

# 不同种源中间锦鸡儿碳氮磷化学计量特征研究

马飞<sup>1</sup>, 徐婷婷<sup>2</sup>, 刘吉利<sup>1</sup>, 肖国举<sup>1</sup>, 李明<sup>1</sup>, 毕江涛<sup>1</sup>, 纳小凡<sup>2\*</sup>

(1 宁夏大学 环境工程研究院, 银川 750021; 2 宁夏大学 生命科学学院, 银川 750021)

**摘要:** 中间锦鸡儿(*Caragana liouana*)是中国毛乌素沙地的主要灌木建群种,在其主要分布区采集9个不同地理种源的种子,栽种至同质园,并测定不同器官(根、茎、叶)碳(C)、氮(N)、磷(P)含量,比较种源和器官间碳氮磷化学计量特征的差异及元素之间的相关性。结果显示:(1)不同种源中间锦鸡儿根、茎、叶的C含量差异显著,分别为361.12~426.30 mg·g<sup>-1</sup>、412.32~463.13 mg·g<sup>-1</sup>、419.21~478.94 mg·g<sup>-1</sup>;N含量种源间差异显著,分别为20.52~33.67 mg·g<sup>-1</sup>、15.77~23.92 mg·g<sup>-1</sup>、27.60~36.44 mg·g<sup>-1</sup>;P含量种源间差异显著,分别为1.52~3.73 mg·g<sup>-1</sup>、1.24~2.14 mg·g<sup>-1</sup>、1.44~2.38 mg·g<sup>-1</sup>;不同器官的C/N、C/P、N/P也表现出种源间显著差异。(2)种源和器官对中间锦鸡儿碳氮磷化学计量特征的影响程度存在差异,种源对P、C/P、N/P影响较大,器官对C、N、C/N影响较大。(3)相关性分析表明,N、P分别对C/N和C/P的变异起主导作用,并共同影响N/P的变异。研究表明,中间锦鸡儿的碳氮磷化学计量特征在长期的适应进化过程中已产生遗传分化,并形成了自身的养分利用策略。

**关键词:** 中间锦鸡儿;种源;碳;氮;磷;生态化学计量

**中图分类号:** Q945.12      **文献标志码:** A

## Variations in Carbon, Nitrogen and Phosphorus Stoichiometry of *Caragana liouana* Originated from Nine Provenances in a Common Garden

MA Fei<sup>1</sup>, XU Tingting<sup>2</sup>, LIU Jili<sup>1</sup>, XIAO Guojun<sup>1</sup>, LI Ming<sup>1</sup>, BI Jiangtao<sup>1</sup>, NA Xiaofan<sup>2\*</sup>

(1 Institute of Environmental Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2 School of Life Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** To understand the response and adaptation of carbon(C), nitrogen(N) and phosphorus(P) stoichiometry to environmental changes, we conducted a provenance experiment on *C. liouana*, the dominant shrub species in the Mu Us Sandland of Northern China. We collected seeds from nine provenances and seedlings were cultivated under uniform condition, measuring the concentrations of C, N and P of different organs of *C. liouana* originated from nine provenances. The results showed that: (1) there were significant differences in C, N and P concentrations among provenances for different organs, with C concentrations of roots, stems and leaves ranging from 361.12 to 426.30 mg·g<sup>-1</sup>, from 412.32 to 463.13 mg·g<sup>-1</sup>, from 419.21 to 478.94 mg·g<sup>-1</sup>, respectively, with N concentrations ranging from 20.52 to 33.67 mg·g<sup>-1</sup>, from 15.77 to 23.92 mg·g<sup>-1</sup>, from 27.60 to 36.44 mg·g<sup>-1</sup> and with P concentrations from 1.52 to 3.73 mg·g<sup>-1</sup>, from 1.24 to 2.14 mg·g<sup>-1</sup>, from 1.44 to 2.38 mg·g<sup>-1</sup>, respectively. The C/N, C/P and N/P

收稿日期: 2017-03-29; 修改稿收到日期: 2017-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(31260166, 3136018, 31560345)

作者简介: 马飞(1982-), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事植物生理生态学研究。E-mail: mafei05@163.com

\* 通信作者: 纳小凡, 副教授, 硕士生导师, 主要从事植物营养与植物生理学研究。E-mail: nxf-0324@163.com

were also significantly differed among provenances for different organs. (2) GLM analysis revealed that relative to the strong effect of organs on C, N and C/N, the provenances appeared to have greater effects on P, C/P and N/P. (3) There were also significant correlations between N and C/N, P and C/P. The N/P was significantly correlated with both N and P. Overall, these results suggest that adaptation of *C. liouana* to different environments has led to its genetic differentiation in stoichiometric traits, and differences in C, N and P stoichiometry among different organs probably suggest that *C. liouana* has evolved a series of strategies in nutrient utilization.

**Key words:** *Caragana liouana*; provenance; carbon; nitrogen; phosphorus; stoichiometry

生态化学计量学综合了生物学、化学和物理学等学科的基本原理,研究生态过程中多种化学元素[主要是碳(C)、氮(N)和磷(P)]的平衡关系,是近年来新兴的一个生态学研究领域。C、N和P对植物生长及各种生理机能起着重要的调节作用<sup>[1]</sup>,三者的含量变化及其比值控制着植物的营养和生长状况<sup>[2-3]</sup>。N和P元素作为植物生长所必需的营养元素,也是各种蛋白质和遗传物质的重要组成元素,碳C则是植物各种生理生化过程的底物和能量来源<sup>[4]</sup>。因而,研究植物体内C、N和P生态化学计量特征对于揭示植物的生态适应过程和养分利用特征具有重要意义。

中间锦鸡儿(*Caragana liouana*)是毛乌素沙地主要建群灌木种之一,由于其具有抗旱、抗寒、耐瘠薄、繁殖性强等特点<sup>[5]</sup>,已成为当地防风固沙、水土保持以及生态系统保护、恢复和重建的先锋种<sup>[5-6]</sup>,而且较好适口性使其成为干旱和半干旱地区优良饲料。毛乌素沙地多样性的气候和地理环境促使中间锦鸡儿呈现出多种遗传型和表现型的分异,导致不同种源中间锦鸡儿产生生态性状的差异<sup>[5]</sup>。近年来,虽然有关中间锦鸡儿的生态学研究已有诸多报道,如水分利用<sup>[7]</sup>、开花和结实习性<sup>[8]</sup>、化学成分<sup>[9]</sup>、根瘤菌的多样性<sup>[10]</sup>、地理分布<sup>[11]</sup>、生理生

态<sup>[12]</sup>、遗传多样性等<sup>[13]</sup>,但是不同种源中间锦鸡儿碳氮磷化学计量特征是否存在差异、差异度如何、器官之间是否有差异等问题,尚未见报道,尽管这些研究对阐明中间锦鸡儿响应和适应环境变化的生理生态学机制具有重要意义。因此,本研究在同质园环境下,比较了9个种源中间锦鸡儿不同器官的C、N、P含量及其计量比,旨在分析不同种源中间锦鸡儿碳氮磷化学计量特征是否存在遗传分化,以及不同器官的养分利用特征和分配策略,以期研究中间锦鸡儿的环境适应机制以及该属植物的种质资源保护与利用提供数据支持。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验在宁夏大学试验基地进行(39°17'N,108°02'E)。该地区为中温带大陆性气候,昼夜温差大,雨雪稀少,蒸发强烈,气候干燥,风大沙多等。年均气温8.5℃左右,年均日照时数2800~3000h,年均降水量200mm左右,其中50%集中在6~8月份,无霜期185d左右。

参试中间锦鸡儿种子于2014年7月采自9个不同地理和气候特点的种源地(表1)。中间锦鸡儿所有种源的种子于2015年3月底在光照培养箱内进

表1 中间锦鸡儿9个种源地的环境状况

Table 1 Environmental characteristics of nine sampling sites collecting seeds of *C. liouana*

种源 Provenance	代码 Code	经度(E) Longitude/°	纬度(N) Latitude/°	海拔 Altitude/m	年均降水量 MAP/mm	年均温 MAT/°C
宁夏盐池县 Yanchi, Ningxia	YC	107.45	37.81	1431	258.6	8.2
鄂托克前旗 Etuokeqian Qi	EQ	107.66	38.68	1344	225.2	7.2
陕西靖边县 Jingbian, Shaanxi	JB	108.21	37.48	1372	353.7	7.3
陕西横山县 Hengshan, Shaanxi	HS	109.25	37.86	1057	370.1	8.1
陕西榆林市 Yulin, Shaanxi	YL	109.36	38.15	1152	341.5	8.4
陕西神木县 Shenmu, Shaanxi	SM1	110.15	39.21	1257	379.9	7.2
陕西神木县 Shenmu, Shaanxi	SM2	110.23	38.76	1220	385.8	6.5
内蒙伊金霍洛旗 Yijinhuoluo Qi	YQ	110.28	39.33	1285	382.4	7.3
山西河曲县 Hequ, Shanxi	HQ	111.18	39.35	893	393.6	7.9

行萌发、培育,并在 4 月底移栽至室外 6 L 塑料花盆内。每盆栽种 1 株,每个种源栽种 5 盆作为重复。栽培基质为黄沙和珍珠岩 1:1(体积比)均匀混合。

## 1.2 取样与分析

试验于 2015 年 8 月对中间锦鸡儿不同种源植株进行收获。每个种源选择 3 株长势一致的植物进行采样,并分为根、茎、叶三部分。所有样品带回实验室经清洗后,于烘箱中 105 ℃ 杀青 0.5 h,然后 80 ℃ 烘干至恒重(48 h)。粉碎后过 100 目筛,测定不同器官 C、N、P 含量。全 C 采用重铬酸钾氧化外加热法,全 N 采用全自动凯氏定氮法,全 P 采用钼锑抗比色法测定。测定结果均以单位质量含量( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )表示。

## 1.3 统计分析

采用 SigmaPlot 12.5 和 SPSS 16.0 软件分别

对数据进行图形绘制和统计分析,并利用 GLM 模型(General Linear Model)分析种源、器官及其交互作用对中间锦鸡儿碳氮磷化学计量特征的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 中间锦鸡儿不同器官 C、N、P 含量及其计量比的种源间差异

由图 1 可知,中间锦鸡儿根 C 含量的变化范围为  $361.12 \sim 426.30 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,茎 C 含量变化范围为  $412.32 \sim 463.13 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,叶 C 含量变化范围为  $419.21 \sim 478.94 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,且各器官 C 含量在种源间差异极显著( $P < 0.001$ )。根 N 含量变化范围为  $20.52 \sim 33.67 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,茎 N 含量变化范围为  $15.77 \sim 23.92 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,叶 N 含量变化范围为  $27.60 \sim 36.44 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,且各器官 N 含量种源间差异极

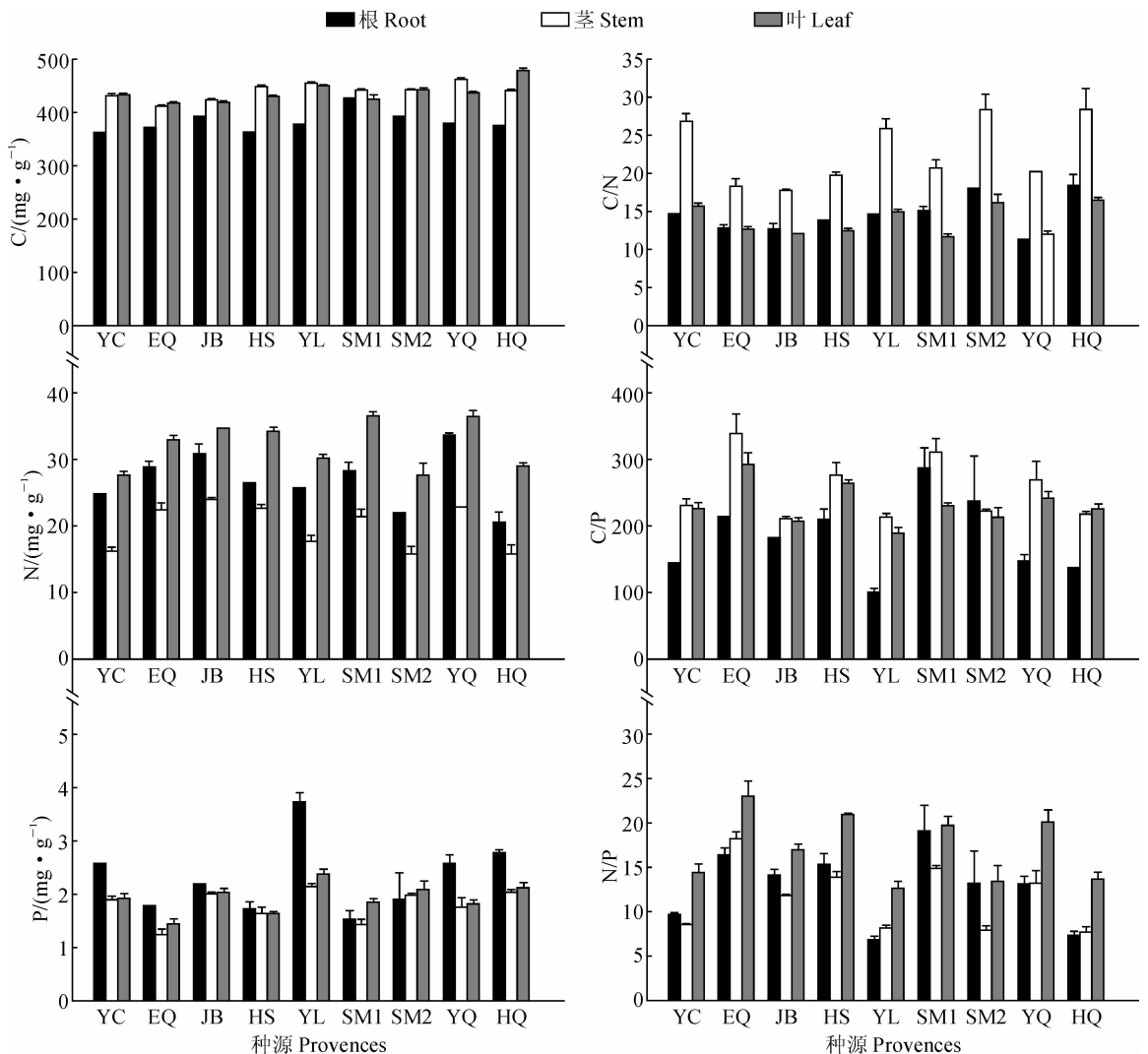


图 1 不同种源中间锦鸡儿 C、N、P 含量及其计量比

Fig. 1 Concentrations of C, N, P and their ratios (C/N, C/P and N/P) for different organs of *C. liouana* originated from nine provenances

显著。根 P 含量变化范围为 1.52~3.73 mg·g<sup>-1</sup>, 茎 P 含量变化范围为 1.24~2.14 mg·g<sup>-1</sup>, 叶 P 含量变化范围为 1.44~2.38 mg·g<sup>-1</sup>。种源间各器官 P 含量差异达到极显著。

不同种源中间锦鸡儿的计量比(C/P、C/N、N/P)如图 1 所示。中间锦鸡儿根、茎、叶的 C/P 分别在 101.28~285.82 mg·g<sup>-1</sup>、211.68~338.44 mg·g<sup>-1</sup>、189.47~292.2 mg·g<sup>-1</sup> 之间波动,种源间各器官的 C/P 差异均达到极显著( $P < 0.001$ )。中间锦鸡儿根、茎、叶的 N/P 分别在 6.93~19.13 mg·g<sup>-1</sup>、7.72~18.26 mg·g<sup>-1</sup>、12.69~22.99 mg·g<sup>-1</sup> 之间波动,种源间差异达到极显著。中间锦鸡儿根、茎、叶的 C/N 的波动范围分别在 11.25~18.43 mg·g<sup>-1</sup>、17.76~28.45 mg·g<sup>-1</sup>、11.70~16.52 mg·g<sup>-1</sup>,且种源间差异极显著。

## 2.2 不同器官 C、N、P 含量及其计量比与环境因子的相关性

通过分析不同器官 C、N、P 含量及其计量比(C/N、C/P、N/P)与种源地海拔(ALT)、年降水量(MAR)和年均温(MAT)之间的相关性(表 2),结果表明根的 C、N、P 含量及其计量比中仅有 C 含量、C/P 和 N/P 与 MAT 呈显著负相关,P 含量与 MAT 呈显著正相关;茎的元素含量及其计量比中仅发现 C 含量与 MAR 呈显著正相关;叶的元素含量及其计量比中仅发现 C 含量与 ALT 呈正相关。

## 2.3 中间锦鸡儿不同器官 C、N、P 含量及其化学计量特征

通过对 9 个种源中间锦鸡儿不同器官 C、N、P

含量及其计量比进行统计学分析(图 2),结果表明中间锦鸡儿根、茎、叶 C 含量的平均值分别为 381.35、440.38 和 437.65 mg·g<sup>-1</sup>,茎和叶的 C 含量极显著高于根( $P < 0.001$ )。根、茎、叶 N 含量的平均值分别为 26.73、19.84 和 32.09 mg·g<sup>-1</sup>,根和叶的 N 含量极显著高于茎( $P < 0.001$ )。根、茎、叶的 P 含量分别为 2.30、1.79 和 1.92 mg·g<sup>-1</sup>,根的 P 含量极显著高于茎和叶。不同种源中间锦鸡儿根、茎、叶的 C/N 和 C/P 分别为 14.61 和 183.51、22.98 和 254.26、13.85 和 232.07, N/P 分别为 12.83、11.63、17.22。

## 2.4 种源和器官对中间锦鸡儿 C、N 和 P 含量及其计量比的影响

由表 3 可知,中间锦鸡儿 C、N、P 含量及其计量比受种源、器官及两者交互影响的程度各不相同。中间锦鸡儿 C 含量受器官影响极显著( $P < 0.001$ ),其平方和最大(59 959.83),其次为种源和器官的交互影响( $P < 0.001$ ),最后为种源对 C 含量的极显著影响。N 含量受器官影响极显著( $P < 0.001$ ),其平方和最大(2 037.51),其次为种源(911.81,  $P < 0.001$ ),最后为两者的交互作用( $P < 0.01$ )。种源、器官及其交互作用对中间锦鸡儿 P 含量的影响极显著( $P < 0.001$ ),通过比较平方和,可知种源对其影响最大(10.98),其次为交互作用(4.51)和种源(3.79)。

由表 3 可知,中间锦鸡儿 C/N 的变异主要受器官影响,其次为种源,最后为两者的交互作用,且三者对中间锦鸡儿 C/N 的影响均达到极显著水平( $P$

表 2 中间锦鸡儿不同器官 C、N、P 含量及 C/N、C/P、N/P 与环境因子的相关性

Table 2 Correlations of C, N, P and their ratios (C/N, C/P and N/P) with environmental factors for different organs of *C. liouana*

器官 Organ	环境因子 Environmental factor	C	N	P	C/N	C/P	N/P
根 Root	海拔 ALT	0.089	0.513	-0.210	-0.533	0.143	0.326
	年均降雨量 MAR	0.438	-0.097	0.037	0.317	0.125	-0.025
	年均温 MAT	-0.850**	-0.363	0.677*	-0.055	-0.793*	-0.772*
茎 Stem	海拔 ALT	-0.407	0.265	-0.222	-0.335	0.164	0.262
	年均降雨量 MAR	0.683*	-0.025	0.401	0.157	-0.349	-0.322
	年均温 MAT	0.174	-0.382	0.476	0.385	-0.463	-0.469
叶 Leaf	海拔 ALT	0.755*	-0.094	-0.247	-0.294	0.049	0.193
	年均降雨量 MAR	0.437	0.233	0.437	-0.026	-0.448	-0.236
	年均温 MAT	0.409	-0.531	0.283	0.510	-0.137	-0.409

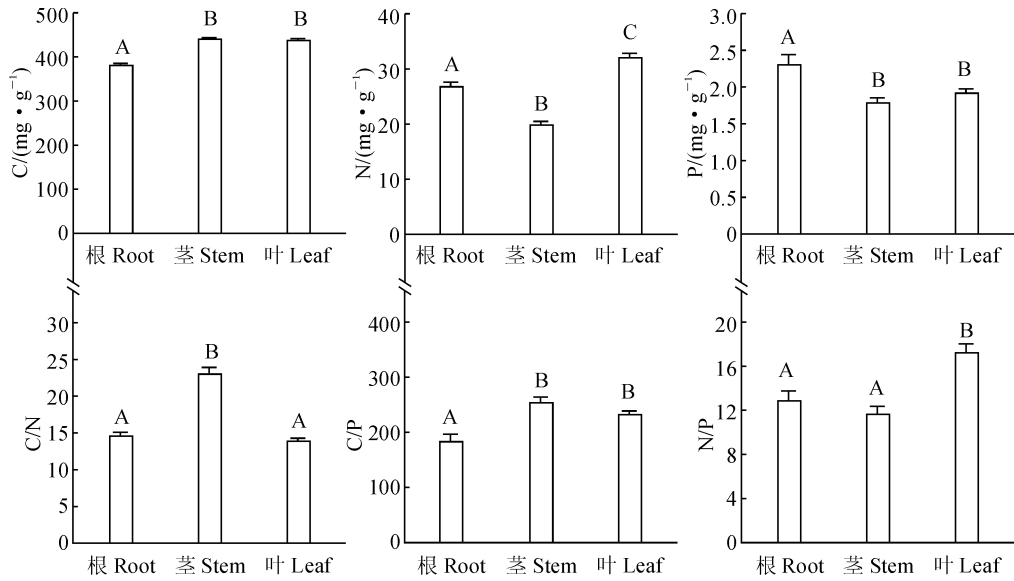


图2 中间锦鸡儿不同器官 C、N、P 含量及其计量比

Fig. 2 Differences in concentrations of C, N, P and their ratios among different organs of *C. liouana*

表3 种源与器官及其交互作用对中间锦鸡儿 C、N、P 含量及其计量比的影响

Table 3 Effect of provenances, organs and their interaction on concentrations of C, N, P and their ratios

自变量 Independent variable	因变量 Dependent variable	平方和 SS	自由度 <i>df</i>	均方 MS	F
种源 Provenance (P)	C/(mg·g <sup>-1</sup> )	8 724.74	8	1 090.59	96.62***
	N/(mg·g <sup>-1</sup> )	911.81	8	113.98	51.04***
	P/(mg·g <sup>-1</sup> )	10.98	8	1.37	27.21***
	C/N	551.26	8	68.91	28.98***
	C/P	107 013.02	8	13 376.63	13.77***
	N/P	989.27	8	123.66	28.97***
器官 Organ (O)	C/(mg·g <sup>-1</sup> )	59 959.83	2	29 979.92	2 656.00***
	N/(mg·g <sup>-1</sup> )	2 037.51	2	1 018.75	456.15***
	P/(mg·g <sup>-1</sup> )	3.79	2	1.90	37.60***
	C/N	1 385.79	2	692.90	291.40***
	C/P	70 693.50	2	35 346.75	36.38***
	N/P	467.91	2	233.96	54.81***
种源×器官 P×O	C/(mg·g <sup>-1</sup> )	14 744.30	16	921.52	81.64***
	N/(mg·g <sup>-1</sup> )	95.73	16	5.98	2.68**
	P/(mg·g <sup>-1</sup> )	4.51	16	0.28	5.59***
	C/N	134.02	16	8.38	3.52***
	C/P	49 242.15	16	3 077.64	3.17***
	N/P	106.06	16	6.63	1.55

<0.001)。种源、器官及其交互作用对中间锦鸡儿 C/P 影响极显著( $P<0.001$ ),但是三者的影响程度表现为种源最大,其次为器官,最后为两者交互作用。N/P 受种源影响最显著( $P<0.001$ ),其平方和最大(989.27),其次为器官(467.91, $P<0.001$ ),两

者交互作用对其影响不显著( $P>0.05$ )。

## 2.5 中间锦鸡儿 C、N、P 含量及其与计量比的相关性

由图 3 可知,C 含量与 N 含量相关性不显著( $R^2=0.014$ , $P=0.551$ ),但是与 C/N、C/P 均存在显著

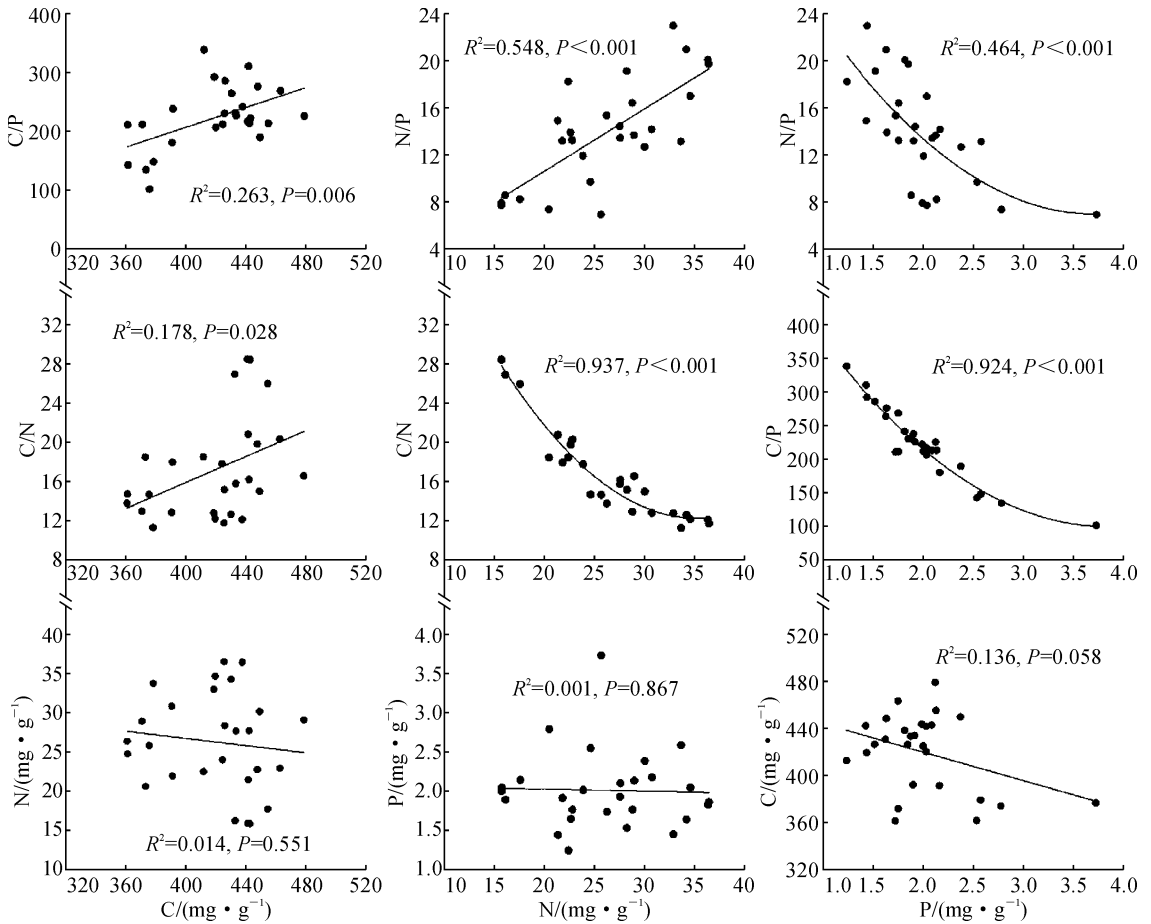


图3 不同种源中间锦鸡儿 C、N、P 含量及其计量比间的相关性

Fig. 3 Relationships among C, N, P and their ratios of *C. liouana* originated from nine provenances

正相关 ( $R^2 = 0.178, P = 0.028$ ;  $R^2 = 0.263, P = 0.006$ )。N 含量与 P 含量之间相关性不显著 ( $R^2 = 0.001, P = 0.867$ )，但是与 C/N 呈显著负相关 ( $R^2 = 0.937, P < 0.001$ )，以及与 N/P 呈显著正相关 ( $R^2 = 0.548, P < 0.001$ )。P 含量与 C 含量相关性不显著 ( $R^2 = 0.136, P = 0.058$ )，而与 C/P 和 N/P 均呈显著负相关 ( $R^2 = 0.924, P < 0.001$ ;  $R^2 = 0.464, P < 0.001$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 不同种源中间锦鸡儿 C、N、P 化学计量特征分析

植物对异质环境的适应是表型驯化和遗传分化共同作用的结果，并在长期的进化过程中形成不同的生理生态和养分利用特征<sup>[14-15]</sup>。在同质园环境下比较同一植物不同种群(种源)的生理生态特征差异，剔除表型变异中的环境因素而单独考察遗传因素的效应，是检验植物在适应不同环境过程中是否产生遗传分化的有效手段之一<sup>[16]</sup>。如果不同种群(种源)的生理生态特征差异在同质园环境下依然存

在，则可认定这种差异来源于遗传分化。本研究通过采集中间锦鸡儿 9 个种源的种子，并在一致的气候和土壤条件萌发、生长以及测定其生态化学计量特征，研究表明中间锦鸡儿根、茎、叶的 C、N、P 含量及其计量比(C/N、C/P、N/P)均表现出显著的种源间差异，说明中间锦鸡儿不同器官中化学计量特征在对种源地环境条件的长期进化适应过程中产生了遗传分化。包珊珊等<sup>[13]</sup>利用 ISSR 分子标记也证实了中间锦鸡儿种源间也存在较大的遗传分化。虽然 Reich 等<sup>[17]</sup>通过在同质园下比较不同温度条件下欧洲赤松的 N、P 化学计量特征，表明生长于低温环境中的赤松叶片表现出更高的 N、P 含量，平川等<sup>[14]</sup>在同质环境下对 6 个不同种源兴安落叶松的研究也表明不同器官 N 含量随温度的升高呈增加趋势。尽管如此，在本研究中，通过比较中间锦鸡儿不同器官 C、N、P 含量及其计量比与种源地环境因子的关系，仅发现根 C 和 P 含量与年均温存在显著正相关，茎和叶 C 含量分别与年均降雨量和海拔显著正相关，而根、茎、叶的 N 含量与种源地的海拔、年均温及降雨量均不相关。造成这种结果的原因可能

与遗传和环境因素对植物适应性状的影响程度有关,如 Bresson 等<sup>[18]</sup>研究表明同质园环境下欧洲橡树和山毛榉不同海拔种群叶片性状与其种源地气候环境不具相关性的主要原因是环境因素对叶片性状的变异起主导作用,遗传因素的影响较弱。因此,通过本研究结果可以推断环境因素可能是中间锦鸡儿碳氮磷化学计量特征变异的主要驱动力。

### 3.2 中间锦鸡儿不同器官 C、N、P 化学计量特征分析

植物在长期进化过程中通过调节自身的资源配置适应特定的生长环境,形成一定的生长特性与元素分配规律,因而分析植物不同器官的元素变化特征及分配策略有助于理解植物的生态适应机制<sup>[14-15]</sup>。植物叶、茎和根由于养分贮存与功能差异导致各器官的元素含量及其计量存在显著差异<sup>[19]</sup>。叶片是植物获取能源和合成光合产物的场所,对营养元素的吸收和贮存起着重要作用;茎是支撑和连接地下吸收器官和地上同化组织的传导器官,根是营养元素吸收和转运的主要器官<sup>[15,19]</sup>。本研究结果表明,将不同种源的中间锦鸡儿栽种至同质环境下,中间锦鸡儿叶、茎 C 含量显著高于根 C 含量,说明中间锦鸡儿在长期适应环境过程中将更多的 C 分配到茎和叶器官中,用于地上部分生长,以便获取更多光能、积累更多同化物以及抵抗外界环境的干扰,如强风、沙埋等。中间锦鸡儿不同器官的 N 分配特征表明叶片 N 含量最高,其次是根,茎中 N 含量最低。这可能是因为本研究的采样时间是中间锦鸡儿的生长旺季,叶片光合作用增强,N 作为叶片光合作用关键酶的重要组成部分,叶片对 N 元素需求相应增加,从而导致叶片中 N 含量最高<sup>[20]</sup>,而根是豆科锦鸡儿属植物吸收 N 元素以及生物固氮的场所。这与赵亚芳等<sup>[17]</sup>研究结果一致。中间锦鸡儿根 P 含量显著高于叶、茎,可能是由于根系持续吸收养分并在根中贮存的结果<sup>[19]</sup>。

植物叶片 C/N 和 C/P 能够表征植物吸收 N、P 元素所同化 C 的能力,是植物养分利用效率的重要指标,在一定程度上能够反映植物的生态适应策略<sup>[21]</sup>。Bell 等<sup>[22]</sup>和李征等<sup>[23]</sup>研究表明 C/N 和 C/P 可以预测有机质的分解速率,表征植物的生长速率,并因此推断生长快速的有机体 C/N 和 C/P 较低。在本研究中,中间锦鸡儿根 C/P 显著低于茎、叶,而根和叶 C/N 显著低于茎,可能说明相对于叶和茎,中间锦鸡儿的根具有更快的生长速率。中间锦鸡儿的这种特性有助于其更加充分或者能够从更深层的

土壤中吸收水分,以增强应对旱季水分亏缺的能力。植物叶片 N/P 是判断环境对植物生长的养分供应状况和植物生长速率的重要指标<sup>[24]</sup>。在本研究中,中间锦鸡儿的叶 N/P 显著高于茎,这可能是中间锦鸡儿在长期处于干旱环境中,水分亏缺限制了茎和根对养分元素传递和运输能力,导致叶片中起保护作用的含氮可溶性物质增加,调节渗透势,从而避免干旱胁迫的危害。包茵等<sup>[25]</sup>和吴统贵等<sup>[26]</sup>等研究也发现类似的结果。除此之外,本研究还发现中间锦鸡儿的 N/P 明显高于 16,说明相对于 N 元素,P 元素可能是限制中间锦鸡儿生长发育的主要元素<sup>[24]</sup>,这可能与锦鸡儿属植物自身具有固氮能力有关。

### 3.3 种源与器官对中间锦鸡儿 C、N、P 化学计量特征的影响

植物叶片通过光合作用合成所需的 C 同化产物,并将其分配至茎器官和根器官,用于营养元素的运输和吸收。N 元素作为光合作用关键酶的重要组成部分,直接决定了植物光合能力的高低<sup>[3]</sup>。因而,器官间 C、N 元素的分配策略对植物适应环境至关重要。已有的研究表明器官对 C、N 及 C/N 影响相对较大<sup>[20]</sup>,这与本研究结果一致。平川等<sup>[14]</sup>研究也表明植物在同质环境下通过调节器官间养分分配策略来适应环境变化。P 元素也是荒漠植物主要的限制元素,但是植物本身转化 P 元素的速率较低,因而荒漠植物对 P 的需求主要依赖环境的变化,从而致使环境对 P、C/P 和 N/P 的影响相对较大。胡启武等<sup>[27]</sup>研究也表明土壤养分含量会在植物中体现,并受外界环境影响。除此之外,本研究还发现中间锦鸡儿的 N 与 C/N、P 与 C/P 相关性极显著,说明 N 和 P 含量的变化分别对 C/N 和 C/P 的变异起主导作用,而 N、P 与 N/P 的极显著相关性表明两者的变异对 N/P 影响极显著。平川等<sup>[14]</sup>、Li 等<sup>[28]</sup>的研究结果与此类似。

## 4 结 论

同质环境下不同种源中间锦鸡儿根、茎、叶的 C、N、P 含量及计量比差异显著,说明中间锦鸡儿在适应不同环境的过程中养分利用特征产生了遗传分化;中间锦鸡儿不同器官的 C、N、P 含量及计量比存在显著差异,可能是中间锦鸡儿响应外界环境以及自身调节的结果,体现了不同器官的养分利用策略;种源和器官对中间锦鸡儿 C、N、P 含量及计量比的影响存在差异,种源对 P 含量、C/P、N/P 影响较大,

器官对 C、N 含量及 C/N 影响较大,而且 N、P 含量分别对 C/N 和 C/P 的变异起主导作用,并共同影

响 N/P 的变异。

### 参考文献:

- [1] 荣钺钺,刘京涛,夏江宝,等. 莱州湾湿地柽柳叶片 N、P 生态化学计量学特征[J]. 生态学杂志,2012,**31**(12):3 032-3 037.
- RONG Q Q, LIU J T, XIA J B, *et al.* Leaf N and P stoichiometry of *Tamarix chinensis* L. in Laizhou Bay wetland, Shandong Province of East China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012,**31**(12):3 032-3 037.
- [2] NIKLAS K J, OWENS T, REICH P B, *et al.* Nitrogen/phosphorus leaf stoichiometry and the scaling of plant growth[J]. *Ecology Letters*, 2005,**8**(6):636-642.
- [3] REICH P B, TJOELKER M G, MACHADO J L, *et al.* Universal scaling of respiratory metabolism, size and nitrogen in plants[J]. *Nature*, 2006,**439**(7 075): 457-463.
- [4] 杨惠敏,王冬梅. 草-环境系统植物碳氮磷生态化学计量学及其对环境因子的响应研究进展[J]. 草业学报, 2011,**20**(2): 244-252.
- YANG H M, WANG D M. Advances in the study on ecological stoichiometry in grass- environment system and its response to environment factors[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011,**20**(2): 244-252.
- [5] 杨明博,杨吉力,杨九艳,等. 鄂尔多斯高原不同生境条件下中间锦鸡儿植物叶片表皮特征及遗传多样性变化分析[J]. 植物生态学报, 2007,**31**(6): 1 181-1 189.
- YANG M B, YANG J L, YANG J Y, *et al.* Changes of characteristics of the leaf epidermis and genetic diversity of *Caragana davazamcii* in different habitats in Erdos Plateau, China [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007,**31**(6): 1 181-1 189.
- [6] WHITFORD W G. Ecology of Desert Systems[M]. London: Academic Press, 2002.
- [7] 刘丽颖,贾志清,朱雅娟,等. 高寒沙地不同林龄中间锦鸡儿的水分利用策略[J]. 干旱区资源与环境, 2012,**26**(5): 119-125.
- LIU L Y, JIA Z Q, ZHU Y J, *et al.* Water use strategy of different stand ages of *Caragana intermedia* in alpine sandland [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012,**26**(5): 119-125.
- [8] 陈河龙,王 赞,孙桂枝,等. 中间锦鸡儿结实习性[J]. 草业科学,2007,**24**(2): 20-26.
- CHEN H L, WANG Z, SUN G Z, *et al.* Study on fruit habit of *Caragana intermedia* Kuang[J]. *Pratacultural Science*, 2007,**24**(2): 20-26.
- [9] 张 甦,施 蛟,孙智华,等. 中间锦鸡儿化学成分的研究[J]. 中药材,2006,**29**(1): 19-21.
- ZHANG S, SHI J, SUN Z H, *et al.* Studies on the chemical components of *Caragana intermedia* Kuang[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2006,**29**(1): 19-21.
- [10] 高丽峰,邓 馨,王洪新,等. 毛乌素沙地中间锦鸡儿根瘤菌的多样性及其抗逆性[J]. 应用生态学报,2004,**15**(1): 44-48.
- GAO L F, DENG X, WANG H X, *et al.* Diversity and resistance of rhizobia isolated from *Caragana intermedia* in Maowusu sandland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004,**15**(1): 44-48.
- [11] 牛西午. 中国锦鸡儿属植物资源研究-分布及分种描述[J]. 西北植物学报, 1999,**19**(5): 107-133.
- NIU X W. The distribution and description of *Caragana* Fabr. in China[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1999,**19**(5): 107-133.
- [12] 徐婷婷,毕江涛,马 飞. 毛乌素沙地 2 种锦鸡儿属植物的光合生理特性[J]. 森林与环境学报, 2016,**1**: 48-53.
- XU T T, BI J T, MA F. Photosynthetic characteristics of two *Caragana* species in Mu Us sandy land[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2016,**1**: 48-53.
- [13] 包姗姗,杨九艳,赵玲玲,等. 内蒙古高原小叶锦鸡儿与中间锦鸡儿遗传多样性的研究[J]. 西北植物学报, 2015,**35**(10):1 998-2 006.
- BAO S S, YANG J Y, ZHAO L L, *et al.* Genetic Diversity of *Caragana microphylla* and *Caragana intermedia* in Inner Mongolia Plateau [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015,**35**(10):1 998-2 006.
- [14] 平 川,王传宽,全先奎. 环境变化对兴安落叶松氮磷化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2014,**34**(8):1 965-1 974.
- PING C, WANG C K, QUAN X K. Influence of environmental changes on stoichiometric traits of nitrogen and phosphorus for *Larix gmelinii* trees[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014,**34**(8):1 965-1 974.
- [15] 赵亚芳,徐福利,王渭玲,等. 华北落叶松根茎叶碳氮磷含量及其化学计量学特征的季节变化[J]. 植物学报, 2014,**49**(5): 560-568.
- ZHAO Y F, XU F L, WANG W L, *et al.* Seasonal variation in contents of C, N and P and stoichiometry characteristics in fine roots, stems and needles of *Larix principis-rupprechtii* [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2014,**49**(5): 560-568.
- [16] BALLENTINE B, GREENBERG R. Common garden experiment reveals genetic control of phenotypic divergence between swamp sparrow subspecies that lack divergence in neutral

- genotypes[J]. *Plos One*, 2010, **5**(4): e10229.
- [17] REICH P B, OLEKSYN J, TJOELKER M G. Needle respiration and nitrogen concentration in Scots pine populations from a broad latitudinal range: a common garden test with field-grown trees [J]. *Functional Ecology*, 1996, **10** (6): 768-776.
- [18] BRESSON C C, VITASSE Y, KREMER A, *et al.* To what extent is altitudinal variation of functional traits driven by genetic adaptation in European oak and beech? [J]. *Tree Physiology*, 2013, **31**(11): 1 164-1 174.
- [19] 李从娟, 徐新文, 孙永强, 等. 不同生境下三种荒漠植物叶片及土壤 C、N、P 的化学计量特征[J]. 干旱区地理(汉文版), 2014, **37**(5): 996-1 004.
- LI C J, XU X W, SUN Y Q, *et al.* Stoichiometric characteristics of C, N, P for three desert plants leaf and soil at different habitats [J]. *Arid Land Geography*, 2014, **37** (5): 996-1 004.
- [20] 罗 艳, 贡 璐. 塔里木盆地南缘不同生境下芦苇生态化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2016, **35**(3): 684-691.
- LUO Y, GONG L. Stoichiometric characteristics in root, stem and leaf of *Phragmites australis* in different habitats in the southern marginal zone of Tarim Basin [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, **35**(3): 684-691.
- [21] 黄建军, 王希华. 浙江天童 32 种常绿阔叶树叶片的营养及结构特征[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2003, **2003** (1): 92-97.
- HUANG J J, WANG X H. Leaf nutrient and structural characteristics of 32 evergreen broad leaved species [J]. *Journal of East China Normal University: (Natural Science)*, 2003, **2003**(1): 92-97.
- [22] BELL C, CARRILLO Y, BOOT C M, *et al.* Rhizosphere stoichiometry: are C/N/P ratios of plants, soils, and enzymes conserved at the plant species-level [J]. *New Phytologist*, 2014, **201**(2): 505-517.
- [23] 李 征, 韩 琳, 刘玉虹, 等. 滨海盐地碱蓬不同生长阶段叶片 C、N、P 化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2012, **36** (10): 1 054-1 061.
- LI Z, HAN L, LIU Y H, *et al.* C, N and P stoichiometric characteristics in leaves of *Suaeda salsa* during different growth phase in coastal wetlands of China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, **36**(10): 1 054-1 061.
- [24] 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.
- [25] 包 茜, 清 华, 王立新, 等. 乌梁素海湖滨带植物生态化学计量学研究[J]. 内蒙古大学学报(自然版), 2014, **4**: 404-409.
- BAO H, QING H, WANG L X, *et al.* A study on ecological stoichiometry plants on Lakeside zone of Wuliangsu Lake [J]. *Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition)*, 2014, **4**: 404-409.
- [26] 吴统贵, 吴 明, 刘 丽, 等. 杭州湾滨海湿地 3 种草本植物叶片 N、P 化学计量学的季节变化[J]. 植物生态学报, 2010, **34**(1): 23-28.
- WU T G, WU M, LIU L, *et al.* Seasonal variations of leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of three herbaceous species in Hangzhou Bay coastal wetlands, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, **34**(1): 23-28.
- [27] 胡启武, 宋明华, 欧阳华, 等. 祁连山青海云杉叶片氮、磷含量随海拔变化特征[J]. 西北植物学报, 2007, **27**(10): 2 072-2 079.
- HU Q W, SONG M H, OUYANG H, *et al.* Variations in leaf N, P of *Picea crassifolia* along the altitude gradient in Qilian Mountains [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, **27**(10): 2 072-2 079.
- [28] LI A, GUO D, WANG Z, LIU H. Nitrogen and phosphorus allocation in leaves, twigs, and fine roots across 49 temperate, subtropical and tropical tree species: a hierarchical pattern [J]. *Functional Ecology*, 2010, **24**(1): 224-232.

(编辑:潘新社)