

DOI: 10.5846/stxb201906261352

董正武, 玉米提·哈力克, 李生字, 雷加强, 赵英. 古尔班通古特沙漠西南缘柽柳沙包的土壤化学计量特征. 生态学报, 2020, 40(20): 7389-7400.  
Dong Z W, Umut Halik, Li S Y, Lei J Q, Zhao Y. Soil stoichiometric characteristics of *Tamarix* cones in the southwest margin of Gurbantunggut Desert. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(20): 7389-7400.

# 古尔班通古特沙漠西南缘柽柳沙包的土壤化学计量特征

董正武<sup>1,2,3</sup>, 玉米提·哈力克<sup>1</sup>, 李生字<sup>2,\*</sup>, 雷加强<sup>2</sup>, 赵英<sup>4</sup>

1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011

3 新疆师范大学生命科学学院, 乌鲁木齐 830054

4 鲁东大学资源与环境工程学院, 烟台 264025

**摘要:** 柽柳沙包作为沙漠地区一种特殊的生物地貌景观, 在维持区域生态环境稳定中发挥着极为重要的作用。以古尔班通古特沙漠西南缘的典型柽柳沙包为研究对象, 通过对土壤含水量、pH 值、电导率、粒径及土壤有机碳(SOC)、总氮(TN)、总磷(TP)含量的分析, 探讨了古尔班通古特沙漠柽柳沙包中土壤 C、N、P 的化学计量特征、垂直变化规律及影响因素。结果表明: (1) 随着土层深度增加, SOC 和 TN 均呈先升高后降低的变化, 且 C、N 在表层土壤含量最高, 具有“肥岛效应”; 总磷(TP)含量总体变化幅度较小, 呈弱变异。随着土层深度增加, 土壤 C/N 呈先降低后升高再降低的变化, C/P 和 N/P 呈先降低后升高的变化。(2) 与全球及中国平均值相比, 古尔班通古特沙漠柽柳沙包土壤 C、N、P、C/N、C/P 及 N/P 均相对较低, 而 C/N 相对较高, 土壤养分缺乏程度表现为 N>C>P。土壤养分元素及化学计量比多呈显著的线性关系, 且土壤化学计量比在 0—200 cm 层主要受 C、N 的制约, 在 200—500 cm 层不仅受 C、N 的制约, 也受 P 的限制。(3) 土壤 C、N、P 化学计量特征在 0—200 cm 层主要受降水、温度及蒸发等气候因素的影响, 而在 200—500 cm 层易受土壤含水量的影响; 此外, 粘、粉、沙粒含量在整个土壤剖面中对土壤 C、N、P 化学计量特征也具有明显的影响。

**关键词:** 柽柳沙包; 土壤化学计量; 环境因子; 古尔班通古特沙漠

## Soil stoichiometric characteristics of *Tamarix* cones in the southwest margin of Gurbantunggut Desert

DONG Zhengwu<sup>1,2,3</sup>, Umut Halik<sup>1</sup>, LI Shengyu<sup>2,\*</sup>, LEI Jiaqiang<sup>2</sup>, ZHAO Ying<sup>4</sup>

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

2 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

3 College of Life Science, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China

4 College of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China

**Abstract:** *Tamarix* cones, as one of special bio-geographical phenomena, play a crucial role in maintaining the stability of desert environments. The main objectives of this study were to explore soil carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) stoichiometric features, and to clarify the relationships between soil C, N, P stoichiometry and environmental factors in the southwest of Gurbantunggut Desert. Soil samples were collected in the *Tamarix* cones for analyzing soil physico-chemical properties including pH, electrical conductivity (EC), water content, grain composition, organic carbon (OC), total

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(41571011); 关键技术人才(Y932111); 国家“青年千人计划”新疆项目(Y472241001)

**收稿日期:** 2019-06-26; **网络出版日期:** 2020-08-27

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lishy\_hb@163.com

nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) content. The results showed that (1) with the increase of soil depth, the SOC and TN decreased firstly and then increased, and soil C and N were the highest in the surface layer, showing “fertile island effect”; and TP was weakly fluctuated along the soil profiles. With the increase of soil depth, C/N decreased firstly and then increased, and decreased again. C/P and N/P decreased firstly and then increased. (2) Compared with the global soils and the averages of China, soil C, N, P, C/P and N/P in the *Tamarix* cones were relatively lower, but C/N was relatively higher. The degree of deficiency of soil nutrient elements were ranked in order  $N > C > P$ . The soil nutrients and their stoichiometric ratios exhibited a significantly linear relationships with other nutrients, and the stoichiometric ratios were dominated by C and N in surface layers (0—200 cm), while in deep layers (200—500 cm) they were limited not only C and N, but also P. (3) In the soil layers of 0—200 cm, soil nutrients and its stoichiometry were susceptible to climatic factors such as precipitation, temperature and evaporation. However, in the soil layers of 200—500cm, soil nutrient and its stoichiometry was influenced by soil water content. Soil clay, silt and sand also had significant effects on soil C, N, P and their stoichiometric ratios throughout the soil profiles.

**Key Words:** *Tamarix* cones; soil stoichiometry; environmental factor; Gurbantunggut Desert

土壤是植物赖以生存的物质基础,能够提供植物生长的营养与环境等条件<sup>[1-2]</sup>。碳(C)、氮(N)、磷(P)是土壤中以相对稳定比例分布的重要养分元素,其含量的多寡及其平衡关系,不仅影响着植物的生长发育、群落组成及生产力水平,而且对维持区域生态系统的稳定具有重要作用<sup>[3]</sup>。土壤C、N、P在生物地球化学循环过程中具有相互耦合的特征,这种耦合关系可用化学计量学的基本原理进行表达<sup>[4]</sup>。土壤生态化学计量学的理论和方法为深入认识植物-土壤相互作用的养分调控机制提供了新的思路<sup>[5-6]</sup>,因此,研究土壤养分及化学计量特征对认识土壤养分循环及平衡机制具有重要的意义<sup>[7-8]</sup>。在干旱沙漠地区,植物生命活动不仅受水分短缺的限制,而且也受到土壤养分贫瘠及胁迫环境的制约<sup>[9]</sup>,从而使土壤养分及化学计量特征呈现特殊的变化趋势<sup>[10]</sup>。此外,土壤养分在一定程度上决定了土壤的结构及性质,间接影响着土壤水分、肥力及抗侵蚀能力等<sup>[11-13]</sup>。沙漠生态系统中土壤养分极其匮乏,通常受降水等气候因素、沙丘地貌、微地形、土壤质地及植被类型等诸多因素影响<sup>[10-11]</sup>。因此,研究沙漠生态系统土壤养分化学计量特征及其与环境因素之间的关系是非常必要的,对评价干旱沙漠地区土壤演变过程及退化程度具有重要的理论价值和现实意义<sup>[14-15]</sup>。

怪柳沙包作为干旱沙漠地区独特的生物地貌景观,主要由长期的风成沙与怪柳枯枝落叶交互堆积形成<sup>[16]</sup>,是沙漠-绿洲过渡带的重要生态屏障,在保障绿洲生态安全及遏制沙漠蔓延等方面发挥着重要作用<sup>[17]</sup>。目前,关于怪柳沙包的研究主要集中在其形成机理、形态结构、环境指示意义及土壤盐分等方面<sup>[16-17, 18-19]</sup>。刘进辉等<sup>[12]</sup>和尹传华等<sup>[14]</sup>认为怪柳灌丛沙堆土壤养分具有“肥岛效应”,且土壤养分在表层呈现富集,这种灌丛沙堆养分的富集直接影响到区域生物地球化学循环过程。然而,由于土壤养分的积累与气候、地形地貌、成土过程及生物作用等因素密切相关,在从怪柳沙堆发育成高大沙包的过程中,怪柳沙包的土壤养分分布情况尚不明确,尤其对处于稳定阶段怪柳沙包中土壤养分变化的研究鲜见报道。

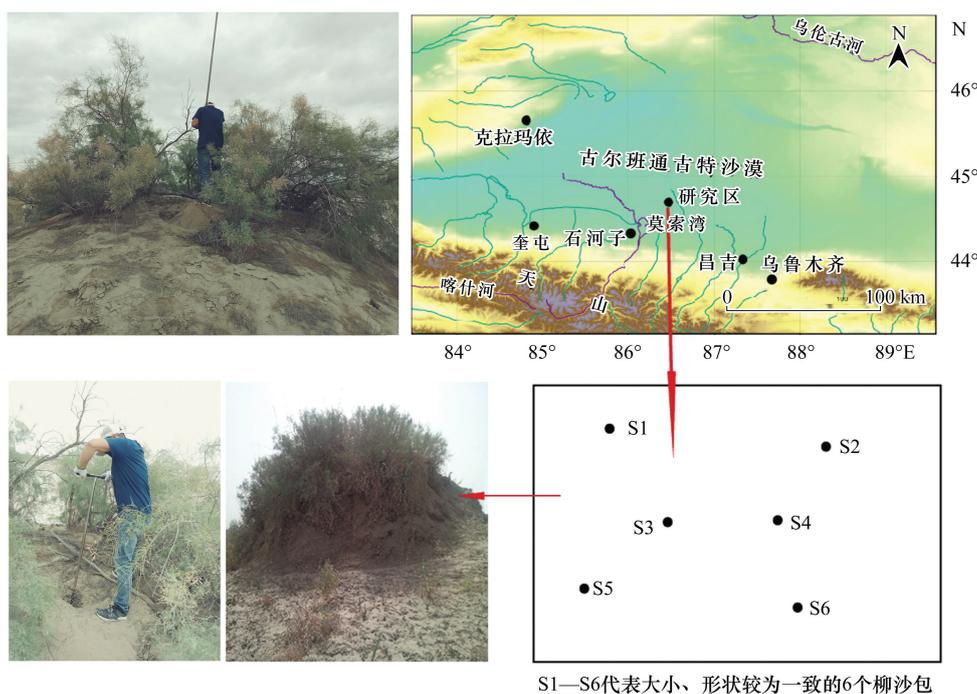
近年来,古尔班通古特沙漠地区部分怪柳沙包被开发用于农业生产,怪柳沙包的开垦增加了耕地,提高了土地利用效率。然而,由于该地区降水稀少,以及农业生产等对水资源的过度利用,造成地下水位明显下降、水资源严重短缺,使已开垦的怪柳沙包被荒弃现象时有发生。这种怪柳沙包的不当利用,导致该地区生态环境呈恶化发展的趋势。随着怪柳沙包的破坏及消失,导致局部土地向荒漠化或沙丘演进,进而带来严重的生态环境问题<sup>[20-21]</sup>。基于此,本文以古尔班通古特沙漠西南缘地区的典型怪柳沙包为研究对象,通过分析处于稳定阶段怪柳沙包中土壤养分变化及化学计量特征,结合部分环境因子,揭示怪柳沙包中土壤养分及化学计量的变化特点、以及它们与环境因子之间的关系,探讨怪柳沙包的形成对土壤养分的影响。研究结果对理解干旱沙漠地区怪柳在生物地球化学循环中的作用,以及环境变化对怪柳沙包土壤演化过程的影响提供初步认识;也为怪柳沙包的保护及利用提供理论依据,同时也对该地区生态环境的保护及建设具有

参考价值。

## 1 研究区域和研究方法

### 1.1 研究区概况

古尔班通古特沙漠(84.52°—90.00°E, 44.18°—46.33°N)地处新疆维吾尔自治区准噶尔盆地中心, 面积约为  $5.11 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 是中国第二大沙漠。地貌类型主要为各种类型的沙垄、沙丘链及蜂窝状沙丘。该地区年均温度约为 5—8℃,  $\geq 10^\circ\text{C}$  的年积温 3000—3500℃, 年平均降水量约为 114.89 mm, 主要发生于冬季(降雪)和春季(降雨), 冬季积雪厚度约为 13 cm, 最厚可达 27 cm。春夏两季为风季, 控制本区域的风系主要为西风气流和蒙古高压形成的西北和东北风系, 起沙风速达 6 m/s, 以 4—6 月最强盛, 最大风速达 20 m/s; 年均潜在蒸发量超过 2000 mm, 为典型温带干旱荒漠气候<sup>[22]</sup>。植被以短命、类短命植物及旱生草灌木为主, 植物种类丰富、生活型多样, 主要优势植物有梭梭、白梭梭、柽柳、麻黄、绢蒿等, 部分可形成大小不等的植丛沙堆。地表有发育良好的土壤结皮, 成为维持地表稳定的重要因素<sup>[23-24]</sup>。



S1—S6代表大小、形状较为一致的6个柳沙包

图1 古尔班通古特沙漠柽柳沙包采样图

Fig.1 Sample plots of *Tamarix* cones in the Gurbantungut Desert

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 试验设计

根据柽柳沙包形成过程中的气候、水文及植被分布状况等特征, 本研究以古尔班通古特沙漠西南缘由风蚀和水蚀共同作用形成的柽柳沙包为研究对象, 选择荒漠-绿洲过渡带的典型柽柳沙包分布区为研究区(图1), 沙包上的柽柳盖度为 50%—60%左右, 柽柳沙包周围伴生有梭梭、白梭梭及早春短命草本植物等<sup>[24]</sup>。该地区地下水埋深约在 30 m 以上, 地表有生物结皮, 土壤主要为风沙土, 呈中度盐渍化。本研究共选择了 6 个长势较为一致、大小相近、处于稳定阶段发育成熟的典型柽柳沙包(高度为  $(2.5 \pm 0.3)$  m, 直径约为 10 m)。

#### 1.2.2 土壤样品采集

为避免降水对土样采集造成的影响, 选择基本没有降水发生的夏季进行采样。于 2017 年 7 月进行样品

采集。在柽柳沙包顶部灌丛下,用土钻以 20 cm 为一个取样层分层进行土样采集;根据柽柳沙包高度,取样深度设定为 0—500 cm,即每个沙包采集土样 25 个,6 个柽柳沙包共采集土样 150 个,装入自封袋,带回实验室进行测试和分析。

### 1.2.3 指标测定

土样在室内经自然风干后分成两部分,一部分过 0.5 mm 筛,用于土壤理化性质分析,另一部分过 2 mm 筛,用于土壤粒径分析。制备土水质量体积比为 1:5 的土壤浸提液进行土壤 pH 和电导率(EC)的测定。土壤 pH 采用 pH 计(pHS-2C,上海仪电科学仪器股份有限公司,上海)测定;土壤电导率(EC)(Ms/cm)采用电导率仪(DDS-307,上海仪电科学仪器股份有限公司,上海)测定;土壤含水量(SWC)(%)采用烘干称重法;土壤有机碳(SOC)含量(g/kg)采用重铬酸钾外加热法测定;全氮(TN)含量(g/kg)采用凯氏定氮法测定;全磷(TP)含量(g/kg)采用钼锑抗比色法测定;具体分析方法参见《土壤农化分析》<sup>[25]</sup>。土壤粒径测定按照试验规范对土样进行预处理,然后通过 Malvern Mastersizer 2000 激光粒径仪(粒径 0.02—2000  $\mu\text{m}$ )测量土壤粒径的体积百分比,采用美国制土壤颗粒大小的分级标准:沙粒(2.0—0.05 mm)、粉粒(0.05—0.002 mm)和粘粒(< 0.002 mm)。

### 1.2.4 取样土层确定

基于柽柳沙包中土壤养分含量及变异程度随土壤深度的变化特点,共划分为 5 个层次:0—100、100—200、200—300、300—400 和 400—500 cm 层。

### 1.2.5 数据分析

利用 R 3.5.2 软件进行数据统计分析,并运用 Origin2017 进行绘图。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)比较不同深度土壤理化性质、养分及化学计量特征的差异。利用 Levene's test 检验方差齐性,方差齐性时使用 Duncan 法进行多重比较,方差不齐时则使用  $T_2$  Tamhane's test 进行多重比较。运用 Pearson 相关性分析土壤化学计量特征间的关系,并通过线性回归分析对土壤 C、N、P 含量及化学计量比进行拟合。运用 Pearson 相关性分析和 db-RDA(Distance-based redundancy analysis)分析土壤化学计量特征与环境因子的关系。在用 R 语言进行数据分析时,主要用到以下软件包:1) db-RDA 分析-ggvegan; 2) Pearson 相关性分析-Hmisc; 3) 回归分析-lm。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤基本理化特征的垂直变化

随着土层深度的增加,土壤含水量及粉粒含量呈现相似的变化规律(表 1)。土壤含水量在 300—400 cm 层最低( $P < 0.05$ ),0—200 cm 层土壤含水量明显低于 200—300 cm 和 400—500 cm( $P < 0.05$ )。0—100 cm 和 100—200 cm 层土壤含水量没有明显差异( $P > 0.05$ )。粘、粉粒含量呈先升高后降低再升高的变化,而沙粒含量正好相反。200—300 cm 层土壤粘、粉粒含量最高,沙粒含量最低( $P < 0.05$ ),而 300—400 cm 层土壤粘、粉粒含量最低,沙粒含量最高( $P < 0.05$ )。土壤 EC 值呈先降低后升高的变化,0—100 cm 层盐分含量最高( $P < 0.05$ ),达 2.960 Ms/cm; 300—400 cm 层含量最低( $P < 0.05$ ),为 0.710 Ms/cm; 从 0—100 cm 至 400—500 cm,土壤 EC 值降幅达 200%以上;说明柽柳沙包的土壤盐分垂直分布呈表聚现象。土壤 pH 呈先升高后降低再升高的变化,且 0—100 cm 层土壤 pH 最低,呈弱碱性(pH 为 7.802); 100—200 cm 层为碱性(pH 为 8.416),而 200 cm 层以下呈强碱性,且 400—500 cm 层土壤 pH 最高( $P < 0.05$ )。

### 2.2 土壤养分含量及化学计量比的垂直变化

柽柳沙包的土壤养分变化见图 2。随着土层深度增加,SOC 和 TN 均呈先升高后降低的变化,其中表层 0—100 cm 含量最大,与 100 cm 以下各土层有显著差异( $P < 0.05$ ); TP 含量在整个土壤剖面的变化幅度较小,其中 300—400 cm 层明显低于其他各层( $P < 0.05$ )。随着土层深度的增加,土壤 C/N 呈先降低后升高再降低的变化,且 300—400 cm 层明显高于其他各层( $P < 0.05$ ),土壤 C/P 和 N/P 呈先降低后升高的变化,表

层 0—100 cm 明显高于其他各层( $P<0.05$ ) (表 2)。

表 1 柽柳沙包土壤基本性质

Table 1 Soil properties of *Tamarix* cones

土壤深度 Soil depth/cm	土壤含水量 Soil water content/%	pH	电导率 EC/(Ms/cm)	粘粒 Clay/%	粉粒 Silt/%	沙粒 Sand/%
0—100	5.580±1.022b	7.802±0.116b	2.960±0.432a	1.824±0.458b	71.662±4.382c	26.514±4.839b
100—200	5.794±0.538b	8.416±0.087c	2.158±0.149b	2.492±0.462b	89.032±3.077ab	8.476±3.325c
200—300	14.108±4.766a	8.940±0.119b	1.410±0.057c	5.866±0.435a	92.688±0.968a	1.446±0.961d
300—400	2.736±0.249c	8.756±0.167bc	0.710±0.062d	0.710±0.152b	52.110±1.741d	47.180±1.821a
400—500	14.544±4.341a	9.396±0.163a	1.108±0.036cd	8.710±3.125a	77.480±7.476cb	13.81±9.818bc

同一列字母不同表示有显著差异( $P<0.05$ ), 字母相同表示无显著差异( $P>0.05$ )

变异系数 CV (Coefficient of variation) 反映样点的离散程度,  $CV<0.1$  为弱变异性;  $0.1\leq CV\leq 1$  为中等变异性;  $CV>1$  为强变异性<sup>[26]</sup>。由表 2 可知, 不同深度土壤 C、N、P 含量的变异程度存在一定差异, 土壤 C、N 在 0—500 cm 层均呈中等变异, 而 P 在 0—400 cm 呈弱变异, 400—500 cm 为中等变异。

### 2.3 土壤 C、N、P 与化学计量特征的关系

土壤养分元素间密切相关并相互耦合<sup>[27]</sup>, 已有研究认为元素计量比与两个元素间均存在一定关系, 但不同元素间的变化趋势不尽相同<sup>[10,28]</sup>。根据 Pearson 相关性分析, 除 C 与 C/N 之间、N 与 C/N 之间、C/P 与 C/N 之间、N/P 与 C/N 之间相关性不显著外, 其余土壤化学计量指标之间均呈显著和极显著相关关系 ( $P<0.05$ ,  $P<0.01$ ) (图 3)。线性方程拟合表明, 土壤 C、N、P 之间均具有显著的线性关系 ( $P<0.05$ ), 其中 C 与 N 的相关性最强 (图 3, 图 4)。C/N 与 C、N 之间没有明显的关系, C/P 与 C、P 之间、N/P 与 N、P 之间呈显著的线性关系 ( $p<0.05$ ) (图 4)。

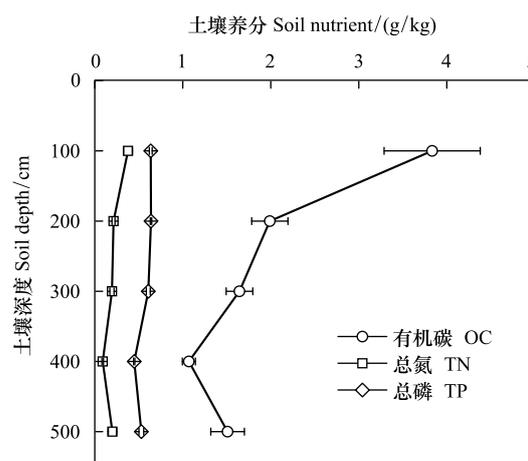


图 2 柽柳沙包中土壤养分变化特征

Fig.2 Variation of soil nutrient contents at *Tamarix* cones

表 2 柽柳沙包土壤养分变异程度及化学计量特征

Table 2 Soil stoichiometric characteristics and coefficient of variation at *Tamarix* cones

土壤深度 Soil depth/cm	变异系数 Coefficient of variation			C/N	C/P	N/P	C/N/P
	土壤有机碳 SOC	总氮 TN	总磷 TP				
0—100	0.318	0.299	0.058	11.969±0.648b	15.605±2.151a	1.321±0.185a	16/1.3/1
100—200	0.232	0.181	0.028	10.835±0.352b	8.033±0.838b	0.736±0.061b	8/0.7/1
200—300	0.206	0.269	0.079	9.956±0.486b	6.977±0.561b	0.707±0.070b	7/0.7/1
300—400	0.156	0.243	0.037	14.158±0.912a	6.169±0.420b	0.445±0.051b	6/0.4/1
400—500	0.283	0.512	0.113	10.038±1.506b	7.270±0.663b	0.807±0.154b	7/0.8/1

同一列字母不同表示有显著差异( $P<0.05$ ), 字母相同表示无显著差异( $P>0.05$ )

土壤化学计量比与各元素的相关性大小不同, 相关性较小的元素对化学计量比的影响小于相关性大的元素<sup>[28]</sup>。根据相关性分析及线性拟合, C/N 和 N/P 主要受控于 N 含量, C/P 主要受控于 C 含量 (图 3, 图 4); 此外, 除 C/N 与 C、N 外, 化学计量比与分子的决定系数 ( $R^2$ ) 明显大于其与分母的决定系数, 表明土壤化学计量比主要受控于土壤 C 和 N, 其中 N 的影响作用更明显 (图 4)。

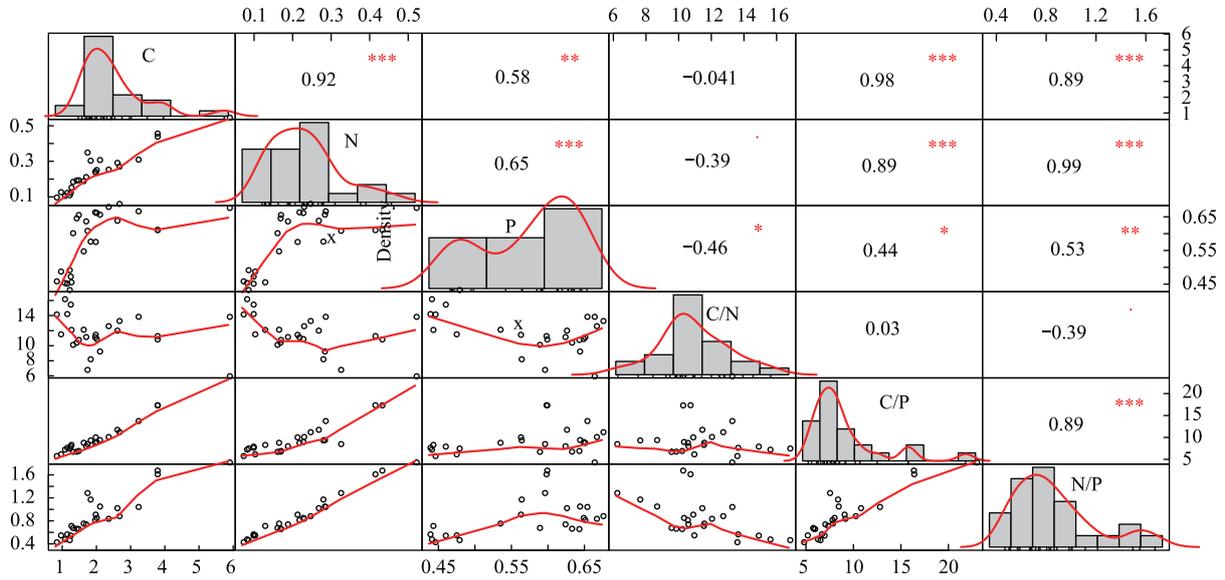


图 3 柽柳沙包土壤 C、N、P 含量及化学计量比之间的 Pearson 相关系数

Fig.3 Correlation coefficients between soil C, N and P content and their stoichiometric ratios at *Tamarix* cones

\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , \*\*\*  $P < 0.001$

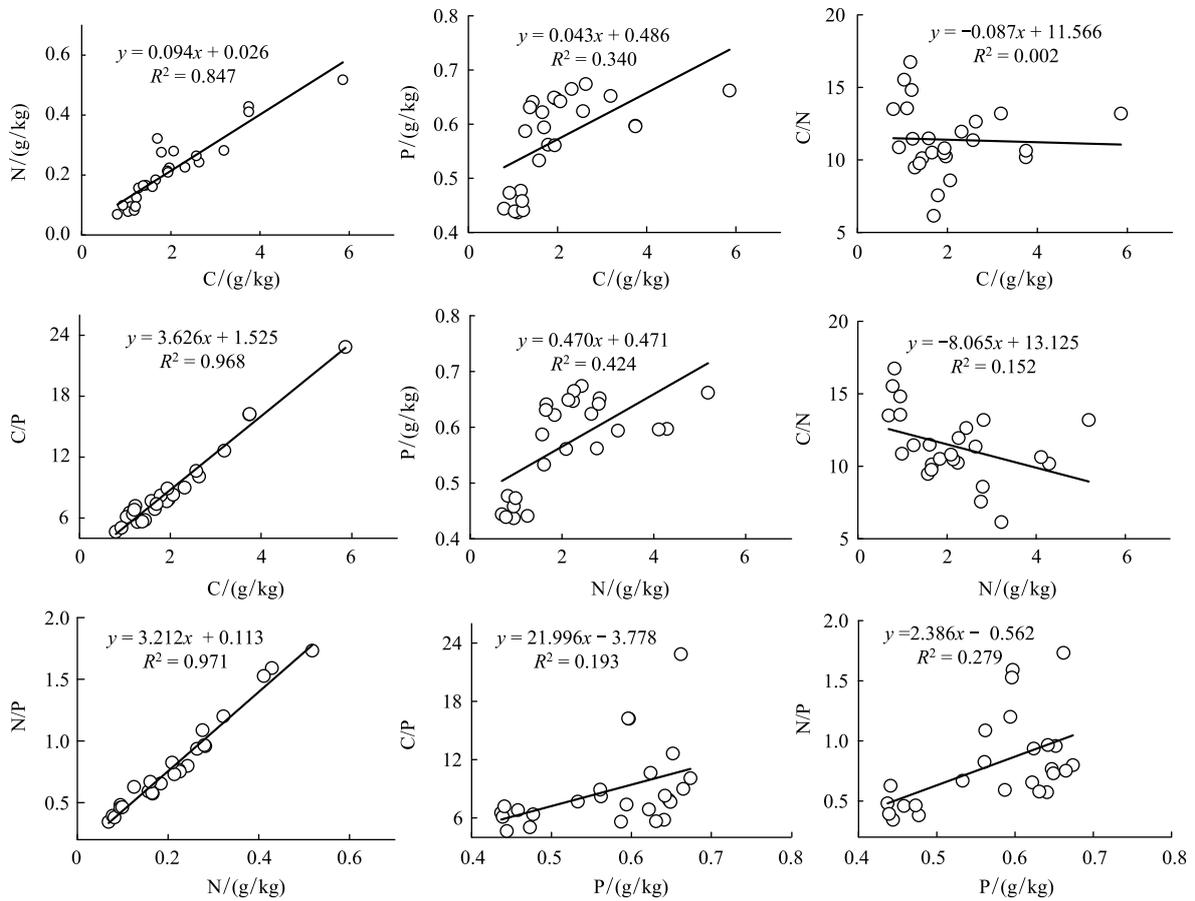


图 4 柽柳沙包土壤 C、N、P 含量及化学计量之间的线性关系

Fig.4 Linear relationships between soil C, N, P contents and their corresponding stoichiometric ratios

就不同深度而言, 从 0—100 cm 到 400—500 cm 层, 土壤 C 与 C/P 之间、N 与 N/P 之间均呈极显著正相关, 表明土壤化学计量比主要受 C 和 N 控制。0—100 cm 层 N、N/P 与 C/P 之间呈极显著正相关, 100—200 cm 层 C、C/P 与 N/P 之间呈极显著正相关, 而 P 与 C/P、N/P 之间在 0—200 cm 层无显著相关性, 表明 0—200 cm 层 P 对土壤化学计量特征的影响不明显。400—500 cm 层 N 与 P 之间及 N、P 与 N/P 之间呈极显著正相关, C/N 与 N/P 之间为显著负相关, 表明土壤化学计量特征在 400—500 cm 层不仅受 C、N 的制约, 也受 P 的影响(表 3)。

表 3 不同深度土壤养分及化学计量比间的 Pearson 相关关系

Table 3 Pearson correlation relationships between soil nutrients and their corresponding stoichiometric ratios

土壤深度 Soil depth/cm		C	N	P	C/N	C/P
0—100	N	0.918 *				
	P	-0.095	-0.46			
	C/N	0.055	-0.343	0.935 *		
	C/P	0.981 **	0.973 **	-0.283	-0.125	
	N/P	0.852	0.988 **	-0.589	-0.471	0.934 *
100—200	N	0.973 **				
	P	0.146	0.055			
	C/N	0.809	0.653	0.342		
	C/P	0.993 **	0.976	0.031	0.777	
	N/P	0.948 *	0.988 **	-0.094	0.599	0.969 *
200—300	N	0.902 *				
	P	0.434	0.635			
	C/N	-0.167	-0.576	-0.628		
	C/P	0.917 *	0.721	0.041	0.092	
	N/P	0.913 *	0.951 *	0.366	-0.443	0.851
300—400	N	0.768				
	P	0.251	-0.218			
	C/N	-0.039	-0.671	0.632		
	C/P	0.976 **	0.841	0.037	-0.181	
	N/P	0.695	0.988 **	-0.361	-0.736	0.798
400—500	N	0.856				
	P	0.863	0.983 **			
	C/N	-0.515	-0.883	-0.851		
	C/P	0.964 **	0.697	0.698	-0.284	
	N/P	0.851	0.998 ***	0.973 **	-0.887 *	0.694

\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , \*\*\*  $P < 0.001$ 

#### 2.4 土壤养分化学计量特征与环境因子的关系

基于 db-RDA 分析的土壤化学计量特征与环境因子关系见表 4 和图 5。第一轴和第二轴解释了土壤化学计量与环境因子之间关系的大部分信息。在 0—200 cm 层, 第一轴和第二轴分别解释了土壤化学计量 89.198% 和 1.235% 的变量, 解释了土壤化学计量与环境因子之间关系 98.493% 和 1.383% 的变量。在 200—500 cm 层, 第一轴和第二轴分别解释了土壤化学计量 95.268% 和 1.023% 的变量, 解释了土壤化学计量与环境因子之间关系的 98.086% 和 1.053% 的变量(表 4)。

根据 db-RDA 分析, 各因子箭头所指的方向大致相同, 表明具有极显著正相关<sup>[3]</sup>。在 0—200 cm 层, 年平均降水量、温度、蒸发量、pH、土壤含水量及 EC 对土壤养分及化学计量的影响依次减弱; 其中位于第一轴右侧的年均降水量、年均温度、年均蒸发量及 pH 与土壤 P、C/N 呈正相关关系, 说明温度、降水及蒸发是影响

土壤养分化学计量特征的主要因素。而在 200—500 cm 层, 土壤含水量、pH、年均温度及 EC 对土壤养分及化学计量具有显著的影响, 且所有环境因子均位于第一轴的左侧, 与土壤 C、N、P、C/P 及 N/P 呈正相关关系 (图 5), 说明土壤含水量、pH 及盐分是影响土壤养分化学计量特征的主要因素。

表 4 基于 db-RDA 分析的土壤化学计量的特征值和累积贡献比率

Table 4 The eigenvalues and cumulative proportion of soil stoichiometry for the first two axes of db-RDA

结果 Results	0—200 cm		200—500 cm	
	RDA1	RDA2	RDA1	RDA2
特征值 Eigenvalues	0.879	0.012	1.14	0.014
土壤化学计量的解释比例 Cumulative proportion of soil stoichiometry/%	89.198	1.253	95.268	1.023
土壤化学计量与环境因子关系的解释比例 Cumulative proportion of soil and environment/%	98.493	1.383	98.086	1.053
F 值 F-ratio	56.722	0.796	98.911	2.135
P 值 P-Value	0.020 *	0.986	0.001 ***	0.856

\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , \*\*\*  $P < 0.001$

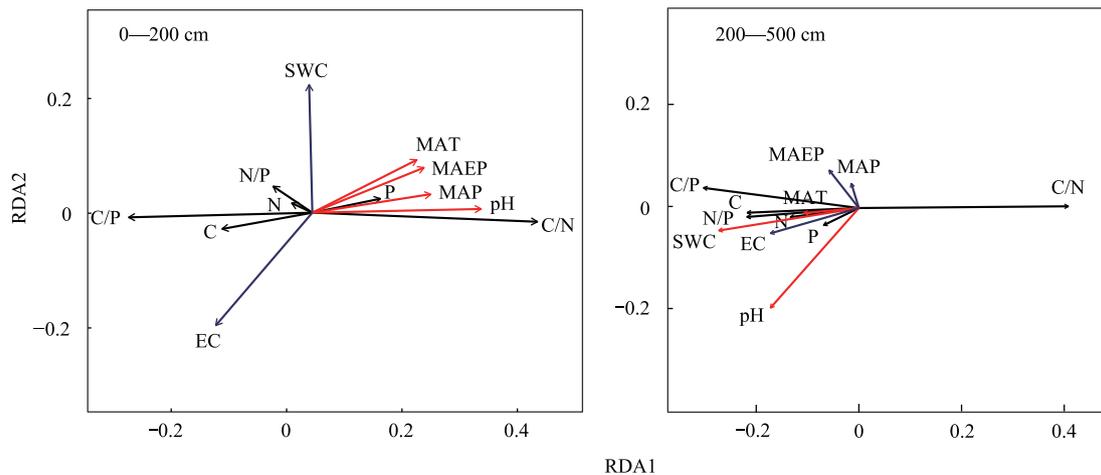


图 5 基于 db-RDA 分析的土壤化学计量与环境因子之间的关系

Fig.5 Distance based redundancy analysis (db-RDA) biplot of soil stoichiometry and environmental factors

MAT: 年平均温度 mean annual temperature, MAP: 年平均降水 mean annual precipitation, MAEP: 年平均蒸发量 mean annual evaporation, C: 有机碳 organic carbon, N: 总氮 total nitrogen, P: 总磷 total phosphorus, SWC: 土壤水分含量 soil water content and electrical conductivity, EC: 电导率 respectively

根据 Pearson 相关性分析, 在 0—200 cm 层, 除 P 与所选环境因子之间相关性不显著外, 土壤 C、N、C/P 及 N/P 与年平均温度、年平均蒸发量、pH 及粘粉粒呈显著和极显著负相关, 而与沙粒呈显著和极显著正相关; 电导率与 C、N、C/N 及 C/P 呈显著正相关 (表 5), 说明表层土壤 C、N 易受温度、蒸发等气候因素的影响, 而 P 受环境因素的影响不明显。在 200—500 cm 层, 土壤 C、N、C/P 及 N/P 与土壤含水量、粘粉粒呈显著和极显著正相关, 与沙粒呈极显著负相关; C/N 与土壤含水量、粘粉粒呈极显著负相关, 与沙粒呈极显著正相关 (表 5); 说明深层土壤 C、N、P 化学计量特征主要受土壤含水量的影响。此外, 粘、粉、沙粒在整个剖面对土壤 C、N、P 化学计量特征均有一定程度的影响。

### 3 讨论

#### 3.1 柽柳沙包中土壤养分及化学计量特征

土壤养分含量反映了土壤肥力、有机质组成及质量程度, 是表征土壤 C、N、P 元素循环的有效指标<sup>[8-9]</sup>。

沙漠地区由于降水稀少及相对低的分解速率,使得土壤储存有机质的能力较低,导致养分可利用性相对较低<sup>[10]</sup>。本研究中,土壤 C 含量低于中国平均值(24 g/kg)及中国温带沙漠平均值(9 g/kg)<sup>[29]</sup>(表 2),土壤 N 含量低于中国平均值(1.5 g/kg)及中国温带沙漠平均值(1.0 g/kg)<sup>[29]</sup>(表 2),表明研究区柽柳沙包中土壤 C、N 元素极为贫瘠,是影响区域植物生长发育的主要因素。土壤 C、N 主要源于土壤有机质及凋落物的分解<sup>[29-31]</sup>,由于受水分及风沙侵蚀的影响,柽柳沙包中枯落物相对较少,致使输送到土壤中的有机质含量较低。类似较低土壤 C、N 含量及存在 C、N 源限制的还有准噶尔荒漠<sup>[10]</sup>、塔里木河上游荒漠<sup>[30]</sup>及河西走廊沙漠<sup>[32]</sup>等地区。土壤 P 是一种沉积性元素,主要源于岩石分化,受成土母质及气候等因素的影响较大<sup>[3]</sup>,本研究 P 含量为 0.57 g/kg,低于地壳平均值(2.8 g/kg)及全国平均(0.65 g/kg)水平<sup>[28]</sup>(表 2)。与荒漠地区相比,本研究 P 含量与塔里木河上游荒漠<sup>[30]</sup>及河西走廊沙漠<sup>[32]</sup>相近,这主要与荒漠区干旱少雨等气候条件密切相关,导致岩石分化缓慢,从而使土壤 P 含量相对较低。综合分析表明,干旱荒漠区土壤 C、N、P 含量均较为缺乏,并以降水稀少的古尔班通古特沙漠柽柳沙包中更甚,且 N 和 C 较 P 而言更为缺乏。

表 5 土壤养分及化学计量与环境因子之间的 Pearson 相关关系

Table 5 Pearson correlation relationships between soil nutrients, their stoichiometric ratios and environmental factors

土壤深度 Soil depth/cm		MAT	MAP	MAEP	SWC	pH	EC	Clay	Silt	Sand
0—200	C	-0.578 *	-0.377	-0.657 *	-0.126	-0.875 ***	0.691 *	-0.58 *	-0.865 ***	0.739 **
	N	-0.575 *	-0.393	-0.657 *	0.051	-0.917 ***	0.584 *	-0.642 *	-0.901 ***	0.737 **
	P	-0.217	-0.116	-0.17	-0.392	-0.038	0.405	0.139	0.089	0.184
	C/N	-0.476	-0.232	-0.453	-0.533	-0.475	0.747 **	-0.133	-0.392	0.448
	C/P	-0.577 *	-0.378	-0.658 *	-0.068	-0.899 ***	0.660 *	-0.601 *	-0.885 ***	0.731 **
	N/P	-0.557 *	-0.383	-0.638 *	0.115	-0.918 ***	0.528	-0.654 *	-0.907 ***	0.712 **
200—500	C	0.011	-0.121	-0.125	0.781 **	0.398	0.677 **	0.812 ***	0.790 **	-0.888 ***
	N	0.172	-0.072	-0.016	0.793 **	0.596 *	0.532	0.896 ***	0.835 ***	-0.901 ***
	P	-0.049	-0.16	-0.167	0.708 **	0.489	0.742 **	0.868 ***	0.885 ***	-0.949 ***
	C/N	-0.176	0.006	0.004	-0.718 **	-0.601 *	-0.431	-0.810 ***	-0.719 **	0.739 **
	C/P	0.09	-0.051	-0.039	0.722 **	0.228	0.516	0.649 **	0.599 *	-0.710 **
	N/P	0.241	-0.023	0.045	0.788 **	0.582 *	0.445	0.861 ***	0.775 **	-0.839 ***

\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , \*\*\*  $P < 0.001$ ; MAT:年平均温度, MAP:年平均降水, MAEP:年平均蒸发量, C:有机碳, N:总氮, P:总磷, SWC:土壤含水量,

EC:电导率, Clay:粘粒, Silt:粉粒, Sand:沙粒

本研究中, 0—300 cm 层土壤养分含量随土层深度的增加呈降低趋势, 尤其是 C、N 含量具有较大的变异, 而 P 含量波动相对较小(表 1), 这与前人的研究结果较为一致<sup>[12,14,27]</sup>, 即表层土壤 C、N 含量高于深层, 这主要是由于土壤 C、N 受气候环境、枯落物分解、植物利用等影响而存在较大的空间异质性。土壤 P 含量主要由母质经风化形成, 且风化程度在土层中差异不明显<sup>[31]</sup>, 因此, P 在柽柳沙包 0—500 cm 层土壤分布相对稳定(图 2)。已有研究表明柽柳灌丛沙堆在表层土壤存在“肥岛效应”, 即柽柳灌丛下土壤 C、N 含量明显高于丘间地及裸沙地<sup>[12, 14, 31-33]</sup>。本研究结果与文献<sup>[10, 12, 14, 33]</sup>进行对比发现柽柳沙包表层 0—100 cm 土壤 C、N 含量明显高于丘间地及裸沙地, 证实柽柳沙包也存在“肥岛效应”(表 6)。这与柽柳沙包的形成过程密切相关, 由于柽柳呈灌丛状分布, 能够将枯枝落叶及沙物质阻挡于灌丛下, 从而使灌丛下土壤含有相对较高的枯落物等物质<sup>[16-17]</sup>, 枯落物的分解有利于提高灌丛下土壤肥力, 从而使灌丛下土壤具有相对较高的养分。本研究中柽柳沙包表层土壤 C、N、P 含量明显高于柽柳灌丛沙堆土壤养分含量<sup>[10,12, 33]</sup>(表 6), 表明柽柳沙包富集养分的能力强于柽柳灌丛沙堆。在 300—400 cm 层土壤 C、N、P 含量呈最低值, 且土壤水分及盐分含量最低(表 1), 这与该层土壤沙粒含量(47%)较高而粘粉粒含量较低有关, 较高的沙粒含量易使土壤水分携带着营养物质一起流失, 从而导致该层养分及盐分含量均较低。在 400—500cm 层, 随着粘、粉粒的增加, 土壤水分及养分含量逐渐升高, 并形成一定的富集(表 1 和 2)。这也解释了为什么在整个剖面土壤养分含量会随

深度的增加呈先降低后升高的变化。

表 6 柽柳沙包与不同采样点柽柳灌丛沙堆土壤养分含量对比

Table 6 Comparison of soil nutrient contents between *Tamarix* cones and *Tamarix* Nabkhas in the different positions

样点 Sampling sites	有机碳 SOC (g/kg)	总氮 TN (g/kg)	文献 References
古尔班通古特沙漠 Gurbantunggut Desert	柽柳沙包灌丛下(0—100 cm) 3.83	0.38	本研究
	柽柳沙堆灌丛下(0—10 cm) 1.74	0.18	[33]
	柽柳沙堆边缘(0—10 cm) 1.16	0.12	[33]
	灌丛间低地(0—10 cm) 0.52	0.04	[33]
塔克拉玛干沙漠 Taklimakan Desert	柽柳沙堆灌丛下(0—10 cm) 2.09	0.13	[14]
	柽柳沙堆边缘(0—10 cm) 1.34	0.14	[14]
	灌丛间低地(0—10 cm) 1.12	0.11	[14]
	流沙地 0.43	0.05	[14]

土壤化学计量比是表征土壤有机质组成及质量程度的重要指标<sup>[10]</sup>。由于受气候、地形地貌、植被、年代等土壤形成因子及人类活动的影响,土壤 C、N、P 比值在空间上有较大的差异<sup>[8-9]</sup>。本研究中,柽柳沙包表层 0—100 cm 土壤 C/N (11.32—12.62) 高于中国陆地平均值 (10—12)<sup>[29]</sup>、古尔班通古特沙漠荒漠灌木群落 (8.12)<sup>[31]</sup>、河西走廊荒漠生态系统 (8.2)<sup>[32]</sup> 及塔克拉玛干沙漠北缘冲积平原中下部柽柳灌丛下 (9.2—11.1)<sup>[12]</sup>, 反映出柽柳沙包中土壤 N 比 C 更为缺乏。土壤 C/N 与有机质的分解速率呈反比<sup>[10]</sup>, 因此较高的 C/N 表明柽柳沙包中土壤 C 源及有机质分解速率较低。Cleveland 和 Liptzin<sup>[9]</sup> 研究表明土壤 C/N 在生态系统中具有相对一致性, 张珂等<sup>[3]</sup> 发现沙漠生态系统中土壤 C/N 随着土层深度的增加没有明显差异。这与本研究结果并不一致, 在柽柳沙包中, 随着土层深度的增加, C/N 呈先降低再升高后降低的变化 (表 2); 这可能与柽柳沙包形成过程中的环境因素及生物作用有关。由于气候环境的变化 (如降水, 温度和风速等)、沉积物的厚度 (枯枝落叶和沙物质) 及营养物质的释放速度在柽柳沙包形成的各个阶段存在差异<sup>[15-16]</sup>, 从而使养分在不同土层分布不均匀; 此外, 柽柳根系对养分的吸收及地下生物量的分布<sup>[33]</sup>, 也影响着 C/N 随土层深度的变化。

土壤 C/P 的高低对植物的生长发育具有重要的作用, 其不仅能够反映土壤 P 的矿化能力, 也是衡量土壤中微生物矿化有机质释放 P 的有效指标<sup>[34]</sup>。已有研究表明低 C/P 有利于微生物对土壤有机质分解的养分释放, 有利于土壤中有效 P 的增加; 反之, 高 C/P 会导致微生物在分解有机质过程中受到 P 限制, 从而与植物存在对土壤 P 的竞争, 不利于植物的生长<sup>[34]</sup>。大多数陆地生态系统中土壤 C/P 介于 10.06—503.5 之间<sup>[35]</sup>, 本研究中柽柳沙包土壤 C/P 仅为 6.2—15.6, 低于中国陆地平均值 (52.7)、全球陆地平均水平 (72.0) 及大部分已有研究<sup>[3, 10, 29]</sup>, 表明研究区土壤 P 表现为净矿化, 微生物分解有机质过程中不受 P 的限制; 因此, 土壤 P 表现出较高的有效性。较低的土壤 C/P 表明相比于 P 而言土壤 C 更为缺乏, 这也印证了 C/P 的分析结果。柽柳沙包的土壤 N/P 为 0.45—1.32, 低于全球陆地平均值 (5.9) 及中国平均值 (3.9), 接近于中国温带荒漠平均值 (1.2)<sup>[29]</sup>。一般认为温带荒漠地区土壤 N 是主要的限制性因子, 如荒漠灌丛沙堆土壤 N/P 为 0.43, 表现为显著 N 缺乏<sup>[10]</sup>。因此, 结合较低的 N 含量及 N/P, 本研究中 N 缺乏程度远远高于 P。综合分析表明, 柽柳沙包中土壤 C、N、P 元素的缺乏程度为 N>C>P。

### 3.2 柽柳沙包中土壤养分及化学计量特征的影响因素

土壤养分及化学计量与气候、地形地貌、土壤质地及植被组成等有较强的相关关系<sup>[31-32]</sup>。干旱荒漠区土壤 N、P 含量与 MAT 呈负相关, MAP 与 N、N/P 呈正相关, 与 P 呈负相关<sup>[35]</sup>。陶冶等<sup>[10]</sup> 发现沙漠生态系统 MAP 的增加有利于土壤 C、N 含量的升高, 并认为经纬度、海拔、MAP 和 EC 对沙漠灌木群落土壤化学计量特征有较大的影响。在古尔班通古特沙漠地区, 近些年随着全球气候的变化, 导致降水量有相对增加的趋势<sup>[10, 36]</sup>, 降水的增加有利于表层土壤枯落物的分解<sup>[10]</sup>, 从而有利于灌丛下表层土壤养分的积累, 这部分印

证了怪柳沙包中表层(0—200 cm)土壤养分高于深层,也反映出怪柳沙包表层土壤养分易受气候环境的影响(表4,图5)。怪柳沙包深层(200—500 cm)土壤养分及化学计量主要受土壤水分及质地等的影响(表4,图5),这与丁小慧等<sup>[37]</sup>的研究结果较为一致。由于深层土壤受降水等气候因素的影响较小,且深层土壤中缺乏氧气,不利于微生物对土壤中有机质的分解,导致深层土壤养分含量相对较低。此外,怪柳沙包中枯落物对土壤养分的影响不容忽视,由于怪柳沙包的形成为沙物质及枯落物等的影响,枯落物含量在怪柳沙包土壤养分循环中起着极其重要的作用,关于怪柳沙包中枯落物含量及分解对土壤养分的影响有待进一步研究。

### 3.3 怪柳沙包中土壤养分变化的生态环境意义

怪柳沙包作为沙漠与绿洲之间重要的生态屏障,其演化发展方向对区域生态环境具有重要的影响。土壤养分是沙包上怪柳生长发育的营养基础,且怪柳沙包的形成为影响着土壤养分的变化。就怪柳沙包的形成机理来看,怪柳沙包是由怪柳枯落物和风沙在风力、怪柳灌丛等因素长期作用下交替堆积而成<sup>[16-17]</sup>。在怪柳灌丛发育初期,由于其形态较小,对风沙及枯落物的拦截能力较弱,导致土壤中养分含量较低。随着怪柳灌丛的生长,对风沙及枯落物的拦截能力逐渐增强,且怪柳的枯枝落叶逐渐增加,有利于更多沉积物堆积于怪柳灌丛下,在气候因子(降水、温度等)及生物因子的共同作用下,土壤养分逐渐积累。就本研究中相对稳定的怪柳沙包来说,在当前古尔班通古特沙漠地区降水相对增加的情况下,有利于怪柳沙包中土壤养分的持续积累,也有利于区域生态环境的稳定。

从怪柳沙包的现实意义来看,怪柳沙包中土壤虽具有“肥岛效应”,但其C、N、P仍然极为缺乏,不宜对其进行破坏及利用。如果对怪柳沙包进行开垦,不仅造成土壤养分的流失,也会导致土地退化。由于失去了怪柳灌丛的庇护,破坏的怪柳沙包将成为新的沙源,使风沙活动加剧,从而导致区域生态环境的退化。

## 4 结论

(1)随着土壤深度的增加,古尔班通古特沙漠怪柳沙包土壤pH总体呈升高趋势,从表层到深层土壤pH呈弱碱性、碱性到强碱性;土壤电导率总体呈先降低后升高的变化,呈表聚现象;土壤有机碳及总氮均呈先降低后升高的变化,且C、N在表层含量最高,呈表层富集。总磷含量在整个土层变化幅度较小,土壤C/N值呈先降低后升高再降低的变化,C/P和N/P值呈先降低后升高的变化。

(2)根据Pearson相关性分析和回归分析,怪柳沙包土壤C、N、P之间具有显著的线性关系,且化学计量比主要受C和N的制约。与全球及中国平均值相比,古尔班通古特沙漠怪柳沙包土壤C、N、P含量、C/P及N/P均相对较低,C/N相对较高,土壤养分元素缺乏程度表现为 $N > C > P$ 。

(3)怪柳沙包表层0—200 cm土壤养分易受降水、温度及蒸发等气候因素的影响,主要受C和N的制约;深层200—500 cm土壤养分易受土壤含水量的影响,受C、N、P的共同限制。

(4)怪柳沙包的土壤虽具有“肥岛效应”,但其C、N、P仍极其缺乏,不宜对其进行开发利用;其具有较好的生态价值,应加强保护。

### 参考文献(References):

- [1] Basic F, Kisić I, Mesic M, Nestroy O, Butorac A. Tillage and crop management effects on soil erosion in central Croatia. *Soil and Tillage Research*, 2004, 78(2): 197-206.
- [2] Xu G C, Li Z B, Li P. Fractal features of soil particle-size distribution and total soil nitrogen distribution in a typical watershed in the source area of the middle Dan River, China. *Catena*, 2013, 101: 17-23.
- [3] 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): 3235-3243.
- [4] 李红林, 贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 解丽娜, 洪毅. 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1345-1355.
- [5] Yang Y, Liu B R, An S S. Ecological stoichiometry in leaves, roots, litters and soil among different plant communities in a desertified region of Northern China. *Catena*, 2018, 166: 328-338.
- [6] Chai H, Yu G R, He N P, Wen D, Li J, Fang J P. Vertical distribution of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in typical Chinese terrestrial ecosystems. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(5): 549-560.

- [ 7 ] Bradshaw C, Kautsky U, Kumbalad L. Ecological stoichiometry and multi-element transfer in a coastal ecosystem. *Ecosystems*, 2012, 15(4): 591-603.
- [ 8 ] 周晓兵, 陶冶, 吴林, 李永刚, 张元明. 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土壤化学计量特征. *生态学报*, 2019, 39(3): 969-980.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 陶冶, 张元明. 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*, 2015, 26(3): 659-665.
- [ 11 ] Chen Y L, Chen L Y, Peng Y F, Ding J Z, Li F, Yang G B, Kou D, Liu L, Fang K, Zhang B B, Wang J, Yang Y H. Linking microbial C:N:P stoichiometry to microbial community and abiotic factors along a 3500 km grassland transect on the Tibetan plateau. *Global Ecology and Biogeography*, 2016, 25(12): 1416-1427.
- [ 12 ] 尹传华, 冯固, 田长彦, 白灯莎, 张福锁. 塔克拉玛干沙漠北缘柽柳灌丛肥岛效应的变化规律及其生态学意义. *北京林业大学学报*, 2008, 30(1): 52-57.
- [ 13 ] 刘树林, 王涛, 屈建军. 浑善达克沙地土地沙漠化过程中土壤粒度与养分变化研究. *中国沙漠*, 2008, 28(4): 611-616.
- [ 14 ] 刘进辉, 王雪芹, 马洋. 沙漠绿洲过渡带柽柳灌丛沙堆-丘间地系统土壤养分空间异质性. *生态学报*, 2016, 36(4): 979-990.
- [ 15 ] 李学斌, 张义凡, 陈林, 刘学东, 李月飞, 杨新国. 荒漠草原典型群落土壤粒径和养分的分布特征及其关系研究. *西北植物学报*, 2017, 37(8): 1635-1644.
- [ 16 ] 夏训诚, 曹琼英, 王富葆, 雷加强, 赵元杰. 罗布泊地区红柳沙包年层的研究意义. *干旱区地理*, 2005, 28(5): 565-568.
- [ 17 ] 赵元杰, 夏训诚. 新疆罗布泊红柳沙包与环境研究. 北京: 科学出版社, 2011, 38-142.
- [ 18 ] 尹传华, 石秋梅, 梁飞, 田长彦. 塔里木盆地柽柳灌丛沙堆盐分分布特点研究. *水土保持通报*, 2013, 33(3): 287-293.
- [ 19 ] 董正武, 赵英, 雷加强, 喜银巧. 塔克拉玛干沙漠不同区域柽柳沙包土壤盐分分布特征及其影响因素. *植物生态学报*, 2018, 42(8): 873-884.
- [ 20 ] 马瑞, 王继和, 屈建军, 胡小柯, 刘虎俊. 1960-2005 年民勤典型绿洲-荒漠过渡带景观格局与动态. *应用生态学报*, 2010, 21(3): 714-722.
- [ 21 ] 潘光耀, 穆桂金, 岳健, 贺俊霞, 孙琳. 2001-2010 年策勒绿洲-沙漠过渡带的变化及其成因. *干旱区研究*, 2014, 31(1): 169-175.
- [ 22 ] 丁改改, 蒋进, 宋春武, 李生宇, 王海峰, 周杰, 李亚萍. 古尔班通古特沙漠人工梭梭林群落生态特征研究. *中国生态农业学报*, 2017, 25(10): 1423-1432.
- [ 23 ] 张元明, 王雪芹. 准噶尔荒漠生物结皮研究. 北京: 科学出版社, 2008.
- [ 24 ] 张立运, 陈昌笃. 论古尔班通古特沙漠植物多样性的一般特点. *生态学报*, 2002, 22(11): 1923-1932.
- [ 25 ] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [ 26 ] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [ 27 ] Omar Z, Bouajila A, Brahim N, Grira M. Soil property and soil organic carbon pools and stocks of soil under oases in arid regions of Tunisia. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(12): 415.
- [ 28 ] 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.
- [ 29 ] 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.
- [ 30 ] 罗艳, 贡璐, 朱美玲, 安申群. 塔里木河上游荒漠区 4 种灌木植物叶片与土壤生态化学计量特征. *生态学报*, 2017, 37(24): 8326-8335.
- [ 31 ] 陶冶, 吴甘霖, 刘耀斌, 张元明. 古尔班通古特沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征及其影响因素. *中国沙漠*, 2017, 37(2): 305-314.
- [ 32 ] Zhang K, Su Y Z, Yang R. Variation of soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and biogeographic factors across the desert ecosystem of Hexi Corridor, northwestern China. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19: 49-57.
- [ 33 ] 李君, 赵成义, 朱宏, 王锋. 柽柳(*Tamarix* spp.) 和梭梭(*Haloxylon ammodendron*) 的“肥岛”效应. *生态学报*, 2007, 27(12): 5138-5147.
- [ 34 ] 王建林, 钟志明, 王忠红, 余成群, 沈振西, 张宪洲, 胡兴祥, 大次卓嘎. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳磷比的分布特征. *草业学报*, 2014, 23(2): 9-19.
- [ 35 ] Zhang G Q, Zhang P, Peng S Z, Chen Y M, Cao Y. The coupling of leaf, litter, and soil nutrients in warm temperate forests in northwestern China. *Scientific Reports*, 2017, 7: 11754.
- [ 36 ] 陈发虎, 黄伟, 靳立亚, 陈建徽, 王劲松. 全球变暖背景下中亚干旱区降水变化特征及其空间差异. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(11): 1647-1657.
- [ 37 ] 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.