

固沙灌木配置模式对宁夏东部风沙区土壤生态化学计量特征的影响

李海泉¹, 邱开阳^{1*}, 谢应忠¹, 何毅¹, 苗虎¹, 刘王锁^{1,2}, 黄业芸¹

(1. 宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏葡萄酒与防沙治沙职业技术学院, 宁夏 银川 750199)

摘要:为探讨宁夏东部风沙区不同固沙灌木配置模式对土壤养分含量及其生态化学计量比的影响,以宁夏灵武白芨滩国家级自然保护区典型固沙灌木样地为研究对象,分析5种固沙灌木配置模式(柠条纯林、杨柴纯林、柠条×花棒混交、柠条×沙拐枣混交、花棒×沙拐枣混交)下土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量比。结果表明:0~10 cm土层,柠条×花棒混交、柠条×沙拐枣混交固沙灌木配置模式的土壤全氮含量和N:P均显著高于其他3种固沙灌木配置模式,但土壤C:N显著低于其他3种;10~20 cm土层,柠条纯林、柠条×沙拐枣混交固沙灌木配置模式土壤C:N显著高于其他3种,柠条纯林固沙灌木配置模式土壤C:P显著高于其他4种;20~30 cm土层,柠条纯林固沙灌木配置模式土壤全氮含量显著高于其他4种,柠条×沙拐枣混交固沙灌木配置模式土壤有机碳含量和C:P均显著低于其他4种。C:N和N:P主要限制因素均为全氮,C:P主要限制因素为有机碳。柠条×花棒混交、柠条×沙拐枣混交固沙灌木配置模式有利于表层土壤氮矿化,提高土壤全氮含量,促进沙地土壤养分的平衡。

关键词:固沙灌木;土壤;生态化学计量;沙地恢复;草方格造林

中图分类号:S714.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2022)06-0028-11

DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2022.06.004



我国是世界上土地沙漠化较为严重的国家,沙漠化已成为制约我国经济社会发展的重要因素,我国在沙漠化治理方面形成了诸多技术^[1]。草方格协同种植不同固沙灌木作为沙漠化防治过程中最为常见的工程措施,被称为草方格造林^[2]。在实践中采用的固沙灌木,有时为一种,有时是两种灌木进行混交,具有一定的随意性。有研究表明,不同灌木对降水的再分配^[3]对地上一地下生物量分配^[4]会产生不同的影响。同时,不同固沙灌木的凋落物含量及分解速率也不相

同^[5],进而,会对土壤养分的积累产生不同的影响。罗雅曦等^[6]在宁夏风沙区不同人工固沙灌丛林的研究发现,相比其他灌木类型,油蒿林地对土壤养分的提高最为显著;而张立欣等^[7]对库布齐沙漠不同人工固沙灌木林的研究发现,几种灌木类型下油蒿+杨柴混交林对土壤养分的提高最为显著;董雪等^[8]对科尔沁沙地4种典型灌木灌丛下土壤碳、氮、磷化学计量特征研究表明,东北木蓼和小叶锦鸡儿更有利于土壤养分的积累。这些研究表明,不同固沙灌木对土壤养分的提高存在一定的差异。

沙地松软,沙粒之间排列疏松,孔隙较大,因此沙地是个良好的碳库。沙地经常掩埋各种枯落物而增加其碳储量。同时,沙地土壤易渗漏,可溶性的氮磷养分也经常由于渗漏或风蚀而流失。因此,沙地土壤的碳、氮、磷含量易于变化,而这方面的研究较少,尤其是沙地不同固沙灌木配置模式对土壤碳、氮、磷含量及其化学计量比的影响尚不明确。

收稿日期:2021-07-16; **修回日期:**2021-09-30

基金项目:宁夏重点研发项目(引才专项)(2019BEB04011);高层次留学人才回国资助项目(人社厅函[2019]160号);宁夏自然科学基金(2020AAC03273)

作者简介:李海泉(1993-),男,宁夏吴忠人,硕士研究生。
E-mail:419688621@qq.com

*通信作者。Email:kaiyangqiu@nxu.edu.cn

生态化学计量学是通过结合多学科的基本原理,形成对生态系统C、N、P等化学元素平衡以及C、N、P等化学元素对生态系统交互作用影响研究的一种理论方法^[9],C、N、P元素之间互相作用是土壤系统中的重要过程^[10],同时土壤C、N、P作为生态化学计量学领域研究的主要对象,土壤C、N、P生态化学计量比是评价土壤质量的重要指标之一^[11]。近年来生态化学计量学方面的研究主要集中在农田^[12]、森林^[13]、草原^[14]等陆地生态系统,相比而言沙漠地区的相关研究较少。许多研究表明土壤C:N:P的生态化学计量比受温度^[15]和降水^[16]等气候因素、海拔^[17]和纬度^[18]等地形因子的影响。但在沙地生态恢复过程中不同固沙灌木配置模式的影响尚不清楚。

宁夏是我国沙漠化最为严重的地区之一,草方格造林作为该地区主要的固沙措施,已有多年的应用。宁夏也是全国最早开始应用草方格耦合灌木进行固沙的地区,利用固沙灌木进行沙地恢复在该区域的应用也非常广泛。白芨滩国家级自然保护区是中国草方格固沙的典范。但是,草方格灌木固沙过程中种植不同灌木对土壤化学计量特征,尤其是C:N:P比值的影响尚不明确。因此,本研究以宁夏白芨滩国家级自然保护区使用最广泛的5种固沙灌木配置模式:柠条纯林、杨柴纯林、柠条×花棒混交、柠条×沙拐枣混交、花棒×沙拐枣混交为研究对象,研究不同固沙灌木配置模式对土壤C、N、P含量及其生态化学计量比的影响。5种固沙灌木中柠条作为深根性树种,耐寒、耐旱、耐瘠薄、抗高温,根系发达、具根瘤、保水性能好,这些特性使得柠条可以高度适应干旱的沙地,并且具有较强的再生能力,被沙埋之后,依然可以产生不定根,生长出新的枝条,有很好的固沙作用。花棒为沙生、耐旱、喜光树种,耐干旱,抗风蚀,喜适度沙压,生长迅速,根生长快,侧根发达,根幅大,易繁殖,种子萌发率高、枝条及根易萌生新芽,形成无性繁殖体,可平茬复壮,是防风固沙的优良树种。花棒全株几乎无小叶或小叶极少,完全以绿色的叶轴代替小叶进行光合作用。杨柴是多年生落叶半灌木,具有耐寒、耐旱、耐贫瘠、抗风沙的特点,适应性强。杨柴是多年生落叶半灌木,具有耐寒、耐旱、耐贫瘠、抗风沙的特点。柠条、花棒和杨柴都属于豆科固沙灌木,根

系发达,有根瘤菌,能固定空气中的游离氮,增加土壤氮含量,从而使土壤肥力得到提高和改善。沙拐枣是蓼科沙拐枣属灌木,具有抗风蚀、耐沙埋、抗干旱、耐瘠薄等特点,能适应条件极端严酷的干旱荒漠区环境,是荒漠区典型的沙生植物。不同固沙灌木的生活习性不同,凋落物的数量和质量也存在不同的差异,柠条比较高,枝叶茂盛,凋落物比较多,而花棒、杨柴和沙拐枣相对矮小一些,枝叶也较为稀疏,凋落物相对较少。

探究宁夏东部风沙区不同固沙灌木配置模式下土壤生态化学计量变化规律,寻求最佳的固沙灌木种植模式,为宁夏沙地恢复提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏灵武白芨滩国家级自然保护区,该地区位于宁夏东部风沙区,属于宁夏毛乌素沙地南缘,地理坐标E 106°21'33"~106°37'00",N 37°48'28"~38°20'12",研究区气候类型属于典型的大陆性季风气候,降水的季节变化和年际变化均较大,多年平均降水量230.49 mm,降水量季节分布不均,以7—9月最多,占全年降水量的60%以上。该地区多年平均气温为10.24℃,≥10℃的时间段分布在4—10月,年平均无霜期为154 d。研究区位于我国内陆高原地区,属于多风地区,全年大风(17 m/s以上)日数为63 d;年沙暴日数为35 d。土壤类型主要为灰钙土和风沙土。研究区主要固沙灌木为柠条(*Caragana korshinskii*)、花棒(*Corethrodedron scoparium*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、杨柴(*C. fruticosum* var. *mongolicum*)等,植被多数是沙生植被,如黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)、沙木蓼(*Atraphaxi sbracteata*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、烛台虫实(*Corispermum candelabrum* Iljin)等。研究区5种典型固沙灌木林基本信息见表1。

1.2 试验设计

于2019年7月在白芨滩国家级自然保护区内以2002年建立的固沙恢复区为研究对象,分别选取5种不同固沙灌木配置模式(表2)样地各3个,每个样地面积100 m×100 m,各样地之间具有相同的地形条件。在每个样地内设置1条50 m长的样线,在每条样线

表1 研究区5种典型固沙灌木样地基本信息

Table 1 Basic information of five typical sand-fixing shrub plots in the study area

灌木组成	1989—2018年 年均降水量/mm	1989—2018年 年均气温/°C	地上生物量/(g·m ⁻²)
柠条	232.70±48.76 ^a	10.19±0.58 ^a	15.48±3.73 ^b
杨柴	230.99±48.46 ^a	10.21±0.58 ^a	57.22±7.38 ^a
柠条×花棒混交	230.87±48.61 ^a	10.20±0.57 ^a	55.14±6.88 ^a
柠条×沙拐枣混交	228.88±48.71 ^a	10.29±0.57 ^a	14.32±3.34 ^b
花棒×沙拐枣混交	229.00±48.80 ^a	10.31±0.57 ^a	21.52±3.82 ^b

注:地上生物量为草本植物地上生物量,同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

上,每10 m设置1个10 m×10 m的灌木样方,5种固沙灌木配置模式共设置75个样方。在每个样方内采用5点法分别采集0~10 cm、10~20 cm和20~30 cm的土样,把同一个样方内5个点采集的同一土层的样品均匀混合形成一个样品,装入自封袋并带回实验室。将土壤样品放置在阴凉干燥通风且无特殊气体和尘土污染的室内,经过自然风干后用镊子拣出枯枝落叶和植物根等杂质,然后采用四分法对土样进行过筛保存,过筛具体步骤:将风干土壤过2 mm筛后,取出一半继续过1 mm筛,之后再取出一半继续过0.15 mm筛,无法通过的土壤进一步研磨,直至全部土样通过0.15 mm筛。将通过0.15 mm筛的土壤样品充分混匀装入自封袋保存,本研究中土壤有机碳、全氮和全磷均采用过0.15 mm筛后的土样进行测定。每一种固沙灌木配置模式的土壤有机碳、全氮和全磷含量均通过测定15个重复求其平均值。

1.3 土壤样品分析方法

土壤有机碳含量采用重铬酸钾容量法测定,全氮

表2 5种固沙灌木配置模式概况

Table 2 Overview of 5 different sand-fixing shrub configuration patterns

配置模式	灌木组成	种植时间/年	株距/m	行距/m	种植方式
I	柠条	2002	1	2	人工栽植
II	杨柴	2002	1	2	人工栽植
III	柠条×花棒混交	2002	1	2	人工栽植
IV	柠条×沙拐枣混交	2002	1	2	人工栽植
V	花棒×沙拐枣混交	2002	1	2	人工栽植

含量采用凯氏定氮法测定,全磷含量采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法测定^[19]。

1.4 数据处理与分析

分别使用土壤有机碳含量、全氮含量和全磷含量代表土壤的C、N、P含量。采用Excel 2016对数据进行录入和初步整理,剔除异常数据。利用SPSS 22.0进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)和Duncan多重检验,对各个土层下5种固沙灌木配置模式的土壤样品C、N、P含量及C:N、C:P和N:P生态化学计量比分别进行差异性检验,显著性水平为 $\alpha=0.05$;运用Pearson Correlation分析土壤C、N、P含量与其化学计量比的相关性;根据相关分析结果,进一步采用一元线性回归模型分析化学计量比与土壤C、N、P含量之间的关系;利用Matlab软件进行作图,图中数据均为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 不同固沙灌木配置模式对土壤C、N、P含量的影响

在0~10 cm土层,柠条×花棒混交与柠条×沙拐枣混交固沙灌木配置模式下土壤全氮含量显著高于其他3种固沙灌木配置模式($P<0.05$)(图2),土壤有机碳含量和土壤全磷含量在不同固沙灌木配置模式间差异均不显著($P>0.05$)(图1、3)。在10~20 cm土层,柠条和杨柴固沙灌木配置模式有机碳含量显著高于其他3种固沙灌木配置模式($P<0.05$)(图1),柠条×沙拐枣混交固沙灌木配置模式全氮含量显著低于其他4种固沙灌木配置模式($P<0.05$),而杨柴固沙灌木配置模式全氮含量显著高于其他4种固沙灌木配

置模式 ($P < 0.05$) (图 2), 5 种固沙灌木配置模式全磷含量差异不显著 ($P > 0.05$) (图 3)。在 20~30 cm 土层, 柠条×沙拐枣混交固沙灌木配置模式有机碳含量显著低于其他 4 种固沙灌木配置模式 ($P < 0.05$) (图 1), 柠条固沙灌木配置模式全氮含量显著高于其他 4 种固沙灌木配置模式 ($P < 0.05$), 同时柠条×花棒混交固沙灌木配置模式全氮含量显著高于另外 3 种固沙灌木配置模式 ($P < 0.05$) (图 2), 杨柴固沙灌木配置模式全磷含量显著低于其他 4 种固沙灌木配置模式 ($P < 0.05$) (图 3)。

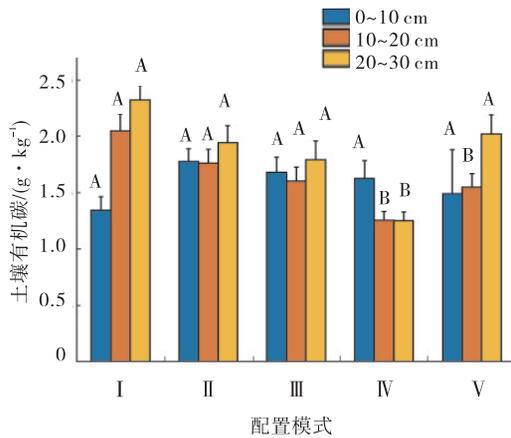


图 1 不同固沙灌木配置模式土壤有机碳含量

Fig. 1 Soil organic carbon content in surface and near surface layers of different sand-fixing shrub configurations

注: I: 柠条、II: 杨柴、III: 柠条×花棒混交、IV: 柠条×沙拐枣混交、V: 花棒×沙拐枣混交。不同字母表示同一土层不同固沙灌木配置模式之间差异显著 ($P < 0.05$)。下同

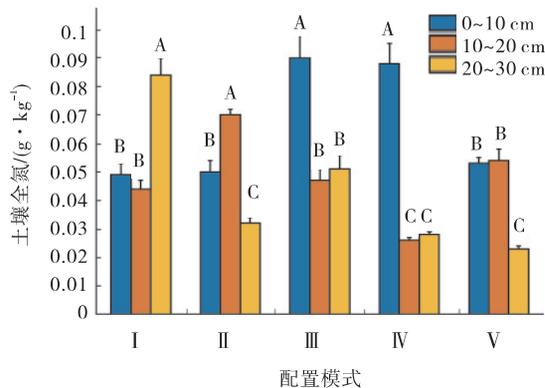


图 2 不同固沙灌木配置模式土壤全氮含量

Fig. 2 Soil total nitrogen content of different sand-fixing shrub configurations

2.2 不同固沙灌木配置模式对土壤 C、N、P 生态化学计量比的影响

C:N 在 0~10 cm 土层, 柠条×花棒混交和柠条×

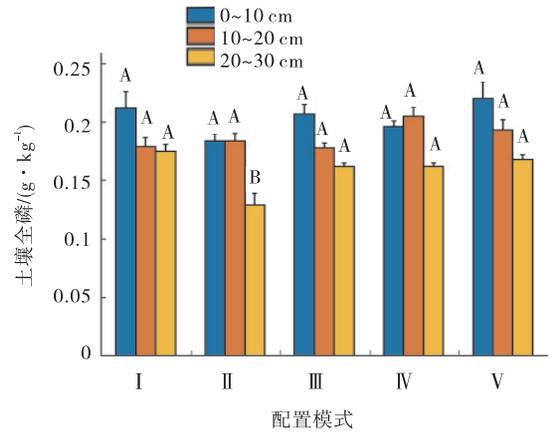


图 3 不同固沙灌木配置模式土壤全磷含量

Fig. 3 Soil total phosphorus content of different sand-fixing shrub configurations

沙拐枣混交固沙灌木配置模式显著低于其他 3 种固沙灌木配置模式; 在 10~20 cm 土层, 柠条和柠条×沙拐枣混交固沙灌木配置模式显著高于其他 3 种固沙灌木配置模式; 在 20~30 cm 土层中, 花棒×沙拐枣混交固沙灌木配置模式最大, 显著高于其他 4 种固沙灌木配置模式, 而柠条和柠条×花棒混交固沙灌木配置模式最小, 显著低于其他 3 种固沙灌木配置模式 (图 4)。

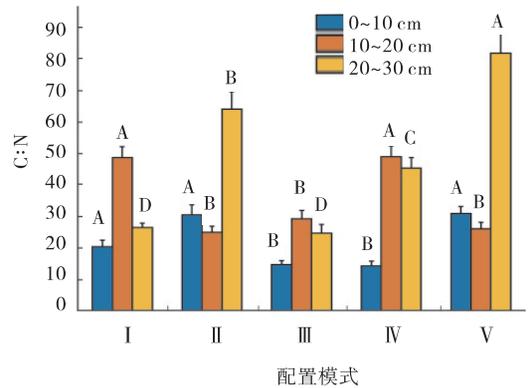


图 4 不同固沙灌木配置模式土壤碳氮比

Fig. 4 Soil C:N ratios of different sand-fixing shrub configurations

C:P 在 0~10 cm 土层, 柠条和花棒×沙拐枣混交固沙灌木配置模式显著低于其他 3 种固沙灌木配置模式 (图 5); 在 10~20 cm 土层, 柠条固沙灌木配置模式显著高于其他 4 种固沙灌木配置模式, 柠条×沙拐枣混交固沙灌木配置模式显著低于其他 4 种草方格造林树种配置模式 (图 5); 在 20~30 cm 土层中, 柠条×沙拐枣混交固沙灌木配置模式显著低于其他 4 种固沙灌木配置模式 (图 5)。

N:P 在 0~10 cm 土层, 柠条×花棒混交和柠条×

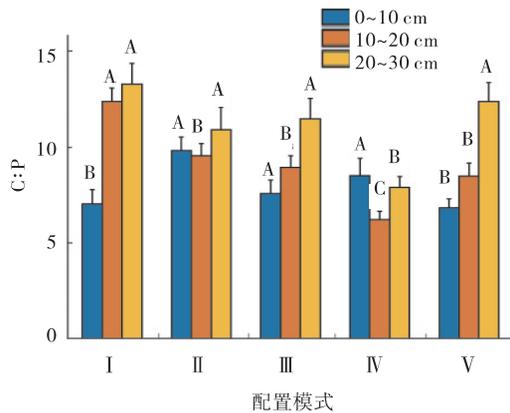


图5 不同固沙灌木配置模式土壤碳磷比

Fig. 5 Soil C:P ratios of different sand-fixing shrub configurations

沙拐枣混交固沙灌木配置模式显著高于其他3种固沙灌木配置模式(图6);在10~20 cm土层中,杨柴固沙灌木配置模式最高,显著高于其他4种固沙灌木配置模式,而柠条×沙拐枣混交固沙灌木配置模式最小,显著低于其他4种固沙灌木配置模式(图6);在20~30 cm土层,柠条固沙灌木配置模式显著高于其他4种固沙灌木配置模式,柠条×沙拐枣混交和花棒×沙拐枣混交固沙灌木配置模式显著低于其他3种固沙灌木配置模式(图6)。

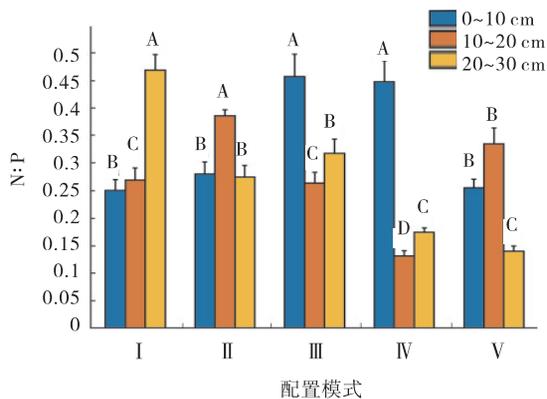


图6 不同固沙灌木配置模式土壤氮磷比

Fig. 6 Soil N:P ratios of different sand-fixing shrub configurations

2.3 不同固沙灌木配置模式下土壤C、N、P含量与其生态化学计量比之间的关系

柠条固沙灌木样地C:P与C含量呈极显著正相关($P<0.001$),与P呈极显著负相关($P<0.001$),C:N与N呈极显著负相关($P<0.001$),C:P与N呈极显著正相关($P<0.001$)(表2);杨柴固沙灌木样地C:N、C:P均与C含量呈极显著正相关($P<0.001$),N:P与N呈极显著正相关($P<0.001$),C:N分别与N含量、P

含量呈极显著正相关($P<0.001$)(表3);柠条×花棒混交固沙灌木样地C:N与N含量呈显著负相关($P<0.01$),C:P与C含量呈极显著正相关($P<0.001$),N:P与N含量呈极显著正相关($P<0.001$)(表3);柠条×沙拐枣混交固沙灌木样地C:N与N含量呈极显著负相关($P<0.001$),C:P与C含量呈极显著正相关($P<0.001$),C:P与P含量呈极显著负相关($P<0.05$),N:P与N含量呈极显著正相关($P<0.001$)(表3);花棒×沙拐枣混交固沙灌木样地C:N、C:P均与C含量呈极显著正相关($P<0.001$),N:P与C含量呈显著负相关($P<0.01$),C:N与N含量呈显著负相关($P<0.01$),C:P分别与N、P含量呈显著负相关($P<0.01$),N:P与N含量呈极显著正相关($P<0.001$)(表3)。

土壤C、N、P化学计量比与其含量之间存在线性关系。C:N和C含量的拟合方程是 $y=16.363x+12.048$ ($R^2=0.139$, $P<0.001$),和N含量的拟合方程是 $y=-584.809x+69.558$ ($R^2=0.504$, $P<0.001$),拟合强度为 $N>C$ (图7)。C:P与C含量的拟合方程为 $y=5.477x+0.123$ ($R^2=0.757$, $P<0.001$),和P的拟合方程是 $y=-40.295x+16.857$ ($R^2=0.168$, $P<0.001$),拟合强度为 $C>P$ (图7)。N:P和N含量的拟合方程是 $y=4.794x+0.041$ ($R^2=0.880$, $P<0.001$),和P含量的拟合方程为 $y=-0.224x+0.333$ ($R^2=0.003$, $P=0.456$),拟合强度为 $N>P$ (图7)。

3 讨论

3.1 不同固沙灌木配置模式下土壤C、N、P含量特征

草方格耦合固沙灌木有利于土壤养分的积累。一方面,草方格扎设增加了地表粗糙度,使沙面得以固定,从而逐渐形成土壤结皮^[20]。并且草方格本身材料多以小麦秸秆^[21]、稻草等为主,长期分解后养分归还大地,会提高土壤肥力。另一方面,在草方格中种植柠条、杨柴、花棒、沙拐枣等固沙灌木,不同灌木树种的生活习性及其各类配置模式下草本层地上生物量等都对土壤C、N、P含量产生影响,灌木生长过程产生的枝叶枯落物,也会增加土壤养分^[22-23]。本研究对5种固沙灌木配置模式下土壤C、N、P含量进行比较发现,土壤C、N、P含量在不同固沙灌木配置模式之间存在一定差异。在0~10 cm土层,柠条×花棒混交与

表 3 不同固沙灌木配置模式下土壤 C、N、P 含量与其化学计量比的相关性
Table 3 Correlation between soil C, N, P contents and their stoichiometric ratios under different sand-fixing shrub configuration patterns

固沙灌木配置模式	土壤指标	C:N	C:P	N:P
I	SOC	0.303	0.862***	0.331
	TN	-0.730***	-0.014	0.956***
	TP	-0.399	-0.720***	0.042
II	SOC	0.593***	0.791***	-0.269
	TN	-0.834***	-0.297	0.781***
	TP	-0.579***	-0.258	-0.049
III	SOC	0.283	0.894***	-0.047
	TN	-0.713**	-0.240	0.957***
	TP	-0.313	-0.343	0.309
IV	SOC	0.197	0.838***	0.305
	TN	-0.791***	0.225	0.979***
	TP	0.085	-0.421*	0.032
V	SOC	0.684***	0.835***	-0.505**
	TN	-0.861***	-0.523**	0.886***
	TP	-0.268	-0.446**	-0.148

注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$; SOC: 有机碳; TP: 全磷; TN: 全氮

柠条×沙拐枣混交固沙灌木配置模式全氮含量最大,显著高于其他 3 种固沙灌木配置模式,这可能是由于混交林有利于改善土壤物理性质^[24],从而加快枯落物的分解,有利于土壤养分积累,花棒×沙拐枣混交林全氮含量低于含柠条的混交林固沙灌木配置模式。可能是由于花棒和沙拐枣接近地面部分分枝少,通风大,不利用枯落物的积累,同时在研究区内的花棒和沙拐枣死亡率高,导致其全氮含量低于含柠条的混交林,在这 3 种固沙灌木配置模式中,沙拐枣×花棒混交固沙灌木配置模式的全氮含量高于另外 2 种纯林,虽然差异不显著。这些结果进一步表明,表层土壤混交林相比纯林更有利于土壤全氮含量的提高,从而提高表层土壤全氮的含量。在 20~30 cm 土层,柠条固沙灌木配置模式全氮含量最高,显著高于其他 4 种固沙灌木配置模式;柠条×花棒混交固沙灌木配置模式全氮含量显著高于另外 3 种固沙灌木配置模式。这可能是由于研究区内柠条、花棒等固沙灌木细根主要分布在 20~30 cm 土层区域^[25],豆科灌木根系具有固氮作用,且柠条对土壤全氮的积累高于花棒和杨柴等其他

豆科固沙灌木^[6],这些结果表明柠条纯林或柠条与其他豆科灌木混交更有利于较深土壤全氮含量的积累。

土壤有机碳在碳循环中起着至关重要的作用^[26]。在 0~10 cm 土层,柠条×花棒混交、柠条×沙拐枣混交固沙灌木配置模式的有机碳含量高于柠条纯林,这是由于混交林更有利于土壤有机质的积累,从而使表层土壤的有机碳含量较高,这与马云波等^[24]的研究结果一致。在 20~30 cm 土层,柠条×沙拐枣混交固沙灌木配置模式有机碳含量显著低于其他 4 种固沙灌木配置模式,这可能是由于不同固沙灌木的凋落物和根系分泌物的质量和数量各不相同^[27],土壤有机碳含量受枯落物影响较大,柠条×沙拐枣混交固沙灌木配置模式的地表枯落物含量虽多但分解速率缓慢。

不同固沙灌木配置模式的全磷含量在 0~20 cm 土层中均不显著,只有在 20~30 cm 土层中杨柴固沙灌木配置模式下全磷含量显著低于其他 4 种固沙灌木配置模式,这是由于研究区土壤主要为风沙土,风沙土的发育程度低,对磷的吸附能力也低,所以表层和近表层土壤中全磷含量不受影响,全磷含量出于一种

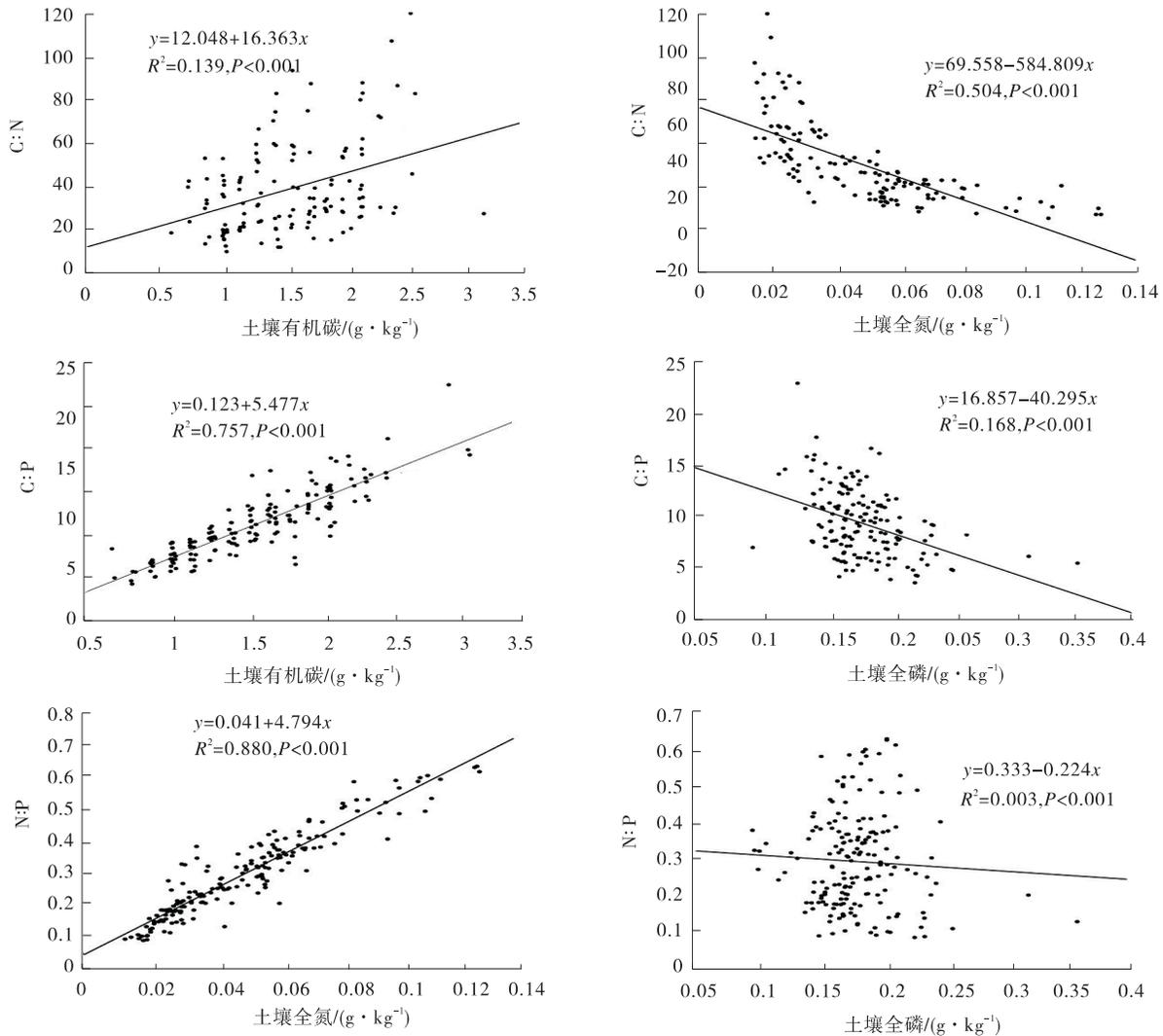


图7 宁夏东部风沙区不同固沙灌木配置模式下0-30 cm土壤C、N、P化学计量比与其含量的关系

Fig. 7 Relationship between stoichiometric ratios of soil C, N, P and their contents in 0-30 cm soil under different sand-fixing shrub configurations in the wind-swept area of eastern Ningxia

动态平衡状态,固沙灌木对土壤全磷的提高最差,这与之前的研究结果一致^[28]。

3.2 不同固沙灌木配置模式下土壤C、N、P生态化学计量比特征

从化学计量学角度阐明沙地恢复过程中,不同固沙灌木混交对土壤养分限制因子供给及养分转化特征的影响。5种固沙灌木样地位于同一个气候区,样地之间的气候差异很小,气候的影响可以忽略不计,土壤化学计量比主要受不同固沙灌木配置模式的影响。土壤碳、氮、磷化学计量特征是确定土壤碳、氮、磷平衡的一个重要指标^[9],对生态学有着重要的指示作用^[29]。C:N通常作为土壤矿化能力指标^[30],反映土壤系统中碳和氮之间的平衡关系,其值越小,表明土壤矿化能力越强,越不利于土壤有机质的积累^[31]。本研究中C:N在0~10 cm土层,柠条×花棒混交和柠

条×沙拐枣混交2种固沙灌木配置模式均显著低于其他3种固沙灌木配置模式,主要原因是这2种固沙灌木配置模式下全氮含量显著大于其他3种固沙灌木配置模式,而有机碳含量与其他3种固沙灌木配置模式无显著性差异;这说明含有柠条的混交林对表层土壤N含量及其矿化速率影响较大,有利于土壤N释放,促进土壤N转化,不利于表层土壤C储存^[32]。而在20~30 cm土层,柠条×花棒混交、柠条纯林、柠条×沙拐枣混交3种固沙灌木配置模式的C:N也显著低于其他2种固沙灌木配置模式,这也说明了含有柠条的混交林更有利于土壤的矿化过程,促进土壤养分循环,从而有利于沙地土壤肥力的提高,促进植被恢复。

C:P作为指示土壤磷素矿化程度的指标,同时也是判断磷的有效性的一个重要指标,其比值越低表明土壤

矿化能力越强^[33]。C:P在10~20 cm土层,柠条固沙灌木配置模式显著高于其他4种固沙灌木配置模式,这主要是由于柠条纯林土壤有机碳含量最大且全磷含量在5种固沙灌木配置模式下无显著差异,这个结果表明柠条纯林固沙灌木配置模式土壤P的有效性较低,这可能是由柠条固沙灌木配置模式土壤有机质的分解速率较低引起的^[9]。在20~30 cm土层,柠条×沙拐枣混交固沙灌木配置模式的C:P显著低于其他4种固沙灌木配置模式,这主要是由于其土壤有机碳含量显著低于其他4种固沙灌木配置模式,而全磷含量显著大于杨柴纯林固沙灌木配置模式且与其他3种固沙灌木配置模式差异不显著,这表明相比其他4种固沙灌木配置模式,柠条×沙拐枣混交固沙灌木配置模式的土壤磷矿化能力更强。

N:P可以确定土壤养分的限制性阈值^[34],在0~10 cm土层,柠条×花棒混交和柠条×沙拐枣混交2种固沙灌木配置模式N:P显著高于其他3种固沙灌木配置模式,这主要是由于这2种固沙灌木配置模式全氮含量显著大于其他3种固沙灌木配置模式且全磷含量在5种固沙灌木配置模式之间无显著差异。此结果表明,含有柠条的混交林更有利于土壤氮的矿化过程,对土壤磷含量的下降速率有一定的限制。

3.3 不同固沙灌木配置模式土壤C:N:P化学计量比与C、N、P含量的关系

土壤作为生态系统的重要组成部分,其C:N:P化学计量比与C、N、P含量之间紧密相关,是衡量土壤元素平衡的重要指标^[35]。本研究不同固沙灌木配置模式之间土壤生态化学计量比与C、N、P含量的关系存在差异。C:N与C、N含量的拟合强度为N大于C,而且,C:N在5种固沙灌木配置模式下与全氮含量均呈极显著负相关($P<0.001$),而杨柴和花棒×沙拐枣混交2种固沙灌木配置模式的C:N与有机碳含量呈极显著正相关($P<0.001$),这些结果表明这两种固沙灌木配置模式的土壤C:N由土壤碳和氮的限制同时决定,而另外3种固沙灌木配置模式的土壤C:N主要由氮的限制引起。土壤C:P在5种固沙灌木配置模式下与有机碳间均呈极显著正相关($P<0.001$),而只有柠条纯林、柠条×沙拐枣混交、花棒×沙拐枣混交3种固沙灌木配置模式的C:P与全磷含量呈显著负相关($P<0.05$),而且土壤C:P与C、P含量的拟合强度为

C大于P。这些结果表明,在不同固沙灌木配置模式下,对土壤C:P起主导作用的是土壤有机碳含量,而柠条纯林、柠条×沙拐枣混交、花棒×沙拐枣混交3种固沙灌木配置模式的土壤全磷含量也在一定程度上影响土壤C:P比值。土壤N:P在5种固沙灌木配置模式下与全氮间均呈极显著正相关($P<0.001$),而与全磷均差异不显著($P>0.05$),而且土壤N:P与N、P的拟合强度为N大于P。这些结果表明,在土壤元素平衡过程中土壤N作为主要的限制因素,这与陶冶等^[36]在古尔班通古特沙漠的研究结果一致。在前人的研究中,C:N:P化学计量比与C、N、P含量之间均有一定的线性或非线性关系^[30,36-38]。由于研究区域不同,其关系也有不同的具体表现。在本研究中C:N与C含量呈线性正相关关系,与N含量呈线性负相关关系,这与张书齐^[39]、董雪^[8]、邱岭军^[40]等研究结果相同;C:P与C含量呈线性正相关关系,与P含量不存在线性相关关系。综上所述,本研究C:N和N:P主要限制因素均为全氮含量,C:P主要限制因素为有机碳含量,这一结果与赵力兴等^[41]在科尔沁沙地对二龄紫花苜蓿草地研究结果一致。利用土壤化学计量关系来判断土壤养分的限制还需要进一步的野外施肥实验加以印证^[42-43]。

4 结论

宁夏灵武白芨滩国家级自然保护区典型的5种固沙灌木配置模式对土壤碳、氮、磷及其生态化学计量比的影响不同,在表层土壤(0~10 cm),柠条×花棒混交与柠条×沙拐枣混交显著提高土壤全氮含量,2种模式土壤C:N显著低于其他3种固沙灌木配置模式,土壤N:P显著高于其他3种固沙灌木配置模式。柠条×花棒混交与柠条×沙拐枣混交固沙灌木配置模式有利于表层土壤的矿化过程,促进土壤N释放;10~20 cm土层,柠条固沙灌木配置模式C:P显著高于其他4种,土壤P的有效性较低;20~30 cm土层,柠条固沙灌木配置模式全氮含量显著高于其他4种,柠条×沙拐枣混交固沙灌木配置模式有机碳含量和C:P均显著低于其他4种。不同固沙灌木模式下碳、氮、磷及其生态化学计量比具有一定的线性关系,土壤有机碳和全氮是影响化学计量比的主要限制因子,不同固沙灌木土壤元素平衡主要受到土壤氮限制。因此,未来

在本区域进行固沙恢复实践中应考虑种植对氮素积累有利的柠条混交林。

参考文献:

- [1] 杨超,李钢铁,刘艳琦. 我国土地沙漠化治理产业化研究综述[J]. 内蒙古林业调查设计,2019(6):20-23.
- [2] 常海涛,刘任涛,刘佳楠,等. 草方格造林固沙过程中土壤性质变化及分形特征——以腾格里沙漠东南缘为例[J]. 水土保持学报,2018,32(6):58-65+165.
- [3] 王甜甜,朱林,赵学琳,等. 三种典型固沙灌木的降雨再分配特征[J]. 干旱区资源与环境,2021,35(8):100-107.
- [4] 詹瑾,李玉霖,韩丹,等. 半干旱沙区3种优势固沙灌木生物量分配及其生态学意义[J]. 中国沙漠,2020,40(5):149-157.
- [5] 郭鑫,卢立娜,贺晓辉,等. 毛乌素沙地人工固沙灌木林凋落物分解及改良土壤的研究[J]. 林业资源管理,2014(5):74-78.
- [6] 罗雅曦,刘任涛. 宁夏风沙区不同人工固沙灌丛土壤质量评价[J]. 水土保持研究,2019,26(5):60-67.
- [7] 张立欣,段玉玺,王博,等. 库布齐沙漠不同人工固沙灌木林土壤微生物量与土壤养分特征[J]. 应用生态学报,2017,28(12):3871-3880.
- [8] 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.
- [9] 王绍强,于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报,2008,28(8):3937-3947.
- [10] 贺金生,韩兴国. 生态化学计量学:探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. 植物生态学报,2010,34(1):2-6.
- [11] 程瑞梅,王娜,肖文发,等. 陆地生态系统生态化学计量学研究进展[J]. 林业科学,2018,54(7):130-136.
- [12] Jiang Y, Rao L, Sun K, *et al.* Spatio-temporal distribution of soil nitrogen in Poyang lake ecological economic zone (South-China) [J]. Science of the Total Environment, 2018,626:235-243.
- [13] 张雨鉴,王克勤,宋娅丽,等. 滇中亚高山森林植物叶—凋落叶—土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报,2020,40(21):7648-7658.
- [14] 饶丽仙,沈艳,聂明鹤. 宁夏典型草原不同退耕年限草地植物—土壤生态化学计量特征[J]. 草业学报,2017,26(4):43-52.
- [15] 汪攀. 喀斯特石漠化生态系统土壤C、N、P生态化学计量学特征及其环境影响因子研究[D]. 贵阳:贵州师范大学,2019.
- [16] 朱湾湾,王攀,樊瑾,等. 降水量及N添加对宁夏荒漠草原土壤C:N:P生态化学计量特征和植被群落组成的影响[J]. 草业学报,2019,28(9):33-44.
- [17] 张广帅,邓浩俊,杜锟,等. 泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征——以云南省小江流域为例[J]. 生态学报,2016,36(3):675-687.
- [18] 曾全超,李鑫,董扬红,等. 陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征[J]. 自然资源学报,2015,30(5):870-879.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3版[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [20] Tian L, Wu W, Zhang D, *et al.* Characteristics of erosion and deposition of straw checkerboard barriers in alpine sandy land [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(1):573-584.
- [21] 陈祝春,李定淑. 草方格沙障腐蚀过程中土壤微生物的作用[J]. 中国沙漠,1987(4):42-45.
- [22] 王逸敏,刘康,屈建军. 沙障对流沙地植被和土壤养分的影响[J]. 中国沙漠,2019,39(3):56-65.
- [23] 高阳,高凯,王琳,等. 科尔沁沙地两相菊芋品种顺片C、N、P化学计量特征[J]. 草原与草坪,2019,39(4):72-77.
- [24] 马云波,牛聪傑,许中旗. 不同造林模式对铁尾矿地土壤性质的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(3):242-248.
- [25] 赖宗锐. 四种典型沙生灌木细根动态及其对土壤有机碳的影响[D]. 北京:北京林业大学,2015.
- [26] 安静,邓波,韩建国,等. 土壤有机碳稳定性研究进展[J]. 草原与草坪,2009,29(2):82-87.
- [27] Qi K, Pang X, Yang B, *et al.* Soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry shifts with tree species in subalpine plantations [J]. Peer J, 2020,8:9702.
- [28] 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.
- [29] 青焯,孙飞达,李勇,等. 若尔盖高寒退化湿地土壤碳氮磷比及相关性分析[J]. 草业学报,2015,24(3):38-47.
- [30] 张旭冉,张卫青,王海茹,等. 克氏针茅草原土壤生态化学计量特征对放牧强度的响应[J]. 生态学报,2021,13:1-8.
- [31] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. European Journal of Soil Science, 2014,65(1):151-163.
- [32] 周玉燕,贾晓红,赵昕,等. 不同植被配置下土壤碳矿化潜力[J]. 生态学杂志,2011,30(11):2442-2448.

- [33] 吴建国, 裴伟, 艾丽. 祁连山中部云杉林和高寒草甸土壤 N 矿化及其影响因素研究[J]. 林业科学研究, 2008(2): 161—167.
- [34] 邓斌. 高寒草地不同演替阶段植被变化和土壤碳氮磷的生态化学计量研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [35] Wang M, Chen H, Zhang W, *et al.* Soil nutrients and stoichiometric ratios as affected by land use and lithology at county scale in a karst area, southwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619: 1299—1307.
- [36] 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.
- [37] 潘禹, 王克勤, 宋娅丽, 等. 华山松林凋落物养分释放及土壤生态化学计量特征对模拟氮沉降的短期响应[J]. 生态环境学报, 2021, 30(3): 492—502.
- [38] 郭子豪, 朱秀雯, 陈钱炜, 等. 滇中地区主要灌丛碳氮磷生态化学计量特征[J]. 森林与环境学报, 2021, 41(4): 358—365.
- [39] 樊如月, 李青丰, 贺一鸣, 等. 农牧交错区小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla*) 人工灌木林土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 土壤通报, 2019, 50(2): 437—443.
- [40] 邱岭军, 何宗明, 胡欢甜, 等. 滨海沙地不同树种碳氮磷化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(3): 555—559.
- [41] 赵力兴, 王琳, 李天琦, 等. 科尔沁沙地二龄紫花苜蓿草地土壤养分及化学计量特征研究[J]. 草原与草坪, 2020, 40(5): 76—82.
- [42] 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等. 生态化学计量学特征及其应用研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5484—5492.
- [43] 李素新, 张芸香, 郭晋平. 模拟氮沉降对华北落叶松林凋落叶生态化学计量特征的影响[J]. 中国水土保持科学 (中英文), 2021, 19(2): 12—18.

Effects of sand-fixing shrub patterns on soil ecological stoichiometric characteristics in eolian sand region of eastern Ningxia, China

LI Hai-quan¹, QIU Kai-yang^{1*}, XIE Ying-zhong¹, HE Yi¹, MIAO Hu¹,

LIU Wang-suo^{1,2}, HUANG Ye-yun¹

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Ningxia Grape Wine and Desertification Prevention Technical College, Yinchuan 750199, China)

Abstract: In order to investigate the effects of different sand-fixing shrub allocation patterns on soil nutrient content and ecological stoichiometric ratio in the aeolian sandy area of eastern Ningxia, a typical sand-fixing shrub plot in Lingwu Baijitan National Nature Reserve of Ningxia was selected as the research object. The effects of five sand-fixing shrub configurations (pure shrubland of *Caragana korshinskii*, pure shrub land of *Corethroedendron fruticosum* var. *mongolicum*, mixed shrub land of *C. korshinskii* and *Corethroedendron scoparium*, mixed shrubland of *C. korshinskii* and *Calligonum mongolicum*, mixed shrub land of *C. scoparium* and *C. mongolicum*) on soil carbon, nitrogen and phosphorus content and their ecological stoichiometry ratio were analyzed. The results showed that in the 0~10 cm soil layer, soil total nitrogen content and the N:P ratio of the mixed shrubland of *C. korshinskii* and *C. scoparium*, and those of the mixed shrubland of *C. korshinskii* and *C. mongolicum* were significantly higher than those of the other three sand-fixing shrub configuration patterns. But the soil C:N ratio of the mixed shrub land of *C. korshinskii* and *C. scoparium*, and that of the mixed shrub land of *C. korshinskii* and *C. mongolicum* were both significantly lower than that of the other three patterns. In the 10~20 cm soil layer, the C:N of the shrub land of *C. korshinskii*, and that

of the mixed shrub land of *C. korshinskii* and *C. mongolicum* were both significantly higher than that of the other three patterns, and the soil C:P ratio of the shrubland of *C. korshinskii* was significantly higher than that of the other four patterns. In the 20~30 cm soil layer, the soil total nitrogen content of the shrub land of *C. korshinskii* was significantly higher than that of the other four patterns, and the soil organic carbon content and the soil C:P ratio of the mixed shrub land of *C. korshinskii* and *C. mongolicum* were both significantly lower than those of the other four patterns. The main limiting factor of C:N ratio and N:P ratio was the total nitrogen content, while the main limiting factor of C:P ratio was organic carbon content. The mixed shrubland of *C. korshinskii* and *C. scoparium*, and the mixed shrubland of *C. korshinskii* and *C. mongolicum* were beneficial for surface soil nitrogen mineralization and the increase of soil total nitrogen content, and were also beneficial for promoting the balance of soil nutrients in sandy areas.

Key words: sand-fixing shrub; soil; ecological stoichiometry; sandy land restoration; afforestation based on straw

致谢 2022 年审稿专家

(以姓氏笔画为序)

2022年,《草原与草坪》承蒙以下审稿专家认真审阅稿件,付出辛勤工作,使刊物的学术质量和影响力又上了一个新台阶,入选林草科技重点期刊,再次收录为中国科技核心期刊、科技期刊世界影响力指数报告期刊。在此,编辑部向为我刊审理稿件的专家致以诚挚的谢意,感谢您愿意挤出宝贵的时间,对我们的稿件给予认真审阅!

祝各位审稿专家在新的一年里身体安康,万事如意!

于大炮、于应文、于惠、于珠扎布、马彦军、马维伟、马瑞、王文颖、王占义、王传旗、王多斌、王改玲、王波、王晓凌、王博、王森山、牛奎举、毛娟、方强恩、尹国丽、尹德洁、孔广超、邓浩亮、石永红、付和平、代金霞、兰玉菲、司怀军、毕玉芬、朱慧森、乔谦、任卫波、任正超、任艳芳、刘大林、刘长仲、刘文辉、刘欢、刘苗、刘金平、刘学录、刘建新、刘建霞、刘贵波、刘琳、刘慧霞、闫宝龙、安沙舟、祁娟、孙飞达、孙建、花立民、苏军虎、杜文华、杜岩功、杜峰、李云鹏、李玉珠、李亚娟、李伟华、李州、李红丽、李良勇、李纯斌、李胜、李海燕、李雪萍、李得禄、李惠霞、李善家、杨发荣、杨成德、杨杰、杨扶德、杨志杰、杨芳萍、杨春雪、杨顺义、杨振奇、吴欣明、邱黛玉、辛福梅、汪奎、张元庆、张文太、张世虎、张玉琴、张军、张丽华、张建国、张勃、张美玲、张振粉、张起鹏、张桂杰、张爱梅、张淑花、张超、张鹏、张豪睿、陈仕勇、陈垣、陈银萍、武季玲、苗佳敏、苗彦军、苟文龙、尚占环、尚素琴、罗珠珠、周华坤、周兵、周帮伟、周媛、鱼小军、郑伟、郑敏娜、郑琛、郑普山、单贵莲、宗学风、赵丽丽、赵桂琴、赵晓军、赵祥、赵萌莉、郝媛媛、胡桂馨、南丽丽、柳小妮、柳富治、钟小仙、段敏杰、宫渊波、娜仁花、袁洁、晋小军、贾文雄、夏方山、柴继宽、柴琦、钱广强、徐长林、徐秉良、殷秀杰、高玉红、高永、高莹、郭二辉、郭丽珠、郭忠录、郭微、唐庄生、黄五星、黄迎新、曹文侠、曹兵、曹建军、常智慧、崔晓宁、崔辉梅、康文娟、盖艾鸿、梁欢、梁琪、寇江涛、董世魁、韩丽珍、焦婷、鲁旭阳、曾会明、游永亮、游明鸿、谢开云、路宁娜、解开治、蔺吉祥、廖伟彪、颜立红、薛应钰、魏伟