

DOI: 10.5846/stxb201605241003

安申群, 贡璐, 朱美玲, 李红林, 解丽娜, 罗艳. 塔里木盆地北缘典型荒漠植物根系化学计量特征及其与土壤理化因子的关系. 生态学报, 2017, 37 (16): 5444-5450.

An S Q, Gong L, Zhu M L, Li H L, Xie L N, Luo Y. Root stoichiometric characteristics of desert plants and their correlation with soil physicochemical factors in the northern Tarim Basin. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37 (16): 5444-5450.

塔里木盆地北缘典型荒漠植物根系化学计量特征及其与土壤理化因子的关系

安申群^{1,2}, 贡璐^{1,2,*}, 朱美玲^{1,2}, 李红林^{1,2}, 解丽娜^{1,2}, 罗艳^{1,2}

1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

摘要: 荒漠植物根系直接与高度盐渍化、严重缺水的土壤环境接触, 是执行物质吸收的重要营养器官, 对其化学计量的研究有助于深入了解旱生植物功能特征和生存策略。以塔里木盆地北缘 6 种典型荒漠植物: 甘草、芦苇、花花柴、骆驼刺、怪柳、盐爪爪为研究对象, 分析植物根系化学计量特征, 结合冗余分析探索其与土壤理化因子的相关关系。结果表明, 研究区植物根系 C、N、P 含量分别为 (443.62±70.84) mg/g, (7.44±3.59) mg/g, (0.46±1.92) mg/g; 其中 P 的变异系数最大, C 的最小; C/N、C/P、N/P 的值分别为 63.37、964.39、15.22, C、N、P 含量及 N/P 值低于全球平均水平, C/N 高于全球平均水平。通过冗余分析得出土壤理化因子对植物根系化学计量特征影响的重要性排序为: 土壤含水量>土壤电导率>土壤 P 含量>土壤 C 含量>土壤 N 含量, 即研究区土壤含水量与电导率是影响植物根系化学计量的重要因子。

关键词: 荒漠植物; 根系; 化学计量; 塔里木盆地

Root stoichiometric characteristics of desert plants and their correlation with soil physicochemical factors in the northern Tarim Basin

AN Shenqun^{1,2}, GONG Lu^{1,2,*}, ZHU Meiling^{1,2}, LI Honglin^{1,2}, XIE Li'na^{1,2}, LUO Yan^{1,2}

1 College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi 830046, China

Abstract: Stoichiometry is becoming increasingly used as a method to understand ecological processes. Owing to their direct contact with saline and arid environments, the roots of desert plants play an important role in nutrient absorption from barren soil. The stoichiometric characteristics of roots are affected by several soil factors, and are effective indicators of the functional characteristics and survival strategies of xerophytes. In the present study, to understand the influence of soil factors on root stoichiometrics, we analyzed *Glycyrrhiza*, *Phragmites australis*, *Karelinia caspica*, *Alhagi sparsifolia*, *Tamarix chinensis*, *Kalidium foliatum*, and *Populus euphratica* Oliv from the northern Tarim Basin, and used previously collected data to investigate the stoichiometry of plant roots by experimental methods and analyzed factors, such as element content, using classic statistics, and multiple comparisons between different plant types and the stoichiometric characteristics of root carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P). We studied the relationships between plant ecological stoichiometry and soil factors using redundancy analysis (RDA). Classic statistical analyses indicated that the concentrations of plant C (average: (443.62 ± 70.84) mg/g), N (average: (7.44 ± 3.59) mg/g), and P (average: (0.

基金项目: 国家自然科学基金(U41461105)

收稿日期: 2016-05-24; 网络出版日期: 2017-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gonglu721@163.com

46 ± 1.92) mg/g) were lower in the Tarim Basin than global averages, because the sterile soil could not provide sufficient nutrients. P had the highest and C had the lowest coefficient of variation; the ratio of C/N, C/P, and N/P were 63.37, 964.39, and 15.22, respectively. RDA revealed that soil moisture and EC were the key soil physicochemical factors influencing root stoichiometrics. Both soil moisture and EC were significantly correlated to root stoichiometrics; however, soil stoichiometrics did not show a significant correlation to root stoichiometrics in this study, and these results differed from those of other studies. The hierarchy of importance of soil factors to root stoichiometrics could be arranged as soil moisture > EC > soil P > soil C > soil N. However, these results verified that water salinity has a greater effect on root stoichiometrics than nutrient element content, because the shortage of water made soil moisture a limiting factor, and desert plants have changed their physical characteristics to accommodate high-salinity environments. The results also indicated that water availability and salinity are the limiting factors in arid areas. Our study also confirmed that RDA could effectively be used in research to determine the relationship between stoichiometric and soil physicochemical factors. During this analysis, we studied the factors separately and ignored the interaction among them, which may have led to inaccuracies; therefore, this should be improved in future studies.

Key Words: desert plant; root; stoichiometrics; Tarim Basin

化学计量学是研究生态过程和生态作用的重要工具,主要用于探索各元素动态平衡及其相互作用^[1]。作为植物体内的重要生源元素,C、N、P为研究植物生长发育、生态系统物质与能量交换提供有效途径;同时,不同的元素含量及其比值关系对生态系统中养分的限制与有机质的分解速率有较好的指示性^[2-3]。植物根系是植物吸收土壤中水分与矿质元素的器官,对营养元素的运移与固定有重要作用。应用化学计量学方法对植物根系及其与土壤理化因子关系的研究有助于揭示在特定的环境内植物的生态策略^[4-5],对物质的循环与平衡机制有重要意义。

自19世纪80年代化学计量学首次被应用于生态学中以来,国内外科学家取得了瞩目的成就。其研究主要集中在草原、森林、湿地等生态系统^[6-7],较少关注荒漠生态系统。研究内容则聚焦于植物地上部分,得出C、N、P含量及不同比例关系对植物生长有显著影响^[8]。但在不同生态系统中的影响程度不同、各器官化学计量特征存在差异^[9-10]。由于植物根系分布复杂、不易获取,对根系化学计量特征的研究鲜有报道^[11]。

塔里木盆地北缘荒漠属我国极干旱地区,生态系统脆弱,生物多样性低下^[12],荒漠植物通过调整生理-生态方式以适应缺水、土地贫瘠、土壤盐渍化的生境^[9,13],植物功能性状也发生相应变化,如广泛分布于研究区的多年生草本植物甘草、花花柴、骆驼刺有较强的抗旱能力、发达的根系,其中骆驼刺地下根系深度可达3m;另外,芦苇为多年生禾草本植物,生态位宽、盐碱适应力极强,在不同环境中所表现出的特征差异较大^[14];柽柳、盐爪爪是生长在干旱盐渍地的多年生灌木,其针状与圆柱状的叶片可减少水分的蒸发。但是,荒漠植物如何调整根系的化学计量特征以适应干旱区环境?根系的化学计量特征与土壤理化因子的关系如何?

为此,本研究植物采集于塔里木河北缘荒漠区,选取具有代表性的甘草(*Glycyrrhiza*)、芦苇(*Phragmites australis*)、花花柴(*Karelinia caspica*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)、盐爪爪(*Kalidiumfoliatum*)6种植物,分析根系C、N、P含量及比值特征,探索其与土壤理化因子的相关性,旨在揭示荒漠植物生存策略及生态化学计量的生态指示性,为荒漠区植物生态化学计量特征的探究及地球生物化学循环提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于天山南麓,塔克拉玛干沙漠北缘,塔里木河上游阿拉尔垦区,跨81°15′—81°38′E,40°30′—40°43′N。海拔最高1012 m,最低996 m,东高西低。属暖温带干旱气候,年均气温12.4℃,大于10℃的有效积温

为 4201℃,无霜期 200 d,年均降水量 44.7 mm,年均蒸发量 2498 mm,年平均日照时数为 2729.0 h。主要土壤类型为灌漠土、棕漠土、盐土和风沙土。主要植物为甘草、芦苇、花花柴、骆驼刺、柽柳、盐爪爪、胡杨(*Populus euphratica Oliv.*)。

1.2 研究方法

样品采集于 2014 年 8 月塔里木河上游荒漠区,设置 3 条垂直于塔里木河的样带,每条样带上设置 6 个样地,相邻样地间隔 1 km,每个样地 3 个重复,并将 3 个重复样地获取的相同植物根系进行混合。在设置样方时,草本样方为 5 m×5 m,灌木为 15 m×15 m,确定每个样方的优势种,对长势良好的植物随机选取,用挖掘法挖 1.5 m 深壕沟,取其主根和侧根,剥落杂质后混合,其中草本根系混合后称取 50 g,灌木根系 100 g,将根系样品进行密封保存。采集样方内 0—20 cm 表层土样,并用四分法取土样 500 g,同步测出根系附近土壤电导率、含水量。

室内所测生态化学计量指标为根系与土壤的有机碳、全氮、全磷含量。有机碳用重铬酸钾容量法-外加热法测定,全氮用高氯酸-硫酸消化法测定,全磷用酸溶-钼锑抗比色法测定。

1.3 数据分析

实验所得数据用 Excel 2007 进行整理,用 SPSS 17.0 进行统计学分析。对植物的 C、N、P、C/N、C/P、N/P 采用 One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test (K-S 检验)进行正态性检验,计算出其平均值与标准差。用单因素方差分析检验根系和土壤理化因子的差异,先进行方差齐性检验(*F* 检验),若结果为齐性,则用 LSD 方法进行显著性多重比较;若为非齐性,用 Tamhane's T2 法进行多重比较,显著性水平为 $\alpha=0.05$ 。

本研究将根系的化学计量特征作为研究对象,以土壤含水量、土壤电导率及土壤 C、N、P 含量为环境变量,用冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)分析根系 C、N、P 与环境变量的关系。其中,土壤化学计量特征、土壤含水量与电导率的变异膨胀系数均为 4,小于作为环境变量的临界值 20,即可将其作为环境变量进行比较。排序轴梯度长度 LGA<3,即根系对环境变量的响应为线性,符合线性排序法,可用 RDA 对其进行分析。

2 结果与分析

2.1 植物根系 C、N、P 元素的基本特征

由表 1 可知,在研究区 6 种典型荒漠植物根系中,C、N、P 含量均值分别为 443.62、7.44、1.06 mg/g,C/N、C/P、N/P 值依次为 59.64、418.91、7.02。变异系数是描述空间变量稳定性的主要指标,研究区植物根系 C、N、P 及其比值变异较大,具体变异程度见表 1。研究表明(图 1),植物根系 N 元素与 P 元素($R^2 = 0.339, P < 0.05$)、P 元素与 N/P($R^2 = 0.266, P < 0.05$)呈显著相关关系,C 元素与其他根系生态化学计量特征未表现出显著相关性。

表 1 根系 C、N、P 化学计量特征的描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistical parameters of root C, N and P stoichiometric characteristics

指标 Index	样本数 Number of samples	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV	指标 Index	样本数 Number of samples	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV
C/(mg/g)	18	443.62	70.84	0.16	C/N	18	59.64	40.67	0.53
N/(mg/g)	18	7.44	3.59	0.48	C/P	18	418.91	991.88	0.84
P/(mg/g)	18	0.46	1.92	0.82	N/P	18	7.02	10.46	0.67

2.2 不同植物类型根系 C、N、P 化学计量特征的差异性

C、N、P 含量在不同植物类型间的变化趋势分别为盐爪爪>芦苇>甘草>柽柳>花花柴>骆驼刺、甘草>盐爪爪>骆驼刺>花花柴>柽柳>芦苇、盐爪爪>花花柴>骆驼刺>甘草>柽柳>芦苇。C 含量在不同植物间未表现出显著差异性,N 含量在甘草与芦苇、柽柳间存在显著差异($P < 0.05$),P 元素在盐爪爪与其他类型植物间存在

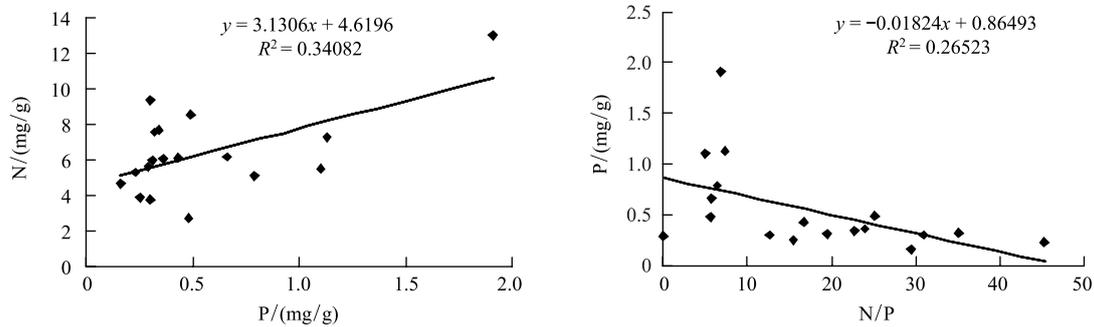


图 1 根系 C、N、P 化学计量特征的相关性

Fig.1 The relationship of stoichiometric characteristics among root C, N and P

显著差异 ($P < 0.05$), 在花花柴和怪柳与其他类型植物间也存在显著差异 ($P < 0.005$) (表 2)。

进一步分析不同植物类型 C、N、P 比的差异性可知, C/N、C/P、N/P 在不同植物类型间的变化趋势为芦苇 > 怪柳 > 花花柴 > 骆驼刺 > 盐爪爪 > 甘草, 芦苇 > 甘草 > 怪柳 > 花花柴 > 盐爪爪 > 骆驼刺, 甘草 > 骆驼刺 > 芦苇 > 怪柳 > 盐爪爪 > 花花柴。C/N 在盐爪爪与怪柳、芦苇中表现出显著差异 ($P < 0.05$), C/P 与 N/P 在芦苇与其他类型植物中均表现出显著性差异 ($P < 0.05$) (表 2)。

表 2 不同植物类型根系 C、N、P 化学计量特征的多重比较

Table 2 Multiple comparisons between different types of plant in stoichiometric characteristics of root C, N and P

指标 Index	甘草 Glycyrrhiza	芦苇 Phragmites australis	花花柴 Karelinia caspica	骆驼刺 Alhagi sparsifolia	怪柳 Tamarix chinensis	盐爪爪 Kalidium foliatum
C/(mg/g)	472.45±31.09a	506.78±74.08a	438.62±56.54a	433.32±38.21a	456.62±10.91 a	510.30±55.56a
N/(mg/g)	10.91±1.47a	4.09±0.49c	5.58±0.54ac	7.76±0.72abc	4.89±1.28bc	10.62±3.37ac
P/(mg/g)	0.37±0.11c	0.24±0.07c	0.99±0.17b	0.37±0.05c	0.30±0.13bc	1.52±0.39a
C/N	43.64±3.92bc	124.31±17.13a	78.63±5.90bc	55.86±1.30c	103.16±37.73ab	49.33±5.79c
C/P	1325.92±246.10b	2348.99±1040.41a	451.57±86.52b	117.76±200.59b	644.42±611.23b	350.45±53.41b
N/P	30.36±4.99a	19.18±8.99b	5.71±0.72a	21.11±3.88a	17.59±17.45a	7.07±0.25a

不同小写字母代表植物根系 C、N、P 含量及化学计量比在不同类型植物之间存在显著差异 ($P < 0.05$)

2.3 植物根系生态化学计量特征与土壤理化因子的 RDA

2.3.1 植物根系生态化学计量特征与土壤理化因子的 RDA 排序

对 6 种植物的生态化学计量特征与土壤理化因子进行 RDA 后, 可得出土壤含水量、电导率、C、N、P 含量这些土壤理化特征对植物根系生态化学计量特征的解释量。植物根系生态化学计量特征在第 I 轴、第 II 轴的解释量分别为 85.0% 和 3.7%, 第 III 轴与第 IV 轴的解释量之和仅为 1.6%, 且前两轴累计解释根系生态化学计量特征量为 88.7%, 对植物根系和土壤理化关系的累计解释量为 91.2%, 由此可知, 前两轴能够很好地反映植物根系与土壤理化因子的关系, 且主要由第 I 轴决定。

图 2 为对根系生态化学计量特征与土壤理化因子关系的二维排序图。实心箭头代表植物根系生态化学计量特征, 空心箭头代表土壤理化因子; 箭头连线的长短表示根系生态化学计量特征与土壤理化的关系大小, 箭头连线越长表示相关性越大, 反之越小; 箭头与排序轴的夹角表示相关性的大小, 夹角越小, 相关性越大。从图中可以看出, 在所有土壤理化因子中, 土壤含水量与电导率的箭头连线最长, 可知土壤含水量与电导率对植物根系生态化学计量特征变异起到了很好的解释。土壤含水量和植物根系 C 含量、N 含量、N/P 成反比与根系的 C/N、C/P、P 含量成正比, 其中含水量和 C/P 的相关性最大; 电导率和 N、P 含量呈正相关。土壤 C、N 含量皆与根系 C、N 含量、N/P 成正比; 土壤 P 含量与根系 P 含量成正比, 且相关性明显大于与其他根系生态化学计量特征的相关性。

表 3 为土壤理化因子影响程度大小排序,其重要性由大到小排序依次为:土壤含水量、土壤电导率、土壤 P 含量、土壤 C 含量、土壤 N 含量。其中,土壤含水量与土壤电导率对根系的影响显著 ($P < 0.05$),土壤含水量与电导率占有土壤理化因子解释量的 63% 与 57%,说明含水量与电导率是影响根系生态化学计量特征的主要因子;土壤 C、N、P 含量对其影响未达到显著水平。

3 结论与讨论

3.1 根系 C、N、P 化学计量特征

在长期自然选择过程中,植物通过优化自身资源配置以应对不同环境带来的胁迫,造成在不同环境中根系所含营养元素存在差异^[15]。通过与 Jackson^[16] 基于全球水平上的研究对比得出,塔里木河上游典型荒漠植物根系 C、N、P 含量均低于全球植物根系平均水平(表 4),这是由于塔里木河上游荒漠区土地贫瘠,土壤营养元素含量低下,植物通过自身调节将 C、N、P 含量维持在一个较低水平以达到元素的优势地位和利用效率^[17-18]。C 元素在植物中起到骨架作用,其含量与全球植物根系含量基本一致,且具有最小的变异系数,P 含量的变异系数最大,N 含量次之。C 元素在植物生命活动中表现出了较高的稳定性,可能由于 C 元素不直接参与植物的生产活动;其次是 N 元素,N 元素具有较高的内稳态系数,对外界环境变化的响应不敏感^[19];P 元素则表现出了最低的稳定性,因为土壤 P 含量差异性大,造成根系 P 含量稳定性较低。

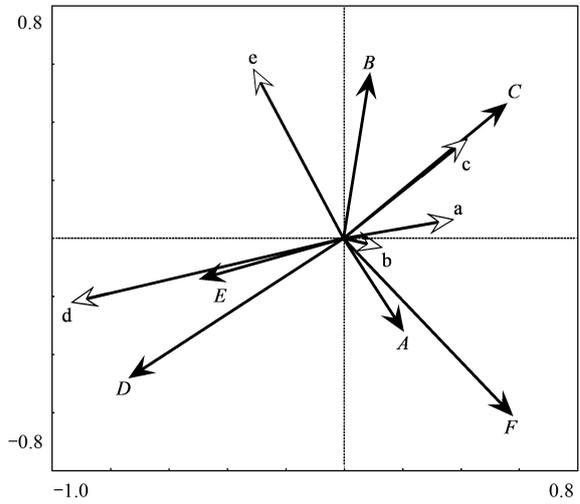


图 2 根系 C、N、P 化学计量特征与理化因子关系的冗余分析二维排序图

Fig.2 Bidimensional ordering chart of the RDA of relationships of stoichiometric characteristics of root C, N and P with physicochemical factors

A:根系碳含量 Root C;B:根系氮含量 Root N;C:根系磷含量 Root P;D:根系 C/N Root C/N;E:根系 C/P Root C/P;F:根系 N/P Root N/P;a:土壤碳含量 Soil C;b:土壤氮含量 Soil N;c:土壤磷含量 Soil P;d:土壤含水量 Soil moisture;e:土壤电导率 EC

表 3 理化土壤变量解释的重要性排序和显著性检验的结果

Table 3 Importance sequencing and Duncan test of physicochemical factors

指标 Index	重要性排序 Importance sequencing	理化因子解释量 Explained variation of various physicochemical	F	P
土壤含水量 Soil moisture	1	63	49.75	0.008
土壤电导率 EC	2	57	11.55	0.026
土壤磷含量 Soil P	3	7	11.38	0.311
土壤碳含量 Soil C	4	4	1.92	0.856
土壤氮含量 Soil N	5	1	1.08	0.950

表 4 全球范围、塔里木河上游根系化学计量特征

Table 4 Comparisons between world-wide, northern Tibet, upstream of tarim river stoichiometric characteristics

研究区域 Study area	C/(mg/g)	N/(mg/g)	P/(mg/g)	C/N	C/P	N/P
全球 Global	535.58	11.10	0.77	48.25	1158.00	24.00
本研究 This research	443.62	7.44	0.46	63.37	964.39	15.22

C/N、C/P 反映了 N、P 利用效率和植物生长速率,N/P 值则反映植物受 N 或 P 的限制情况。如表 5 所示,本研究 C/N 值远大于全球平均水平^[16]、藏北高寒区的值^[20],表明研究区荒漠生态系统具有较高的元素利用效率。C/P、N/P 值则远小于全球平均水平;另外,本研究得出的 N/P 值(15.22)与 Han^[21]有关全国平均水

平(13.5)的说法有所差异,说明在区域尺度上根系生态化学计量特征变异较大。

植物根系 C 与 N、C 与 P 含量无显著相关性,N 和 P 含量呈显著正相关关系,与基于全球尺度的研究结果一致^[22],但较于叶片 N、P 的相关性有所降低^[23-26]。表明即使在干旱缺水的荒漠区 N 与 P 元素仍然保持着较强的内在联系性,这对植物维持其内稳性有重要意义。另一方面,P 与 N/P 也表现出了显著相关性,张文彦^[26]、He^[27]等人也得出了相同的研究结果,说明干旱区植物根系的 N/P 也受到 P 元素的限制。

不同类型的荒漠植物对干旱区生态系统功能的影响存在差异,主要体现在植物生理生态等方面,而这些差异性则被认为是遗传与适应机制的体现^[28-29]。C 元素在各类型植物中未体现显著差异性,再次验证了其在植物体内的骨架作用;N 元素在甘草与芦苇、柽柳间存在显著差异($P < 0.05$);P 元素在盐爪爪与其他类型植物间存在显著差异($P < 0.05$),在花花柴和柽柳与其他类型植物间也存在显著差异($P < 0.05$);表明不同植物对营养元素的吸收有选择性。C/N 在盐爪爪与柽柳、芦苇间存在显著差异($P < 0.05$);C/P N/P 在芦苇与其他类型植物间存在显著差异($P < 0.05$);说明不同荒漠植物对养分适应策略不同,即对营养元素的利用效率及对环境的适应能力存在差异^[30]。

3.2 根系生态化学计量与土壤理化因子的关系

土壤与根系直接接触,是植物生命活动的重要场所,土壤理化特性对根系生态化学计量特征产生重大影响。研究区土壤含水量与根系 N 含量、C/P、C/N、N/P 均呈显著相关关系,与土壤 C、P 含量无显著相关关系,随土壤含水量的增加,根系 N 含量减少、N/P 值降低,C/P、C/N 均有不同程度的增加。水是干旱区限制因子,植物对水敏感,高的土壤含水量加快植物根系生物量的积累,对 N 元素有稀释作用^[31];C 元素作为植物结构元素,具有较小的变异系数,不随土壤因子变化而产生大的变异。这与有关学者对塔里木盆地荒漠区植物与水分关系的研究结论一致^[32]。贡璐^[14]认为荒漠植物根系特征与土壤含水量密切相关;李玉霖^[5]、丁小慧^[33]对中国北方植物叶片生态化学计量的研究得出相同结论。虽然以往研究多集中于植物地上部分,但本研究证实此结论在植物根系上也呈现类似规律。

土壤电导率与土壤含盐量之间存在显著正相关关系且常用于表示土壤含盐量的高低^[34]。研究区土壤电导率与植物根系 N、P 含量呈显著正相关关系,与 C/N 呈显著负相关关系,说明高的土壤含盐量促进根系对 N、P 元素的吸收,这与李修仓^[35]对干旱区植物研究得出的结论一致。已有学者对荒漠区植物与盐分的关系进行研究,得出植物生长受全盐、钠吸附比^[32]、pH^[36]不同程度的影响。但 Thevs 等^[37]在塔里木河中游对芦苇与含盐量的研究发现其与含盐量并无显著相关性,说明在区域尺度上植物所受环境因子的影响有差异。

本文应用冗余技术研究土壤含水量、电导率及土壤 C、N、P 含量对根系生态化学计量的影响,并根据其程度进行排序,这种方法的应用是对干旱区研究的有益尝试。但单独分析水、盐或营养元素对根系生态化学计量的影响是存在缺陷的,根系的生态化学计量特征受土壤理化因子的双重或多重影响的,且土壤理化因子之间也存在相互制约。研究是基于单次采样分析,使化学计量特征值有所波动,表明单次的研究不能精确地反映研究结果,多次的采样研究更为合理、科学。

参考文献 (References):

- [1] Amatangelo K L, Vitousek P M. Stoichiometry of ferns in Hawaii: implications for nutrient cycling. *Oecologia*, 2008, 157(4): 619-627.
- [2] Ågren G I. The C:N:P stoichiometry of autotrophs-theory and observations. *Ecology Letters*, 2004, 7(3): 185-191.
- [3] Knecht M F, Göransson A. Terrestrial plants require nutrients in similar proportions. *Tree Physiology*, 2004, 24(4): 447-460.
- [4] 牛得草, 李茜, 江世高, 常佩静, 傅华. 阿拉善荒漠区 6 种主要灌木植物叶片 C:N:P 化学计量比的季节变化. *植物生态学报*, 2013, 37(4): 317-325.
- [5] 李玉霖, 毛伟, 赵学勇, 张铜会. 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. *环境科学*, 2010, 31(8): 1716-1725.
- [6] 郭畏, 何兴东, 周启星. 生态系统氮磷比化学计量特征研究进展. *中国沙漠*, 2010, 30(2): 296-302.
- [7] 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.
- [8] 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. *植物生态学报*, 2014, 38(9): 929-940.

- [9] 李从娟, 雷加强, 徐新文, 唐清亮, 高培, 王永东. 塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤 C N P 的化学计量特征. 生态学报, 2013, 33(18): 5760-5767.
- [10] 许振柱, 周广胜. 全球变化下植物的碳氮关系及其环境调节研究进展——从分子到生态系统. 植物生态学报, 2007, 31(4): 738-747.
- [11] 徐露燕, 田大伦, 王光军, 罗赵慧, 叶生晶, 梁贵. 湘潭锰矿采树叶片和土壤 N、P 化学计量特征. 生态学报, 2014, 34(9): 2316-2322.
- [12] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 安韶山. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征. 生态学报, 2013, 33(15): 4674-4682.
- [13] Niklas K J. Plant allometry, leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry, and interspecific trends in annual growth rates. *Annals of Botany*, 2006, 97(2): 155-163.
- [14] 贡璐, 朱美玲, 塔西甫拉提·特依拜, 张雪妮, 韩丽, 解丽娜. 塔里木盆地南缘旱生芦苇生态特征与水盐因子关系. 生态学报, 2014, 34(10): 2509-2518.
- [15] Cao Y B, Wang B T, Wei T T, Ma H. Ecological stoichiometric characteristics and element reserves of three stands in a closed forest on the Chinese loess plateau. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188: 80.
- [16] Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997, 94(14): 7362-7366.
- [17] Helton A M, Ardón M, Bernhardt E S. Thermodynamic constraints on the utility of ecological stoichiometry for explaining global biogeochemical patterns. *Ecology Letters*, 2015, 18(10): 1049-1056.
- [18] Yamamichi M, Meunier C L, Peace A, Prater C, Rúa M A. Rapid evolution of a consumer stoichiometric trait destabilizes consumer-producer dynamics. *Oikos*, 2015, 124(7): 960-969.
- [19] Yu Q, Elser J J, He N P, Wu H H, Chen Q S, Zhang G M, Han X G. Stoichiometric homeostasis of vascular plants in the Inner Mongolia grassland. *Oecologia*, 2011, 166(1): 1-10.
- [20] 洪江涛, 吴建波, 王小丹. 藏北高寒草原紫花针茅根系碳氮磷生态化学计量学特征. 山地学报, 2014, 32(4): 467-474.
- [21] Han W X, Fang J Y, Guo D L, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377-385.
- [22] Yuan Z Y, Chen H Y H, Reich P B. Global-scale latitudinal patterns of plant fine-root nitrogen and phosphorus. *Nature Communications*, 2011, 2: 344.
- [23] 樊江文, 张良侠, 张文彦, 钟华平. 中国草地样带植物根系 N、P 元素特征及其与地理气候因子的关系. 草业学报, 2014, 23(5): 69-76.
- [24] Corman J R, Moody E K, Elser J J. Stoichiometric impact of calcium carbonate deposition on nitrogen and phosphorus supplies in three montane streams. *Biogeochemistry*, 2015, 126(3): 285-300.
- [25] Danger M, Gessner M O, Bärlocher F. Ecological stoichiometry of aquatic fungi: current knowledge and perspectives. *Fungal Ecology*, 2016, 19: 100-111.
- [26] 张文彦, 樊江文, 钟华平, 胡中民, 宋璐璐, 王宁. 中国典型草原优势植物功能群氮磷化学计量学特征研究. 草地学报, 2010, 18(4): 503-509.
- [27] He J S, Wang L, Flynn D F B, Wang X P, Ma W H, Fang J Y. Leaf nitrogen: phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes. *Oecologia*, 2008, 155(2): 301-310.
- [28] 汪涛, 杨元合, 马文红. 中国土壤磷库的大小、分布及其影响因素. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 44(6): 945-952.
- [29] Sterck F J, Poorter L, Schieving F. Leaf traits determine the growth-survival trade-off across rain forest tree species. *The American Naturalist*, 2006, 167(5): 758-765.
- [30] Wright I J, Reich P B, Westoby M, Ackerly D D, Baruch Z, Bongers F, Cavender-Bares J, Chapin T, Cornelissen J H C, Diemer M, Flexas J, Garnier E, Groom P K, Gulias J, Hikosaka K, Lamont B B, Lee T, Lee W, Lusk C, Midgley J J, Navas M L, Nünemets Ü, Oleksyn J, Osada N, Poorter H, Poot P, Prior L, Pyankov V I, Roumet C, Thomas S C, Tjoelker M G, Veneklaas E J, Villar R. The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 2004, 428(6985): 821-827.
- [31] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [32] Hao X M, Li W H, Huang X, Zhu C G, Ma J X. Assessment of the groundwater threshold of desert riparian forest vegetation along the middle and lower reaches of the Tarim River, China. *Hydrological Processes*, 2010, 24(2): 178-186.
- [33] 丁小慧, 罗淑政, 刘金巍, 李魁, 刘国华. 呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化. 生态学报, 2012, 32(11): 3467-3476.
- [34] 彭杰, 王家强, 向红英, 腾洪芬, 柳维扬, 迟春明, 牛建龙, 郭燕, 史舟. 土壤含盐量与电导率的高光谱反演精度对比研究. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(2): 510-514.
- [35] 李修仓, 胡顺军, 李岳坦, 李雪梅. 干旱区旱生芦苇根系分布及土壤水分动态. 草业报, 2008, 17(2): 97-101.
- [36] 赛迪古丽·哈西木, 海米提·依米提. 于田绿洲土壤 pH 值的空间异质性及其对芦苇生长的影响研究——以喀尔克乡为例. 新疆师范大学学报: 自然科学版, 2012, 31(2): 9-15.
- [37] Thevs N, Zerbe S, Gahlert F, Mijit M, Succow M. Productivity of reed (*Phragmites australis* Trin. ex Steud.) in continental-arid NW China in relation to soil, groundwater, and land-use. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 2007, 81(1): 62-68.