

DOI: 10.5846/stxb201506301362

张珂, 苏永中, 王婷, 刘婷娜. 荒漠绿洲区不同种植年限人工梭梭林土壤化学计量特征. 生态学报, 2016, 36(11): - .

Zhang K, Su Y Z, Wang T, Liu T N. Soil stoichiometry characteristics of *Haloxylon ammodendron* with different plantation age in the desert-oasis ecotone, north China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): - .

荒漠绿洲区不同种植年限人工梭梭林土壤化学计量特征

张 珂^{1,2}, 苏永中^{1,*}, 王 婷^{1,2}, 刘婷娜¹

1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所临泽内陆河流域研究站, 兰州 730000

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:为阐明梭梭建立对林下土壤养分化学计量特征影响, 本研究分析了 2 年、5 年、9 年、13 年、16 年、31 年、39 年荒漠绿洲区梭梭林灌丛下和流沙区(0 年)土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、碳酸钙(CaCO₃)、速效磷(Available P)含量及其化学计量特征变化规律。结果显示: 1) SOC 和 TN 在 9 年后出现显著地成层化分布, 而 TP 的这一特征相对滞后; 不同土壤深度 SOC、TN 均随林龄增加而显著增加, 而 TP 未表现出明显变化。2) C:P 和 N:P 在 9 年后表现出明显的成层化分布且不同土层 C:P 和 N:P 随林龄增加显著增加, 而 C:N 保持相对稳定。3) 较低含量的 Available P 在 2 年后即表现出 0—5 cm 含量大于 5—20 cm 且表层 Available P 和 CaCO₃ 随林龄增加而显著增加。而 CaCO₃: Available P 在不同林龄间并未发生显著变化。4) 随林龄增加, 土壤表层风蚀可蚀性极显著降低且与土壤表层养分含量呈显著的负相关关系。以上结果表明, 梭梭的建立提高了土壤 SOC 和 TN 含量且随林龄增加变化更显著, 而变化较小的 C:N 说明土壤氮的形成需要固定比例的碳。变化幅度较小的 TP 说明主要来源于岩石风化的磷素受时间作用的限制, 而较低含量的 Available P 和变化幅度较小的 CaCO₃: Available P 则表明梭梭的生长受 P 的限制且有限的 Available P 易被 CaCO₃ 固定。另外, 土壤养分含量与土壤风蚀可蚀性显著的负相关关系, 进一步说明梭梭的建立改善了土壤质地, 增加了土壤养分含量, 这对荒漠绿洲区土壤恢复和植被建设有极大的促进和指导作用。

关键词: 人工梭梭林; 林龄; 土壤化学计量特征; 荒漠-绿洲区

Soil stoichiometry characteristics of *Haloxylon ammodendron* with different plantation age in the desert-oasis ecotone, north China

ZHANG Ke^{1,2}, SU Yongzhong^{1,*}, WANG Ting^{1,2}, LIU Tingna¹

1 Key Laboratory of Eco-Hydrology in Inland River Basin, Linze Inland River Basin Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Vegetation construction is one of the most important measures of ecological restoration in arid area and also one of the most effective methods of desertification control. *Haloxylon ammodendron*, one important sand-fixation plant in desert region of China with remarkable tolerance to drought, hot environmental stress, and can grow rapidly after planting on sand lands, was widely used for restoring vegetation on the peripheries of the oasis to fix the sand dunes in Linze Station since 1975. To clarify the effect of *H. ammodendron* on soil nutrient stoichiometric characteristics and explore the indicative significance of nutrient stoichiometric ratios on the recovery of soil, this study conducted the research on the artificial forest of *H. ammodendron* in an desert-oasis ecotone by analyzing soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401337)

收稿日期: 2015-06-30; 修订日期: 2015-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: suyzh@lzb.ac.cn

phosphorus (TP), Available P and CaCO_3 in an age sequence of 0-, 2-, 5-, 9-, 13-, 16-, 31-, and 39-year-old *H. ammodendron* plantations. Results showed that (1) distribution of SOC, TN and TP presented significant layered phenomenon along with the increase of plantation age, even though this feature in TP was relatively backward. In different soil depth, SOC and TN increased significantly with the increase of plantation age, but TP has no significant variation. (2) C:P and N:P also displayed obvious stratification trait and C:P and N:P in different layer also increased with the increase of plantation age. However, C:N presented at a relatively constant variation. (3) The lower content of Available P expressed significant stratification feature after 2-year-old plantation and Available P and CaCO_3 in 0—5 cm increased with the increase of plantation age. Nevertheless, CaCO_3 : Available P also has no remarkable changes. (4) With the increase of plantation age, soil erodible fraction was highly significant decreased and has remarkably negative correlated with soil nutrients. These results exhibited significant increase of SOC and TN with the increase of establishment time. C:N exhibited a stable trend, compared with C:P and N:P, indicating the formation of nitrogen need a relative fixation ratio of carbon and also stating C:N that less susceptible to the effects of climate factors is quite stable. The small variation of TP mainly derived from the weathering of rock was strongly restricted by time. Moreover, the lower content of Available P and the narrow change of CaCO_3 : Available P manifested that the growth of *H. ammodendron* may limited by soil P and the limited Available P was more fixed by CaCO_3 . In addition, the negative relationship between soil nutrients and soil erodible fraction further showed that the establishment of *H. ammodendron* has improved soil texture and enhance soil nutrients contents. Our findings aimed at soil environment has enriched the study on *H. ammodendron*. However, further study is needed to clarify the response of soil nutrient stoichiometric characteristics to *H. ammodendron* and herbaceous, so as to provide more knowledge for the restoration effect of *H. ammodendron* on arid environmental and maintain sustainable development under the limited water condition.

Key Words: *Haloxylon ammodendron*; plantation age; soil stoichiometry characteristics; desert-oasis ecotone

生态化学计量学作为近年来对生态系统养分循环研究的一种重要工具,是分析多重化学元素(尤其是碳(C)、氮(N)、磷(P))平衡关系及其生态系统交互影响的理论依据^[1-3]。目前,生态化学计量学研究的重点主要集中在对植物叶片中 C:N:P 化学计量特征的研究,其中,C:N 和 C:P 反映了植物在同化 CO_2 同时对 N、P 的吸收利用情况,N:P 临界值则是判断土壤对植物养分供应状况的指标^[4-5]。作为影响植物养分特征的重要因子,土壤是一个比较复杂的生态系统,由于其不可移动性,且受植被类型、盖度、气候、地形、土壤母质、生物多样性及发育时间等因素的影响,使得土壤生态系统具有较高的空间异质性,且不同区域土壤养分循环特征也有显著差异^[6-8]。如,在较高纬度易受风蚀影响的荒漠区,植物体生命活动不仅受水分短缺的影响,还受土壤贫瘠养分以及胁迫环境的限制,从而影响着植物叶片中的养分元素含量^[9-11]。因此,对不同区域不同植被类型土壤化学计量特征的研究显得尤为重要。

在干旱荒漠区建立人工固沙植被是生态恢复的重要措施之一^[12]。研究表明,人工固沙林的建立能显著提高了土壤表层有机质和 N、P 等养分含量,且随着人工植被建立时间的延长土壤肥力显著改变^[13-15]。另外,人工植被对流沙的固定不仅为物种繁衍和生物多样性的恢复创造必要的环境条件,而且促进了土壤的形及空间异质性的改变,进一步影响着植被格局的变化^[13]。自上世纪 70 年代以来,为保护绿洲环境及恢复由沙化导致的退化的植被-土壤系统,梭梭作为重要的人工固沙植被在河西走廊中段荒漠绿洲带被广泛的种植^[16]。随着不同时间梭梭人工防护林的建立,形成了不同林龄的防护林系统并起到了极大的防风固沙作用^[16]。现有的对梭梭的研究显示,当梭梭林龄大于 10 年时,由于很难利用到深达 20 m 的地下水及干旱区有限的降水,梭梭林出现自疏现象,这对梭梭在干旱区固沙可持续发展产生重要的影响^[17-18]。然而,随梭梭林龄的增加,土壤养分特征如何变化? 土壤状况是否发生显著改变? 土壤状况的改变与土壤养分特征的关系如何? 对上述问题的研究将丰富对梭梭的研究并对荒漠绿洲区人工梭梭林的建立和生态恢复提供一定的理论指导。

本研究以荒漠绿洲区不同种植年限梭梭林为研究对象,考虑到梭梭自身独特的泌盐特性及其他生物因子的共同作用导致土壤环境具有相对较高的盐分含量,而盐分离子中高含量的 Ca^{2+} 又对土壤 P 的有效性有显著的影响^[19-21],因此,本研究将比较不同种植年限梭梭灌丛下土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、速效磷(Available P)、碳酸钙(CaCO_3)含量,分析不同林龄土壤化学计量特征及其影响因子,从而揭示荒漠-绿洲区土壤养分平衡和循环,为梭梭林在荒漠绿洲区的可持续发展、环境保护和生态恢复提供理论依据及参考资料。

1 研究区概况

研究区位于黑河中游甘肃省临泽县中科院临泽内陆河流域研究站区(N39°21',E100°07',海拔 1350 m)东北部,为近几十年来由绿洲向荒漠扩展的过渡区。绿洲外围与巴丹吉林沙漠南缘和戈壁荒漠相接。该区域为典型的荒漠气候,年均降雨量为 117 mm 且多集中在 7—9 月份,年蒸发量 2390 mm,年均气温 7.6℃,无霜期 165 d。西北风向为主,年均风速为 3.2 m/s,大风日数(> 17 m/s)为 15 d,风沙活动主要集中在 3—5 月^[16]。地下水深度为 4—10 m。该区地带性土壤为灰棕漠土,由于受风沙长期侵袭,在绿洲边缘有大片的表层结构疏松且有机质含量很低的风沙土发育,极易发生风蚀。绿洲边缘主要荒漠植物种有红砂(*Reaumuria soongarica*)、珍珠(*Salsola passerina*)、泡泡刺(*Nitraria tangutorum*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)等灌木半灌木和碱蓬(*Suaeda przewalskii*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、白茎盐生草(*Halogeton arachnoideus*)等 1 年生草本植物^[16,22]。

2 材料与方法

2.1 植物-土壤样品采集

于 2014 年 8 月初在研究区选择通过植苗建立的 2 年,5 年,9 年,13 年,16 年,31 年和 39 年的梭梭林为研究对象(图 1)。在每个年代梭梭林中分别建立 3 个 10 m × 10 m 的研究样地,每个样地间隔约 10 m。在每个样地分别选择 5 株大小长势相似的梭梭(表 1),以每株梭梭根部为中心,在距每株梭梭根部 5 cm 处的四个方向(东、西、南、北)上采集 0—5 cm 和 5—20 cm 土壤样品并混合。同时,在流动沙丘处采集土壤样品作为参考(0 年)。

2.2 土壤养分测定

土壤样品于室内自然风干,研磨过 100 目筛制成供试样品。土壤有机碳(SOC)采用重铬酸解外加加热法测定,土壤全碳(TC)和全氮(TN)用德国元素分析仪进行

测定(a vario MACRO CUBE elementar, Germany),土壤全磷(P)和速效磷(Available P)分别采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}_2$ 消煮法和 NaHCO_3 提取法。土壤 CaCO_3 含量利用土壤无机碳含量转化而来,公式为 $\text{CaCO}_3(\text{mg/g}) = (\text{TC} - \text{SOC}) \times 8.33$ ^[23]。

2.3 数据处理

土壤风蚀可蚀性结合了土壤物理和化学性质,利用公式 $\text{EF}(\text{Erodible Fraction})(\%) = 0.29 + 0.31\text{Sa} + 0.17\text{Si} + 0.33\text{Sc} - 2.59\text{OM} - 0.95\text{CaCO}_3$ ($R^2 = 0.67$) 来评价土壤对于风力引起的剥离和搬运的敏感程度,其中, Sa、Si、Sc 和 OM 分别代表土壤砂粒含量、土壤粉粒含量、土壤黏粒含量和土壤有机质含量,所有指标均用%表示^[24-25]。

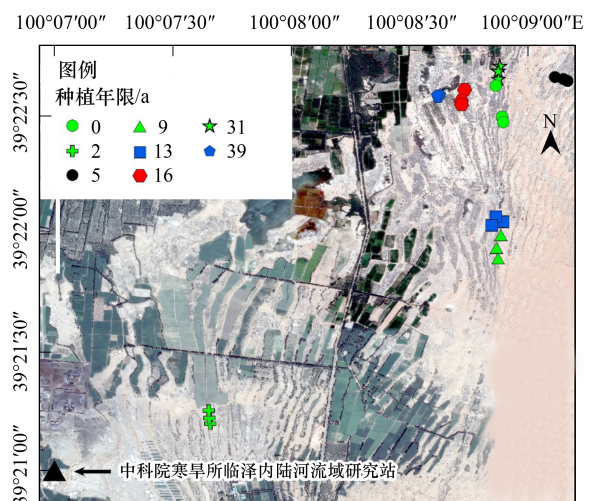


图 1 不同林龄梭梭林采样点分布图
Fig.1 Distribution of sampling sites of *Haloxylon ammodendron* in different plantation ages

表 1 不同林龄梭梭林形态特征

Table 1 Morphological characteristics of *Haloxylon ammodendron* in different plantation ages

种植年限 Plantation age/year	样地位置 Sampling position	密度 Plantation density	高度/m Shrub height	基径/cm Stem diameter	冠幅/m ² Canopy area
2	平地	2m × 2m	0.59 ± 0.04 d	0.97 ± 0.08 d	0.28 ± 0.05 e
5	沙丘缓坡	1m × 2m	2.02 ± 0.10 c	5.10 ± 0.37 c	3.02 ± 0.35 d
9	沙丘缓坡	1m × 2m	3.19 ± 0.15 b	8.45 ± 0.58 b	6.78 ± 1.11 c
13	沙丘缓坡	1m × 2m	3.41 ± 0.17 b	9.85 ± 0.69 ab	10.48 ± 2.41 bc
16	沙丘缓坡	1m × 2m	3.75 ± 0.15 b	9.93 ± 0.79 ab	11.31 ± 1.09 abc
31	沙丘缓坡	1m × 2m	3.93 ± 0.17 ab	10.17 ± 0.58 ab	12.02 ± 0.96 ab
39	沙丘顶部	1m × 2m	4.78 ± 0.24 a	12.99 ± 1.21 a	20.20 ± 2.93 a
F			202.82	141.82	111.74
P			< 0.001	< 0.001	< 0.001

数据分析采用 SPSS16.0 软件进行分析,用 ORIGIN 9.2 做图。土壤 SOC、TN、TP 含量均采用质量含量, C:N、C:P、N:P、CaCO₃: Available P 采用质量比。用 One-Sample T test 对 0—5 cm 和 5—20 cm 的土壤养分及化学计量比进行比较;利用 One-Way ANOVA 对不同林龄梭梭生长特征、土壤 SOC、TN、TP、Available P、CaCO₃: C:N、C:P、N:P、CaCO₃: Available P 和风蚀可蚀性的比较;SOC、TN 和 TP 的相关性用 Linear regression analysis 进行分析;利用 Person product-moment correlation analysis 对土壤变量和影响因子进行相关性分析。所有数据均经过 K-S 检验(One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test)。

3 结果与分析

3.1 不同林龄土壤养分成层化分布特征

如表 1 所示, SOC 和 TN 含量在 5 年之前随土壤深度增加无显著变化趋势($P > 0.05$), 在 5 年之后表层(0—5 cm) SOC 和 TN 含量则显著高于 5—20 cm 的含量($P < 0.05$)。TP 含量在 13 年之后 0—5 cm 含量显著高于 5—20 cm 含量($P < 0.05$)。表层 Available P 含量在 2 年之后表现为显著高于深层($P < 0.05$), 而 CaCO₃ 含量并未随林龄增加表现出明显的成层化分布($P > 0.05$)。

土壤 C:N 在 2 年、16 年和 31 年均表现为 0—5 cm 显著高于 5—20 cm($P < 0.05$), 其余林龄下无显著差异($P > 0.05$)。垂直方向上 C:P 和 N:P 变化趋势一致, 即在 5 年之后表层显著高于深层($P < 0.05$)。CaCO₃: Available P 则在不同林龄处(除 0 年)均表现为深层比值显著高于表层($P < 0.05$)(表 2)。

3.2 不同林龄土壤养分水平分布化学计量特征

随梭梭种植年限的增加, 水平方向上 0—5 cm 和 5—20 cm 的 SOC 和 TN 含量均表现为显著的增加($P < 0.05$), 而 TP 含量并未随林龄的增加发生显著变化($P > 0.05$)。另外, Available P 和 CaCO₃ 含量仅在土壤表层随林龄增加显著增加($P < 0.05$)且 Available P 的最大值(0.016 mg/g)仅占 TP(0.36 mg/g)的 5%(表 2)。

水平方向上, 随梭梭林龄的增加, 土壤 C:N 和 CaCO₃: Available P 在 0—5 cm 和 5—20 cm 均未有显著变化($P > 0.05$); C:P 和 N:P 在表层则随林龄显著增加($P < 0.05$), 5—20 cm 处的 C:P 和 N:P 在 31 年之前均未有显著变化, 而在 39 年处达到最大值(表 2)。

3.3 土壤养分相关性及其与影响因子的关系

分析不同林龄土壤 SOC、TN 及 TP 的相关关系发现, 三者均呈显著地正相关关系($P < 0.001$)(图 2)。Pearson 相关分析表明, 土壤 pH 与 SOC、TN、C:P 和 N:P 均呈极显著的正相关关系($P < 0.01$); 土壤电导率(Electrical conductivity, EC)与 SOC、TN、C:P 和 N:P 均呈极显著地正相关关系($P < 0.01$), 与 TP 和 Available P 呈显著的相关关系($P < 0.05$); 除与 CaCO₃ 呈显著地负相关关系($P < 0.05$), 与 CaCO₃: Available P 呈显著地正相关关系($P < 0.05$)及与 C:N 无显著关系($P > 0.05$)外, 土壤砂粒与其他土壤变量均呈极显著的负相关关系($P < 0.01$); 土壤粉粒和粘粒均与 SOC、TN、TP、C:P、N:P 呈极显著的正相关关系($P < 0.01$), 与 CaCO₃

表 2 不同林龄土壤养分成层化分布特征

土壤性质 Soil properties	土层 Depth/cm	林龄 Plantation age/year									
		0	2	5	9	13	16	31	39		
SOC/(mg/g)	0—5	0.54±0.05 Ae	0.69±0.02 Be	1.50±0.23 Ad	2.57±0.27 Ac	3.68±0.09 Ab	3.11±0.28 Abc	3.07±0.46 Abc	4.89±0.30 Aa		
	5—20	0.61±0.03 Ab	0.82±0.11 Ab	0.70±0.05 Ab	0.76±0.05 Bb	1.07±0.13 Bb	1.07±0.07 Bb	0.87±0.04 Bb	1.70±0.41 Ba		
TN/(mg/g)	0—5	0.08±0.01 Ac	0.08 Ac	0.20±0.03 Ac	0.32±0.04 Ab	0.41±0.02 Ab	0.38±0.05 Ab	0.38±0.06 Ab	0.66±0.04 Aa		
	5—20	0.07±0.01 Ab	0.07 Ab	0.10 Ab	0.11±0.02 Bb	0.12±0.02 Bb	0.10±0.01 Bb	0.10±0.01 Bb	0.28±0.06 Ba		
TP/(mg/g)	0—5	0.23±0.01 Ad	0.25 Acd	0.24±0.01 Ad	0.26 Acd	0.31±0.02 Aab	0.29±0.01 Abc	0.26±0.01 Acd	0.32±0.01 Aa		
	5—20	0.23±0.02 Abc	0.25±0.01 Aab	0.23 Abc	0.24±0.01 Aabc	0.27±0.01 Aab	0.24 Babc	0.21 Bc	0.27±0.01 Ba		
C:N	0—5	7.13±1.02 Aa	8.87±0.57 Ba	7.42±0.19 Aa	8.13±0.29 Aa	8.98±0.54 Aa	8.30±0.49 Ba	8.12±0.17 Ba	7.39±0.53 Aa		
	5—20	9.16±0.60 Aa	11.9±2.01 Aa	6.87±0.35 Aa	7.20±0.77 Aa	9.05±0.71 Aa	11.0±1.32 Aa	9.43±0.16 Aa	6.60±1.72 Aa		
C:P	0—5	2.35±0.13 Ad	2.75±0.11 Bd	6.21±0.84 Ac	9.99±1.02 Ab	12.0±0.63 Ab	10.87±0.73 Ab	11.73±1.46 Ab	15.11±0.67 Aa		
	5—20	2.66±0.10 Ab	3.25±0.43 Ab	3.01±0.14 Ab	3.19±0.19 Bb	3.98±0.48 Bb	4.42±0.29 Bb	4.18±0.23 Bb	6.14±1.22 Ba		
N:P	0—5	0.34±0.04 Ad	0.31±0.02 Ad	0.83±0.09 Ac	1.23±0.13 Abc	1.35±0.14 Abc	1.33±0.16 Abc	1.45±0.20 Ab	2.06±0.15 Aa		
	5—20	0.29±0.01 Ab	0.28±0.01 Ab	0.44±0.01 Ab	0.46±0.08 Bb	0.45±0.06 Bb	0.41±0.04 Bb	0.44±0.03 Bb	1.03±0.23 Ba		
Available P/(mg/g)	0—5	0.004±0.001 Ab	0.009±0.003 Ab	0.003 Ab	0.006±0.001 Ab	0.011±0.002 Aab	0.01±0.001 A ab	0.012±0.001 Aab	0.016±0.004 Aa		
	5—20	0.001 Aa	0.004±0.003 Aa	0.001 Ba	0.002 Aa	0.003 Ba	0.002 Ba	0.002 Ba	0.004±0.001 Aa		
CaCO ₃ /(mg/g)	0—5	37.15±0.39 Aa	41.63±1.37 Aa	43.42±3.58 Aa	37.92±8.28 Ba	38.99±15.24 Aa	47.37±12.33 Aa	41.99±15.30 Aa	65.96±15.47 Aa		
	5—20	38.63±0.32 Aa	42.16±1.30 Aa	46.59±3.73 Aa	54.94±10.32 Aa	65.46±12.88 Aa	52.45±8.23 Aa	50.88±9.21 Aa	65.25±19.91 Aa		
CaCO ₃ : Available P	0—5	16516.00±8510 Aa	5511.00±1990 Ba	14109.00±2109 Ba	6352.00±1975 Ba	4107.00±2180 Ba	4625.00±1245 Ba	3769.00±1562 Ba	4362.00±1012 Ba		
	5—20	35541.00±8772 Aa	21410.00±8530 Aa	33880.00±7080 Aa	28600.00±7969 Aa	23657.00±4348 Aa	29528.00±3440 Aa	29887.00±7553 Aa	16407.00±3854 Aa		

同列同一元素不同大写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 同行同一元素不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

呈显著地正相关关系($P < 0.05$),与 CaCO_3 : Available P 呈显著的负相关关系($P < 0.05$)。另外, Available P 与 SOC, TN 和粉粒呈极显著的正相关关系($P < 0.01$),与粘粒呈显著正相关($P < 0.05$),且 SOC 与 CaCO_3 , N:P, 和 CaCO_3 : Available P 均有显著地相关关系($P < 0.05$)。总体来看,土壤砂粒、粉粒和粘粒是影响土壤养分及其化学计量特征的主要因子(表 3)。

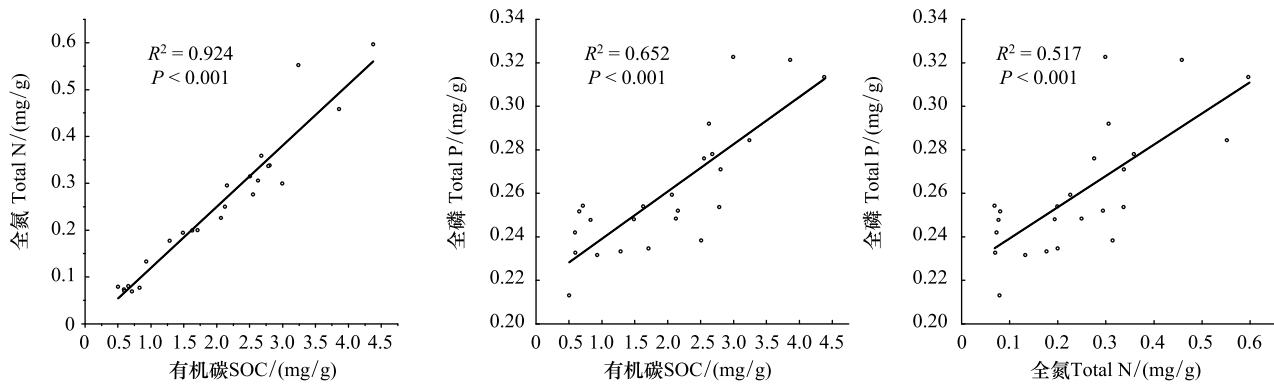


图 2 土壤有机碳、全氮和全磷的关系

Fig.2 Relationship between SOC, TN, and TP

表 3 土壤养分及化学计量特征与影响因子间的 Pearson 相关分析

Table 3 Pearson product-moment correlation analysis of the relationships between soil variables and influencing factors

变量 Variable	有机质 SOC	全氮 TN	全磷 TP	速效磷 Available P	碳酸钙 CaCO_3	pH	电导率 EC	砂粒 Sand	粉粒 Silt	粘粒 Clay
有机质 SOC	—					0.678 **	0.817 **	-0.885 **	0.910 **	0.669 **
全氮 TN		—				0.678 **	0.885 **	-0.900 **	0.909 **	0.700 **
全磷 TP			—	—		0.316	0.444 *	-0.625 **	0.687 **	0.416 **
速效磷 Available P	0.667 **	0.579 **	—	—		0.275	0.429 *	-0.678 **	0.726 **	0.476 *
碳酸钙 CaCO_3	0.406 *	0.389	0.296	0.354	—	0.302	0.338	-0.503 *	0.475 *	0.433 *
C:N	—	—	0.189	0.356	-0.056	-0.368	-0.403	0.176	-0.185	-0.127
C:P	—	0.952 **	—	—	0.405 *	0.749 **	0.867 **	-0.905 **	0.895 **	0.727 **
N:P	0.933 **	—	—	—	0.382	0.738 **	0.926 **	-0.907 **	0.883 **	0.746 **
CaCO_3 : Available P	-0.482 *	-0.404	—	—	—	-0.234	-0.349	0.511 *	-0.444 *	-0.489 *

* * 表示极显著相关($P < 0.01$); * 表示显著相关($P < 0.05$); “—”表示存在自相关,不宜进行相关性分析

3.4 土壤风蚀可蚀性与土壤养分的关系

结果表明,随林龄的增加,土壤表层(0—5 cm)的风蚀可蚀性极显著的减弱,并且表层 SOC、TN、TP、Available P 和 CaCO_3 含量均随土壤风蚀可蚀性的减弱而显著增加($P \leq 0.001$)(表 4;图 3)。而 5—20 cm 深度的土壤风蚀可蚀性呈显著地减弱($P < 0.05$)(表 4),且仅与土壤 CaCO_3 含量有关(表 5)($P = 0.001$)。

表 4 土壤风蚀可蚀性随林龄变化特征

Table 4 Changing characteristics of soil erodible fraction with plantation age increasing

土层 Depth/cm	林龄 Plantation age/year								F	P
	0	2	5	9	13	16	31	39		
0—5 cm	39.70±2.32 a	31.90±0.47 b	31.83±0.53 b	28.37±0.31 bc	29.13± 2.24bc	28.64±1.48 bc	28.97± 2.73bc	23.38±1.40 c	7.640	<0.001
5—20 cm	37.65±2.20 a	31.22±0.40 ab	31.18±3.33 b	27.64±0.71 b	27.02±1.97 b	28.26±1.45 b	28.63±2.86 b	25.42±1.92 b	3.344	<0.05

同列同一元素不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

4 讨论

植被-土壤是一个相互作用的过程,土壤 SOC、N、P 元素作为植物正常生长发育所必需的养分,在植物生

长过程中发挥着重要的作用,其含量的多少及成分组合状况,均会受到土壤养分含量的影响,而植被的建立对土壤环境也有一定的反馈作用,如:植物凋落物的分解、根系分泌物及根际微生物的积累等,对土壤质地的改善和土壤养分的积累有极大的促进作用^[26-29]。

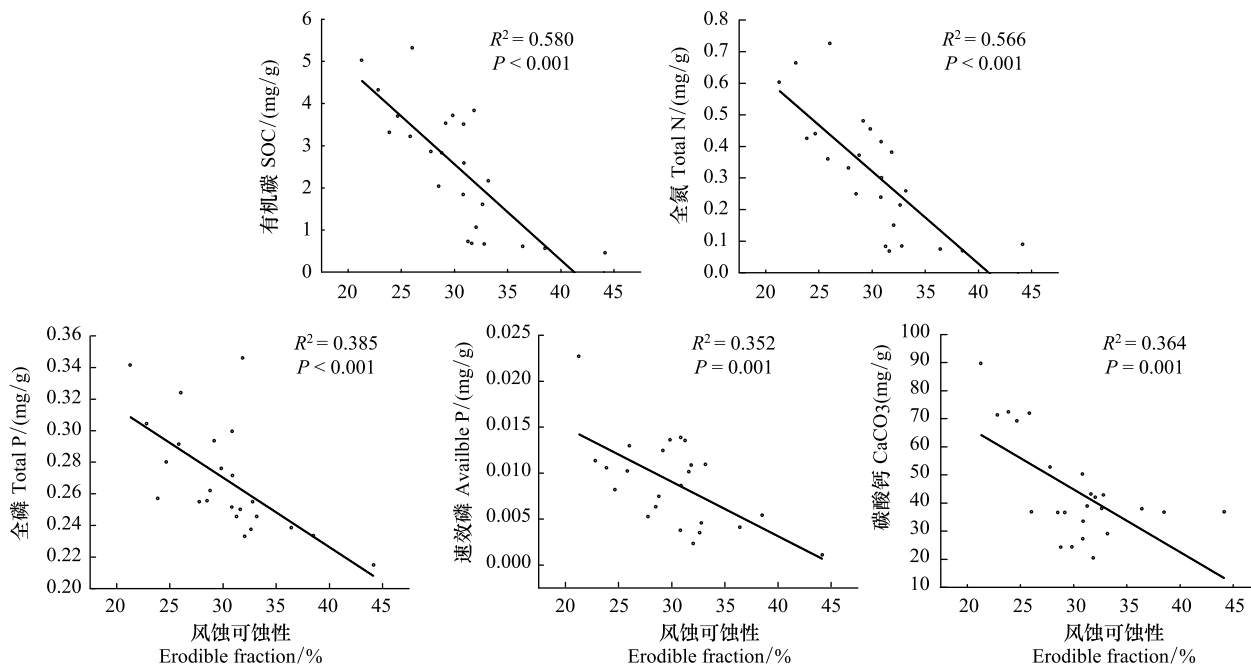


图3 土壤风蚀可蚀性(0—5 cm)与土壤养分(0—5 cm)的关系

Fig.3 Relationship between soil erodible fraction with soil nutrients in 0—5 cm

表5 5—20 cm 土壤风蚀可蚀性与土壤养分的关系

Table 5 Relationship between soil erodible fraction with soil nutrients in 5—20 cm

变量 Variable	线性回归方程 Linear equation	R^2	P
有机碳 SOC	$y = -0.033x + 1.94$	0.112	0.061
全氮 TN	$y = -0.006x + 0.28$	0.091	0.082
全磷 TP	$y = -0.002x + 0.291$	0.059	0.132
速效磷 Available P	$y = -0.001x + 0.005$	0.021	0.233
碳酸钙 CaCO ₃	$y = -2.407x + 123.362$	0.392	0.001

与流动沙丘相比,随着梭梭的建立,SOC 和 TN 均显著增加并在梭梭建立 5 年后 0—5 cm 土壤 SOC 和 N 显著高于 5—20 cm 土壤,一方面说明梭梭建立后能够降低风蚀和减少地面的粗糙程度,不断的改善土壤表面的物理性质,为土壤养分的积累提供必要条件,并且随着梭梭林龄的增加,凋落物的不断增加直接影响着 SOC 和 TN 的积累;另一方面也说明了在受水分限制的干旱区土壤养分的表层积聚作用^[30-32]。相对于 SOC 和 TN,TP 含量随梭梭林龄的增加没有显著变化且直到 13 年后 0—5 cm TP 含量才显著高于 5—20 cm,这是由于 TP 的增加主要是通过来源相对固定且时间漫长的岩石风化作用,且表层土壤更易受岩石风化的影响,这就导致土壤 P 成层化的分布的形成^[11]。随林龄的增加,SOC 和 TN 在 0—5 cm 和 5—20 cm 均显著增加,而 TP 并未发生显著的变化,一方面说明梭梭的建立为 SOC 和 TN 的积累创造了有利的环境条件,而 TP 的变化则直接受土壤恢复时间的影响;另一方面表明梭梭的生长可能受 P 的限制。

C:N:P 是衡量土壤有机质组成和营养平衡的一个重要指标,是确定土壤 C、N、P 平衡特征的重要参数^[7,33]。与 SOC 和 TN 相比,土壤 C:N 在不同深度和不同林龄间均维持相对稳定,这与 Tian 等^[8]对中国土壤 C:N:P 的研究相一致^[8],即 SOC 和 TN 含量具有较大的空间变异性,而受气候的影响较小的 C:N 相对稳定,

同时验证了不同深度土壤 C:N 相对稳定的基本原则,即有机物质的形成需要一定数量的 N 与其相应的相对固定比率的 C^[2]。另外,相比于稳定的 C:N,土壤 C:P 和 N:P 随林龄的增加而显著增加,这与 Tian 等^[8]、Cleveland 等^[7]分别从区域尺度和全球尺度上探讨的天然生态系统土壤 C:N、C:P 和 N:P 化学计量比得出的结论一致,即:由于 C 元素和 P 元素来源的差异性,土壤 C:P 和 N:P 随气候、土壤类型、土壤深度和风化阶段而呈现显著地差异性。同时表明天然生态系统土壤 C:N、C:P 和 N:P 的变化特征也适用于研究区人工梭梭林土壤。

对 C、N 和 P 的相关性分析显示三者间均有极显著的相关性,且 C 和 N、C 和 P、N 和 P 的相关系数分别为 0.92、0.65 和 0.52。这与 Tian 等^[8]对中国土壤 8000 个土壤层 C、N 和 P 的相关分析结果(相关系数分别为 0.93、0.62 和 0.51)相似,这说明相对于大尺度上有机质丰富的土壤,人工梭梭林建立后 SOC 含量显著增加,且逐渐恢复的土壤中 C、N 和 P 也存在显著地耦合关系,这与最近的研究相符^[34-35],表明小尺度上研究 C、N 和 P 的耦合关系也具有生态指示作用。另外,人工梭梭林建立后土壤养分及化学计量特征与土壤砂粒、粉粒和粘粒显著地相关关系,进一步表明土壤质地的改善促进了土壤养分含量的提高^[14]。

由于钙离子在植物抗旱性中起重要作用,同时速效磷是植物直接可吸收利用的磷素直接影响着植物体蛋白质的合成^[1-2,36-37],因此,土壤 CaCO₃和速效磷对植物生长有重要的影响。然而,研究表明^[38],土壤中高含量的 CaCO₃会大大降低土壤磷的有效性,进而影响植物生长。并且衡量土壤碳酸钙对速效磷固持指标的土壤碳酸钙/速效磷(钙磷比)化学计量特征对植物生物量、密度变化的影响显著大于土壤碳酸钙、速效磷含量的影响。本研究中,随林龄增加,表层 Available P 显著增加且在 0—5 cm 和 5—20 cm 间表现出明显的成层化现象,而 Available P 的最大值(0.016 mg/g)仅占总磷(0.36 mg/g)的 5%,说明尽管梭梭的建立提高了土壤 Available P 的含量,而较低的 Available P 含量进一步说明梭梭的生长受 P 的限制。此外,CaCO₃在表层随林龄的增加而增加,而 CaCO₃: Available P 随林龄增加并未发生显著变化,说明土壤 CaCO₃含量与 Available P 增加的同步性,从而使得土壤中有有限速效磷被吸附固持。

土壤风蚀是导致干旱半干旱区土壤退化的一个普遍存在的现象^[39]。土壤风蚀可蚀性临界值显示^[24-25],EF < 40%表明研究区较弱的风蚀可行性,40% < EF < 50%表明中等程度的风蚀可蚀性,EF > 50%则表明较高的风蚀可蚀性。同时,研究表明,土壤风蚀可蚀性的减弱表明土壤团聚体直径的增加,这是土壤肥力水平提高的基础且土壤有机质、全氮和碳酸钙含量的增加是促进团聚体度增加的重要影响因子^[39]。本研究中,梭梭建立后,表层(0—5 cm)土壤风蚀性极显著的减弱,而深层(5—20 cm)土壤风蚀性减弱程度稍弱,这表明表层土壤质地的改善较快。另外,表层土壤养分与土壤风蚀可蚀性显著的负相关关系,进一步说明梭梭的建立有效的提高了表层土壤肥力并降低了表层土壤风蚀可蚀性,这为该区植被恢复提供了重要的环境条件。

本研究在一定程度上揭示了梭梭建立对荒漠绿洲区土壤恢复的促进作用,为该生态恢复提供了理论依据和参考。然而,植被-土壤是一个交互作用的复杂生态系统,因此,梭梭如何在有限的水分条件下实现可持续发展、梭梭群落特征及草本物种如何响应土壤环境变化将是今后的研究重点。

参考文献(References):

- [1] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, Fagan W F, Markow T A, Cotner J B, Harrison J F, Hobbie S E, Odell G M, Weider L J. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540-550.
- [2] Sterner R W, Elser J J. *Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere*. Princeton, New Jersey, USA: Princeton University Press, 2002.
- [3] Ågren G I. The C:N:P stoichiometry of autotrophs-theory and observations. *Ecology Letters*, 2004, 7(3): 158-191.
- [4] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *The Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [5] Rong Q Q, Liu J T, Cai Y P, Lu Z H, Zhao Z Z, Yue W C, Xia J B. Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Tamarix chinensis* Lour in the Laizhou Bay coastal wetland, China. *Ecological Engineering*, 2015, 76: 57-65.
- [6] Chadwick O A, Derry L A, Vitousek P M, Huebert B J, Hedin L O. Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development. *Nature*, 1999, 397(6719): 491-497.

- [7] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235-252.
- [8] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [9] He M Z, Dijkstra F A. Drought effect on plant nitrogen and phosphorus: a meta-analysis. *New Phytologist*, 2014, 204(4): 924-931.
- [10] Drenovsky R E, Richards J H. Critical N:P values: Predicting nutrient deficiencies in desert shrublands. *Plant and Soil*, 2004, 259(1/2): 59-69.
- [11] Delgado-Baquerizo M, Maestre F T, Gallardo A, Bowker M A, Wallenstein M D, Quero J L, Ochoa V, Gozalo B, García-Gómez M, Soliveres S, García-Palacios P, Berdugo M, Valencia E, Escolar C, Arredondo T, Barraza-Zepeda C, Bran D, Carreira J A, Chaieb M, Conceição A A, Derak M, Eldridge D J, Escudero A, Espinosa C I, Gaitán J, Gabriel Gatica M, Gómez-González S, Guzman E, Gutiérrez J R, Florentino A, Hepper E, Hernández R M, Huber-Sannwald E, Jankju M, Liu J S, Mau R I, Miriti M, Moneris J, Naseri K, Noumi Z, Polo V, Prina A, Pucheta E, Ramírez E, Ramírez-Collantes D A, Romão R, Tighe M, Torres D, Torres-Díaz C, Ungar E D, Val J, Wamiti W, Wang D L, Zaady E. Decoupling of soil nutrient cycles as a function of aridity in global drylands. *Nature*, 2013, 502(7473): 672-676.
- [12] 李新荣, 赵洋, 回嵘, 苏洁琼, 高艳红. 中国干旱区恢复生态学研究进展及趋势评述. *地理科学进展*, 2014, 33(11): 1435-1443.
- [13] 李新荣. 干旱沙区土壤空间异质性变化对植被恢复的影响. *中国科学(D辑:地球科学)*, 2005, 35(4): 361-370.
- [14] 苏永中, 赵哈林, 张铜会, 李玉霖. 科尔沁沙地不同年代小叶锦鸡儿人工林植物群落特征及其土壤特性. *植物生态学报*, 2004, 28(1): 93-100.
- [15] 翁伯琦, 郑祥洲, 丁洪, 王煌平. 植被恢复对土壤碳氮循环的影响研究进展. *应用生态学报*, 2013, 24(12): 3610-3616.
- [16] Su Y Z, Zhao W Z, Su P X, Zhang Z H, Wang T, Ram R. Ecological effects of desertification control and desertified land reclamation in an oasis-desert ecotone in an arid region: A case study in Hexi Corridor, northwest China. *Ecological Engineering*, 2007, 29(2): 117-124.
- [17] Ma Q L, Wang J H, Zhu S J. Effects of precipitation, soil water content and soil crust on artificial *Haloxylon ammodendron* forest. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5057-5067.
- [18] Zhu Y J, Jia Z Q. Soil water utilization characteristics of *Haloxylon ammodendron* plantation with different age during summer. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(6): 341-346.
- [19] Song J, Feng G, Tian C Y, Zhang F S. Strategies for adaptation of *Suaeda physophora*, *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* to a saline environment during seed-germination stage. *Annals of Botany*, 2005, 96(3): 399-405.
- [20] von Wandruszka R. Phosphorus retention in calcareous soils and the effect of organic matter on its mobility. *Geochemical Transactions*, 2006, 7: 6.
- [21] Cross A F, Schlesinger W H. Biological and geochemical controls on phosphorus fractions in semiarid soils. *Biogeochemistry*, 2001, 52(2): 155-172.
- [22] 陈隆亨, 李福兴, 邸醒民, 张继贤. 中国风沙土. 北京: 科学出版社, 1998.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] Borrelli P, Ballabio C, Panagos P, Montanarella L. Wind erosion susceptibility of European soils. *Geoderma*, 2014, 232-234: 471-478.
- [25] Fryrear D W, Krammers C A, Williamson D L, Zobeck T M. Computing the wind erodible fraction of soils. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1994, 49(2): 183-188.
- [26] McGroddy M E, Daufresne T, Hedin L O. Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: Implications of terrestrial Redfield-type ratios. *Ecology*, 2004, 85(9): 2390-2401.
- [27] 贾晓红, 李新荣, 王新平, 樊恒文, 赵金龙. 流沙固定过程中土壤性质变异初步研究. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 46-50.
- [28] 苏永中, 赵哈林, 张铜会. 几种灌木、半灌木对沙地土壤肥力影响机制的研究. *应用生态学报*, 2002, 13(7): 802-806.
- [29] 李从娟, 雷加强, 高培, 徐新文, 王永东, 范敬龙. 人工防护林作用下风沙土成土过程的研究进展. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1227-1234.
- [30] Jobbágy E G, Jackson R B. The distribution of soil nutrients with depth: Global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry*, 2001, 53(1): 51-77.
- [31] He M Z, Dijkstra F A, Zhang K, Li X R, Tan H J, Gao Y H, Li G. Leaf nitrogen and phosphorus of temperate desert plants in response to climate and soil nutrient availability. *Scientific Reports*, 2014, 4: 6923.
- [32] Schlesinger W H, Reynolds J F, Cunningham G L, Huenneke L F, Jarrell W M, Virginia R A, Whitford W G. Biological feedbacks in global desertification. *Science*, 1990, 247(4946): 1043-1048.
- [33] 杨阳, 刘秉儒, 杨新国, 韩丛丛. 荒漠草原中不同密度人工柠条灌丛土壤化学计量特征. *水土保持通报*, 2014, 34(5): 67-73.
- [34] 王维奇, 王纯, 曾从盛, 全川. 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征. *生态学报*, 2012, 32(13): 4087-4093.
- [35] 周正虎, 王传宽, 张全智. 土地利用变化对东北温带幼龄林土壤碳氮磷含量及其化学计量特征的影响. *生态学报*, 2015, 35(20): 6694-6702.
- [36] Larkindale J, Knight M R. Protection against heat stress-induced oxidative damage in *Arabidopsis* involves calcium, abscisic acid, ethylene, and salicylic acid. *Plant Physiology*, 2002, 128(2): 682-695.
- [37] Kawano T, Sahashi N, Takahashi K, Uozumi N, Muto S. Salicylic acid induces extracellular superoxide generation followed by an increase in cytosolic calcium ion in tobacco suspension culture: The earliest events in salicylic acid signal transduction. *Plant and Cell Physiology*, 1998, 39(7): 721-730.
- [38] 赵雪莱, 何兴东, 薛苹苹, 张宁, 邬畏, 李荣, 慈华聪, 徐静静, 高玉葆, 赵哈林. 土壤碳酸钙/有效磷化学计量特征对油蒿群落植物密度的影响. *科学通报*, 2012, 57(1): 80-87.
- [39] 南岭, 杜灵通, 展秀丽. 土壤风蚀可蚀性研究进展. *土壤*, 2014, 46(2): 204-211.