层,6,11,16 年梭梭土壤含水量分别是 3 年的 6.14,1.57,6.46 倍,说明在荒漠区建植梭梭林有利于土壤水分蓄积。对同一林龄而言,梭梭林土壤各指

标随土层深度增加变化各异,且各土层土壤 pH 差异不显著(*P*>0.05)。此外,除 16 年外,3,6,11 年梭梭林土壤容重、土壤总孔隙度和土壤含水量差异不显著(*P*>0.05)。16 年土壤总孔隙度、土壤含水量在 20—40 cm 土层较 0—20 cm 分别增加 17.47%和 81.52%(*P*<0.05),土壤容重减少 13.33%(*P*<0.05)。

2.2 不同林龄人工梭梭林土壤 SOC、TN、TP 含量变化

由表 2 可知,在 0—60 cm 土层范围内,土壤 SOC、TN 含量随梭梭林龄增加整体呈增加趋势,而 TP 含量与之相反。各林龄梭梭土壤 SOC、TN、TP 含量在不同土层深度范围存在差异。其中,3,6 年梭梭林土壤 SOC、TN 含量随土层深度增加而降低,11,16 年土壤 SOC 含量与之相反。各林龄梭梭土壤 TP 含量均随土层深度增加而降低。在 0—60 cm,16 年梭梭土壤 SOC 和 TN 含量较 3 年增加 85.71%(*P*<0.05)。土壤 SOC、TN、TP 含量变异系数均属于中等变异。土壤 SOC 变异系数随林龄和土层深度增加逐渐降低,说明土壤 SOC 随林龄和土层深度增加逐渐趋于稳定。土壤 TN 和 TP 变异系数随林龄变化较小,说明 TN 和 TP 含量维持在比较平稳的状态。

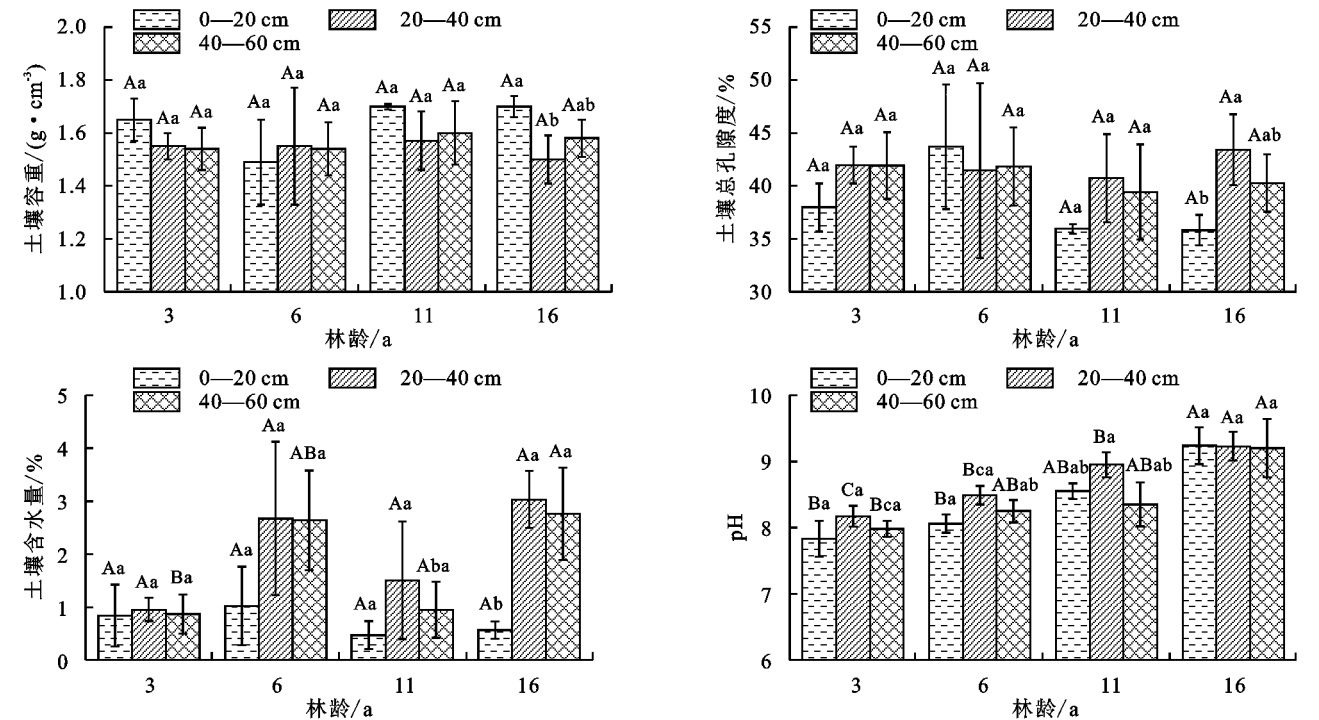
2.3 不同林龄人工梭梭林土壤 C:N:P 密度变化

由表 3 可知,SOC 密度、TN 密度随林龄增加而升高,TP 密度与之相反。其中,与 3 年梭梭相比,16 年梭梭土壤 SOC 密度增加 85.71%(*P*<0.05),且 3,6,11 年与 16 年梭梭土壤 SOC 密度差异显著(*P*<0.05),TN 密度、TP 密度在各林龄之间差异不显著(*P*>0.05),说明不同林龄梭梭林土壤 TN 密度、TP 密度维持在比较平稳的状态。SOC 密度、TN 密度变异系数随林龄增加而逐渐降低,但 TP 密度变异系数无规律性。

由图 2 可知,3 年和 6 年梭梭土壤 SOC 密度、TN 密度随土层深度增加而升高,而 11,16 年梭梭土壤 SOC 密度、TN 密度与之相反;各林龄梭梭土壤 TP 密度随土层深度增加而降低。同一土层不同林龄土壤 SOC 密度、TN 密度和 TP 密度无统一变

化规律。同一土层不同林龄梭梭土壤 SOC 密度、TN 密度差异显著($P<0.05$)。其中,在 0—20 cm 土层,16 年梭梭土壤 SOC 密度、TN 密度较 3 年分别增加 397.37%,51.02% ($P<0.05$)。20—40 cm 土

层,16 年梭梭土壤 SOC 密度、TN 密度较 3 年分别增加 300.64%,18.00% ($P<0.05$)。TP 密度在同一林龄不同土层和同一土层不同林龄间差异均不显著($P>0.05$)。



注:图柱上方不同大写字母表示同一土层下不同林龄之间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一林龄不同土层之间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 不同林龄人工梭梭林土壤容重、总孔隙度、含水量和 pH

表 2 4 种林龄人工梭梭林各土层土壤 SOC、TN 和 TP 含量

指标	林龄/a	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—60 cm	变异系数/%
SOC/(g · kg ⁻¹)	3	0.37±0.04Db	0.48±0.03Cb	1.46±0.03Aa	0.77±0.54B	59.83
	6	0.63±0.05Cb	0.67±0.06Bb	1.15±0.31ABa	0.82±0.30B	27.31
	11	1.08±0.07Ba	0.92±0.21Bab	0.72±0.08Bb	0.91±0.20B	17.26
	16	1.67±0.09Aa	1.49±0.07Ab	1.13±0.04Ac	1.43±0.25A	14.11
	变异系数/%	49.14	40.66	25.57	—	—
TN/(g · kg ⁻¹)	3	0.15±0.07Aa	0.16±0.06Aa	0.18±0.08Aa	0.17±0.06A	17.78
	6	0.16±0.02Aa	0.17±0.04Aa	0.19±0.02Aa	0.18±0.05A	5.42
	11	0.22±0.04Aa	0.19±0.01Aa	0.18±0.01Aa	0.20±0.02A	22.72
	16	0.22±0.04Aa	0.20±0.02Aa	0.20±0.02Aa	0.20±0.02A	7.63
	变异系数/%	21.55	26.15	14.24	—	—
TP/(g · kg ⁻¹)	3	0.34±0.08Aa	0.34±0.12Aa	0.29±0.08Aa	0.32±0.09A	16.31
	6	0.33±0.09Aa	0.30±0.11Aa	0.29±0.09Aa	0.30±0.08AB	16.61
	11	0.31±0.06Aa	0.27±0.04Aa	0.25±0.03Aa	0.28±0.05AB	13.46
	16	0.29±0.09Aa	0.24±0.04Aa	0.21±0.04Aa	0.25±0.06B	16.85
	变异系数/%	24.42	25.71	28.29	—	—

注:同列不同大写字母表示同一土层下不同林龄之间差异显著($P<0.05$);同行不同小写字母表示同一林龄不同土层之间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.4 不同林龄人工梭梭林土壤 C : N : P

由表 4 可知,0—60 cm 土层土壤 C : N 随林龄增加呈增加趋势,而 C : P 和 N : P 随林龄增加无显

著变化。此外,各林龄梭梭土壤 C : N、C : P 和 N : P 随土层深度增加变化各异。其中,3,6 年梭梭林土壤 C : N、C : P 随土层深度增加而增大,11,16 年梭

梭林土壤 C : N、C : P 随土层深度增加而降低,而 N : P 随土层深度增加而降低。土壤 C : N、C : P、N : P 均属于中等变异,其变异系数随林龄增加而逐

渐降低,说明在梭梭林建植初期,C : N、C : P、N : P 生态化学计量比不稳定,但随着建植年限增加,其逐渐趋于平稳的状态。

表 3 不同林龄人工梭梭林土壤碳氮磷密度

林龄/a	SOC		TN		TP	
	密度/(kg · m ⁻²)	变异系数/%	密度/(kg · m ⁻²)	变异系数/%	密度/(kg · m ⁻²)	变异系数/%
3	7.43±0.93b	12.50	1.57±0.41a	25.99	3.10±0.70a	17.94
6	7.91±0.71b	8.92	1.71±0.01a	3.89	2.79±0.50a	7.22
11	8.51±0.72b	8.45	1.80±0.07a	3.37	2.61±0.19a	22.56
16	13.26±0.96a	7.27	1.87±0.06a	0.83	2.38±0.41a	17.32

注:同列不同小写字母表示不同林龄之间差异显著(P<0.05)。

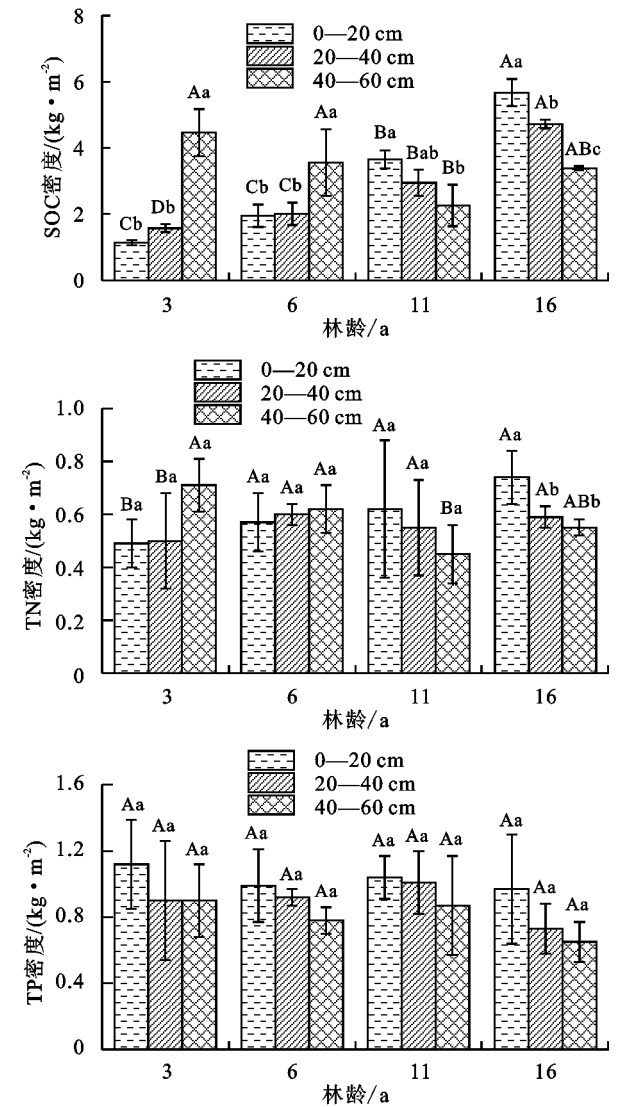


图 2 不同林龄人工梭梭林各层土壤碳氮磷密度

2.5 人工梭梭林土壤理化性质和 C : N : P 化学计量比的影响因素

2.5.1 林龄和土层深度 通过对人工梭梭林林龄和土层深度的土壤理化性质和 C : N : P 化学计量比进行双因素方差分析(表 5)发现,林龄和土层深度对梭梭林土壤 SOC 含量、SOC 密度、C : N 和 C : P 有显著影响。同时,对林龄和土层深度的交互作用进行简

单效应分析发现,二者的交互作用对 SOC 含量、SOC 密度、C : N 和 C : P 也具有显著影响(P<0.01)。此外,林龄和土层深度对 SM、pH 影响显著,而对土壤 SD、STP、TN、TP 含量 N : P 影响不显著。2.5.2 土壤 C : N : P 生态计量比与土壤理化性质的相关性趋势变化 由表 6 可知,SOC 密度与 SOC、TN 分别呈极显著正相关(P<0.01)和显著正相关(P<0.05);TN 密度与 SOC、TN 呈极显著正相关(P<0.01);TP 密度仅与 TP 呈极显著正相关(P<0.01);STP 与 SOC 密度呈显著正相关(P<0.05);C : N 与 SOC 呈极显著正相关(P<0.01),与 TN 呈显著负相关(P<0.05);C : P 与 SOC 呈极显著正相关(P<0.01),与 TP 呈显著负相关(P<0.05);N : P 与 TN 呈极显著正相关(P<0.01),与 TP 呈显著负相关(P<0.05)。对上述相关性显著的指标进行拟合分析,TN 与 C : N 之间存在斜率为负的线性关系,TP 分别与 C : P 和 N : P 之间存在斜率为负值的指数函数关系。SOC 密度与 SOC、TN 和 STP,TN 密度与 SOC、TN、TP 密度与 TP,SOC 与 C : N、C : P 以及 TN 与 N : P 之间存在斜率为正的线性关系(表 7)。

3 讨论

3.1 人工梭梭林对土壤 SOC、TN、TP 含量的影响 本研究中,4 种林龄梭梭土壤 SOC、TN 含量随林龄增加而增大,说明梭梭在生长过程中表现为明显的碳汇作用,也说明土壤碳、氮积累存在一定偶联关系。土壤 TP 含量随林龄增加逐渐减小,说明梭梭生长增加了对土壤磷的消耗。已有研究^[14]表明,表层土壤 SOC、TN 含量高于深层土壤。但是,研究区 3、6 年梭梭土壤 SOC、TN 含量随土层深度增加而增大,与淑敏等^[15]对科尔沁沙地土壤的研究结果相悖,其研究表明,樟子松人工林土壤 SOC、TN 含量随土层深度增加逐渐降低。原因为吉兰泰气候环境恶劣,3、6 年梭梭冠幅较小,枯落物较少,强烈风

沙活动导致林内表层有限的凋落物和黏粉粒被风吹走,土壤养分损失严重。其次,可能与梭梭造林方式—水冲造林有关,水冲造林过程中水流将表层粉黏粒冲到底层,导致下层土壤 SOC、TN 含量大于表层。11,16 年人工梭梭林土壤 SOC、TN 含量随土层深度增加而减小,说明随着梭梭林龄增加,株高、冠幅和侧影面积增加,削弱了过境的风沙活动,土壤表层可蚀性减弱,使粉粒和黏粒在其周围沉积,增强了地表土壤黏结力,下垫面趋于稳定^[16]。本研究表明,与 SOC 含量相比,不同林龄和土层深度的 TN 含量无显著差异($P>0.05$),与伍方骥等^[17]对喀斯特植被恢复过程的研究一致。土壤 TN 主要来源于枯

落物分解、植物固氮和大气降尘^[7],然而,干旱区降雨和温度等气候因子并不利于凋落物分解。而且梭梭纯林化,导致氮素归还能力弱,从而限制了土壤 TN 的来源。此外,梭梭林土壤 SOC、TN、TP 含量分别介于 0.37~1.67,0.15~0.22,0.21~0.34 g/kg,含量远低于全国平均水平^[18]和北方典型风沙区表层土壤(12.2,1.2,0.8 g/kg)^[19]。该结果与董雪等^[20]对乌兰布和沙漠荒漠灌丛的研究结果相一致,主要归因于吉兰泰极端的生境条件。吉兰泰降雨稀少,植被盖度低,表层土壤微生物活性较低,凋落物分解速率较慢且时间长,加之研究区土壤类型为风沙土,不利于土壤养分固存。

表 4 不同林龄人工梭梭林各土层土壤 C : N、N : P 和 C : P

指标	林龄/a	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—60 cm	变异系数/%
C : N	3	2.24±0.23Cb	2.51±0.91Cb	9.21±2.88Aa	4.65±3.74B	64.51
	6	3.21±0.34Bb	3.54±0.16Bb	5.79±1.52Ba	4.18±1.45B	25.43
	11	6.62±2.79Aa	5.75±2.68ABa	5.62±2.4Ba	6.00±2.32AB	23.05
	16	8.00±0.52Aa	7.88±1.66Aa	6.17±0.39Ba	7.35±1.26A	12.90
	变异系数/%	54.27	46.55	32.28	—	—
C : P	3	1.59±0.25Bb	1.75±0.62Cb	7.05±2.26Aa	3.46±2.94AB	69.06
	6	2.05±0.61Ba	2.39±1.02Ba	3.58±1.32Ca	2.67±1.13B	29.00
	11	4.11±0.81Aa	2.94±0.44Ba	2.93±0.71Ca	3.33±0.83AB	17.50
	16	5.44±1.4Aa	5.31±1.46Aa	4.14±1.4Ba	4.97±1.38A	17.50
	变异系数/%	52.48	45.63	44.55	—	—
N : P	3	0.81±0.38Aa	0.79±0.19Aa	0.66±0.13Aa	0.75±0.23A	19.53
	6	0.73±0.23Aa	0.64±0.24Aa	0.58±0.17Aa	0.65±0.20A	17.64
	11	0.67±0.17Aa	0.57±0.19Aa	0.56±0.15Aa	0.60±0.16A	17.83
	16	0.68±0.15Aa	0.67±0.09Aa	0.66±0.19Aa	0.67±0.13A	11.23
	变异系数/%	31.31	26.34	25.94	—	—

表 5 林龄和土层深度对杉木人工林土壤理化性质及 C : N : P 化学计量比的影响

因素	F 值												
	SM	BD	STP	pH	SOC	TN	TP	C : N	C : P	N : P	SOC 密度	TN 密度	TP 密度
A	6.736 **	1.313	1.284	30.227 **	38.011 **	0.965	1.685	6.209 **	6.281 **	0.884	21.433 **	1.267	1.757
B	9.528 **	2.382	2.422	10.798 **	40.809 **	1.677	0.875	8.361 **	9.447 **	0.048	28.168 **	1.591	0.829
A×B	1.640	0.854	0.867	0.991	11.656 **	0.466	0.416	3.611 **	5.239 **	0.362	8.002 **	0.974	0.683

注:BD、STP、SM 分别为土壤容重、总孔隙度、含水量;A、B、A×B 分别表示林龄、土层深度、林龄和土层深度的交互作用;* 表示 $P<0.05$ 的显著性;** 表示 $P<0.01$ 的显著水平。下同。

表 6 人工梭梭林土壤理化性质和 C : N : P 密度及其生态化学计量比的相关性分析($n=60$)

指标	SM	BD	STP	pH	SOC	TN	TP
SOC 密度	0.190	0.107	0.409 *	—0.331	0.986 **	0.426 *	—0.022
TN 密度	0.199	—0.110	0.310	—0.124	0.735 **	0.934 **	0.250
TP 密度	0.070	—0.010	0.014	—0.164	0.015	0.215	0.955 **
C : N	0.180	0.180	—0.181	—0.123	0.862 **	—0.428 *	—0.155
C : P	0.245	—0.125	0.129	—0.016	0.851 **	—0.149	—0.430 *
N : P	0.163	—0.298	0.095	—0.251	0.663	0.523 **	—0.589 **

表 7 人工梭梭林土壤各指标之间的关系				
指标	拟合模型	R^2	P	n
SOC 密度	$y=0.311x_{\text{SOC}}+0.002$	0.977	<0.01	60
	$y=0.019x_{\text{TN}}+0.124$	0.504	<0.01	60
	$y=2.090x_{\text{TP}}+33.687$	0.570	<0.01	60
TN 密度	$y=3.565x_{\text{SOC}}-1.069$	0.823	<0.01	60
	$y=0.314x_{\text{TN}}+0.002$	0.883	<0.01	60
TP 密度	$y=0.316x_{\text{TP}}+0.002$	0.907	<0.01	60
SOC	$y=5.177x_{\text{C:N}}+0.523$	0.763	<0.01	60
	$y=3.823x_{\text{C:P}}-0.064$	0.760	<0.01	60
TN	$y=-0.007x_{\text{C:N}}+0.221$	0.221	<0.01	60
	$y=4.274x_{\text{N:P}}-0.107$	0.904	<0.01	60
TP	$y=0.436x_{\text{C:P}}^{-0.382}$	0.711	<0.01	60
	$y=192x_{\text{N:P}}^{-0.862}$	0.855	<0.01	60

3.2 人工梭梭林建植对土壤碳氮磷密度的影响

土壤养分密度是衡量土壤肥力和土地生产力水平的重要指标^[21]。研究区人工梭梭林 0—60 cm 土层 SOC、TN 和 TP 密度随林龄增大而增加。尤其 16 年梭梭土壤 SOC 密度较 3 年增加 178.46%，说明荒漠区建植梭梭能明显提高局域土壤碳汇能力^[22]。而且，群落植物种类随林龄逐渐增加(表 1)，说明随着林龄增加，林内环境越来越有利于草本定居。但是，3,6 年梭梭土壤 SOC 密度、TN 密度随土层深度增加而增大，该结果与董雪等^[20]对乌兰布和沙漠典型灌木的研究结果相悖。另外，11,16 年人工梭梭林土壤 SOC 密度、TN 密度随土层深度增加而降低。其原因与 SOC、TN 含量的变化相同。相关分析发现，SOC 密度与 STP 呈显著正相关关系，说明梭梭在生长发育过程中，改善了土壤孔隙度，有利于 SOC 的固持，从而在梭梭周围形成“肥岛”效应。各林龄梭梭 TP 密度随着土层深度增加而减少，与何高迅等^[23]对滇中退化山地的研究结果一致。因为土壤 TP 主要来源于岩石风化和凋落物分解。研究区土壤属于风沙

土，凋落物质量低且分解缓慢，吉兰泰干燥的气候环境导致凋落物和岩石中的磷元素淋溶缓慢。另外，随着梭梭林龄的增加，梭梭对 TP 的需求增加，当表层土壤不能满足梭梭所需，需要从深层土壤获取^[24]。因此，导致表层 TP 密度大于下层。

3.3 人工梭梭林建植对土壤 C：N：P 生态化学计量比的影响

研究区人工梭梭林样地土壤 C：N、C：P、N：P 显著低于全国平均水平(表 8)^[18]。人工梭梭林土壤 C：N、C：P 随林龄增加整体呈递增的趋势。土壤 C：N 为 2.24~9.21，其值远<25，说明研究区土壤碳较为缺乏，且有机质分解速率和积累速率较低。但是随梭梭林龄增加，土壤 SOC 积累速率将会大于分解速率。土壤 C：P 为 1.59~7.05，表明研究区土壤 P 的有效性相对较高，P 的矿化速率也相对较高，微生物分解有机质过程中受 P 的限制可能性较小^[25]。该结果与陶冶等^[26]和李红林等^[27]分别对准格尔荒漠区和塔里木盆地北缘绿洲的研究结果一致。土壤 N：P 随梭梭林龄增加整体呈逐渐降低的趋势。研究区土壤 N：P 仅为 0.56~0.81，表明研究区梭梭生长发育可能受到氮限制。由于森林生态系统的功能是土壤、凋落物和叶片三者之间相互作用的结果。单一生态化学计量比不能很好地反映梭梭的生长状况，因此，在今后试验过程中，需要对不同林龄梭梭凋落物和叶片养分含量进行测定，从而对梭梭生长的限制因素进行诊断。通过双因素方差分析发现，林龄、土层深度及其交互作用对土壤 C：N、C：P 产生显著影响($P<0.05$)。C：N 与 SOC 的相关系数大于 TN，而 C：P 与 SOC 的相关系数大于其与 TP，说明 C：N、C：P 主要受控于 SOC 含量。而且，土壤 TP 与 C：P、N：P 分别呈极显著负相关($P<0.01$)，说明 TP 是影响梭梭林土壤 C：P、N：P 的关键元素^[28]。

表 8 本研究与其他地区土壤 C：N：P 生态化学计量比较

研究区	土层深度/cm	土壤类型	SOC	TN	TP	C：N	C：P	N：P	参考文献
吉兰泰干旱荒漠	0—60	风沙土	0.37~1.67	0.15~0.22	0.21~0.34	2.24~9.21	1.59~7.05	0.56~0.81	本研究
塔里木盆地	0—20	荒漠土、盐土、风沙土	2.97	0.27	0.64	12.14	0.40	4.55	[38]
乌兰布和沙漠	0—100	风沙土	2.45	0.26	0.28	9.41	8.70	0.93	[36]
准格尔荒漠	0—10	风沙土、灰漠土、棕漠土、棕钙土、龟裂土、盐土	5.73	0.21	0.35	29.92	15.97	0.50	[33]
中国陆地土壤	—	—	29.51	2.30	0.56	11.90	61.00	5.20	[34]

4 结论

(1)建植 3,6 年梭梭林土壤 SOC、TN 含量及其密度随土层深度增加而升高，11,16 年梭梭林土壤 SOC、TN 含量及其密度随土层深度增加而降低。TP 含量及其密度随林龄和土层深度增加而降低。

(2)SOC 密度、TN 密度随着梭梭林龄增加而逐渐增加，TP 密度逐渐降低。干旱荒漠区建植梭梭能明显提高土壤的碳汇能力，尤其是 16 年梭梭 SOC 密度显著高于其他林龄，达 13.26 kg/m²。

(3)林龄、土层深度及其交互作用显著影响 SOC

含量、SOC 密度、C : N 和 C : P, 对 TN、TP 含量及其密度、N : P 无显著影响。C : N、C : P 变化主要受控于 SOC 含量的变化。

(4) 人工梭梭林土壤主要受到氮的限制, 且随着林龄增加, 氮限制作用越强。可以在后期抚育管理过程中, 增施氮肥。

参考文献:

- [1] Yu Z P, Wang M H, Huang Z Q, et al. Temporal changes in soil C—N—P stoichiometry over the past 60 years across subtropical China [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(3): 1308-1320.
- [2] Qiao Y, Wang J, Liu H M, et al. Depth-dependent soil C—N—P stoichiometry in a mature subtropical broad-leaf forest [J]. *Geoderma*, 2020, 370: 1-12.
- [3] Achat D L, Bakker M R, Augusto L, et al. Phosphorus status of soils from contrasting forested ecosystems in southwestern Siberia: Effects of microbiological and physicochemical properties [J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(2): 733-752.
- [4] Jiang L, He Z S, Liu J F, et al. Elevation gradient altered soil C, N and P stoichiometry of *Pinus taiwanensis* forest on Daiyun Mountain [J]. *Forests*, 2019, 10(12): 1089-1100.
- [5] Zhang Y, Li C, Wang M L. Linkages of C : N : P stoichiometry between soil and leaf and their response to climatic factors along altitudinal gradients [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(4): 1820-1829.
- [6] 张元明, 王雪芹. 准噶尔荒漠生物结皮研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [7] Chen H, Zhao X R, Chen X J. Seasonal changes of soil microbial C, N, P and associated nutrient dynamics in a semiarid grassland of north China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 128: 89-97.
- [8] 高永. 吉兰泰盐湖环境演化及沙害成因 [J]. *干旱区研究*, 1996, 13(4): 54-56, 66.
- [9] 郭戔, 汪季, 党晓宏, 等. 吉兰泰盐湖不同造林方式下梭梭枝系构型特征分析 [J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(3): 36-42.
- [10] 韩永伟, 王堃, 张汝民, 等. 吉兰泰地区退化梭梭蒸腾生态生理学特性 [J]. *草地学报*, 2002, 10(1): 40-44.
- [11] 陈婧. 吉兰泰人工梭梭林下土壤养分和机械组成的时空分布规律 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] Jobbágy E E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. *Ecology Applications*, 2000, 10(2): 423-436.
- [14] 张芸, 李惠通, 张辉, 等. 不同林龄杉木人工林土壤 C : N : P 化学计量特征及其与土壤理化性质的关系 [J]. *生态学报*, 2019, 39(7): 2520-2531.
- [15] 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.
- [16] 张珂, 陈永乐, 高艳红, 等. 阿拉善荒漠典型植物功能群氮、磷化学计量特征 [J]. *中国沙漠*, 2014, 34(5): 1261-1267.
- [17] 伍方骥, 刘娜, 胡培雷, 等. 典型喀斯特洼地植被恢复过程中土壤碳氮储量动态及其对极端内涝灾害的响应 [J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2020, 28(3): 429-437.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 刘玉林, 朱广宇, 邓蕾, 等. 黄土高原植被自然恢复和人工造林对土壤碳氮储量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2163-2172.
- [22] Li Y Q, Chen Y P, Wang X Y, et al. Improvements in soil carbon and nitrogen capacities after shrub planting to stabilize sand dunes in China's Horqin Sandy Land [J]. *Sustainability*, 2017, 9(4): 1-17.
- [23] 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.
- [24] Viscarra R R A, Bui E N. A new detailed map of total phosphorus stocks in Australian soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 542: 1040-1049.
- [25] 张继辉, 蔡道雄, 卢立华, 等. 不同林龄柚木人工林土壤生态化学计量特征 [J]. *生态学报*, 2020, 40(16): 5718-5728.
- [26] 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.
- [27] 李红林, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征 [J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1345-1355.
- [28] 董雪, 郝玉光, 辛智鸣, 等. 科尔沁沙地 4 种典型灌木灌丛下土壤碳、氮、磷化学计量特征 [J]. *西北植物学报*, 2019, 39(1): 164-172.