

不同生境下骆驼刺与花花柴生态化学计量学特征的比较

荆瑞雪^{1,2,3} 张波^{1,2,3} 郭平林^{1,2,3} 张志浩^{1,2,3} 黄彩变^{1,2,3} 曾凡江^{1,2,3*}

(¹中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011; ²新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 新疆策勒 848300; ³中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 以塔克拉玛干沙漠南缘典型荒漠豆科植物骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)和菊科植物花花柴(*Karelinia caspia*)为对象,研究单一骆驼刺种群(LTC)、单一花花柴种群(HHC)及骆驼刺-花花柴群落(GSQL)中植物及土壤中碳(C)、氮(N)、磷(P)、钾(K)等养分的生态化学计量学特征。结果表明:骆驼刺-花花柴群落中土壤有效N(AN)、有效K(AK)含量及N:P、N:K显著高于单一花花柴种群;骆驼刺-花花柴群落中花花柴叶片的全N含量显著高于单一花花柴种群,骆驼刺-花花柴群落中骆驼刺叶片的全P含量显著高于单一骆驼刺种群。相关性分析显示:不同生境土壤的AK含量与N:P及AN含量呈显著正相关,而与SOC呈负相关;不同生境下叶片中的全K含量与SOC、全N、全P含量呈显著正相关,叶片中的全N含量与SOC、全P亦呈显著正相关,而N:P与SOC、全P含量呈显著负相关;土壤中SOC含量与叶片中全P、全K含量呈正相关,而与N:K呈负相关;土壤有效N含量与叶片N:K呈正相关,而与叶片4种元素含量均呈显著负相关;土壤有效K含量与叶片中4种元素含量均呈显著负相关,而与叶片N:K呈正相关;土壤N:P、N:K则分别与叶中全C、全P、全K呈显著负相关。综合分析认为:相较于单一种群,骆驼刺与花花柴的群落能够在一定程度上提高土壤养分,改善植物的营养状况,显示出豆科植物骆驼刺在群落演替中重要作用。

关键词 荒漠生态系统; 豆科植物; 生物固氮; 养分利用

The ecological stoichiometric characteristics of *Alhagi sparsifolia* and *Karelinia caspia* in different habitats. JING Rui-xue^{1,2,3}, ZHANG Bo^{1,2,3}, GUO Ping-lin^{1,2,3}, ZHANG Zhi-hao^{1,2,3}, HUANG Cai-bian^{1,2,3}, ZENG Fan-jiang^{1,2,3*} (¹State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumchi 830011, China; ²Cele National Station of Observation and Research for Desert-Grassland Ecosystems, Cele 848300, Xinjiang, China; ³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China).

Abstract: We investigated carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) ecological stoichiometric characteristics in plant and soil of *Alhagi sparsifolia* population (LTC), *Karelinia caspia* population (HHC) and *A. sparsifolia*-*K. caspia* community (GSQL) in the south rim of the Taklimakan Desert. The results showed that the concentrations of available N (AN), available K (AK), N:P, and N:K in GSQL soil were significantly higher than those in HHC soil. The concentrations of total N in GSQL leaves were significantly higher than those in HHC leaves, while the concentrations of total P in GSQL leaves were significantly higher than those in LTC leaves. Results of the correlation analysis showed that soil AK concentrations were positively correlated with N:P and AN across different habitats, but negatively correlated with SOC concentrations. Across all the habitats, foliar K concentrations were positively correlated with SOC, total N and total P concentrations, respectively; foliar N concentrations were positively correlated with SOC and total P concentrations, while N:P was negatively correlated with SOC and total P

国家自然科学基金委-新疆联合基金重点支持项目(U1603233)、中国科学院“西部青年学者”B类项目(2018-XBQNXX-B-018)资助。

收稿日期: 2019-08-29; 接受日期: 2019-12-04
© 2020 China Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

* 通讯作者 E-mail: zengfj@ms.xjb.ac.cn

concentrations. The SOC concentrations were positively correlated with foliar P and K concentrations, but negatively correlated with N : K. Soil AN concentrations were positively correlated with foliar N : K, but negatively correlated with these four element concentrations in leaves. Soil AK concentrations were negatively correlated with these four element concentrations in leaves and positively correlated with N : K in leaves. Soil N : P and N : K were positively correlated with the foliar total C, total P, total K concentrations, respectively. In brief, *A. sparsifolia*-*K. caspia* community can improve nutrient state of soil and plant compared with single-species population, suggesting the significance of leguminous species *A. sparsifolia* in community succession. Our results could provide scientific basis for the restoration of desert ecosystem in the south rim of the Taklimakan Desert.

Key words: desert ecosystem; leguminous plant; biological nitrogen fixation; nutrient utilization.

生态化学计量学是一门综合了生物学、化学计量学和物理学的综合交叉学科,是研究生态过程中不同化学元素平衡关系的重要手段。生态化学计量学不仅是当前生态研究的热点领域,同时也为研究植物限制性元素及生态系统物质循环提供了一种新的思路和方法(Elser *et al.* 2000; 贺金生等 2010; 卢同平等 2016)。目前,生态化学计量学已经在不同生态系统中的养分循环、限制性元素的判断、生态系统稳定性及全球 C、N、P 生物地球化学循环等诸多领域中被广泛研究,并取得了一系列研究成果(曾德慧等 2015; Urbina *et al.* 2017)。

Sierra 等(2006)研究发现,在养分贫瘠的热带林草复合生态系统中,豆科植物固定的 N 可以被邻近的非豆科植物所吸收和利用,这将改变与豆科植物邻近的非豆科植物的养分状态。随后 Nyfeler 等(2009)研究发现,在人工栽培草地生态系统中非豆科植物与豆科植物间作时,非豆科植物可以通过根系吸收降低土壤有效氮的浓度从而促进豆科植物的固氮效率,而豆科植物固氮作用得到的氮也能转运至非豆科植物被其利用。与之类似,芦奕晓等(2019)发现:在人工栽培草地生态系统中,豆科与禾本科牧草混播可以使得生态位互补且能促进豆科牧草的生物固氮作用。在我国年均降雨为 35.1 mm 的塔克拉玛干沙漠南缘的荒漠生态系统中,豆科植物骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)是多年生草本植物,也是塔克拉玛干沙漠南缘绿洲荒漠过渡带上的优势建群种植物,在新疆的分布面积达 $1.73 \times 10^6 \text{ hm}^2$,约占新疆草地总面积的 3.03%。骆驼刺不但在防风固沙、防止土地遭受风沙侵蚀、维护绿洲生态安全等方面发挥了重要作用,同时也是重要的优质牧草资源,在当地畜牧业生产中有着不可替代的作用和地位(黄彩变等 2016; Zhang *et al.* 2018)。同为多年

生草本的花花柴(*Karelinia caspia*)则常与骆驼刺组成优势群落(李向义等 2009)。前期研究发现,该地区非豆科植物比豆科植物有更低的叶氮含量,且非豆科植物分配更少的叶氮于光合系统(朱军涛等 2010)。但具有生物固氮作用的荒漠豆科植物骆驼刺是否可以改变其临近植物的养分状态尚需要进一步深入研究。

孙力等(2017)研究塔里木盆地北缘豆科植物骆驼刺和花花柴等荒漠典型植物 C、N、P 的化学计量特征发现,土壤含水量是叶片 C、N、P 含量及其化学计量比变化的主要驱动因子,土壤全氮含量、全磷含量和有机碳含量对叶片化学计量特征的影响相对较小。但周晓兵等(2018)却发现,塔克拉玛干沙漠南缘荒漠绿洲过渡带中荒漠豆科植物骆驼刺中 C、N 和 P 与土壤营养之间的关系显著,骆驼刺总氮、总磷与土壤有机质具有显著相关关系,骆驼刺总氮与土壤总氮显著相关。骆驼刺总磷与土壤总磷、有效氮及有效磷显著相关。因此,塔克拉玛干沙漠南缘的骆驼刺与花花柴的植物养分是否受土壤养分的影响以及与土壤养分之间的相关性,需要深入的研究探讨。

本研究以塔克拉玛干沙漠南缘的单一骆驼刺种群、单一花花柴种群及骆驼刺-花花柴群落为对象,测定不同生境的表层 0~20 cm 的土壤有机碳、有效氮、有效磷、有效钾含量及植物叶片的有机碳、全氮、全磷、全钾等养分含量,探讨荒漠生态系统中的豆科植物骆驼刺与菊科植物花花柴在不同生境下的生态化学计量学特征,明确荒漠植物骆驼刺与花花柴叶片的生态化学计量学特征与土壤养分的关系,以为塔克拉玛干沙漠南缘的优势植物生态保护及恢复提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于塔克拉玛干沙漠南缘的策勒绿洲-荒漠过渡带,新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测试验站,地理坐标为 $80^{\circ}03'E-82^{\circ}10'E$, $35^{\circ}17'N-39^{\circ}30'N$ 。该地区春季多大风,风沙灾害较为严重;夏季炎热干燥,极端高温达 $41.9^{\circ}C$,年平均气温 $11.9^{\circ}C$ 。绿洲平原区年平均降水量为 35.1 mm ,蒸发量高达 2239 mm ,水分亏值较大(Zhang *et al.* 2018)。骆驼刺与花花柴是过渡带内主要的建群种及景观植被,具有防风固沙、维护绿洲生态安全的重要作用。

1.2 试验设计

在策勒绿洲-荒漠过渡带进行植被调查与样地选择,并根据所观测的植被情况,将样地分为3个不同的类型:单一骆驼刺种群、单一花花柴种群、骆驼刺-花花柴群落。每个样地面积为 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$,每个样地距离大约为 30 m 。

1.3 采样方法

单一骆驼刺种群中随机选择3株骆驼刺、单一花花柴种群中随机选择3株花花柴以及在骆驼刺-花花柴群落中随机选择3株骆驼刺及其相邻的3株花花柴。2018年8月对每株骆驼刺与花花柴进行叶片和植株冠幅边缘 20 cm 深度土壤的采集。植物每株采集50片无病虫害的叶片,装入自封袋后立即带回实验室,放在烘箱中 $75^{\circ}C$ 烘干至恒重,烘干后的叶片送到中国科学院新疆生态与地理研究所中心实验室测定全氮、全磷、全钾和有机碳含量。土壤样品使用土钻采集,采集时土钻紧贴植株冠层边缘,垂直插入土层中。采集土壤时每株植株周围采集3次,将采集好的土壤混合均匀后作为一个重复装入自封袋中带回实验室自然风干,挑去杂物,过100目筛,然后送到中国科学院新疆生态与地理研究所中心实验室测定。植物和土壤有机碳采用重铬酸钾容量法-外加热法测定(吕国红 2006)。植物叶片的全氮采用凯氏法(高氯酸-硫酸硝化法)进行测定,全磷采用酸溶-流动分析仪法,全钾采用酸溶-火焰光度法测定。土壤有效氮采用碱解蒸馏法,有效磷采用 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaHCO}_3$ 浸提钼锑抗比色法,速效钾采用 NH_4OAc 浸提-火焰光度法(胡俊 2018)。

1.4 数据分析

应用 Excel 2003、SPSS 20.0 统计分析软件进行

数据处理和统计分析,同时结合 Origin 8.0 进行制图。利用 Tukey 法进行多重比较;将植物各计量学指标与土壤各指标进行 Pearson 相关性分析,探讨土壤养分与植物生态化学计量学之间的相互关系。

2 结果与分析

2.1 不同生境土壤养分含量特征及其相关性

单一骆驼刺种群、单一花花柴种群和骆驼刺-花花柴群落中的土壤有机碳值在 $1603.69\sim 2080.73\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,单一花花柴种群中的土壤有机碳含量显著高于单一骆驼刺种群的土壤有机碳含量,而与骆驼刺-花花柴群落中的土壤有机碳含量无显著差异(图 1A)。土壤有效氮含量在 $10.74\sim 45.69\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,骆驼刺-花花柴群落的土壤有效氮含量显著高于单一花花柴种群的土壤有效氮含量,其中骆驼刺-花花柴群落中的土壤有效氮含量比单一花花柴种群高 228.95% (图 1B)。土壤有效磷含量在 $4.90\sim 8.68\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,不同生境下土壤有效磷含量无显著性差异(图 1C)。土壤有效钾含量在 $240.80\sim 364.50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,骆驼刺-花花柴群落的土壤有效钾含量显著高于单一花花柴种群的土壤有效钾含量,而与单一骆驼刺种群的土壤有效钾含量无显著差异。(图 1D)。土壤 N:P 范围为 $1.90\sim 6.97$,N:K 范围为 $0.04\sim 0.13$,骆驼刺-花花柴群落的土壤 N:P 和 N:K 显著高于单一花花柴种群的土壤 N:P 和 N:K,与单一骆驼刺种群的土壤 N:P 和 N:K 无显著差异(图 1E 和 F)。

在不同生境下的土壤养分之间,土壤有机碳与土壤有效钾呈显著负相关。土壤有效氮与土壤有效钾、N:P 和 N:K 呈显著正相关。土壤有效钾与 N:P 和 N:K 呈显著正相关。土壤 N:P 和 N:K 呈显著正相关。其他土壤养分之间不存在显著相关性(表 1)。

2.2 不同生境植物叶片 C、N、P、K 生态化学计量学特征及其相关性

单一骆驼刺种群、单一花花柴种群和骆驼刺-花花柴群落中的叶片有机碳含量在 $359.33\sim 436.06\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,单一骆驼刺种群叶片的有机碳含量显著高于单一花花柴种群以及共生花花柴的叶片有机碳含量,而与共生骆驼刺的叶片有机碳含量无显著差异(图 2A)。叶片全氮含量在 $14.15\sim 23.63\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,单一骆驼刺种群的叶片全氮含量显著高于共生花花

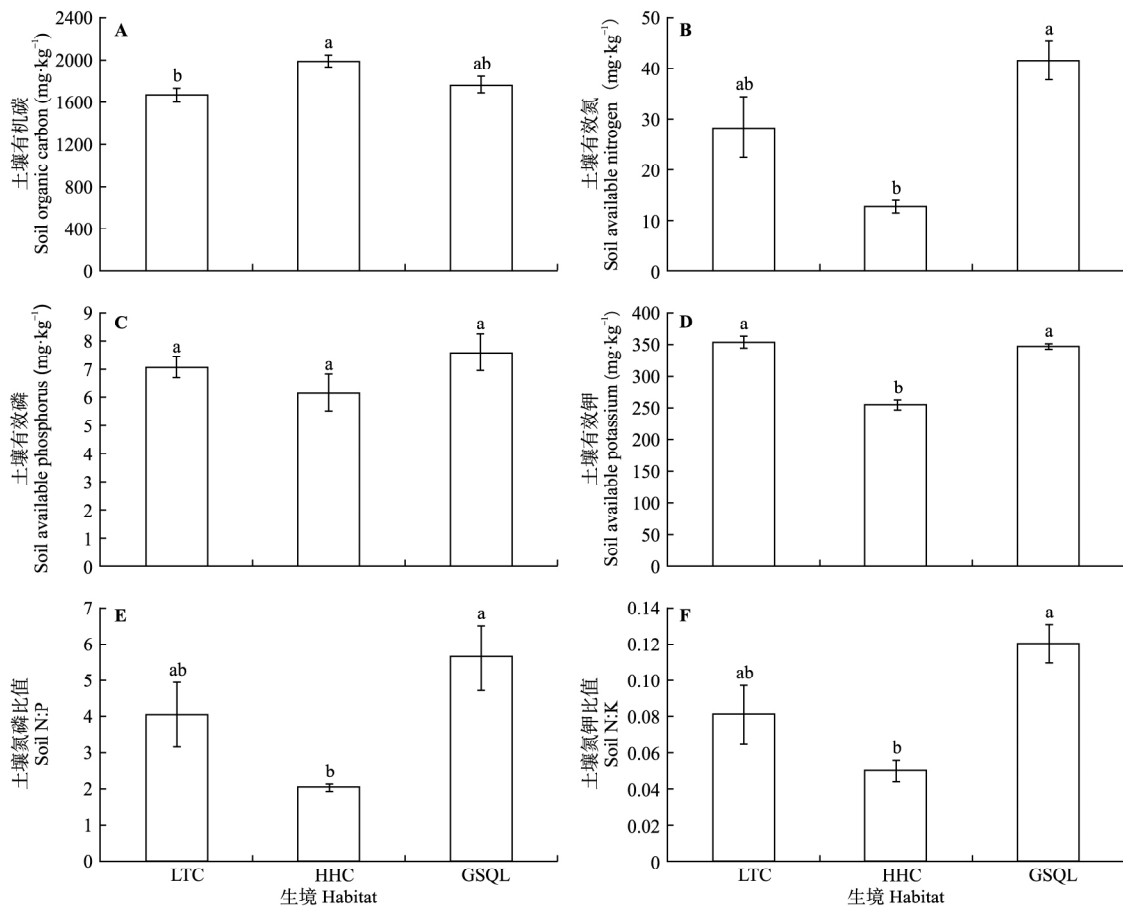


图 1 不同生境下土壤碳、氮、磷、钾及其土壤氮磷、氮钾比值

Fig.1 Soil C, N, P, and K concentrations and N : P and N : K ratios at different habitats

注: 其中 LTC 为单一骆驼刺种群。HHC 为单一花花柴种群。GSQ 为骆驼刺-花花柴群落。不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: LTC: *Alhagi sparsifolia* population; HHC: *Karelinia caspia* population; GSQ: *Alhagi sparsifolia* - *Karelinia caspia* community. Different letters indicate significant change ($P < 0.05$).

柴和单一花花柴种群叶片的全氮含量 而与共生骆驼刺的叶片全氮含量无显著差异; 其中骆驼刺-花花

表 1 不同土壤养分及氮磷、氮钾比值之间的相关系数

Table 1 The correlation among different soil nutrients and N : P and N : K ratios

项目 Item	土壤碳 Soil C	土壤氮 Soil N	土壤磷 Soil P	土壤钾 Soil K	土壤 氮磷比 Soil N : P	土壤 氮钾比 Soil N : K
土壤碳 Soil C	1					
土壤氮 Soil N	-0.344	1				
土壤磷 Soil P	-0.522	0.481	1			
土壤钾 Soil K	-0.771*	0.760*	0.393	1		
土壤氮磷比 Soil N : P	-0.239	0.963**	0.243	0.733*	1	
土壤氮钾比 Soil N : K	-0.266	0.990**	0.498	0.675*	0.951**	1

注: * 表示在 0.05 水平上具有显著相关。 ** 表示在 0.01 水平上具有显著相关。
Note: * and ** indicate the correlation is significant at 0.05 and 0.01 level, respectively.

柴群落中的花花柴叶片养分比单一花花柴群落中的花花柴叶片养分高 11.74% (图 2B)。叶片的全磷含量在 0.99~2.39 $g \cdot kg^{-1}$, 共生骆驼刺的叶片全磷含量显著高于单一骆驼刺种群、单一花花柴种群以及共生花花柴的叶片全磷含量 (图 2C)。叶片的全钾含量在 2.83~14.10 $g \cdot kg^{-1}$, 单一骆驼刺种群的叶片全钾含量显著高于共生花花柴与单一花花柴种群的叶片全钾含量, 而与共生骆驼刺的叶片全钾含量无显著差异; 共生骆驼刺的叶片全钾含量显著高于共生花花柴的叶片全钾含量 (图 2D)。叶片 N : P 在 9.78~16.60, 单一骆驼刺种群的叶片 N : P 显著高于共生骆驼刺的叶片 N : P, 与单一花花柴种群和共生花花柴的叶片 N : P 无显著差异 (图 2E)。叶片 N : K 在 1.51~5.51, 单一花花柴种群的叶片 N : K 显著高于单一骆驼刺种群和共生骆驼刺的叶片 N : K, 与共生花花柴的叶片 N : K 无显著差异 (图 2F)。在不同生境下, 叶片有机碳与全氮和全钾呈显

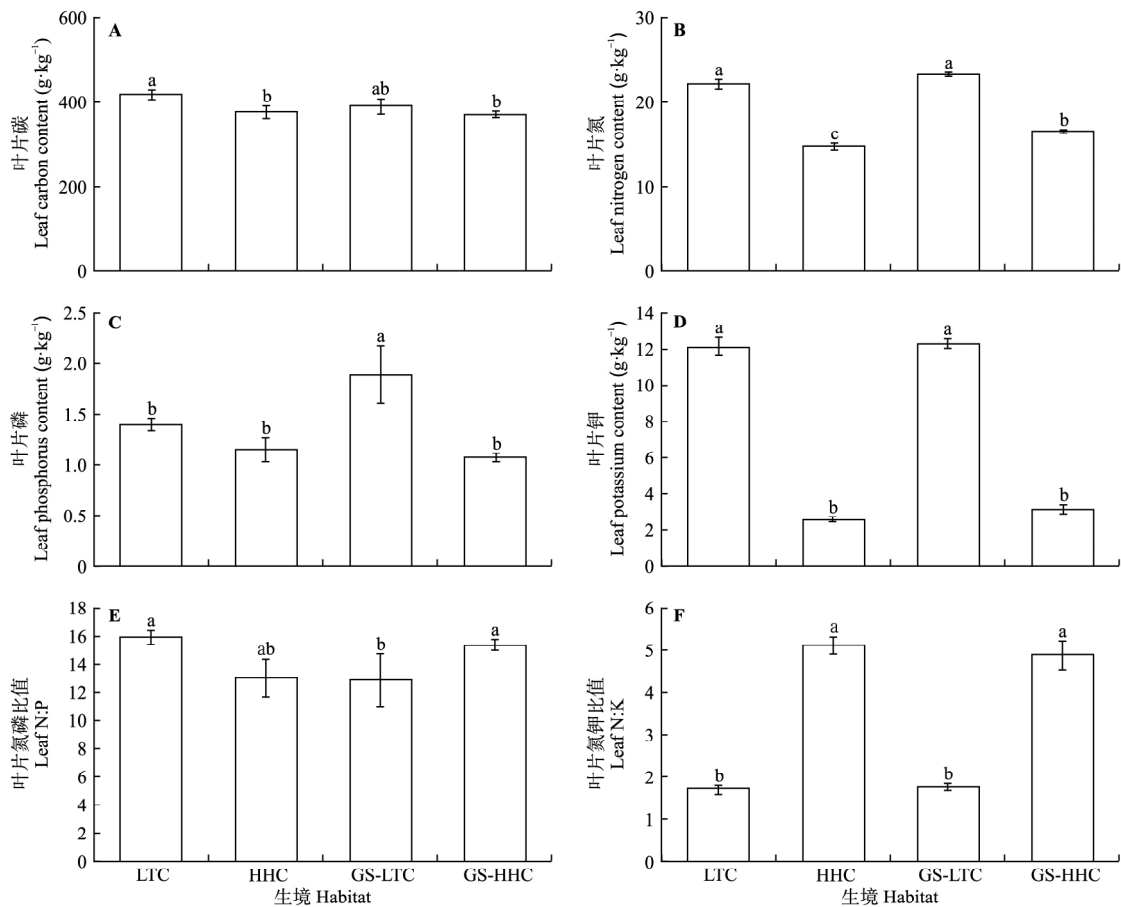


图 2 不同生境下植物叶片碳、氮、磷和钾含量及氮磷、氮钾比值

Fig.2 Leaf C, N, P, and K concentrations and N : P and N : K ratios at different habitats

注: 其中 LTC 为单一骆驼刺种群中的骆驼刺。HHC 为单一花花柴种群中的花花柴。GS-LTC 为骆驼刺-花花柴群落中的骆驼刺。GS-HHC 为骆驼刺-花花柴群落中的花花柴。不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: LTC: *Alhagi sparsifolia* population; HHC: *Karelinia caspia* population; GS-LTC: *Alhagi sparsifolia* in *Alhagi sparsifolia* - *Karelinia caspia* community. GS-HHC: *Karelinia caspia* in *Alhagi sparsifolia* - *Karelinia caspia* community. Different letters indicate significant change ($P < 0.05$).

表 2 植物叶片碳、氮、磷、钾及其生态化学计量学特征之间的相关系数

Table 2 The correlation among leaf carbon, nitrogen, phosphorus, potassium concentrations and their eco-stoichiometric characteristics

项目 Item	叶片碳 Leaf C	叶片氮 Leaf N	叶片磷 Leaf P	叶片钾 Leaf K	叶片氮磷比 Leaf N:P	叶片氮钾比 Leaf N:K
叶片碳 Leaf C	1					
叶片氮 Leaf N	0.739 **	1				
叶片磷 Leaf P	0.567	0.776 **	1			
叶片钾 Leaf K	0.823 **	0.964 **	0.738 **	1		
叶片氮磷比 Leaf N:P	-0.185	-0.175	-0.743 **	-0.157	1	
叶片氮钾比 Leaf N:K	-0.833 **	-0.952 **	-0.712 **	-0.990 **	0.134	1

注: * 表示在 0.05 水平上具有显著相关。** 表示在 0.01 水平上具有显著相关。
Note: * and ** indicate the correlation is significant at 0.05 and 0.01 level, respectively.

著正相关,与 N : K 呈显著负相关。叶片全氮与全磷和全钾呈显著正相关,与 N : K 呈显著负相关。叶片全磷和全钾呈显著正相关,与 N : P、N : K 呈显著负相关。叶片全钾与 N : K 呈显著负相关 (表 2)。

2.3 不同生境土壤养分与植物叶片 C、N、P、K 生态化学计量学特征的相关性

在不同生境下,土壤有机碳含量与叶片全氮和全钾含量呈显著正相关,与叶片 N : K 呈显著负相关。土壤有效氮含量与叶片有机碳、全氮、全磷、全钾含量均呈显著负相关,与叶片 N : K 呈显著正相关。土壤有效磷含量与叶片有机碳、全氮、全磷、全钾含量均无显著负相关。土壤有效钾含量与叶片有机碳、全氮、全磷、全钾含量均呈显著负相关,与叶片 N : K 呈显著正相关。土壤 N : P、土壤 N : K 均与叶片有机碳、全磷和全钾含量呈显著负相关 (表 3)。

表 3 植物化学计量与土壤营养因子之间的相关系数
Table 3 The correlation between plant stoichiometry and soil nutrient ($n=3$)

项目 Item	土壤碳 Soil C	土壤氮 Soil N	土壤磷 Soil P	土壤钾 Soil K	土壤 氮磷比 Soil N : P	土壤 氮钾比 Soil N : K
叶片碳 Leaf C	0.651	-0.761*	-0.464	-0.772**	-0.673*	-0.713*
叶片氮 Leaf N	0.818**	-0.686*	-0.508	-0.962**	-0.629	-0.612
叶片磷 Leaf P	0.587	-0.837**	-0.534	-0.738*	-0.778*	-0.832**
叶片钾 Leaf K	0.785*	-0.761*	-0.519	-0.963**	-0.694*	-0.686*
叶片氮磷比 Leaf N : P	0.449	0.014	-0.060	-0.491	0.018	0.112
叶片氮钾比 Leaf N : K	-0.855**	0.694*	0.604	0.929**	0.591	0.619

注: * 表示在 0.05 水平上具有显著相关。* * 表示在 0.01 水平上具有显著相关。

Note: * * and * indicate the correlation is significant at 0.01 and 0.05 level, respectively.

3 讨论

3.1 不同生境土壤养分含量特征及其相关性

Nyfelner 等(2009)发现,非豆科作物与豆科作物间作时,非豆科作物可以通过根系吸收降低土壤有效氮的浓度从而促进豆科植物的固氮效率,而豆科植物固氮作用得到的氮也能转运至非豆科作物被其利用。在本研究中,单一骆驼刺种群的土壤有机碳含量显著低于单一花花柴土壤有机碳含量(图 1A),说明豆科植物骆驼刺的固氮作用使得土壤氮含量增加,导致土壤 C : N 值降低,提高微生物活性,加速土壤有机碳的分解,使其含量降低(樊后保等 2007; 肖胜生 2010; Zeng *et al.*, 2010)。骆驼刺-花花柴共生群落的土壤有效氮含量显著高于单一花花柴群落的土壤有效氮含量(图 1B),表明骆驼刺与花花柴的共生促进了骆驼刺的生物固氮作用,使得土壤有效氮含量显著增加,这也与 Nyfelner 等(2009)的研究结果一致。不同生境下土壤有效钾含量的变化规律与土壤有效氮含量变化规律一致,即单一花花柴种群的土壤有效钾含量显著低于骆驼刺-花花柴共生群落的土壤有效钾含量(图 1D)。这可能与单一花花柴种群的土壤有机碳含量最高,而土壤有效钾含量与土壤有机碳含量呈显著负相关关系有关(表 1)。此外,裴广廷等(2013)的研究结果显示,土壤氮含量的增加对森林土壤磷含量影响显著,对土壤钾含量的影响不显著。而本研究显示,不同生境下豆科植物与非豆科植物共生使得土壤中有效钾

含量增加,而土壤有效磷含量无变化(图 1C),此外,不同生境下土壤有效氮和土壤有效钾呈显著正相关关系(表 1)。因此,豆科植物与非豆科植物共生生境下的土壤有效磷和有效钾的具体变化机理还有待进一步深入研究。

3.2 不同生境植物叶片 C、N、P、K 生态化学计量学特征

Zhang 等(2016)研究发现,在内蒙古温带草原生态系统中,豆科灌木锦鸡儿(*Caragana microphylla*)会通过生物固氮作用使得距离 500 cm 之内的羊草(*Leymus chinensis*)的 N 含量显著升高。而在本研究中,骆驼刺-花花柴共生群落中的花花柴叶片的 N 含量显著高于单一花花柴群落中的花花柴叶片的 N 含量(图 2B)。这与 Zhang 等(2016)在内蒙古温带草原生态系统中豆科植物可以提高非豆科植物的叶片含 N 量的研究结果一致。同时也符合 Nyfelner 等(2009)发现,非豆科作物与豆科作物间作时豆科植物固氮作用得到的氮也能转运至非豆科作物被其利用的研究结果。

Aerts 等(2000)及 Ellison(2006)认为,植物受 N 限制的标准之一为叶片 N 含量 $< 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, P 含量 $> 1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。周晓兵等(2018)研究发现,塔克拉玛干沙漠南缘柽柳、骆驼刺和花花柴 3 种植物叶片 N 和 P 含量平均值分别为 13.62 和 1.49 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,代表该区域荒漠绿洲过渡带植物受 N 的限制。本研究中,单一花花柴种群及骆驼刺-花花柴群落中花花柴叶片 N 含量分别是 14.74 和 16.47 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2B),叶片 P 含量为 1.15 和 1.08 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2C),表明本区域的花花柴受 N 的限制。这与周晓兵等(2018)的研究结果一致。但单一骆驼刺种群及骆驼刺-花花柴群落中骆驼刺叶片 N 含量分别是 22.15 和 23.27 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2B),叶片 P 含量为 1.40 和 2.12 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2C),表明本区域的骆驼刺不受 N 的限制。这与周晓兵等(2018)的研究结果有所不同。

同时, Koerselman 等(1996)认为,当植物 N : P < 14 时,植物生长受氮元素限制;当 N : P > 16 时,植物生长受磷元素限制;当 $14 < \text{N} : \text{P} < 16$ 时,植物生长同时受 N 和 P 的限制。在本研究中,单一花花柴种群的叶片 N : P 为 13.05,骆驼刺-花花柴群落中的骆驼刺叶片 N : P 为 11.08,表明单一花花柴种群中的花花柴和骆驼刺-花花柴群落中的骆驼刺生长受氮元素的限制。而单一骆驼刺种群的叶片 N : P 为 15.86,骆驼刺-花花柴群落中的花花柴叶片 N : P 为

15.34,表明单一骆驼刺种群中的骆驼刺和骆驼刺-花花柴群落中的花花柴生长既受氮元素的限制,又有磷元素的限制。但本判定标准下的研究结果与周晓兵等(2018)使用 Aerts 等(2000)和 Ellison(2006)的标准下植物所有的限制元素不同,这可能与不同研究中取样点的土壤水分、潜水埋深和土壤盐分具有较大异质性有关。这也与 Güsewell(2004)的观点一致,即生态系统本身的复杂性决定了不能够采用单一的指标来判断系统的养分限制因子。研究区域、生态系统类型、植被种类均会导致植物的 N/P 阈值会有很大的变化。

3.3 不同生境土壤养分与植物叶片 C、N、P、K 生态化学计量学特征的相关性

在新疆古尔班通古特沙漠,陶冶等(2015)对荒漠短命植物角茴香、土大戟、簇花芹和弯花黄芪叶片与土壤化学计量特征及其相互关系进行研究。研究表明,绝大部分叶片化学计量值与土壤因子之间没有显著相关性。同样,孙力等(2017)研究发现,塔里木盆地北缘骆驼刺和花花柴等荒漠典型植物 C、N、P 的化学计量特征主要受土壤含水量的驱动,基本不受土壤全氮含量、全磷含量和有机碳含量的影响。但周晓兵等(2018)却发现,塔克拉玛干沙漠南缘荒漠绿洲过渡带中荒漠豆科植物骆驼刺叶片中总氮、总磷含量与土壤有机质具有显著正相关关系,骆驼刺叶片的总氮与土壤总氮显著正相关。骆驼刺叶片的总磷与土壤总磷、有效氮及有效磷显著正相关。本研究发现,不同生境下的骆驼刺和花花柴叶片 C、N、P、K 生态化学计量学特征与土壤养分具有显著相关关系。但其相关性与周晓兵等(2018)的研究结果又有所差异,骆驼刺和花花柴叶片中的全氮和全钾含量与土壤有机碳显著正相关,但叶片全氮、全磷和全钾含量与土壤有效氮和有效钾含量呈显著负相关,与土壤有效磷含量无显著相关性(表 3)。本研究结果也与 Zhang 等(2018)在不同潜水埋深下的骆驼刺叶片生态化学计量学特征与土壤养分之间的相关性的研究结果不一致。这可能与骆驼刺-花花柴群落中骆驼刺的固氮作用增加了土壤中的氮,而增加的氮又能转运至花花柴被其利用有关。

4 结 论

本研究表明,在塔克拉玛干沙漠南缘,相较于单一骆驼刺与花花柴种群,骆驼刺与花花柴的群落能够在一定程度上提高土壤养分,改善植物的营养状

况,显示出豆科植物骆驼刺在群落演替中重要作用。但豆科植物骆驼刺与菊科植物花花柴的共生是否能够促进骆驼刺的生物固氮作用,使得土壤 N 含量显著增加,进而使得共生的花花柴的叶片氮含量升高,还需要进一步深入研究。在不同生境下,骆驼刺与花花柴的叶片生态化学计量学特征与土壤养分之间的相关性在不同研究中存在差异,也需要进一步深入探讨。本研究进一步揭示了我国西北荒漠干旱生态系统中豆科植物及非豆科植物之间的养分转移及利用特征,并为当地骆驼刺与花花柴植株养分及土壤养分的相关性提供了进一步的数据支撑。本研究结果将有利于解释养分贫瘠、水分缺乏的塔克拉玛干沙漠南缘的骆驼刺与花花柴的共生关系,并为其荒漠绿洲过渡带的植被保护和恢复提供理论依据。

参考文献

- 樊后保,刘文飞,李燕燕,等. 2007. 亚热带杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林生长与土壤养分对氮沉降的响应. 生态学报, 27(11): 4630-4642. [Fan HB, Liu WF, Li YY, et al. 2007. Tree growth and soil nutrients in response to nitrogen deposition in a subtropical Chinese fir plantation. *Acta Ecologica Sinica*, 27(11): 4630-4642.]
- 胡俊. 2018. 土壤中有氮磷钾的快速检验. 生物化工, 17(4): 34-40. [Hu J. Rapid test of available nitrogen, phosphorus and potassium in soil. *Biological Chemical Engineering*, 17(4): 34-40.]
- 贺金生,韩兴国. 2010. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论. 植物生态学报, 34(1): 2-6. [He JS, Han XG. 2010. Ecological stoichiometry: Searching for unifying principles from individuals to ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34(1): 2-6.]
- 黄彩变,曾凡江,雷加强. 2016. 骆驼刺幼苗生长和功能性状对不同水氮添加的响应. 草业学报, 25(12): 150-160. [Huang CB, Zeng FJ, Lei JQ. 2016. Growth and functional trait responses of *Alhagi sparsifolia* seedlings to water and nitrogen addition. *Acta Prataculturae Sinica*, 25(12): 150-160.]
- 吕国红,周广胜,周莉,等. 2006. 土壤溶解性有机碳测定方法与应用. 气象与环境学报, 22(2): 51-55. [Lü GH, Zhou GS, Zhou L, et al. 2006. Methods of soil dissolved organic carbon measurement and their applications. *Journal of Meteorology and Environment*, 22(2): 51-55.]
- 李向义,林丽莎,赵强. 2009. 策勒绿洲外围不同地下水埋深下主要优势植物的分布和群落特征. 干旱区地理, 32(6): 906-911. [Li XY, Lin LS, Zhao Q. 2009. Distribution of dominant plant species and characteristic of its communities on the foreland of Cele Oasis in relation to groundwater level. *Arid Land Geography*, 32(6): 906-911.]
- 卢同平,史正涛,牛洁,等. 2016. 我国陆生生态化学计量

- 学应用研究进展与展望. 土壤, **48**(1): 29-35. [Lu TP, Shi ZT, Niu J, et al. 2016. Research progresses and prospects of terrestrial ecological stoichiometry in China. *Soils*, **48**(1): 29-35.]
- 芦奕晓, 牟乐, 杨惠敏. 2019. 豆科与禾本科牧草混播改良土壤的研究进展. 中国草地学报, **41**(1): 96-100. [Lu YX, Mou L, Yang HM. 2019. Advances in improved soil fertility with legume-grass mixtures. *Chinese Journal of Grassland*, **41**(1): 96-100.]
- 裴广廷, 马红亮, 高人, 等. 2013. 模拟氮沉降对森林土壤速效磷和速效钾的影响. 中国土壤与肥料, (4): 16-20. [Pei GT, Ma HL, Gao R, et al. 2013. Effects of applying trace fertilizer on growth, nutrient uptake and yield on maize. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, (4): 16-20.]
- 孙力, 贡璐, 朱美玲, 等. 2017. 塔里木盆地北缘荒漠典型植物叶片化学计量特征及其与土壤环境因子的关系. 生态学杂志, **36**(5): 1208-1214. [Sun L, Gong L, Zhu ML, et al. 2017. Leaf stoichiometric characteristics of typical desert plants and their relationships to soil environmental factors in the northern margin of the Tarin Basin. *Chinese Journal of Ecology*, **36**(5): 1208-1214.]
- 陶冶, 张元明. 2015. 古尔班通古特沙漠4种草本植物叶片与土壤的化学计量特征. 应用生态学报, **26**(3): 659-665. [Tao Y, Zhang YM. 2015. Leaf and soil stoichiometry of four herbs in the Gurbantunggut Desert, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **26**(3): 659-665.]
- 肖胜生. 2010. 温带半干旱草地生态系统碳固定及土壤有机碳库对外源氮输入响应(博士学位论文). 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所. [Xiao SS. 2010. The Responses of Carbon Fixation and Soil organic Carbon Pool to External Nitrogen Input in the Temperate Semi-arid Grassland Ecosystem (PhD thesis). Beijing: Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences.]
- 曾德慧, 陈广生. 2005. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索. 植物生态学报, **29**(6): 141-153. [Zeng DH, Chen GS. 2005. Ecological stoichiometry: A science to explore the complexity of living systems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, **29**(6): 141-153.]
- 周晓兵, 陶冶, 张元明. 2018. 塔克拉玛干沙漠南缘荒漠绿洲过渡带不同土地利用影响下优势植物化学计量特征. 草业学报, **27**(5): 15-26. [Zhou XB, Tao Y, Zhang YM. 2018. The C, N and P stoichiometry of dominant species in different land use types in a desert-oasis ecotone of the Southern Taklimakan Desert. *Acta Prataculturae Sinica*, **27**(5): 15-26.]
- 朱军涛, 李向义, 张希明, 等. 2010. 塔克拉玛干沙漠南缘豆科与非豆科植物的氮分配. 植物生态学报, **34**(9): 1025-1032. [Zhu JT, Li XY, Zhang XM, et al. 2010. Nitrogen allocation and partitioning within a leguminous and two non-leguminous plant species growing at the southern fringe of China's Taklamakan Desert. *Chinese Journal of Plant Ecology*, **34**(9): 1025-1032.]
- Aerts R, Chapin FS. 2000. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns. *Advances in Ecological Research*, **30**: 1-67.
- Ellison AM. 2006. Nutrient limitation and stoichiometry of carnivorous plants. *Plant Biology*, **8**: 740-747.
- Elser JJ, Sterner RW, Gorokhova E, et al. 2000. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, **3**: 540-550.
- Güsewell S. 2004. N/P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance. *New Phytologist*, **164**: 243-266.
- Koerselman W, Meuleman AF. 1996. The vegetation N:P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, **33**: 1441-1450.
- Nyfelner D, Huguenin-Elie O, Suter M, Frossard E, et al. 2009. Strong mixture effects among four species in fertilized agricultural grassland led to persistent and consistent transgressive overyielding. *Journal of Applied Ecology*, **46**: 683-691.
- Sierra J, Nygren P. 2006. Transfer of N fixed by a legume tree to the associated grass in a tropical silvopastoral system. *Soil Biology & Biochemistry*, **38**: 1893-1903.
- Urbina I, Sardans J, Grau O, et al. 2017. Plant-community composition affects the species biogeochemical niche. *Ecosphere*, **8**(5): e01801. 10.1002/ecs2.1801.
- Zeng DH, Li LJ, Fahey TJ, et al. 2010. Effects of nitrogen addition on vegetation and ecosystem carbon in a semi-arid grassland. *Biogeochemistry*, **98**: 185-193.
- Zhang B, Gao XP, Li L, et al. 2018. Groundwater depth affects phosphorus but not carbon and nitrogen concentrations of a desert phreatophyte in northwest China. *Frontiers in Plant Science*, doi: 10.3389/fpls.2018.00338.
- Zhang HY, Yu Q, Lü XT, et al. 2016. Impacts of leguminous shrub encroachment on neighboring grasses include transfer of fixed nitrogen. *Oecologia*, **180**: 1213-1222.

作者简介 荆瑞雪,女,1994年生,硕士研究生,主要从事植物生理生态学研究。E-mail: 1161288344@qq.com
责任编辑 李凤芹