

新疆甘家湖梭梭林碳、氮、磷、钾生态化学计量特征

宁虎森¹, 罗青红^{1,2}, 吉小敏¹, 雷春英¹

(1. 新疆林业科学院 造林治沙研究所, 乌鲁木齐 830063; 2. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要:为探讨甘家湖梭梭林的C、N、P、K元素化学计量特征,进而揭示该地区梭梭林的养分限制状况和适应策略,以新疆甘家湖国家级自然保护区3种植被盖度 $C \geq 70\%$ (HC), $50\% \leq C < 70\%$ (MC), $30\% \leq C < 50\%$ (LC)梭梭林为研究对象,从生态化学计量学角度,测定和分析土壤(0—10 cm, 10—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—100 cm)及梭梭标准木地上、地下部分中的有机碳、全氮、全磷和全钾的质量分数及计量比值。结果表明:(1)不同盖度梭梭林土壤营养元素及计量比存在差异,有机C和全N含量的变化规律基本相似:HC>MC>LC,全P和全K含量基本相似:HC>LC>MC。土壤C:N较为稳定,不同盖度梭梭林土壤C:P, C:K, N:P, K:N差异显著,而不同盖度梭梭林地K:P差异不显著($p < 0.05$)。(2)梭梭植株地上部分仅中盖度N含量和C:N显著高于低盖度($p < 0.05$);梭梭植株地下部分C、N、P含量、C:N, N:P, K:N在不同盖度之间差异显著,而K含量、C:P, C:K和K:P在不同盖度之间差异不显著($p < 0.05$)。梭梭植株地上和地下部分相比,C含量、C:N, C:P和C:K为地下>地上,而N、P、K含量、N:P, K:P和K:N均为地上>地下。(3)植株地上部分营养元素与土壤中对应元素多为负相关关系且相关系数较小,而地下部分营养元素与土壤中对应元素则多为正相关关系且相关系数较大。梭梭地上和地下部分,除C和P为负相关外,其余均为正相关,且C:N和K:N为显著正相关($p < 0.05$)。综上得出,该地区土壤较为贫瘠,尤其N、P元素匮乏;梭梭生长主要受N限制;梭梭植株根系生长发育受土壤影响更大,植株体营养元素在同化过程中呈一定的比例关系。

关键词:生态化学计量;梭梭林;盖度;养分元素

中图分类号:S714.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)06-0068-06

Stoichiometry Characteristic on Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Potassium of Ganjiahu *Haloxylon ammodendron* Stand in Xinjiang

NING Husen¹, LUO Qinghong^{1,2}, JI Xiaomin¹, LEI Chunying¹

(1. Institute of Afforestation and Sand Control, Xinjiang Academy of Forestry Science, Urumqi 830063, China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: In Xinjiang Ganjiahu National Nature Reserve, *Haloxylon ammodendron* forest has degenerated in large areas, but the reason is still uncertain. Ecological stoichiometry is a new attempt in the unification of ecological theory that mainly focuses on element coupling relationship in the ecological process. So we want to study the ecological stoichiometric characteristics of nutrients in Ganjiahu *H. ammodendron* stand, reveal the nutrient restriction condition of this area and adaptation strategy of *H. ammodendron*, and then find out the solutions to protect *H. ammodendron* in Ganjiahu area. From the perspective of ecological stoichiometry, we took *H. ammodendron* stands with three different types of coverage ($C \geq 70\%$ (HC), $50\% \leq C < 70\%$ (MC) and $30\% \leq C < 50\%$ (LC)) in Xinjiang Ganjiahu National Nature Reserve as research site, then measured and analyzed the organic carbon (C), total nitrogen (N), total phosphorus (P) and total potassium (K) contents and their stoichiometric ratios in *H. ammodendron* (aboveground part and underground part) and soil (0—10 cm, 10—20 cm, 20—40 cm and 40—60 cm, 60—100 cm) of *H. ammodendron* stands. At the same time, we analyzed the relationship of nutrient in soil and plant. The result showed that: (1) there are differences of soil nutrient contents and their ratios among different types of coverage, change trends of organic C and N contents were similar: HC>MC>LC, and total P and total K contents were similar: HC>LC>MC, soil C:N was stable, soil C:P, C:K, N:P and K:N all had significant differences among different types of coverage, while soli K:P of three different types of coverage was not significantly different

($p < 0.05$); (2) for aboveground part of *H. ammodendron*, N content and C : N of middle coverage were significantly higher than those in low coverage ($p < 0.05$); for underground part, C, N and P contents, C : N, N : P and K : N all had significant differences among different types of coverage, while content of K, C : N, C : P and K : P were not significantly different ($p < 0.05$); when compared aboveground part with underground part of *H. ammodendron*, C content, C : N, C : P and C : K decreased in the order: underground part > aboveground part, while N, P, K contents, N : P, K : P and K : N decreased in the order: aboveground part > underground part; (3) most of the correlation of nutrient contents in aboveground part and soil were negative and the correlation coefficients were small; most of the correlation of nutrient contents in underground part and soil were positive and the correlation coefficients were larger; when it came to the relationship of nutrient content and stoichiometric ratios in aboveground and underground part of *H. ammodendron*, except for the C and P contents were negatively correlated, the rest were positively correlated, and C : N and K : N were significantly positively correlated ($p < 0.05$). In conclusions, the soil nutrients in this region are poor; especially N and P are low. *H. ammodendron* is mainly limited by N. Soil has greater impact on root of *H. ammodendron* and plant nutrition elements have certain proportional relationship in the process of assimilation.

Keywords: *Haloxyylon ammodendron* stand; vegetation coverage; nutrient element; ecological stiochiometry

养分在土壤供应与植物需求之间的动态平衡关系决定了植物不同器官的养分含量,进而影响植物养分比例,使其稳定于一固定的比值^[1]。植物体内元素的这种比值关系突出了限制性最强元素的作用。植物对某种元素的需求远大于土壤供应时,严重影响植物的生长,该元素即为限制元素,它决定了养分元素的循环速度。因此,养分比例可以表示生态过程中大部分营养元素的循环速度,并间接反映植物的生长状况^[1-2]。在植物体内,C,N,P之间的相互联系及其与环境的关系决定植物的生长过程和营养水平^[3],而N和P是陆地生态系统中植物生长的主要限制性资源^[4],干旱区土壤中N,P营养的缺乏往往会抑制植物的生长繁殖^[5]。因此,探究干旱区植被—土壤生态化学计量特征,对于指导干旱区植被管理和生态环境建设具有重要意义。

新疆甘家湖梭梭林国家级自然保护区,是准原始状态下,世界上保护最完整、面积最大的荒漠梭梭天然次生灌木林区,位于古尔班通古特大沙漠西南部,其生态区位特殊,对稳定新疆北部荒漠林生态系统有着至关重要的作用^[6],同时也一直是学者们重点研究的对象。然而近些年来,保护区内的梭梭林出现了大面积退化现象,植株大量枯死^[7]。司朗明等^[8]和刘斌^[9]认为地下水位降低、土壤水分匮乏及土壤盐分含量过高是梭梭退化的主要因素。而本文拟从生态计量学的角度,来探讨甘家湖梭梭林的C,N,P,K元素化学计量特征,其将有助于认识该地区梭梭林的养分限制状况和适应策略,也有助于更加深入地理解不同盖度梭梭林地不同养分元素的限制作用对地上植物群落的影响,为科学合理管理和保护梭梭林提供基础科学数据。

1 研究区概况

研究区位于新疆甘家湖梭梭林国家级自然保护区内(44°54′21″—44°54′37″N,83°38′56″—83°39′11″E),海拔248 m,总面积约为5 000 km²,划定保护区范围为104 km²,属典型的温带大陆性干旱气候,年均太阳总辐射量为536 J/cm²,≥10℃积温为3 423.8℃左右,年平均气温6.7℃,气温年际变化5.9~8.5℃;年均降水量166.6 mm,年蒸发量达到1 973.1 mm;年均风速6 m/s,年均大风(17 m/s)日高达165 d。研究区内自然分布着以藜科、十字花科、菊科和蓼科为主的共42科137属233种荒漠植物^[10]。

2 研究方法

2.1 样方调查与采样

根据《森林资源2类调查技术规范》中林分盖度划分标准,于2014年6月28—6月30日,在研究区选择植被盖度 $C \geq 70\%$ (高盖度:HC), $50\% \leq C < 70\%$ (中等盖度:MC), $30\% \leq C < 50\%$ (低盖度:LC)3类典型梭梭林林地。在每种盖度林地中选取3个100 m×100 m的标准样地。逐株测量每个样地中梭梭的地径后确定标准木3株,在东、南、西、北4个方位,分别采集梭梭地上部分(枝条和同化枝)及地下部分(根系)样品各0.5 kg,带回室内待测。

采用“S”形五点取样法,在每个样地中用土钻分别取深0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm,40—60 cm,60—100 cm共5个土层的土样,将同层土充分混合,每个样品取1~1.5 kg装入样品袋袋,带回室内待测。

2.2 化学元素测定

植物和土壤样品均在新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所土壤农化实验室分析。

植物样品测定方法:将样品置于烘箱内,在80℃下烘干24 h,后经粉碎,过100目(0.149 mm)筛。采用重铬酸钾—硫酸氧化法测定植物有机C质量分数;采用硫酸—高氯酸消煮、靛酚蓝分光光度法测定全N质量分数;采用钼锑抗比色法测定全P质量分数;采用火焰光度法测定全K质量分数。

土壤样品测定方法:将原土样自然风干过筛。参照鲍士旦^[11]采用重铬酸钾—硫酸氧化法测定有机C质量分数;采用凯氏定氮仪法测定全N质量分数;采用碳酸钠碱熔—钼锑抗比色法测定全P质量分数;采用火焰光度法测定全K质量分数。

2.3 数据处理

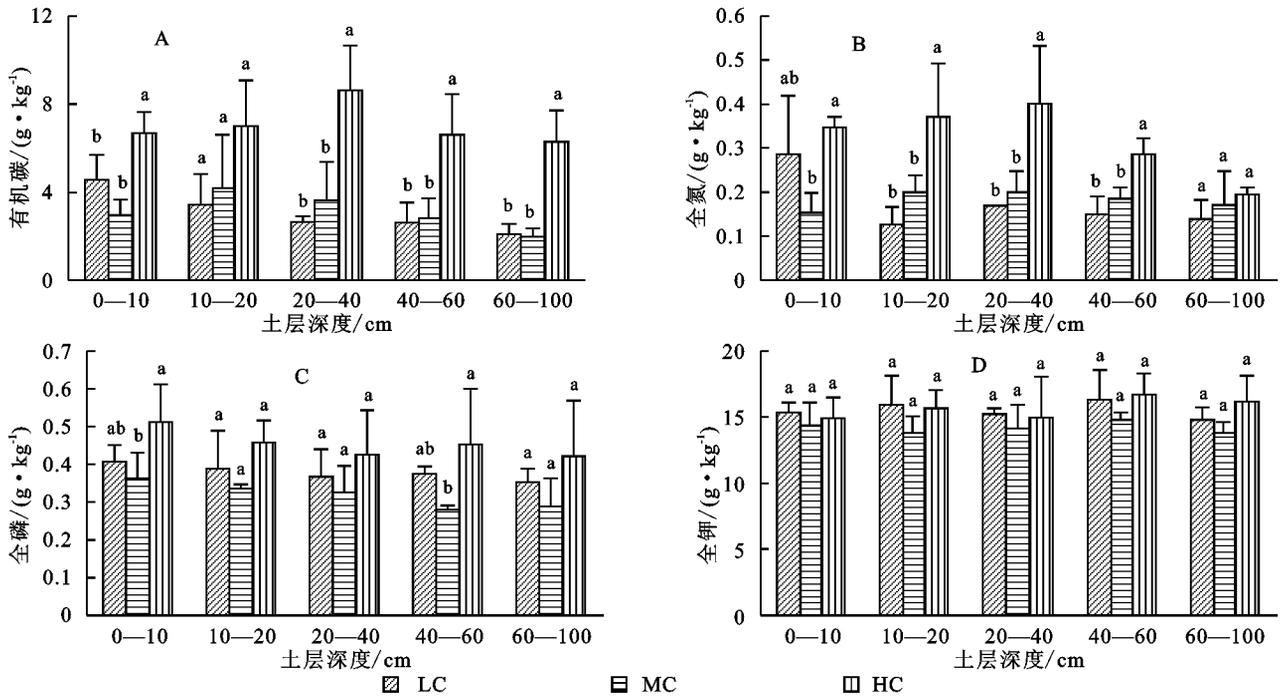
采用Excel 2007初步处理数据和制图,C,N,P和K含量用质量分数表示,C:N,C:P,N:P,C:K,K:N和K:P均采用质量比表示。采用SPSS软件进行统计分析,包括:不同盖度样地同一土层间、梭梭地上部分和地下部分养分质量分数的One-Way ANOVA方差分析及多重比较(LSD)。梭梭地上和地下部分之间差异性分

析采用配对样本T检验法。

3 结果与分析

3.1 不同盖度梭梭林地土壤C,N,P,K含量比较

不同盖度梭梭林地0—100 cm土壤C含量分布特征,见图1A,0—10 cm和60—100 cm土层有机C含量为:HC>LC>MC,且HC显著高于MC和LC($p<0.05$);10—60 cm各土层有机C含量为:HC>MC>LC,其中20—40 cm和40—60 cm土层有机C含量均表现为HC显著高于MC和LC($p<0.05$)。从图1B可知,表层土壤全N含量在不同盖度之间的差异与其他土层不同。0—10 cm土层全N含量为:HC>LC>MC,且HC显著高于MC($p<0.05$);10—100 cm各土层全N含量为:HC>MC>LC,其中10—60 cm各土层均为HC显著高于MC和LC($p<0.05$)。从图1C可知,0—100 cm各土层全P含量变化规律相同,均为HC>LC>MC,但仅0—10 cm和40—60 cm土壤全P表现为HC显著高于MC($p<0.05$)。从图1D可知,土壤全K在各土层变化规律一致为HC>LC>MC,而且含量较为稳定,在不同盖度之间差异不显著($p<0.05$)。



注:图中同一土层不同字母表示不同盖度营养元素含量差异显著($p<0.05$)。

图1 相同土层不同盖度梭梭林地土壤C,N,P和K含量

3.2 不同盖度梭梭林地土壤生态化学计量特征差异

表1显示,土壤C:N仅在40—60 cm和60—100 cm土层存在显著差异,HC显著高于MC($p<0.05$)。不同盖度梭梭林地土壤C:P差异较大,且在各土层均为高盖度下C:P最大。不同盖度梭梭林

土壤C:K相比,发现高盖度下C:K最大,方差分析表明,除10—20 cm外,其余各土层HC显著高于MC和LC。梭梭林地C:P,在10—60 cm各土层均为HC最高,显著高于LC。相同土层不同盖度梭梭林地K:N存在一定差异;各土层K:N变化规律不

一, 0—10 cm; MC>LC>HC, 10—60 cm 各土层: LC>MC>HC。不同盖度梭梭林地 K:P 差异不显著 ($p<0.05$)。

从整个剖面平均值来看, 不同盖度梭梭林土壤 C

: N 之间差异不显著; 高盖度 C:P 和 C:K 显著高于低盖度和中盖度; 高盖度 N:P 显著高于低盖度, 而其 K:P 显著低于中盖度; 低盖度 K:N 显著高于中盖度和高盖度 ($p<0.05$)。

表 1 相同土层不同盖度梭梭林地土壤生态化学计量比

深度/cm	盖度/%	C:N	C:P	C:K	N:P	K:N	K:P
0—10	LC	17.11±3.98a	11.21±2.10ab	0.30±0.06b	0.70±0.27a	60.83±24.50b	38.00±3.51a
	MC	19.48±1.32a	8.07±0.55b	0.20±0.03b	0.42±0.05a	97.02±17.14a	39.86±3.05a
	HC	19.48±4.24a	13.31±3.03a	0.45±0.08a	0.70±0.17a	43.31±6.27b	29.48±2.97b
10—20	LC	27.18±6.60a	8.66±1.83a	0.21±0.06a	0.32±0.03b	132.35±35.95a	41.87±7.46a
	MC	20.05±8.51a	12.36±7.14a	0.30±0.16a	0.60±0.11ab	69.89±7.56b	41.27±4.39a
	HC	19.04±0.83a	15.33±4.00a	0.45±0.13a	0.81±0.24a	45.62±17.16b	34.30±2.04a
20—40	LC	15.63±1.56a	7.34±0.74b	0.17±0.02b	0.48±0.09b	89.61±2.51a	42.67±8.39a
	MC	17.62±5.08a	11.14±4.24b	0.25±0.09b	0.62±0.08b	72.49±12.21a	45.00±11.34a
	HC	22.35±4.95a	20.35±1.32a	0.58±0.09a	0.95±0.25a	40.35±15.95b	35.71±4.95a
40—60	LC	17.69±3.74ab	7.13±2.85b	0.16±0.03b	0.40±0.12b	112.74±22.11a	44.00±8.46a
	MC	14.90±3.59b	9.94±2.99ab	0.19±0.07b	0.66±0.07a	80.56±11.84a	52.89±3.70a
	HC	22.90±3.26a	15.02±2.89a	0.40±0.11a	0.67±0.17a	59.21±10.44b	40.59±17.98a
60—100	LC	13.74±8.00b	5.94±0.94b	0.14±0.04b	0.54±0.29a	89.85±34.76a	42.26±5.77a
	MC	12.64±3.67b	7.14±1.97b	0.14±0.02b	0.62±0.33a	91.52±38.65a	49.67±10.3a
	HC	32.06±4.67a	15.41±2.74a	0.39±0.05a	0.49±0.12a	82.86±3.48a	40.28±8.19a
0—100	LC	18.27±4.78a	8.06±1.69b	0.2±0.04b	0.49±0.16b	97.08±23.96a	41.76±6.72ab
	MC	16.94±4.43a	9.73±3.38b	0.22±0.07b	0.58±0.13ab	82.29±17.48a	45.74±6.56a
	HC	23.16±3.59a	15.89±2.79a	0.45±0.09a	0.72±0.19a	54.27±10.66b	36.07±7.23b

注: 每一列后同一土层不同字母表示不同盖度营养元素差异显著 ($p<0.05$)。

3.3 梭梭植株地上部分与地下部分 C, N, P, K 含量比较

图 2 显示了梭梭植株主要营养元素的分布特征。梭梭植株地上部分 C 含量在不同盖度之间差异不显著, 地下部分 C 含量则表现为 LC 显著大于 MC; HC 和 LC 样地中, 地下部分植株 C 含量显著大于地上部分 ($p<0.05$), 见图 2E。地上部分全 N 含量相比, LC>HC>MC, LC 和 MC 之间差异显著; 地下部分全 N 含量相比, HC>LC>MC, HC 显著高于 MC 和 LC; LC 和 MC 样地中, 地上部分植株 N 含量差异高于地下部分 ($p<0.05$), 见图 2F。地上部分全 P 含量相比, MC>LC>HC, 但三者之间差异不显著, 地下部分全 P 含量相比, LC>HC>MC, LC 显著高于 MC ($p<0.05$); MC 和 HC 样地中, 地上部分全 P 含量显著高于地下部分 ($p<0.05$), 见图 2G。地上部分和地下部分全 K 含量在不同盖度之间均差异不显著。但地上和地下部分相比, 3 种盖度均为地上部分植株 K 含量显著高于地下部分 ($p<0.05$), 见图 2H。

3.4 梭梭植株地上部分与地下部分生态化学计量特征比较

表 2 表示不同盖度梭梭林植株地上和地下部分生态化学计量比差异。梭梭地上部分仅 C:N 在不同盖度之间存在差异, 即中盖度样地显著高于低盖度 ($p<0.05$)。梭梭地下部分 C:N 和 N:P 均表现为: 高

盖度显著高于低盖度和中盖度 ($p<0.05$); 地下部分 K:N 则表现为高盖度显著低于中盖度 ($p<0.05$); 而 C:P, C:K 和 K:P 在不同盖度之间差异不显著 ($p<0.05$)。

地上和地下部分相比, 生态化学计量比存在一定差异。梭梭植株 C:N, C:P 和 C:K 均为地下部分>地上部分, 且 LC 和 MC 梭梭植株地下部分 C:N 均显著高于地上部分, MC 和 HC 样地梭梭地下部分 C:P 显著高于地上部分, 3 种盖度样地中梭梭 C:K 均表现为: 地下部分显著高于地上部分。而 N:P, K:N 和 K:P 基本为地上部分>地下部分, 其中 LC 样地梭梭地上部分 N:P 和 K:P 显著高于地下部分; HC 样地梭梭地上部分 K:N 显著高于地下部分 ($p<0.05$)。

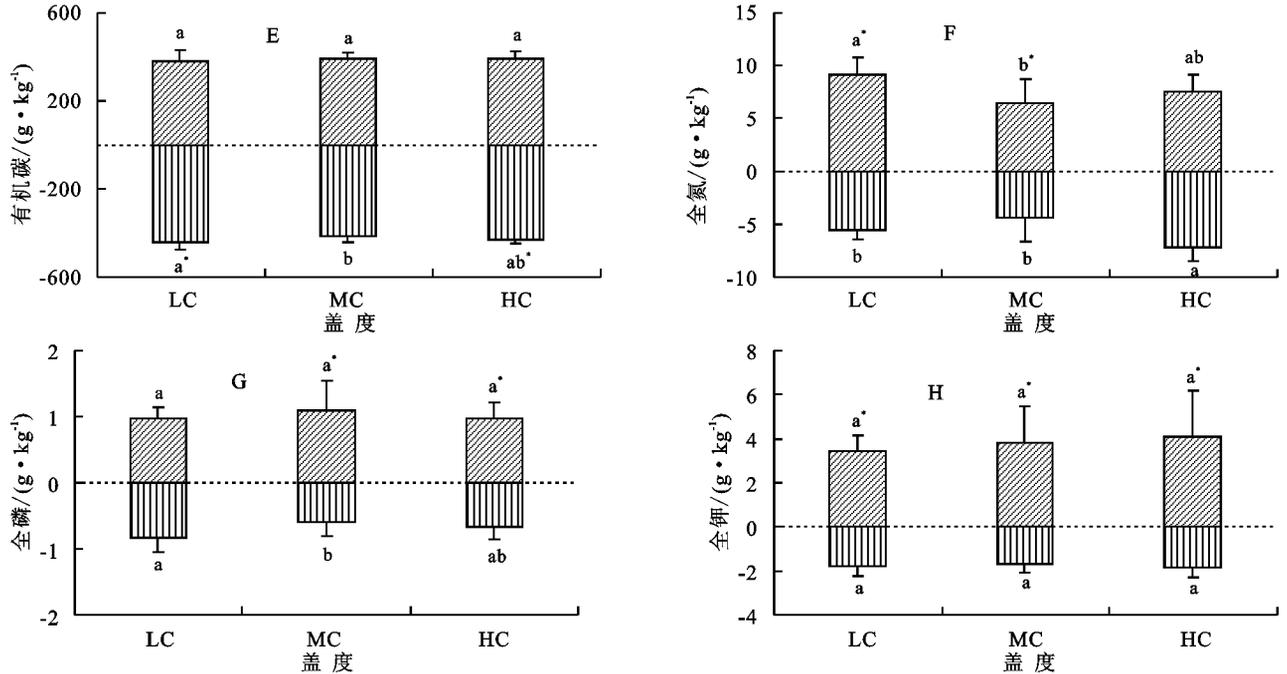
3.5 梭梭植株与林地土壤物营养元素关系

梭梭林植株地上、地下部分和土壤 C, N, P, K 及计量比相关系数, 见表 3。植株地上部分营养元素与土壤中对元元素多为负相关关系且相关系数较小, 但是 P(-0.804) 和 C:K(-0.810) 相关系数较大。植物地下部分营养元素与土壤中对元元素则多为正相关关系, 仅 C:N(-0.850 和 C:K(-0.977) 为负相关。梭梭地上和地下部分, 除 C 和 P 为负相关外, 其余均为正相关, 且 C:N 和 K:N 为显著正相关 ($p<0.05$)。

由此可知, 梭梭植株根系生长发育受土壤影响更大。其原因可能是, 植株根系的营养元素来源于土壤, 尤其是 N, P, K 等矿质元素, 所以根系营养元素多与土

壤呈正相关关系;C元素作为大量元素,在梭梭体内含量稳定,受环境影响较小。梭梭植株地上和地下部分营养

元素之间的相关性小于元素比例之间相关性,可能是因为植株体营养元素在同化过程中呈一定的比例关系。



注:图中同一土层不同字母表示不同盖度营养元素含量差异显著($p < 0.05$);*表示同一盖度时,梭梭地上和地下部分差异显著 $p < 0.05$ 。

图 2 梭梭植株地上与地下部分 C、N、P、K 含量

表 2 梭梭地上与地下部分生态化学计量比

部位	盖度/%	C : N	C : P	C : K	N : P	K : N	K : P
地上	LC	42.83±9.18b	401.36±83.53a	116.35±37.47a	9.47±1.43a*	0.39±0.11a	3.6±0.89a*
	MC	69.83±28.52a	439.59±233.23a	119.56±43.47a	6.73±3.75a	0.66±0.38a	4.38±2.89a
	HC	54.09±11.03ab	421.82±98.38a	113.47±37.57a	8.27±3.29a	0.57±0.32a*	4.22±2.12a
地下	LC	80.55±11.53b*	568.47±174.71a	252.68±51.55a*	7.11±2.04b	0.33±0.07ab	2.38±0.99a
	MC	124.93±72.49a*	799.73±309.26a*	250.78±54.75a*	7.47±2.89b	0.56±0.44a	3.35±1.61a
	HC	62.24±11.25b	707.12±216.08a*	246.14±51.6a*	11.48±3.1a	0.26±0.07b	2.93±0.84a

表 3 梭梭地上和地下部分与土壤 C、N、P、K 及其计量比相关系数

元素	C	N	P	K	C : N	C : P	C : K	N : P	K : N	K : P
土壤—地上	0.542	-0.153	-0.804	-0.028	-0.295	0.242	-0.810	-0.321	-0.512	0.094
土壤—地下	0.202	0.869	0.241	0.994	-0.850	0.313	-0.977	0.948	0.391	0.338
地上—地下	-0.021	0.328	-0.027	0.028	0.711*	0.050	0.160	0.061	0.588*	0.243

注:*表示 0.05 水平(双侧)上显著相关。

4 讨论与结论

新疆甘家湖梭梭林地土壤全 C、N、P、K 平均质量分数分别为:4.46 g/kg,0.23 g/kg 和 0.39 g/kg,15.04 g/kg,均低于全国 C、N、P、K 平均水平(11.12 g/kg,1.06 g/kg,0.65 g/kg^[12]、16.6 g/kg^[13]),说明该地区土壤较为贫瘠,尤其 C、N、P 缺乏。可能是土壤中氮素有 60% 来自生物固氮,而该保护区内固氮类型的植物较少的缘故。此外在干旱区,较低的降水量导致岩石风化淋溶速度下降,而分解出来的磷素又与土壤中碱土金属元素相互作用形成难以被植物吸收利用的难溶态物质^[14],这也是研究区土壤 P 含量

低的主要原因之一。

对相同土层不同盖度梭梭林土壤营养元素比较发现,有机 C 和全 N 的变化规律基本相似,并在不同盖度之间呈现为 HC>MC>LC 的趋势;全 P 和全 K 基本相似,并呈现为 HC>LC>MC 的趋势。说明甘家湖的梭梭林能够提高土壤肥力,且植被盖度较高的林地对环境的改善作用更大。

土壤 C : N 在一定程度上反映有机质的分解速率,而 C : P 表示磷有效性的高低^[15]。从整个剖面平均来看,不同盖度梭梭林土壤 C : N 之间差异不显著,而高盖度林地土壤 C : P、K : P 均显著低于中盖度。说明该区域 C : N 较为稳定,土壤有机质分解速率相近,高盖度

林地 P 的有效性较低。土壤 N:P 可以作为养分限制类型的有效预测指标,甘家湖梭梭林保护区 N:P 介于 0.49~0.72 之间,且高盖度林地 N:P 显著高于低盖度,但均远小于全国土壤 N:P(5.2)。说明该区域元素限制状况,N 相较于 P 更严重。

新疆甘家湖梭梭植株 C,N,P,K 平均含量分别为:409.61 g/kg,6.71 g/kg,0.86 g/kg 和 2.79 g/kg,低于全球陆地植物叶片 C,N,P 平均水平(464.00 g/kg,20.60 g/kg 和 1.99 g/kg)^[16]、中国陆生植物叶片 N,P,K 平均水平(20.20 g/kg,1.46 g/kg^[17] 和 15.09 g/kg^[18]),说明该地区梭梭植株营养元素含量低。

植物 C:N 和 C:P 反映植物吸收营养所能同化 C 能力和营养利用效率的差异^[19]。梭梭地上部分 C:N 在中盖度和低盖度之间差异显著,说明不同盖度梭梭林同化 C 的能力存在一定差异。梭梭地上部分 C:N 和 C:P 高于地下部分。叶片是植物的主要光合器官,植物的光合作用与叶片中 N 含量关系密切。叶片中的 N 依赖于根系对 N 的吸收运输,这些过程所需能量又来自于植物的光合作用。因此,为了获得 C,植物首先要投资 N 到同化器官,而为了获得 N,植物要投资养分物质到根系^[3]。在贫瘠的荒漠地区,梭梭植株主要依赖根系获取养分和水分,因此梭梭在生长过程中,更多的养分投资到根系,而根系通过高的养分利用效率,为光合器官提供氮素,以适应其生长环境。

植物 N:P 可用于判断环境对植物生长养分供应状况^[19-20],当 N:P<14 时,群落水平上的植物生长主要受 N 限制;当 N:P>16 时,植物生长主要受 P 限制^[21-22]。在新疆甘家湖自然保护区,梭梭植株地上部分和地下部分 N:P 小于 14,而且均低于全球陆生植物的平均水平(12.6)^[23]。同时综合土壤中较低 N 含量,说明甘家湖梭梭主要受 N 限制。

参考文献:

[1] 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.

[2] Sterner R W, Elser J J. Ecological Stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere [M]. Princeton:Princeton University Press, 2002.

[3] 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.

[4] Vitousek P M. Nutrient cycling and limitation: Hawaii as a model system[M]. Princeton University Press, 2004.

[5] 张珂,何明珠,李新荣,等. 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. 生态学报,2014,34(22):6538-6547.

[6] 郭泉水,王春玲,郭志华,等. 我国现存梭梭荒漠植被地理分布及其斑块特征[J]. 林业科学,2005,41(5):2-6.

[7] 李启财. 新疆甘家湖自然保护区梭梭退化机制研究[D]. 乌鲁木齐:新疆师范大学,2013.

[8] 司朗明,刘彤,刘斌,等. 古尔班通古特沙漠西部梭梭种群退化原因的对比分析[J]. 生态学报,2011,31(21):6460-6468.

[9] 刘斌,刘彤,李磊,等. 古尔班通古特沙漠西部梭梭大面积退化的原因[J]. 生态学杂志,2010,29(4):637-642.

[10] 宁虎森,罗青红,吉小敏,等. 新疆甘家湖梭梭林地土壤养分、盐分的累积特征[J]. 东北林业大学学报,2014,42(9):83-87.

[11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000:178-189.

[12] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1/3):139-151.

[13] 占丽平,李小坤,鲁剑巍,等. 土壤钾素运移的影响因素研究进展[J]. 土壤,2012,44(4):548-553.

[14] 黄昌勇,徐建明. 土壤学[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2010.

[15] 俞月凤,彭晚霞,宋同清,等. 喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C, N, P 化学计量特征[J]. 应用生态学报,2014,25(4):947-954.

[16] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. Nature, 2000,408(6812):578-580.

[17] Han W X, Fang J Y, Guo D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. New Phytologist, 2005,168(2):377-385.

[18] 秦海,李俊祥,高三平,等. 中国 660 种陆生植物叶片 8 种元素含量特征[J]. 生态学报,2010,30(5):1247-1257.

[19] 李玉霖,毛伟,赵学勇,等. 北方典型荒漠及荒漠化地区植物叶片氮磷化学计量特征研究[J]. 环境科学,2010,31(8):1716-1725.

[20] 吴统贵,陈步峰,肖以华,等. 珠江三角洲 3 种典型森林类型乔木叶片生态化学计量学[J]. 植物生态学报,2010,34(1):58-63.

[21] Makino W, Cotner J B, Sterner R W, et al. Are bacteria more like plants or animals? Growth rate and resource dependence of bacterial C:N:P stoichiometry[J]. Functional Ecology, 2003,17(1):121-130.

[22] 肖遥,陶冶,张元明. 古尔班通古特沙漠 4 种荒漠草本植物不同生长期的生物量分配与叶片化学计量特征[J]. 植物生态学报,2014,38(9):929-940.

[23] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. Journal of Applied Ecology, 1996,33(6):1441-1450.