

# 两种荒漠豆科植物化学计量特征与 生境土壤因子的关系

依里帆·艾克拜尔江<sup>1,2,3,4</sup>, 李 进<sup>1,2,3,4</sup>, 庄伟伟<sup>1,2,3,4\*</sup>

(1 新疆师范大学 生命科学学院, 乌鲁木齐 830054; 2 中亚区域有害生物联合控制国际研究中心, 乌鲁木齐 830054; 3 干旱区植物逆境生物学实验室, 乌鲁木齐 830054; 4 新疆特殊环境物种保护与调控生物学实验室, 乌鲁木齐 830054)

**摘 要:** 豆科植物是荒漠等干旱生态系统的重要先锋物种, 也是生态系统中有效氮的主要来源。为了明确荒漠豆科植物与生境土壤因子之间的关系, 该研究以古尔班通古特沙漠广泛分布的荒漠豆科植物弯花黄芪(*Astragalus flexus*)、镰荚黄芪(*Astragalus arpilobus*)为对象, 测定不同土壤深度(0~5、5~10、10~15 cm)的理化性质, 比较分析 2 种荒漠豆科植物化学计量特征与土壤因子的关系。结果表明:(1)弯花黄芪碳(C)、氮(N)、磷(P)含量分别为 373.35、25.66、1.03 mg·g<sup>-1</sup>, 高于镰荚黄芪的 331.53、19.59、0.66 mg·g<sup>-1</sup>, 且二者的 N、P 含量均差异显著( $P < 0.05$ );弯花黄芪的 C:P、N:P 分别为 374.38、25.75, 均极显著高于镰荚黄芪的 166.09、10.12( $P < 0.01$ ), 而弯花黄芪的 C:N(14.62)低于镰荚黄芪(16.99), 两种植物的 C 和 C:N 均无显著差异。(2)豆科植物生境土壤在 0~5 cm 土层的有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量最高, 且随土层的加深逐渐减少;土壤化学计量比 SOC:TN、SOC:TP 均随土层加深逐渐增大, 而 TN:TP 值随土层加深逐渐减少;较低的 N 含量及 TN:TP 显示该区域土壤属于 N 素缺乏类型。(3)2 种荒漠豆科植物与各层次土壤化学计量特征的相关性无一致规律。其中, 弯花黄芪立地 0~10 cm 土层的 TN 与 N:P 间呈负相关关系, TP 与 P 间呈极显著负相关关系, 而 TP 与 C:N 间呈正相关关系, SOC:TN 与 N:P 间呈极显著正相关关系;在 10~15 cm 土层中, SOC:TN 与 N:P 间呈正相关关系。镰荚黄芪中仅 P 含量与其立地 0~5 cm 土层的 SOC:TP 具有极显著正相关关系, 而大部分化学计量特征间未显示出相关性。(4)弯花黄芪的植物化学计量指标 P 含量与 5~10 cm 土层的电导率(EC)间呈极显著正相关关系, N 含量与 10~15 cm 土层的速效钾(AK)间呈正相关关系;而镰荚黄芪 N、AP 与 N:P 与 0~5 cm 土层的速效磷(AP)间均呈极显著负相关关系, 与其他土层未出现相关关系。研究认为, 古尔班通古特沙漠土壤 N 含量以及 TN:TP 较低, 土壤 N 元素贫瘠, 且该区豆科植物立地土壤养分含量总体偏低;该区弯花黄芪生长的主要限制元素为 P, 而镰荚黄芪生长的主要限制元素为 N 和 P;植物化学计量特征并非全部由土壤养分特征直接决定, 其明显的种间差异显示植物自身遗传特性在土壤-植物计量特征耦合关系的重要性。

**关键词:** 生态化学计量学; 豆科植物; 相关性; 土壤因子; 古尔班通古特沙漠

中图分类号: Q945.12; Q948.113

文献标志码: A

## Relationship between Habitat Soil Factor and Stoichiometric Characteristics of Two Kinds of Desert Leguminous Plants

ERFAN AKBERJAN<sup>1,2,3,4</sup>, LI Jin<sup>1,2,3,4</sup>, ZHUANG Weiwei<sup>1,2,3,4\*</sup>

(1 College of Life Science, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2 International Research Center for the Collaborative Containment of Cross Border Pests in Central Asia, Urumqi 830054, China; 3 Key Laboratory of Plant Stress Biology in Arid Land, Urumqi 830054, China; 4 Xinjiang Key Laboratory of Special Species Conservation and Regulatory Biology, Urumqi 830054, China)

收稿日期: 2022-01-10; 修改稿收到日期: 2022-07-08

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2021D01A123)

作者简介: 依里帆·艾克拜尔江(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事植物生理生态方面的研究。E-mail: 2293323651@qq.com

\* 通信作者: 庄伟伟, 副教授, 博士生导师, 主要从事干旱区植物研究。E-mail: zww8611@sina.com

**Abstract:** Legumes are important pioneer species in arid ecosystems such as deserts, and are also the main source of available nitrogen in ecosystems. In order to clarify the relationship between desert legumes and habitat soil factors, this study took *Astragalus flexus* and *Astragalus arpilobus* as materials, which are widely distributed in the Gurbantunggut Desert. The physicochemical properties of different soil depths (0–5, 5–10, 10–15 cm) were measured, and the relationship between the stoichiometric characteristics and soil factors of the two desert legumes was compared and analyzed. The results showed that: (1) the carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) contents of *A. flexus* were 373.35, 25.66 and 1.03 mg · g<sup>-1</sup>, respectively, which were higher than those of *A. arpilobus*, 331.53, 19.59, and 0.66 mg · g<sup>-1</sup>, and the contents of N and P were significantly different ( $P < 0.05$ ); the C : P and N : P of *A. flexus* were 374.38 and 25.75, respectively, which were significantly higher than those of *A. arpilobus*, 166.09 and 10.12 ( $P < 0.01$ ), while the C : N of *A. flexus* (14.62) was lower than that of *A. arpilobus* (16.99), but there was no significant difference in C and C : N between the two plants. (2) The organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) contents of the legume habitat soil in the 0–5 cm soil layer were the highest, and gradually decreased with the deepening of the soil layer; the soil stoichiometric ratio SOC : TN and SOC : TP increased gradually with the deepening of the soil layer, while the value of TN : TP gradually decreased with the deepening of the soil layer; the lower N content and TN : TP indicated that the soil in this area belonged to the type of N deficiency. (3) The correlation between the two desert legumes and the soil stoichiometric characteristics at different levels was not consistent, among which: there was a negative correlation between TN and N : P, and a very significant negative correlation between TP and P. And there was a positive correlation between TP and C : N, and a very significant positive correlation between SOC : TN and N : P in 0–10 cm soil layer of *A. flexus*. In soil layers 10–15 cm, there was a positive correlation between SOC : TN and N : P. Only P in *A. arpilobus* had a very significant positive correlation with the SOC : TP in the 0–5 cm soil layer, while most of the stoichiometric characteristics showed no correlation. (4) There was a very positive correlation between the phytostoiichiometric index P of *A. flexus* and the electrical conductivity (EC) in the 5–10 cm soil layer, there was a positive correlation between the available potassium (AK) and N in the 10–15 cm soil layer. The *A. arpilobus* was negatively correlated with available phosphorus (AP) and N, AP and N : P in 0–5 cm soil layer, but not with other soil layers. The research showed that the soil N content and TN : TP ratio in the Gurbantunggut Desert were relatively low, the soil N element was poor, and the nutrient content of the leguminous soil in this area was generally low; the main limiting element for the growth of *A. flexus* in this area was P, The main limiting elements for the growth of *A. arpilobus* were N and P; and the phytochemistry characteristics were not directly determined by soil nutrient characteristics, the significant interspecific differences showed the importance of plant genetic traits in the coupling relationship between soil and plant quantitative traits.

**Key words:** eco-stoichiometry; Leguminous plants; correlation; soil factor; Gurbantunggut desert

植物及土壤的碳(C)、氮(N)、磷(P)等元素化学计量研究是近几年来研究热点,对于理解生态系统元素的生物地球化学循环有重要价值。生态化学计量学是一门以生态学化学计量理论和代谢理论为基础,研究亚细胞到生态系统尺度生态相互作用中的能量平衡和多种化学元素的新学科,也是一门包括物理学、生物学和化学等学科基本原理的综合科学<sup>[1]</sup>。在生态学研究领域中,化学计量特征为研究生物体的主要元素组成提供了一种新途径。该主题已在植物个体生长、种群动态、群落演替、限制元素测定、生态系统养分循环和生态系统恢复的各个方面得到广泛的学术研究<sup>[2-3]</sup>。该科学理论还协助深

入认识植物-土壤相互作用的养分调控机制,揭示生态系统中各营养元素之间的相互作用与平衡制约关系<sup>[4]</sup>。目前生态化学计量学的研究主要集中在植物或植物组织上,关于植物-土壤因子关系的研究还鲜见报道<sup>[5]</sup>。

全世界的豆科植物种类约 741 属 17 800 种, 分布全球,中国大概有 184 属 1 234 种,各省区均有分布<sup>[6]</sup>。在古尔班通古特沙漠现有豆科 9 属 12 种,占整个沙漠植被的 7.69%<sup>[7]</sup>。豆科植物是荒漠等干旱生态系统中重要的先锋物种,也是为生态系统提供有效氮素的中心,在这一区域具有很高地位。豆科植物的主要特点为具有较强的预防干旱、耐贫瘠

的能力,适应性强,生长范围广而迅速、具有较高的应用价值,比如低纤维、高蛋白、饲喂价值高,一般是优良的牧草<sup>[8]</sup>,不少的豆科植物还能用于绿肥、蜜源、薪炭、药材等<sup>[9]</sup>。更重要的是,豆科植物由于其独有的固氮功能,除了能够通过凋落物的快速分解而加速养分循环,优化土壤养分状况,提升土壤有机碳储量外,还能为其他植物提供氮素营养<sup>[10-11]</sup>。有报道显示在豆科与禾本科混播草地中,豆科植物固氮最多可达到草地上部氮积累总量的46%<sup>[12]</sup>。土壤状况的改善给其他植物提供更多的生态位,对保护物种多样性和增加资源互补性是有利的<sup>[13]</sup>。庞大的根系也是豆科植物的普遍特征,大部分豆科植物的根系分布可深至5 m,这不仅能够增加群体的水分利用和养分吸收效率,还能提高植被抗风、固土的作用<sup>[14]</sup>。阐明豆科植物在荒漠系统中的重要价值,保护和利用豆科植物资源对发展荒漠经济和生态有重要意义。

豆科植物是生态系统中有效氮的主要来源。保护和利用荒漠豆科植物资源需要对豆科植物的分布和建群规律有充分的认知,了解豆科植物化学计量特征、豆科物种与土壤因子关系等,都是有效利用豆科植物资源的前提。国外早有学者在局域内对天然草地豆科植物分布特征开展了研究。据统计,地球上每年由豆科固定的氮素为 $8 \times 10^{10}$  kg,约占全球生物固氮总量的40%,相当于全世界工业合成氮肥量的2倍<sup>[14]</sup>。豆科植物所固定的氮还可以对下茬植物产生有益影响,据报道第一茬禾谷类作物中有 $280 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的氮是直接从上茬豆科植物中得到的,第二茬为 $110 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[15]</sup>。王卫卫等<sup>[16]</sup>研究了白龙江流域豆科植物的固氮资源,认为这些豆科植物经过长期的自然选择,逐步适应了该地区的生态环境,可以被根瘤菌侵染且具有固氮酶活性。类似的豆科植物资源在草原生态系统中还很多,深入研究和开发利用这些生物固氮自然资源,将会使豆科植物在自然生态系统的改良土壤、防止水土流失、涵养下游水源等方面发挥更大作用。与国外比较,国内对豆科植物分布规律的研究,尤其是温带荒漠地区豆科植物研究偏少。

古尔班通古特沙漠属于西北地区典型温带荒漠生态系统。此生态系统特征为降水量少、土壤贫瘠、草本植物生活型多样、种类丰富,形成了独特的景观。由于特殊的地理位置、水分、气候、土壤理化性质等多种因素的限制,以大部分短命植物占绝对优势,成为该区的主要植被<sup>[17]</sup>。尽管陶岩等<sup>[18]</sup>研究

了该区域5种豆科植物总体的空间分布格局,但本研究并未在群落水平上具体揭示每种豆科植物分布规律,包括土壤理化因子的对应关系。而这些信息仅仅是天然草地保护、引种利用豆科植物的关键背景。基于此,本研究通过野外调查实验,针对本区内分布较广、数量较多、具有较高的生态位的两种代表性豆科植物,即多年生类短命豆科植物弯花黄芪(*Astragalus flexus*)和一年生短命豆科植物镰荚黄芪(*Astragalus arpilobus*),以及3个不同层次(0~5、5~10、10~15 cm)的立地土壤作为研究对象,比较分析不同生活型荒漠豆科植物及其土壤生态化学计量特征,来揭示两种豆科植物与土壤因子之间的关系。此项基础研究对古尔班通古特沙漠的治理及了解豆科植物与土壤关系提供了理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于新疆天山北部中央的典型温带荒漠古尔班通古特沙漠,沙漠位置 $44^{\circ}15' \sim 46^{\circ}50' \text{ N}$ 、 $84^{\circ}50' \sim 91^{\circ}20' \text{ E}$ ,总面积约为4.88万 $\text{km}^2$ ,是中国面积第二大的固定、半固定沙漠<sup>[19]</sup>。研究样地位于中国科学院新疆阜康荒漠试验站在古尔班通古特沙漠的大型永久样地中。该区属于典型中温带大陆性干旱气候,夏季燥热,冬季寒冷,常受西风带控制。全年平均气温 $5 \sim 5.7^{\circ} \text{ C}$ 之间,昼夜温差 $10 \sim 30^{\circ} \text{ C}$ ,极端最高气温超过 $40^{\circ} \text{ C}$ ,最低气温 $-31^{\circ} \text{ C}$ <sup>[20]</sup>。全年蒸发量为 $2000 \sim 2800 \text{ mm}$ ,降水主要集中于5~9月,降水量低于 $220 \text{ mm}$ ,沙漠腹地低至 $70 \sim 100 \text{ mm}$ <sup>[21]</sup>,为此影响春夏两季短命植物的旺盛生长。

沙漠地貌具有多种沙垄,多以树枝状沙垄为主,可划分为丘间地、垄中和垄顶等基本微地貌,形成了特殊生境<sup>[22]</sup>。植物区系成分处于中亚向亚洲中部荒漠的过渡。沙漠内植物种类较丰富,可达百余种。事实上,豆科植物在准噶尔荒漠生态系统的资源价值远比其数量更重要。比如广泛分布的锦鸡儿属、黄芪属植物具有发达的根系,可以发挥良好的环境效应。主要植被有白梭梭(*Haloxyylon persicum*)、淡枝沙拐枣(*Calligonum leucocladum*)、尖喙牻牛儿苗(*Erodium oxyrhynchum*)、假狼紫草(*Nonea caspica*)、碱蓬(*Suaeda glauca*)、弯花黄芪(*Astragalus flexus*)和镰荚黄芪(*Astragalus arpilobus*)等。

### 1.2 样品的采集与处理

为避免降水对土样采集造成影响,选择基本没有降水发生的夏季(至少保证采样前后各18 d无

雨)进行采样。于2021年5月进行植物样和土样的采集。首先选取两种植物分布的荒漠区,根据两类植物分布特点,各分别设置一个 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的大样带。每个样带随机分为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的小样方若干,进行植物取样。采用完全挖掘法获取植株,在每个小样方中随机采集同一物种的豆科植物6株作为1个重复,每一物种做了4次重复。植物采集完后立刻装入密封袋放入冷藏箱带回实验室。在实验室,将采集的植物样品用清水冲洗,去掉灰尘及泥沙等杂物,用去离子水冲洗3遍,于烘箱 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青 $20\text{ min}$ ,随后 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重,最后使用球磨仪(MITR-YXQM-0.4L, MITR, 长沙)磨成粉末后过100目筛(孔径 $0.15\text{ mm}$ ),待测。该区域土壤为风沙土,土壤用四分法<sup>[23]</sup>进行3个不同土层( $0\sim 5$ 、 $5\sim 10$ 、 $10\sim 15\text{ cm}$ )的采集,不同土层土壤样品指标进行3次重复。土壤样品采样时,要严格清除土壤表面的小石头、植物凋落物等杂质,取样后于阴凉处自然风干 $48\text{ h}$ ,过100目筛子除去杂质,用精度为 $0.001\text{ g}$ 的天平称取 $100\text{ g}$ 土样装袋待测。

### 1.3 植物和土壤营养元素的测定

植物全碳(C)和土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾容量法,植物和土壤全氮(TN)与全磷(TP)分别用凯氏定氮法与钼锑抗比色法测定。土壤有机质

(SOM)采用重铬酸钾容量法,速效钾(AK)采用醋酸铵-火焰光度计法,速效磷(AP)采用碳酸氢钠法,酸碱度(pH)以土水比 $1:5$ 的悬浊液测定。土壤电导率(EC)( $\mu\text{m} \cdot \text{cm}^{-1}$ )采用电导率仪(DDS-307,上海仪电科学仪器股份有限公司)测定;具体参考《土壤农化分析》中方法<sup>[24]</sup>。

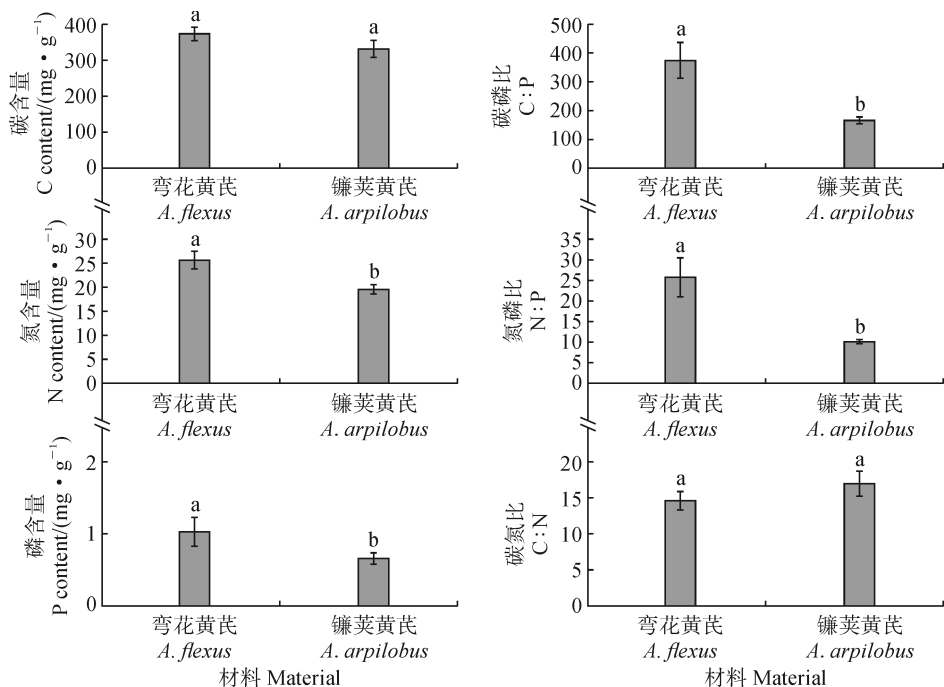
### 1.4 数据分析

首先对2种荒漠豆科植物及不同土层土壤的C、N、P含量,C:N、C:P和N:P进行正态检验,再用Levene's test检验方差齐性后,对以上指标进行单因素方差分析(One-way ANOVA)。植物-土壤化学计量及土壤理化因子采用Pearson方法进行相关性分析。常规数据整理用Excel 2021软件,数据分析及作图分别在SPSS 23.0和Origin 2021软件中完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 2种荒漠豆科植物C、N、P含量及化学计量比特征

据图1可以看出,弯花黄芪C( $373.35\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )、N( $25.66\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )、P( $1.03\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )含量均高于镰茭黄芪C( $331.53\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )、N( $19.59\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )、P( $0.66\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )含量;弯花黄芪化学计量比C:P( $374.38$ )、N:P( $25.75$ )比值也均高于镰茭黄芪C:P( $166.09$ )、N:P( $10.12$ )比值,而弯花黄芪



不同小写字母表示两种植物之间存在显著差异( $P < 0.05$ )

图1 2种荒漠豆科植物C、N、P的含量及化学计量比

Different nonnal letters indicate significant difference between the two plants ( $P < 0.05$ )

Fig. 1 The contents of C, N, P and stoichiometric ratios in two desert leguminous plants

C : N(14.62)比值稍低于镰荚黄芪 C : N(16.99)比值。两种植物间除 C、C : N 差异不显著外,其余均存在显著差异。

## 2.2 2 种植物生境土壤 C、N、P 含量与化学计量比分析

由表 1 可知,豆科植物不同土层的生境土壤养分含量及变异系数有所不同。在 0~5、5~10 和 10~15 cm 土层,土壤的 SOC、TN、TP 含量随着土壤深度均逐渐减少。0~15 cm 土层中,土壤 SOC、TN、TP 的平均含量分别为 0.49、0.11、0.39 mg · g<sup>-1</sup>,化学计量比 SOC : TN、SOC : TP、TN : TP 比值分别为 4.78、1.28、0.27。SOC : TN、SOC :

TP 随土层深度加深逐渐增大,而 TN : TP 随土层深度加深逐渐减少。

变异系数是衡量各观测值变异程度的另一个重要统计量,不同土层的元素含量及比值的变异系数大小表示稳定性强弱。其中,SOC 变异系数随着土壤深度加深明显逐渐减少,TN、SOC : TN 变异系数随着土壤深度加深明显逐渐增大。从不同土层的变异系数来看,SOC 的变异系数在 0~5 cm 土层最大(12.96%);SOC : TP、TN : TP 和 TP 的变异系数均在 5~10 cm 土层中最大,分别为 36.80%、35.71%、35.14%;TN 和 SOC : TN 的变异系数在 10~15 cm 土层中最大,分别为 40.00%、37.96%。

表 1 不同土层荒漠豆科植物生境土壤 C、N、P 含量及化学计量比的统计学参数

Table 1 The C, N, P contents and the statistical parameters of stoichiometric ratios of different soil desert leguminous plant habitat soil

指标 Index	土层 Soil depth/cm	平均值±标准差 Mean±SD/(mg · g <sup>-1</sup> )	极差 Range	最小值 Minimum	最大值 Maximum	变异系数 CV/%
有机碳 SOC	0~5	0.54±0.07a	0.14	0.49	0.63	12.96
	5~10	0.43±0.03b	0.05	0.40	0.46	6.98
	10~15	0.42±0.02b	0.04	0.41	0.45	4.76
	0~15	0.49±0.02	0.04	0.46	0.50	4.08
全氮 TN	0~5	0.17±0.03a	0.07	0.13	0.20	17.65
	5~10	0.10±0.03b	0.07	0.07	0.14	30.00
	10~15	0.05±0.02c	0.03	0.03	0.06	40.00
	0~15	0.11±0.03	0.05	0.08	0.13	27.27
全磷 TP	0~5	0.48±0.10a	0.19	0.40	0.58	20.83
	5~10	0.37±0.13a	0.26	0.24	0.50	35.14
	10~15	0.32±0.10a	0.20	0.21	0.41	31.25
	0~15	0.39±0.08	0.13	0.30	0.43	20.51
碳氮比 SOC : TN	0~5	3.20±0.43b	0.84	2.83	3.67	13.44
	5~10	4.53±1.46b	2.87	3.24	6.11	32.23
	10~15	11.75±4.46a	8.90	7.50	16.40	37.96
	0~15	4.78±1.35	2.48	3.85	6.33	28.24
碳磷比 SOC : TP	0~5	1.15±0.12a	0.21	1.08	1.29	10.43
	5~10	1.25±0.46a	0.91	0.81	1.72	36.80
	10~15	1.42±0.44a	0.83	1.10	1.93	30.99
	0~15	1.28±0.30	0.57	1.06	1.63	23.43
氮磷比 TN : TP	0~5	0.37±0.09a	0.17	0.29	0.46	24.32
	5~10	0.28±0.10ab	0.19	0.19	0.38	35.71
	10~15	0.13±0.04b	0.07	0.10	0.17	30.77
	0~15	0.27±0.02	0.04	0.26	0.30	7.41

注:同列不同字母表示不同土层在同一指标间差异显著( $P < 0.05$ ),下同

Note: Different letters in the same column indicate that different soil depth have significant differences in the same index ( $P < 0.05$ ), the same as below

在 0~15 cm 土层,土壤各元素及元素计量比变异系数大小表现为: $SOC : TN(28.24\%) > TN(27.27\%) > SOC : TP(23.59\%) > TP(20.51\%) > TN : TP(7.41\%) > SOC(4.08\%)$ 。

### 2.3 2 种荒漠豆科植物与土壤化学计量特征的相关关系分析

由表 3 可知,2 种荒漠豆科植物与各层次土壤化学计量特征的相关性无一致规律。其中,在 0~5 cm 土层中,弯花黄芪的 C : N 与土壤 TP 呈显著正相关( $P < 0.05$ ),其 N : P 与土壤 TN 呈显著负相关( $P < 0.05$ );镰荚黄芪的 P 与土壤的 SOC : TP 呈极显著正相关( $P < 0.01$ );两种植物其余指标与该土层各指标均未表现出显著相关性。在 5~10 cm 土层中,弯花黄芪的 P 与土壤的 SOC : TP 显著正相关,P 与土壤 TP 呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),其 N : P 与土壤的 SOC : TN 呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。在 10~15 cm 的土层中,弯花黄芪的 N : P 与土壤的 SOC : TN 呈显著正相关( $P < 0.05$ )。镰荚黄芪各指标在 5~10 cm、10~15 cm 土层均未

表现出显著相关性,这可能因为镰荚黄芪属于一年生短命植物而根系不太发达。各土层土壤与两种植物化学计量相关性强度表现为表层土壤(0~5 cm)较大且显著正相关多于显著负相关,说明不同深度土壤对荒漠豆科植物的促进及营养提供含量不同。

### 2.4 2 种荒漠豆科植物生境土壤养分及理化因子分析

据表 2 可知,不同土层的土壤因子和养分含量及其变异系数有所不同。土壤的 AP、AK、SOM 含量均在 0~5 cm 土层最高,分别达到 17.93、51.80 和 6.49  $mg \cdot kg^{-1}$ ,且随土层深度加深逐渐减少。土壤 pH 和 EC 均在 0~5 cm 含量最低,分别是 8.24、1.25  $\mu m \cdot cm^{-1}$ ,且随土层深度加深逐渐增大。0~15 cm 土层土壤 AP、AK、SOM 的平均含量分别为 14.39、38.84  $mg \cdot g^{-1}$  和 4.03  $mg \cdot kg^{-1}$ 。从不同土层的变异系数来看,AP 变异系数在 10~15 cm 土层的最大(34.78%);SOM、EC 的变异系数在 5~10 cm 土层中最大,分别为 26.90%、10.24%;AK 的变异系数在 0~5 cm 土层中最大,达到 22.37%;

表 2 荒漠豆科植物不同土层生境土壤因子统计学参数

Table 2 Statistical parameter of habitat soil factors in different soil depth from desert legumeneous plants

指标 Index	土层 Soil depth/cm	平均值+标准差 Mean±SD	极差 Range	最小值 Minimum	最大值 Maximum	变异系数 CV/%
速效磷 AP/( $mg \cdot kg^{-1}$ )	0~5	17.93±2.49a	4.67	15.09	19.76	13.89
	5~10	13.96±3.90a	7.80	10.07	17.87	27.94
	10~15	11.30±3.93b	7.85	7.53	15.38	34.78
	0~15	14.39±2.64	4.94	12.45	17.39	18.35
速效钾 AK/( $mg \cdot kg^{-1}$ )	0~5	51.80±11.59a	22.8	39.20	62.00	22.37
	5~10	40.33±8.73b	17.20	32.60	49.80	21.65
	10~15	24.40±4.52b	8.20	21.40	29.60	18.52
	0~15	38.84±7.01	13.60	31.07	44.67	18.05
有机质 SOM/( $mg \cdot kg^{-1}$ )	0~5	6.49±1.25a	2.50	5.27	7.77	19.26
	5~10	3.68±0.99b	1.96	2.80	4.76	26.90
	10~15	1.91±0.40c	0.77	1.59	2.36	20.94
	0~15	4.03±0.71	1.41	3.29	4.70	17.62
电导率 EC/( $\mu m \cdot cm^{-1}$ )	0~5	1.25±0.03c	0.05	1.23	1.28	2.40
	5~10	1.27±0.13b	0.27	1.14	1.41	10.24
	10~15	1.45±0.10a	0.19	1.34	1.53	6.90
	0~15	1.33±0.06	0.10	1.29	1.39	4.51
酸碱度 pH	0~5	8.24±0.04c	0.07	8.20	8.27	0.49
	5~10	8.30±0.05b	0.09	8.25	8.34	0.60
	10~15	8.39±0.05a	0.09	8.34	8.43	0.60
	0~15	8.31±0.04	0.09	8.26	8.35	0.48

表 3 不同植物不同土层土壤 C、N、P 及化学计量比相关性分析

Table 3 Correlation analysis of C, N, P contents and stoichiometric ratios of different plants and soil layers

物种 Species	土层深度 Soil depth /cm	指标 Index	有机碳 SOC	全氮 TN	全磷 TP	碳氮比 SOC : TN	碳磷比 SOC : TP	氮磷比 TN : TP
弯花黄芪 <i>Astragalus flexus</i>	0~5	碳 C	-0.991	-0.018	0.381	-0.276	-0.528	-0.610
		氮 N	0.358	-0.969	-0.988	0.999	0.949	-0.629
		磷 P	0.866	-0.596	-0.866	0.805	0.936	0.000
		碳氮比 C : N	-0.533	0.902	<b>0.999*</b>	-0.989	-0.992	0.467
		碳磷比 C : P	-0.967	0.365	0.705	-0.622	-0.812	-0.262
		氮磷比 N : P	0.153	<b>-0.999*</b>	-0.932	0.967	0.860	-0.779
	5~10	碳 C	-0.726	-0.367	0.792	-0.041	-0.756	-0.913
		氮 N	-0.501	-0.820	-0.777	0.981	0.812	-0.186
		磷 P	0.156	-0.277	<b>-1.000**</b>	0.642	<b>0.998*</b>	0.473
		碳氮比 C : N	0.323	0.694	0.884	-0.926	-0.910	-0.008
		碳磷比 C : P	-0.409	0.016	0.965	-0.419	-0.949	-0.688
		氮磷比 N : P	-0.672	-0.922	-0.627	<b>1.000**</b>	0.670	-0.390
	10~15	碳 C	0.836	-0.317	0.676	0.056	-0.522	-0.890
		氮 N	0.340	-0.849	-0.873	0.958	0.951	-0.237
		磷 P	-0.327	-0.327	-0.985	0.565	0.934	0.427
		碳氮比 C : N	-0.151	0.730	0.951	-0.885	-0.993	0.044
		碳磷比 C : P	0.563	0.069	0.906	-0.329	-0.808	-0.649
		氮磷比 N : P	0.531	-0.941	-0.751	<b>0.997*</b>	0.864	-0.437
镰荚黄芪 <i>Astragalus arpilobus</i>	0~5	碳 C	-0.981	-0.674	-0.979	0.125	0.555	0.231
		氮 N	-0.226	0.395	-0.591	-0.852	0.987	0.982
		磷 P	-0.381	0.240	-0.715	-0.756	<b>1.000**</b>	0.938
		碳氮比 C : N	-0.755	-0.997	-0.435	0.861	-0.319	-0.628
		碳磷比 C : P	-0.980	-0.672	-0.979	0.122	0.558	0.234
		氮磷比 N : P	-0.251	0.371	-0.612	-0.838	0.991	0.976
	5~10	碳 C	-0.996	-0.941	0.065	0.724	-0.008	-0.910
		氮 N	-0.494	-0.079	0.936	-0.330	-0.914	-0.753
		磷 P	-0.629	-0.240	0.866	-0.172	-0.836	-0.850
		碳氮比 C : N	-0.537	-0.844	-0.750	0.989	0.786	-0.228
		碳磷比 C : P	-0.996	-0.940	0.068	0.721	-0.011	-0.911
		氮磷比 N : P	-0.516	-0.105	0.926	-0.305	-0.903	-0.771
	10~15	碳 C	0.964	-0.922	-0.106	0.787	0.296	-0.930
		氮 N	0.639	-0.027	0.862	-0.238	-0.748	-0.718
		磷 P	0.756	-0.189	0.768	-0.076	-0.630	-0.822
		碳氮比 C : N	0.380	-0.871	-0.852	0.969	0.937	-0.278
		碳磷比 C : P	0.965	-0.920	-0.103	0.785	0.293	-0.931
		氮磷比 N : P	0.659	-0.053	0.848	-0.212	-0.730	-0.736

注: \* 表示指标间相关性显著( $P < 0.05$ ); \*\* 表示指标间相关性极显著( $P < 0.01$ ), 均加粗, 下同

Note: \* means the correlation significant between indicators at 0.05 level; \*\* means the correlation significant between indicators at 0.01 level, with bold, the same as below

表 4 不同植物 C、N、P 及化学计量比与土壤因子相关性分析

Table 4 Correlation analysis between different plant C, N and P contents and stoichiometric ratio and soil factor

物种 Species	土层深度 Soil depth/cm	指标 Index	速效磷 AP	速效钾 AK	有机质 SOM	酸碱度 pH	导电率 EC
弯花黄芪 <i>Astragalus flexus</i>	0~5	碳 C	-0.955	0.841	-0.173	0.213	-0.875
		氮 N	0.509	0.331	-0.918	0.901	-0.269
		磷 P	0.937	-0.337	-0.464	0.427	0.397
		碳氮比 C : N	-0.666	-0.142	0.824	-0.800	0.077
		碳磷比 C : P	-0.996	0.571	0.215	-0.176	-0.624
		氮磷比 N : P	0.316	0.523	-0.981	0.972	-0.466
	5~10	碳 C	-0.138	0.976	-0.303	0.317	-0.779
		氮 N	-0.931	-0.016	-0.857	0.849	0.790
		磷 P	-0.495	-0.641	-0.342	0.327	<b>1.000**</b>
		碳氮比 C : N	0.843	0.209	0.741	-0.730	-0.894
		碳磷比 C : P	0.250	0.820	0.084	-0.069	-0.959
		氮磷比 N : P	-0.987	0.196	-0.946	0.941	0.643
	10~15	碳 C	-0.201	-0.298	0.993	0.195	0.487
		氮 N	-0.906	<b>0.998*</b>	-0.113	0.909	0.737
		磷 P	-0.438	0.818	-0.713	0.444	0.147
		碳氮比 C : N	0.807	-0.992	0.304	-0.811	-0.592
		碳磷比 C : P	0.188	-0.639	0.872	-0.193	0.117
		氮磷比 N : P	-0.975	0.961	0.099	0.976	0.863
镰荚黄芪 <i>Astragalus arpilobus</i>	0~5	碳 C	-0.409	0.962	-0.854	0.875	-0.941
		氮 N	<b>-1.000**</b>	0.647	0.122	-0.081	-0.695
		磷 P	-0.986	0.762	-0.042	0.082	-0.803
		碳氮比 C : N	0.472	0.371	-0.934	0.919	-0.309
		碳磷比 C : P	-0.412	0.962	-0.852	0.873	-0.943
		氮磷比 N : P	<b>-1.000**</b>	0.667	0.095	-0.055	-0.714
	5~10	碳 C	-0.835	0.807	-0.916	0.922	-0.043
		氮 N	0.157	0.871	-0.011	0.027	-0.928
		磷 P	-0.006	0.939	-0.174	0.189	-0.855
		碳氮比 C : N	-0.946	0.027	-0.878	0.871	0.764
		碳磷比 C : P	-0.833	0.809	-0.914	0.920	-0.047
		氮磷比 N : P	0.131	0.883	-0.038	0.053	-0.918
	10~15	碳 C	-0.868	0.520	0.746	0.866	0.978
		氮 N	0.094	-0.563	0.915	-0.099	0.211
		磷 P	-0.070	-0.421	0.968	0.064	0.367
		碳氮比 C : N	-0.923	0.994	-0.071	0.926	0.765
		碳磷比 C : P	-0.867	0.518	0.748	0.864	0.977
		氮磷比 N : P	0.067	-0.541	0.925	-0.073	0.237

pH 的变异系数变化不大,始终处于稳定状态。0~15 cm 土层各土壤指标变异系数大小表现为: AP (18.35%) > AK (18.05%) > SOM (17.62%) > EC (4.51%) > pH (0.48%)。

## 2.5 2 种荒漠豆科植物化学计量与土壤养分及理化因子相关性分析

由表 4 可知,2 种荒漠豆科植物与各层次土壤因子之间的相关性无一致规律。其中,弯花黄芪各



指标与 0~5 cm 土层各土壤因子之间均未表现出显著相关,其 P 含量与 5~10 cm 土层导电率显著正相关,其 N 含量与 10~15 cm 土层 AK 显著正相关;而镰茛黄芩的 N、N:P 与 0~5 cm 土层中的 AP 均呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),其各指标与 5~10 和 10~15 cm 土层各因子均未表现出显著相关性。

## 3 讨论

### 3.1 2 种荒漠豆科植物化学计量特征

C、N、P 等元素是植物进行光合作用、构成遗传物质的重要元素,为植物生长发育提供了良好的营养保障<sup>[25-26]</sup>。相关研究表明,植物种类的差异是造成体内化学计量特征差异的关键因素之一<sup>[27]</sup>。本研究发现 2 种植物 C 元素含量最高,是由于 C 元素是构成植物结构的基本物质,总体需求量较大。同时 2 种植物叶表面积大且植株体由绒毛覆盖,光合作用合成有机物能力强<sup>[28]</sup>,有助于 C 元素在植物体内的积累。与中国北方典型荒漠及荒漠化地区的植物 N(25.55 mg·g<sup>-1</sup>)、P(1.74 mg·g<sup>-1</sup>)<sup>[29]</sup> 元素含量相比,弯花黄芩 N 含量(25.66 mg·g<sup>-1</sup>)稍高,镰茛黄芩含量 N(19.59 mg·g<sup>-1</sup>)明显较低;2 种植物 P 含量均小于北方典型荒漠及荒漠化地区的植物 P 含量。此研究中,一年生短命植物(镰茛黄芩)和多年生类短命植物(弯花黄芩)均高于阿拉善荒漠的一年生植物和多年生植物 N 含量(10.88、11.55 mg·g<sup>-1</sup>),P 含量均小于阿拉善荒漠的一年生植物和多年生植物 P 含量(1.41、1.47 mg·g<sup>-1</sup>)<sup>[30]</sup>。

植物的化学计量比能够清晰地表明植物营养缺失情况。C:P 和 C:N 代表植物同化能力的强弱,能够体现其养分利用率的高低,具有很重要的生态学意义<sup>[31]</sup>。本研究中,镰茛黄芩的 C:N 最高,弯花黄芩的 C:P 最高,显示出这两种植物在营养贫瘠的古尔班通古特沙漠具有较强的同化碳能力和养分利用效率。N:P 的大小常被用作植物生长受限元素的判断,当  $N:P < 10$  为缺 N 元素,当  $N:P > 20$  为缺 P 元素,当  $10 < N:P < 20$  时,植物的生长同时受 N 和 P 限制<sup>[32-33]</sup>。本研究中弯花黄芩和镰茛黄芩 N:P 含量分别为 25.75 和 10.12,表明弯花黄芩生长的限制元素为 P,而镰茛黄芩生长的限制元素为 N、P。

### 3.2 不同土层荒漠豆科植物生境土壤化学计量特征分析

SOC、TN、TP 含量及其化学计量比是衡量土

壤有机质组成和质量的关键性指标<sup>[34]</sup>。本研究发现,两种荒漠豆科植物生境土壤表层(0~5 cm)的 SOC、TN、TP 平均含量最高,TN、TP 随土壤深度增加呈下降趋势,这与陶冶等<sup>[35]</sup>的研究相似。0~15 cm 土壤 SOC、TN、TP 平均含量分别为 0.49、0.11 和 0.39 mg·g<sup>-1</sup>,土壤 SOC、TN、TP 整体含量明显低于全国均值水平(11.21、1.06、0.65 mg·g<sup>-1</sup>)<sup>[36]</sup>。化学计量比 SOC:TN、SOC:TP、TN:TP(4.78、1.28、0.27)虽能很好地诠释土壤养分状况,但也远远低于全国均值<sup>[36]</sup>(12.01、25.77、2.15),这可能是受气候、植被、降水等因素的影响,造成该荒漠区土壤养分元素表现极为匮乏。一般认为,降雨会导致土壤 TP 的淋溶作用增强,不利于 TP 的累积<sup>[37]</sup>,研究区土壤 TP 含量较低,可能是由于荒漠区总体上降雨量少,矿物质的风化以物理风化为为主,造成 P 含量相对较低。

SOC:TN 可以影响土壤中碳、氮元素的循环,是衡量土壤氮矿化能力的重要指标。SOC:TN 的大小与有机质分解速度呈反比,即 SOC:TN 较低的土壤具有较快的矿化作用,促进土壤中有效氮含量的增加<sup>[38]</sup>。相比于全国平均水平的 SOC:TN(14.3)<sup>[36]</sup>,该两种荒漠豆科植物生境土壤的 SOC:TN(4.78)低于全国平均水平,表明研究区土壤有机质分解和矿化速率相对较高。在不同土层梯度下,土壤 SOC:TN 始终维持相对稳定,表明 SOC、TN 之间存在显著的相关关系,SOC、TN 对土壤微环境变化的响应几乎是同步的,同时也验证了生态系统中土壤 SOC:TN 保持相对稳定的结论<sup>[39]</sup>。土壤 SOC:TP 的高低会显著影响植物的生长发育,是评价土壤 TP 矿化能力高低的标志,也是衡量微生物矿化土壤有机质释放 TP 的指标。较低的 SOC:TP 有利于微生物分解有机质释放养分,反之,土壤 SOC:TP 过高则会导致微生物在分解有机质的过程中受到 TP 的限制从而与植物竞争土壤中的 TP,进而不利于植物吸收养分<sup>[40]</sup>。本研究区土壤 SOC:TP(1.28)远远低于中国陆地平均值(52.7)和全球陆地平均水平(72.0)<sup>[36]</sup>,表明该研究区土壤 TP 具有较高的有效性,土壤中的微生物分解过程不再受到 TP 的限制。TN:TP 常被用于确定土壤养分限制元素的阈值<sup>[37]</sup>。本研究发现,该研究区具有较低的 N 含量以及 TN:TP 比,这表明本研究区土壤 N 元素相当贫瘠,也进一步佐证了该区域短命、类短命植物生长的限制元素为氮素。

### 3.3 2种荒漠豆科植物化学计量与不同土层土壤因子关系分析

从本研究可知,土壤 pH 和 EC 在表层中最低,并随土层深度加深逐渐增大,这一结果与董正武<sup>[41]</sup>等研究结果相似;土壤 pH 显示偏碱性,与杨海峰<sup>[22]</sup>研究结果一致。表层土壤中 AP、AK、SOM 含量最高,并随土层深度加深而逐渐减少。通过本实验结果可以看出,该研究区 pH、EC 的稳定性强并且土壤养分贫瘠。2 种荒漠豆科植物与土壤养分及因子相关关系按照土层来分析,弯花黄芪表层(0~5 cm)未出现相关关系,说明土壤因子对植物的促进作用不明显,可能该植物为多年生豆科植物及根系发达,因此,表层中没有体现出来相关关系。在 5~15 cm 土层,弯花黄芪中 P、N 元素分别与土壤中的 EC、AK 呈现正相关关系,说明两种土壤因子对弯花黄芪的生长有促进作用。镰荚黄芪中 N、N:P 元素分别与土壤中的 AP 呈负相关关系,说明 N、N:P 随着土壤 AP 的增大而减少,其他植物化学计量与土壤因子相关性较弱。参照新疆土壤养分分级标准<sup>[42]</sup>,本研究区土壤 SOM(4.03 mg·kg<sup>-1</sup>)处于缺乏状态,AP(14.39 mg·kg<sup>-1</sup>)、AK(38.84 mg·kg<sup>-1</sup>)含量为中等水平。因此,该研究区豆科植物土壤养分含量总体偏低。

### 3.4 土壤对荒漠豆科植物化学计量特征的可能影响

土壤是陆地植物生长发育的主要基质,植物赖以生存的土壤可直观反映出植物体的营养情况,而

植物的营养元素状况又能体现出植物对环境的适应策略<sup>[43]</sup>。植物需要吸收的 C、N、P 化学元素主要来自于土壤有机质,其含量与土壤化学计量之间有多多少少的相关性<sup>[44]</sup>。因此,对于本区域而言,土壤与植物的营养关系需要分开综合评价。对各土层分析发现,0~5 cm 土层土壤对植物化学计量比的影响最大,可能是 0~5 cm 土壤接受植物凋落物、动物粪便,导致表层土壤养分含量较为丰富。综合分析来看,0~10 cm 土壤的 SOC、SOC:TP 与植物化学计量间具有较强的相关性,且显著正相关多于显著负相关,说明土壤化学计量特征是植物体内化学计量特征的影响因素,土壤对该地区荒漠豆科植物的生长产生了某些影响。

植物、土壤大部分化学计量特征间并未显示出相关性,说明土壤养分对植物体化学计量特征并未起主要作用,可能是植物化学计量特征更像是物种的自身性状或遗传特征,是植物对生活环境长期适应的结果,具有相对稳定性,因而并不主要受控于土壤养分的限制作用。本研究所选的 2 种荒漠豆科植物属于不同生活型,且土壤采集次数少,所以对于后续豆科植物—土壤化学计量特征相关关系的研究,可以选择更多荒漠豆科植物,跨越植物整个生长季,结合多年代土壤,综合多种环境因子开展更加深入的科学研究,更好地理解荒漠豆科植物,以期对荒漠区植被的保护与恢复提供科学依据。

### 参考文献:

- [1] SINSABAUGH R L, HILL B H, FOLLSTAD SHAH J J. Enzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment[J]. *Nature*, 2009, **462**(7 274): 795-798.
- [2] TIAN D, YAN Z B, NIKLAS K J, *et al.* Global leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry and their scaling exponent[J]. *National Science Review*, 2017, **5**(5): 728-739.
- [3] TIAN D, YAN Z B, MA S H, *et al.* Family-level leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of global terrestrial plants [J]. *Science China Life Sciences*, 2019, **62**(8): 1 047-1 057.
- [4] SARDANS J, RIVAS-UBACH A, PEÑUELAS J. The C:N:P stoichiometry of organisms and ecosystems in a changing world: A review and perspectives[J]. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2012, **14**(1): 33-47.
- [5] TANG Z Y, XU W T, ZHOU G Y, *et al.* Patterns of plant carbon, nitrogen, and phosphorus concentration in relation to productivity in China's terrestrial ecosystems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, **115**(16): 4 033-4 038.
- [6] 熊义勤, 汪自强. 豆科植物的生物多样性和生态适应性[J]. 自然杂志, 2018, **40**(1): 64-70.
- [7] XIONG Y Q, WANG Z Q. Biodiversity and ecoadaptability of Leguminosae[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2018, **40**(1): 64-70.
- [8] 刘铮瑶. 古尔班通古特沙漠沙丘地貌及其发育环境[D]. 西安: 陕西师范大学, 2020.
- [9] BUXTON D R, REDFEARN D D. Plant limitations to fiber digestion and utilization[J]. *The Journal of Nutrition*, 1997, **127**(5): 814S-818S.
- [10] 贾丽, 曲式曾. 豆科锦鸡儿属植物研究进展[J]. 植物研究, 2001, **21**(4): 515-518.
- [11] JIA L, QU S Z. The study progress on the genus *Caragana* Fabr. [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2001, **21**(4): 515-518.
- [12] SHARIFI M, LYNCH D H, HAMMERMEISTER A, *et al.* Effect of green manure and supplemental fertility amend-

- ments on selected soil quality parameters in an organic potato rotation in Eastern Canada[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2014, **100**(2): 135-146.
- [11] SPEHN E M, SCHERER-LORENZEN M, SCHMID B, *et al.* The role of legumes as a component of biodiversity in a cross-European study of grassland biomass nitrogen[J]. *Oikos*, 2002, **98**(2): 205-218.
- [12] CADISCH G R, SCHUNKE M, GILLER K Z. Nitrogen cycle in monoculture grassland and Legume-grass mixture in Brazil Red soil[J]. *Trop Grasslands*, 1994, **28**: 43-52.
- [13] VAN RUIJVEN J, BERENDSE F. Positive effects of plant species diversity on productivity in the absence of legumes[J]. *Ecology Letters*, 2003, **6**(3): 170-175.
- [14] 谭志远, 朱铭莪, 贺学礼, 等. 陕西及甘、宁部分地区豆科植物根瘤菌资源调查[J]. 西北植物学报, 1996, **16**(2): 189-196.  
TAN Z Y, ZHU M E, HE X L, *et al.* Investigation of rhizobium of leguminous plants in Shaanxi Province and some areas of Gansu Province and Ningxia autonomous region[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1996, **16**(2): 189-196.
- [15] GLASENER K M, WAGGER M G, MACKOWN C T, *et al.* Contributions of shoot and root nitrogen-15 labeled legume nitrogen sources to a sequence of three cereal crops[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, **66**(2): 523-530.
- [16] 王卫卫, 阳 灿, 胡正海. 甘肃省白龙江流域豆科植物根瘤菌共生固氮研究[J]. 水土保持通报, 2001, **21**(6): 28-32.  
WANG W W, YANG C, HU Z H. *Rhizobium* and symbiotic nitrogen fixation of legumes in Bailong river basin of Gansu Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, **21**(6): 28-32.
- [17] 冯 雷, 刘 彤, 孙钦明, 等. 古尔班通古特沙漠南部土壤属性空间分布特征[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2015, **33**(3): 287-293.  
FENG L, LIU T, SUN Q M, *et al.* Spatial distribution features of soil properties in southern Gurbantunggut desert[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2015, **33**(3): 287-293.
- [18] 陶 岩, 周道玮, 江 源, 等. 松嫩平原盐碱化草甸中5种豆科植物的分布格局研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2008, **44**(5): 539-544.  
TAO Y, ZHOU D W, JIANG Y, *et al.* Distribution pattern of five leguminous plants in alkalized meadow in the Songnen plain[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2008, **44**(5): 539-544.
- [19] 傅思华, 胡顺军, 李 浩, 等. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭(*Haloxylon ammodendron*)群落优势植物水分来源[J]. 中国沙漠, 2018, **38**(5): 1 024-1 032.  
FU S H, HU S J, LI H, *et al.* Water sources of dominant plants in *Haloxylon ammodendron* community at the southern edge of Gurbantunggut Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 2018, **38**(5): 1 024-1 032.
- [20] MAMTIMIN A, WANG Y, SAYIT H, *et al.* Seasonal variations of the near-surface atmospheric boundary layer structure in China's Gurbantunggut Desert[J]. *Advances in Meteorology*, 2020, **2020**: 6 137 237.
- [21] 段 呈, 吴 玲, 王绍明, 等. 近30年古尔班通古特沙漠短命植物的时空格局[J]. 生态学报, 2017, **37**(8): 2 642-2 652.  
DUAN C, WU L, WANG S M, *et al.* Analysis of spatio-temporal patterns of ephemeral plants in the Gurbantunggut Desert over the last 30 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(8): 2 642-2 652.
- [22] 杨海峰, 钱亦兵, 蒋 超, 等. 古尔班通古特沙漠南缘主要土壤化学特征的空间异质性[J]. 中国沙漠, 2010, **30**(2): 319-325.  
YANG H F, QIAN Y B, JIANG C, *et al.* Spatial heterogeneity of soil chemical properties in the south Gurbantunggut Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 2010, **30**(2): 319-325.
- [23] 冯德枫, 包维楷. 土壤碳氮磷化学计量比时空格局及影响因素研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2017, **23**(2): 400-408.  
FENG D F, BAO W K. Review of the temporal and spatial patterns of soil C : N : P stoichiometry and its driving factors[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2017, **23**(2): 400-408.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [25] 郑艳明, 尧 波, 吴 琴, 等. 鄱阳湖湿地两种优势植物叶片C、N、P动态特征[J]. 生态学报, 2013, **33**(20): 6 488-6 496.  
ZHENG Y M, YAO B, WU Q, *et al.* Dynamics of leaf carbon, nitrogen and phosphorus of two dominant species in a Poyang Lake wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(20): 6 488-6 496.
- [26] 任璐璐, 张炳学, 韩凤朋, 等. 黄土高原不同年限刺槐土壤化学计量特征分析[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(2): 339-344.  
REN L L, ZHANG B X, HAN F P, *et al.* Ecological stoichiometric characteristics of soils in *Robinia pseudoacacia* forests of different ages on the loess plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, **31**(2): 339-344.
- [27] 姜沛沛, 曹 扬, 陈云明. 陕西省森林群落乔灌木叶片和凋落物C、N、P生态化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(2): 365-372.  
JIANG P P, CAO Y, CHEN Y M. C, N, P stoichiometric characteristics of tree, shrub, herb leaves and litter in forest community of Shaanxi Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(2): 365-372.
- [28] 丁俊祥, 范连连, 李 彦, 等. 古尔班通古特沙漠6种荒漠草本植物的生物量分配与相关生长关系[J]. 中国沙漠, 2016, **36**(5): 1 323-1 330.  
DING J X, FAN L L, LI Y, *et al.* Biomass allocation and allometric relationships of six desert herbaceous plants in the Gurbantunggut Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 2016, **36**(5): 1 323-1 330.
- [29] 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): 1 716-1 725.  
LI Y L, MAO W, ZHAO X Y, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry in typical desert and desertified re-

- gions, North China[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(8): 1 716-1 725.
- [30] 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): 6 538-6 547.  
ZHANG K, HE M Z, LI X R, *et al.* Foliar carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of typical desert plants across the Alashan Desert[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(22): 6 538-6 547.
- [31] 聂志刚, 吴江琪, 马维伟, 等. 甘南尕斯库勒湿地不同退化程度植物碳、氮、磷的化学计量特征及动态变化[J]. 草地学报, 2018, **26**(2): 386-392.  
NIE Z G, WU J Q, MA W W, *et al.* Stoichiometric characteristics and dynamics of plant carbon, nitrogen and phosphorus in differently degraded Gannan Hai wetland[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, **26**(2): 386-392.
- [32] GÜSEWELL S. N : P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance[J]. *New Phytologist*, 2004, **164**(2): 243-266.
- [33] HAN W X, TANG L Y, CHEN Y H, *et al.* Relationship between the relative limitation and resorption efficiency of nitrogen vs phosphorus in woody plants[J]. *PLoS One*, 2013, **8**(12): e83366.
- [34] 霍举颂, 刘卫国, 刘建国, 等. 影响阜康荒漠-绿洲过渡带荒漠植物数量特征的土壤驱动力分析[J]. 生态学报, 2017, **37**(24): 8 304-8 313.  
HUO J S, LIU W G, LIU J G, *et al.* Driving forces of desert plant characteristics in a desert oasis transitional zone in Fukang, Xinjiang, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(24): 8 304-8 313.
- [35] 陶冶, 刘耀斌, 吴甘霖, 等. 准噶尔荒漠区域尺度浅层土壤化学计量特征及其空间分布格局[J]. 草业学报, 2016, **25**(7): 13-23.  
TAO Y, LIU Y B, WU G L, *et al.* Regional-scale ecological stoichiometric characteristics and spatial distribution patterns of key elements in surface soils in the Junggar Desert, China[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, **25**(7): 13-23.
- [36] TIAN H Q, ZHANG C, MELILLO J, *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.
- [37] 汪其同, 高明宇, 刘梦玲, 等. 杨树根际土碳氮磷生态化学计量特征与根序的相关性[J]. 应用与环境生物学报, 2018, **24**(1): 119-124.  
WANG Q T, GAO M Y, LIU M L, *et al.* Correlation between ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus, and the root order in the rhizosphere soils of poplar plantations[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2018, **24**(1): 119-124.
- [38] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2013, **33**(15): 4 674-4 682.  
ZHU Q L, XING X Y, ZHANG H, *et al.* Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hillygully region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(15): 4 674-4 682.
- [39] JIAO F, WEN Z M, AN S S, *et al.* Successional changes in soil stoichiometry after land abandonment in Loess Plateau, China[J]. *Ecological Engineering*, 2013, **58**: 249-254.
- [40] 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.  
ZENG Q C, LI X, DONG Y H, *et al.* Ecological stoichiometry characteristics and physical-chemical properties of soils at different latitudes on the loess plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(5): 870-879.
- [41] 董正武, 玉米提·哈力克, 李生字, 等. 古尔班通古特沙漠西南缘柽柳沙包的土壤化学计量特征[J]. 生态学报, 2020, **40**(20): 7 389-7 400.  
DONG Z W, UMUT HALIK, LI S Y, *et al.* Soil stoichiometric characteristics of *Tamarix* cones in the southwest margin of Gurbantunggut Desert[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(20): 7 389-7 400.
- [42] 杨海峰, 钱亦兵, 蒋超, 等. 古尔班通古特沙漠南缘主要土壤化学特征的空间异质性[J]. 中国沙漠, 2010, **30**(2): 319-325.  
YANG H F, QIAN Y B, JIANG C, *et al.* Spatial heterogeneity of soil chemical properties in the south Gurbantonggut Desert[J]. *Journal of Desert Research*, 2010, **30**(2): 319-325.
- [43] 刘茂, 王雪梅, 陈波浪, 等. 库尔勒市香梨园土壤肥力评价[J]. 经济林研究, 2015, **33**(3): 93-98.  
LIU M, WANG X M, CHEN B L, *et al.* Soil fertility evaluation of fragrant pear orchard in Korla City[J]. *Nonwood Forest Research*, 2015, **33**(3): 93-98.
- [44] 田耀武, 和武宇恒, 翟淑涵, 等. 陶湾流域草本植物土壤及土壤微生物量碳氮磷生态化学计量特征[J]. 草地学报, 2019, **27**(6): 1 643-1 650.  
TIAN Y W, HE W YH, ZHAI S H, *et al.* Changes of the relationships between soil and microbes in carbon, nitrogen phosphorus ecological stoichiometry in grassland in Taowan watershed[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, **27**(6): 1 643-1 650.
- [45] 马可心, 张梅, 方馨, 等. 入侵植物曼陀罗对本地植物功能性状和土壤碳、氮、磷化学计量特征的影响[J]. 植物研究, 2020, **40**(6): 867-875.  
MA K X, ZHANG M, FANG X, *et al.* Effects of invasive plant *Datura stramonium* on the functional traits of native plants and the stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2020, **40**(6): 867-875.