

叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨叶片和凋落叶的生态化学计量特征

王晶^{a,b}, 殷飞^{a,b}, 林宁^{a,b}

(喀什大学: a. 化学与环境科学学院, b. 新疆生物类固废资源化工程技术研究中心, 新疆喀什 844006)

摘要: 以叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨(*Populus euphratica* Oliv.) 为研究对象, 比较了胡杨叶片和凋落叶及不同类型叶片间 C、N 和 P 的生态化学计量特征差异, 并对 N 和 P 的再吸收率及其与叶片和凋落叶 N 和 P 含量的相关性进行了分析。结果表明: 胡杨叶片 C、N 和 P 含量的均值(分别为 404.00、43.75 和 0.81 mg · g⁻¹) 均大于凋落叶(分别为 373.45、42.83 和 0.78 mg · g⁻¹); 叶片 C/N 比、C/P 比和 N/P 比的均值(分别为 10.50、511.49 和 56.15) 也均大于凋落叶(分别为 8.12、492.72 和 54.90), 其中, 叶片 C 含量的均值显著($P < 0.05$) 大于凋落叶, 而叶片与凋落叶其他 5 个生态化学计量指标的均值均无显著差异。披针形、卵圆形和阔卵形叶片 C、N 和 P 含量的均值分别为 399.03 ~ 408.76、37.12 ~ 47.60 和 0.78 ~ 0.84 mg · g⁻¹, C/N 比、C/P 比和 N/P 比的均值分别为 8.68 ~ 13.92、495.19 ~ 533.32 和 52.05 ~ 62.11; 其中, 阔卵形叶片 C 和 N 含量的均值均最大, 卵圆形叶片 P 含量的均值最大, 披针形叶片 C、N 和 P 含量的均值均最小, 披针形叶片 C/N 比和 C/P 比的均值均最大, 阔卵形叶片 N/P 比的均值最大; 阔卵形叶片与披针形叶片 N 含量的均值差异显著, 3 类叶片其他 5 个生态化学计量指标的均值均无显著差异。胡杨叶片和凋落叶 C 含量的变异系数均最小, 表明胡杨叶片中 C 含量相对稳定; 在 3 类叶片中, 披针形叶片 C、N 和 P 含量及 C/P 比、C/N 比和 N/P 比的变异系数均最大, 表明披针形叶片的生态化学计量特征变幅较大。胡杨叶片 N 和 P 再吸收率分别为 2.10% 和 3.70%; N 再吸收率与凋落叶 N 含量呈显著负相关, N 再吸收率与叶片 N 含量呈不显著负相关, P 再吸收率与叶片和凋落叶 P 含量均呈不显著正相关。综合分析结果显示: 叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨叶片和凋落叶及 3 类叶片间的生态化学计量特征差异明显, 根据生态化学计量特征推测该区域胡杨生长主要受到 P 元素限制; 胡杨凋落叶的分解速率较为缓慢, 导致其 N 和 P 的再吸收能力均较弱; 在胡杨的 3 类叶片中, 披针形叶片的养分吸收和转化能力均较弱。

关键词: 叶尔羌河流域; 胡杨; 凋落叶; 生态化学计量特征; 养分再吸收率

中图分类号: Q944.56; S792.11 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2021)05-0042-08
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2021.05.05

Ecological stoichiometric characteristics of leaf and litter leaf of *Populus euphratica* from desert riparian forest in Yarkant River Basin WANG Jing^{a,b}, YIN Fei^{a,b}, LIN Ning^{a,b} (Kashi University: a. College of Chemistry and Environmental Science, b. Xinjiang Biomass Solid Waste Resources Technology and Engineering Center, Kashi 844006, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2021, 30(5): 42-49

Abstract: Taking *Populus euphratica* Oliv. from desert riparian forest in Yarkant River Basin as the research object, the differences in ecological stoichiometric characteristics of C, N and P between leaf and litter leaf and among different types of leaves of *P. euphratica* were compared, and the reabsorption rates of N and P and their correlations with N and P contents in leaf and litter leaf were analyzed. The

收稿日期: 2021-01-07

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2019D01A03)

作者简介: 王晶(1982—), 女, 新疆呼图壁人, 硕士, 副教授, 主要从事环境生态学方面的研究。

引用格式: 王晶, 殷飞, 林宁. 叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨叶片和凋落叶的生态化学计量特征[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(5): 42-49.

results show that the averages of C, N and P contents in leaf of *P. euphratica* (which are 404.00, 43.75 and 0.81 mg · g⁻¹, respectively) are larger than those in litter leaf (which are 373.45, 42.83 and 0.78 mg · g⁻¹, respectively); the averages of C/N ratio, C/P ratio and N/P ratio of leaf (which are 10.50, 511.49 and 56.15, respectively) are also larger than those of litter leaf (which are 8.12, 492.72 and 54.90, respectively), in which, the average of C content in leaf is significantly ($P < 0.05$) larger than that in litter leaf, while there is no significant difference in the averages of other five ecological stoichiometric indexes between leaf and litter leaf. The averages of C, N and P contents in lanceolate, oval and broad-ovate leaves are 399.03–408.76, 37.12–47.60 and 0.78–0.84 mg · g⁻¹, respectively, and those of C/N ratio, C/P ratio and N/P ratio are 8.68–13.92, 495.19–533.32 and 52.05–62.11, respectively; in which, the averages of C and N contents in broad-ovate leaf are the largest, the average of P content in oval leaf is the largest, the averages of C, N and P contents in lanceolate leaf are the smallest, the averages of C/N ratio and C/P ratio of lanceolate leaf are the largest, and the average of N/P ratio of broad-ovate leaf is the largest; there is a significant difference in the average of N content between broad-ovate leaf and lanceolate leaf, while there is no significant difference in the averages of other five ecological stoichiometric indexes among three types of leaves. The coefficients of variation of C content in leaf and litter leaf of *P. euphratica* are the smallest, indicating that the C content in leaf of *P. euphratica* is relatively stable; among three types of leaves, the coefficients of variation of C, N and P contents and C/P ratio, C/N ratio and N/P ratio of lanceolate leaf are the largest, indicating that the variation degrees of ecological stoichiometric characteristics of lanceolate leaf are relatively great. The reabsorption rates of N and P of leaf of *P. euphratica* are 2.10% and 3.70%, respectively; there is a significant negative correlation between N reabsorption rate and N content in litter leaf, a non-significant negative correlation between N reabsorption rate and N content in leaf, and a non-significant positive correlation between P reabsorption rate and P content in leaf and litter leaf. The result of comprehensive analysis shows that there are obvious differences in ecological stoichiometric characteristics between leaf and litter leaf and among three types of leaves of *P. euphratica* in desert riparian forest in Yarkant River Basin, and it is speculated that the growth of *P. euphratica* in this area is mainly constrained by P element according to the ecological stoichiometric characteristics; the decomposition rate of litter leaf of *P. euphratica* is relatively slow, resulting in weak reabsorption capacities of N and P; among three types of leaves of *P. euphratica*, the nutrient absorption and transformation capacities of lanceolate leaf are relatively weak.

Key words: Yarkant River Basin; *Populus euphratica* Oliv.; litter leaf; ecological stoichiometric characteristics; nutrient reabsorption rate

植物的生态化学计量特征不仅能反映植物的生长速率,还能反映植物在生长过程中对养分的利用情况及限制性元素^[1-4],其中,C/N比和C/P比能反映植物生长速率并与植物N和P的利用效率有关,而N/P比则可作为判定植物营养限制性元素的指标之一^[5-7]。目前,以叶片生态化学特征为主的植物化学计量学研究多集中于森林和草原生态系统^[8-11],但人们对荒漠生态系统植物生态化学计量特征的认识尚不充分。新疆分布有中国面积最大的荒漠区,对新疆荒漠生态系统中典型植物种类的生态化学计量特征进行研究,有助于人们更全面地认识荒漠生态系统中植物的物质循环特征,对维持荒漠生态系统平衡具有一定的理论意义^[12]。

胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)隶属于杨柳科(Salicaceae)杨属(*Populus* Linn.),主要分布在新疆,

是叶尔羌河流域荒漠河岸林的主要建群种,是维护叶尔羌河流域生态平衡和生态功能的重要植物^[13];叶尔羌河流域胡杨林内植物多样性和植物资源较为丰富^[14],但近年来由于人为破坏和水资源的短缺,胡杨林资源逐年减少^[15-16],主要表现在胡杨林面积逐年减小、动态度降低、呈斑块化趋势和生物多样性减少等多方面^[17-18],并因此而破坏荒漠生态系统的平衡^[19]。胡杨在维持荒漠生态系统平衡上具有不可替代的作用,胡杨具有“进化异形叶”特征,其异形叶在碳同化能力^[20]、光合效率^[21]、渗透调节能力^[22]和抗逆性^[23]等方面存在差异,且随叶形由披针形向阔卵形变化逐渐增强,而不同叶形的生长状况还可以反映不同生境条件。因此,研究胡杨异形叶及凋落叶的生态化学计量特征对于分析胡杨生境条件及维持荒漠生态系统的平衡具有重要意义。

鉴于此,作者以叶尔羌河流域典型荒漠河岸林中的胡杨为研究对象,运用生态化学计量学方法比较胡杨叶片与凋落叶间以及不同类型叶片间的生态化学计量指标的差异,并对胡杨凋落叶养分再吸收率进行分析,探讨其叶片和凋落叶的生态化学计量指标与环境的关系,以期为叶尔羌河荒漠河岸林的恢复和重建提供基础研究资料。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

叶尔羌河位于新疆维吾尔自治区西南部,塔里木盆地西缘,东邻塔克拉玛干沙漠,西接布古里、托乎拉克沙漠,南以喀喇昆仑山为屏障,北迄天山南麓并与阿克苏地区毗连。叶尔羌河全长 1 097 km,多年平均径流量 $6.63 \times 10^{10} \text{ m}^3$,主要靠降水和冰川融雪补给,其气候和土壤概况见文献[18]。

叶尔羌河两岸的河漫滩、低阶地、河心沙洲和古河床上分布着荒漠地带特有的河岸走廊式落叶阔叶林,即荒漠河岸林,由胡杨群系和灰胡杨(*Populus pruinosa* Schrenk)群系^[14]组成。

1.2 研究方法

1.2.1 样点设置和样品采集 于2019年6月初从叶尔羌河上游至下游,在胡杨生长状况良好的林区设置4个样点,分别位于新疆维吾尔自治区喀什市的泽普县(东经 $76^{\circ}58'40''$ 、北纬 $38^{\circ}02'44''$ 、海拔 1 412 m)、莎车县(东经 $77^{\circ}22'21''$ 、北纬 $38^{\circ}23'13''$ 、海拔 1 202 m)、麦盖提县(东经 $77^{\circ}35'41''$ 、北纬 $38^{\circ}53'32''$ 、海拔 1 176 m)和巴楚县(东经 $78^{\circ}20'14''$ 、北纬 $37^{\circ}28'35''$ 、海拔 1 127 m)境内;样点面积 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$,在每个样点内设置3个面积 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的样方。

在每个样方内选取胸径(距地面 1.2 m 处的树干直径)40~50 cm 的样株 6 株,从样株的东、南、西、北 4 个方位分别采集健康叶片,包括披针形、卵圆形和阔卵形 3 类叶片,每类叶片采集 20~30 枚,将 6 株样株的披针形、卵圆形和阔卵形叶片分别混合后作为 1 个样品,每个样点每类叶片有 3 份样品,共采集 36 份样品;同时,在各样株底部采集凋落叶(不分叶形)约 200 g,每个样方 6 株样株的凋落叶混合后作为 1 个样品,每个样点采集 3 个凋落叶样品,共采集 12 份凋落叶样品。

1.2.2 样品前处理及 C、N 和 P 含量测定 叶片和凋

落叶样品用蒸馏水漂洗、晾干后,于 $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下杀青 15 min,然后于 $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒质量;粉碎过筛(孔径 0.25 mm),避光保存,用于 C、N 和 P 含量测定。

用电子天平(精度 0.1 mg)分别称取上述样品 20~30 mg,采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-H}_2\text{SO}_4$ 容量法^[24]测定样品中的 C 含量;用电子天平分别称取上述样品 0.3 g,采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,并用 Cleverchem 200+全自动间断化学分析仪(德国 Dechem-Tech.GmbH 公司)标准方法测定样品中的 N 和 P 含量。

1.3 数据处理和分析

变异系数(CV)根据公式“变异系数=(某指标标准差/该指标的平均值) $\times 100\%$ ”计算;根据文献[25]中的方法计算养分再吸收率,计算公式为养分再吸收率= $[(\text{叶片中养分含量}-\text{凋落叶中养分含量})/\text{叶片中养分含量}] \times 100\%$ 。

采用 EXCEL 2010 软件进行数据整理,以 3 类叶片的 C、N 和 P 含量均值计为叶片的 C、N 和 P 含量,并据此计算叶片的 C/N 比、C/P 比和 N/P 比。采用 Origin 7.5 软件对叶片和凋落叶中的 C、N 和 P 含量及化学计量比进行单因素方差分析(one-way ANOVA);参照文献[26]中的方法,以叶片和凋落叶的 N 和 P 含量为横坐标(x)、N 和 P 再吸收率为纵坐标(y),分别对胡杨叶片 N 和 P 再吸收率与叶片和凋落叶的 N 和 P 含量进行线性回归分析。

2 结果和分析

2.1 胡杨叶片和凋落叶的生态化学计量特征比较

叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨叶片和凋落叶的生态化学计量指标的统计分析结果见表 1。结果显示:胡杨叶片和凋落叶的 C、N 和 P 含量以及 3 个元素的化学计量比均存在不同程度的差异,叶片的上述 6 个生态化学计量指标的均值均高于凋落叶。

胡杨叶片 C、N 和 P 含量的均值分别为 404.00、43.75 和 $0.81 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$;其 C/N 比、C/P 比和 N/P 比的均值分别为 10.50、511.49 和 56.15;凋落叶 C、N 和 P 含量的均值分别为 373.45、42.83 和 $0.78 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,其 C/N 比、C/P 比和 N/P 比的均值分别为 8.12、492.72 和 54.90。总体上,叶片和凋落叶均以 C 含量最高、P 含量最低,且 C/P 比最大,而 C/N 比最小。

与叶片相比,凋落叶 C、N 和 P 含量以及 C/N 比、C/P 比和 N/P 比的均值均不同程度减小,但仅叶

表1 叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨叶片和凋落叶的生态化学计量指标的统计分析结果

Table 1 Statistical analysis result of ecological stoichiometric indexes of leaf and litter leaf of *Populus euphratica* Oliv. from desert riparian forest in Yarkant River Basin

统计量 Statistic	不同样品的 C 含量/(mg · g ⁻¹) C content in different samples		不同样品的 N 含量/(mg · g ⁻¹) N content in different samples		不同样品的 P 含量/(mg · g ⁻¹) P content in different samples	
	叶片 Leaf	凋落叶 Litter leaf	叶片 Leaf	凋落叶 Litter leaf	叶片 Leaf	凋落叶 Litter leaf
最大值 Maximum	453.24	402.69	53.38	45.82	1.04	0.98
最小值 Minimum	339.62	335.22	11.42	30.37	0.53	0.54
均值 Average ¹⁾	404.00a	373.45b	43.75a	42.83a	0.81a	0.78a
标准差 Standard deviation	21.96	21.44	10.62	5.74	0.12	0.13
CV/% ²⁾	5.44	5.74	24.27	13.39	14.98	16.93

统计量 Statistic	不同样品的 C/N 比 C/N ratio of different samples		不同样品的 C/P 比 C/P ratio of different samples		不同样品的 N/P 比 N/P ratio of different samples	
	叶片 Leaf	凋落叶 Litter leaf	叶片 Leaf	凋落叶 Litter leaf	叶片 Leaf	凋落叶 Litter leaf
最大值 Maximum	34.53	11.57	833.10	682.04	90.27	75.36
最小值 Minimum	7.09	6.90	391.23	363.38	12.45	42.91
均值 Average ¹⁾	10.50a	8.12a	511.49a	492.72a	56.15a	54.90a
标准差 Standard deviation	5.72	1.35	88.79	101.11	17.78	15.67
CV/% ²⁾	54.48	16.63	17.36	20.52	31.76	28.54

¹⁾ 同行中不同的小写字母表示同一指标在不同样品间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same row indicate the significant ($P < 0.05$) difference in the same index among different samples.

²⁾ CV: 变异系数 Coefficient of variation.

片 C 含量的均值显著 ($P < 0.05$) 大于凋落叶,而叶片 N 和 P 含量及 C/N 比、C/P 比和 N/P 比的均值与凋落叶均无显著差异。

从变异系数(CV)看,在叶片 C、N 和 P 含量中,C 含量的 CV 值最小,N 含量的 CV 值最大,C/N 比的 CV 值在叶片 3 个元素的化学计量比中最大,表明叶片 C 含量相对稳定,而 N 含量变异较大。在凋落叶 C、N 和 P 含量中,C 含量的 CV 值最小,P 含量的 CV 值最大,N/P 比的 CV 值在叶片 3 个元素的化学计量比中最大,表明凋落叶中 C 含量也较为稳定,而 P 含量变异较大。

2.2 胡杨不同类型叶片的生态化学计量特征比较

叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨不同类型叶片的生态化学计量指标的统计分析结果见表 2。结果显示:胡杨 3 类叶片的 C、N 和 P 含量以及 3 个元素的化学计量比均存在不同程度的差异。

阔卵形叶片 C 含量的均值最大 (408.76 mg · g⁻¹),披针形叶片 C 含量的均值最小 (399.03 mg · g⁻¹),但 3 类叶片 C 含量的均值无显著差异。阔卵形叶片 N 含量的均值最大 (47.60 mg · g⁻¹),披针形叶片 N 含量的均值最小 (37.12 mg · g⁻¹),二者间 N 含量的均值差异显著 ($P < 0.05$)。卵圆形叶片 P 含量的均值最大 (0.84 mg · g⁻¹),披针形叶片 P 含量的

均值最小 (0.78 mg · g⁻¹),但 3 类叶片 P 含量的均值无显著差异。

披针形叶片 C/N 比的均值最大 (13.92),阔卵形叶片 C/N 比的均值最小 (8.68);披针形叶片 C/P 比的均值最大 (533.32),卵圆形叶片 C/P 比的均值最小 (495.19);阔卵形叶片 N/P 比的均值最大 (62.11),披针形叶片 N/P 比的均值最小 (52.05)。方差分析结果表明:3 类叶片 C/N 比、C/P 比和 N/P 的均值均无显著差异。

从 3 类叶片生态化学计量指标的变异系数(CV)看,在 C、N 和 P 含量中,C 含量的 CV 值均最小,变幅为 3.31%~6.88%,N 和 P 含量的 CV 值均不同程度大于 C 含量;在 3 个元素的化学计量比中,C/P 比的 CV 值总体较小,变幅为 11.37%~23.20%;C/N 比的 CV 值变幅最大,为 10.63%~63.70%;N/P 比的 CV 值变幅也较大,为 12.04%~54.44%。在 3 类叶片中,披针形叶片 C、N 和 P 含量以及 C/P 比、C/N 比和 N/P 比的 CV 值均最大;卵圆形叶片 C 和 N 含量以及 C/N 比的 CV 值均最小,阔卵形叶片 P 含量以及 C/P 比和 N/P 比的 CV 值均最小。

总体上看,披针形叶片 C、N 和 P 含量的均值均最小,C/N 比和 C/P 比的均值最大、N/P 比的均值最小,且披针形叶片的 6 个生态化学计量指标的变异系数均最大,表明披针形叶片的养分吸收和转化能力较弱。

表2 叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨不同类型叶片的生态化学计量指标的统计分析结果¹⁾Table 2 Result of statistical analysis on ecological stoichiometric indexes of different types of leaves of *Populus euphratica* Oliv. from desert riparian forest in Yarkant River Basin¹⁾

统计量 Statistic	不同类型叶片的 C 含量/(mg · g ⁻¹) C content in different types of leaves			不同类型叶片的 N 含量/(mg · g ⁻¹) N content in different types of leaves			不同类型叶片的 P 含量/(mg · g ⁻¹) P content in different types of leaves		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
最大值 Maximum	453.24	437.13	438.03	51.28	53.38	51.69	0.97	1.04	0.93
最小值 Minimum	339.62	388.18	347.72	11.42	38.89	30.63	0.53	0.66	0.70
均值 Average	399.03a	407.21a	408.76a	37.12b	46.86ab	47.60a	0.78a	0.84a	0.81a
标准差 Standard deviation	27.44	13.49	23.61	15.17	3.62	5.92	0.15	0.13	0.08
CV/% ²⁾	6.88	3.31	5.78	40.87	7.73	12.45	19.08	14.99	10.18

统计量 Statistic	不同类型叶片的 C/N 比 C/N ratio of different types of leaves			不同类型叶片的 C/P 比 C/P ratio of different types of leaves			不同类型叶片的 N/P 比 N/P ratio of different types of leaves		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
最大值 Maximum	34.53	11.24	13.20	833.10	634.41	605.76	90.27	74.69	70.99
最小值 Minimum	7.09	7.38	7.40	419.45	391.23	425.59	12.45	42.74	48.99
均值 Average	13.92a	8.75a	8.68a	533.32a	495.19a	505.96a	52.05a	57.17a	62.11a
标准差 Standard deviation	8.86	0.93	1.56	123.73	74.99	57.51	28.34	10.64	7.48
CV/% ²⁾	63.70	10.63	18.01	23.20	15.14	11.37	54.44	18.60	12.04

¹⁾ L1: 披针形叶片 Lanceolate leaf; L2: 卵圆形叶片 Oval leaf; L3: 阔卵形叶片 Broad-ovate leaf. 同行中不同的小写字母表示同一指标在不同类型叶片间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same row indicate the significant ($P < 0.05$) difference among different types of leaves of the same index.

²⁾ CV: 变异系数 Coefficient of variation.

2.3 胡杨叶片的养分再吸收率及线性回归分析

叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨叶片的 N 和 P 再吸收率分别为 2.10% 和 3.70%, P 再吸收率高于 N 再吸收率。线性回归分析结果(表 3)显示: N 再吸收率

与凋落叶 N 含量呈显著 ($P < 0.05$) 负相关 ($R^2 = 0.2360$); N 再吸收率与叶片 N 含量也呈负相关, P 再吸收率与叶片和凋落叶 P 含量均呈正相关, 但相关性均未达显著水平。

表3 叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨叶片 N 和 P 再吸收率与叶片和凋落叶 N 和 P 含量的线性回归分析结果¹⁾Table 3 Result of linear regression analysis on reabsorption rates of N and P of leaf with N and P contents in leaf and litter leaf of *Populus euphratica* Oliv. from desert riparian forest in Yarkant River Basin¹⁾

y	x	叶片 Leaf		凋落叶 Litter leaf	
		回归方程 Regression equation	R^2	回归方程 Regression equation	R^2
R_N	C_N	$y = -0.001 1x + 0.071 6$	0.147 4	$y = -0.001 3x + 0.082 0$	0.236 0*
R_P	C_P	$y = 0.092 2x - 0.038 2$	0.240 8	$y = 0.069 6x - 0.017 6$	0.109 1

¹⁾ R_N : N 再吸收率 N reabsorption rate; R_P : P 再吸收率 P reabsorption rate; C_N : N 含量 N content; C_P : P 含量 P content. *: $P < 0.05$.

3 讨论和结论

上述研究结果表明:叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨叶片 C 含量的均值为 $404.00 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 小于黑河下游流域胡杨叶片 C 含量的均值 ($435.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[13], 也小于全球陆生植物叶片 C 含量的均值 ($464.0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[27], 这可能与荒漠区土壤养分含量相对较低, 植物对土壤养分的再利用率较低有关。而胡杨叶片 N 含量均在 $30 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 以上, 均值达到 43.75

$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 明显大于黑河下游流域胡杨^[13] 以及全球陆生植物^[27] 和中国植物^[28] 叶片 N 含量的均值(分别为 14.9 、 20.6 和 $20.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 这一结果符合“干旱荒漠环境植物叶片平均 N 含量相对较高”^[29] 的假说, 也与 Skujins^[30] 报道的“干旱荒漠区植物叶片 N 含量平均值大于 $30 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ”的结果相符。胡杨叶片 P 含量的均值为 $0.81 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 明显小于其他研究区域植物叶片的平均 P 含量^[7, 10, 27-28, 31-32], 但与干旱区域荒漠植物叶片的平均 P 含量^[12, 33] 较为接近, 这可能是由于分布在干旱区荒漠生态系统的植物更易受到 P 元

素的限制^[12]。

虽然叶尔羌河流域胡杨叶片的 C 含量较低,但其 N 含量较高、P 含量较低,因此其 C/N 比(均值为 10.50)明显低于其他研究区域的植物^[7,13,27-28,31-33],C/P 比(均值为 511.49)则与其他研究区域的植物比较接近^[7,13,27-28,31-33],而 N/P 比(均值为 56.15)则明显大于其他研究区域的植物^[7,13,27-28,31-33]。C/N 比可用于评价植物的长期氮利用效率(NUE)^[34-35],而本研究区域内胡杨叶片 C/N 比均值明显小于全球陆生植物 C/N 比的均值^[27],表明叶尔羌河流域胡杨生长期对 N 的吸收效率明显较高。植物叶片 N 和 P 含量及 N/P 比反映了植物对区域环境的适应性^[36-37],其中 N/P 比可作为判断植物生长过程中限制性元素的指标,若 N/P 比大于 16,植物生长受 P 元素限制;若 N/P 比小于 14,植物生长受 N 元素限制;若 N/P 比介于 14~16 之间,植物生长受 P 元素和 N 元素的共同限制^[6,26]。本研究中,胡杨叶片 N/P 比明显大于 16,表明在叶尔羌河流域内胡杨的生长主要受 P 元素的限制,符合“中国陆地植被普遍受 P 限制”^[28]的观点。

植物凋落物分解过程中释放的养分对土壤养分给予了相应的补偿,为植物自身养分的调节和需求提供了必要条件^[38];植物凋落物中养分含量与植物本身的再吸收能力有关,在凋落前植物叶片会将养分转移到花、果实、枝和根中,从而防止养分随叶片的凋落而流失^[39-40]。本研究结果显示:胡杨叶片 C 含量显著高于凋落叶,且其 N 和 P 含量也高于凋落叶,也可能源于植物叶片在凋落老化前已将部分养分转移到其他组织,以便实现养分的再吸收和再利用。曾昭霞等^[25]和李雪峰等^[39]的研究结果表明:凋落物的分解速率受到 C/N 比、C/P 比和 N/P 比的影响,C/N 比和 C/P 比与分解速率呈正相关,而 N/P 比则与分解速率呈负相关;在凋落物 P 含量较低、N 含量较高(尤其是当 N/P 比大于 25 时)的情况下,凋落物的分解速率会明显降低。胡杨凋落叶 N 含量的均值为 42.83 mg · g⁻¹,P 含量的均值为 0.78 mg · g⁻¹,N/P 比的均值达到 54.90,说明叶尔羌河流域荒漠河岸林胡杨凋落叶的分解速率较为缓慢,养分再吸收需要经历较长的时间。

严思维等^[26]的研究结果显示:干热河谷区赤桉(*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.)叶片 N 再吸收率与凋落叶全 N 含量呈极显著($P < 0.01$)负相关,与鲜叶

全 N 含量呈不显著正相关,而 P 再吸收率与鲜叶和凋落叶全 P 含量均无显著相关性;但孙书存等^[38]认为,东灵山地区辽东栎(*Quercus liaotungensis* Koidz.)鲜叶的养分浓度高可促进养分的再吸收,其 N 回收率与成熟叶 N 含量显著正相关。本研究中,胡杨叶片 N 再吸收率与凋落叶 N 含量呈显著($P < 0.05$)负相关,与叶片 N 含量呈不显著负相关;P 再吸收率与叶片和凋落叶 P 含量均呈不显著正相关。表明除了长期的适应进化使不同植物对养分吸收利用的策略、方式和效率存在差异外,生境条件对植物养分再吸收效率也有一定的影响^[38,40],特别是荒漠干旱条件下植物的养分吸收和再利用效率具有一定的特殊性^[26]。胡杨叶片的 P 再吸收率为 3.70%,N 再吸收率为 2.10%,均明显低于全球陆生植物 N 和 P 再吸收率的均值(分别为 62.1%和 64.9%)^[41],且其 P 再吸收率略高于 N 再吸收率,表明胡杨叶片 N 和 P 再吸收效率均不高,且在胡杨叶片中 P 元素的移动性略高于 N 元素^[38]。

胡杨具有异形叶性,在其成年个体上可观察到披针形、卵圆形和阔卵形叶片,其中,披针形叶片属于苗期和萌生枝的幼态叶型,阔卵圆形叶片属于成年个体的成熟叶型,而卵圆形叶片为过渡叶型,异形叶的形成,是其长期适应环境变化的结果^[20-21]。相关研究结果^[15,20,22-23,42-43]表明:随着叶形的变化,胡杨叶片的光合能力、水分利用效率和抗逆性均逐渐增强,其对 C 和 N 的吸收能力呈逐渐提升的趋势,随植株的生长和发育,幼树或萌生枝上占主体地位的披针形叶片逐渐被光合能力和抗逆性较强的阔卵形叶片所替代,使后者成为胡杨成年植株上占优势的叶片类型。本研究中,胡杨叶片从披针形、卵圆形至阔卵形,其 C 和 N 含量呈增加的趋势,这一结果佐证了“植物叶片 C 和 N 含量与植物的光合作用和维管组织发育呈正相关”^[38]的观点。而在胡杨的 3 类叶片中,P 含量在卵圆形叶片中最高,从生长速率理论看,生物体生长速率越快,越需要更多的 P 元素用于 rRNA 的合成,从而提高生长速率,因此对 P 元素的需求也相应增加,迫使环境供应更多的 P 元素^[1,8,13],这表明在胡杨的 3 类叶片中卵圆形叶片的生长速率相对较快,这是其适应干旱环境的表现之一。

综上所述,在叶尔羌河流域荒漠河岸林中,胡杨叶片 C 和 P 含量均较低,N 含量则较高,叶片 C、N 和 P 含量的均值明显高于凋落叶,且叶片 N/P 比的均

值为 56.15,表明在本研究区域内胡杨的生长主要受到 P 元素的限制,据此建议在胡杨林生长期通过施加磷肥来提高胡杨的生长效率。另外,随着胡杨叶形从披针形、卵圆形至阔卵形的变化,叶片养分含量均有所提高,其光合能力、水分利用效率和抗逆性也逐渐增强,表明在胡杨的 3 类叶片中披针形叶片对养分的吸收和转化能力较弱,导致其抗逆性最弱。

由于本研究主要以生长旺盛期的胡杨叶片为样本,取样范围较窄,并不能说明胡杨生长周期内完整的生态化学计量特征,加之并未对胡杨根际土壤进行取样分析,对胡杨叶片的生态化学计量特征与土壤理化性质的关系缺乏详尽分析,导致研究结果具有一定的局限性,后续将据此进行广泛而深入的研究,以期进一步探讨植物与土壤间的生态化学计量特征关系,为叶尔羌流域荒漠河岸林的保护提供科学依据。

参考文献:

- [1] STERNER R W, ELSER J J. Ecological Stoichiometry: the Biology of Elements from Molecules to the Biosphere [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002: 1-20.
- [2] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索 [J]. 植物生态学报, 2005, 29(6): 1007-1019.
- [3] DOBBERFUHL D R. Elemental stoichiometry in crustacean zooplankton: phylogenetic patterns, physiological mechanisms and ecological consequences [D]. Phoenix: Arizona State University, 1999: 1-4.
- [4] HESSEN D O, ÅGREN G I, ANDERSON T R, et al. Carbon sequestration in ecosystems: the role of stoichiometry [J]. Ecology, 2004, 85(5): 1179-1192.
- [5] 吴慧, 王树力, 郝玉琢, 等. 阿什河流域 6 种人工林叶片-凋落物-土壤系统的养分分配与利用格局 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2020, 44(5): 100-108.
- [6] KOERSELMAN W, MEULEMAN F M. The vegetation N : P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [7] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 等. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究 [J]. 环境科学, 2007, 28(12): 2665-2673.
- [8] ELSER J J, STERNER R W, GOROKHOVA E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems [J]. Ecology Letters, 2000, 3: 540-550.
- [9] WRIGHT I J, REICH P B, WESTOBY M, et al. The worldwide leaf economics spectrum [J]. Nature, 2004, 428: 821-827.
- [10] 周磊, 吴慧, 王树力. 不同林分红皮云杉针叶养分含量及生态化学计量特征研究 [J]. 植物资源与环境学报, 2020, 29(3): 19-25, 33.
- [11] KERKHOFF A J, ENQUIST B J, ELSER J J, et al. Plant allometry stoichiometry and the temperature-dependence of primary productivity [J]. Global Ecology and Biogeography, 2005, 14: 585-598.
- [12] 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): 1716-1725.
- [13] 曹生奎, 冯起, 司建华, 等. 荒漠河岸林胡杨养分状况研究 [J]. 中国沙漠, 2011, 31(5): 1131-1140.
- [14] 王彦涛. 叶尔羌河流域植物区系及植被研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 2010: 29-46.
- [15] 李志军, 刘建平, 于军, 等. 胡杨、灰叶胡杨生物生态学特性调查 [J]. 西北植物学报, 2003, 23(7): 1292-1296.
- [16] 冯起, 司建华, 李建林, 等. 胡杨根系分布特征与根系吸水模型建立 [J]. 地球科学进展, 2008, 23(7): 765-772.
- [17] 李华林, 白林燕, 冯建中, 等. 新疆叶尔羌河流域胡杨林时空格局特征 [J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5080-5094.
- [18] 李金, 徐海量, 王勇辉, 等. 叶尔羌河下游河岸胡杨种群长势与植物多样性对淹灌的响应评估 [J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(7): 859-866.
- [19] 陈炳浩. 保护好荒漠地带珍贵的胡杨森林资源 [J]. 中国沙漠, 1983, 3(4): 27-28.
- [20] 岳宁. 胡杨异形叶生态适应的解剖及生理学研究 [D]. 北京: 北京林业大学生物科学与技术学院, 2009: 23-29.
- [21] 苏培玺, 张立新, 杜明武, 等. 胡杨不同叶形光合特性、水分利用效率及其对加富 CO₂ 的响应 [J]. 植物生态学报, 2003, 27(1): 34-40.
- [22] 杨树德, 陈国仓, 张承烈, 等. 胡杨披针形叶与宽卵形叶的渗透调节能力的差异 [J]. 西北植物学报, 2004, 24(9): 1583-1588.
- [23] 杨树德, 郑文菊, 陈国仓, 等. 胡杨披针形叶与宽卵形叶的超微结构与光合特性的差异 [J]. 西北植物学报, 2005, 25(1): 14-21.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 423-424.
- [25] 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 等. 桂西北喀斯特森林植物-凋落物-土壤生态化学计量特征 [J]. 植物生态学报, 2015, 39(7): 682-693.
- [26] 严思维, 陈爱民, 林勇明, 等. 干热河谷区不同林龄赤桉叶中养分含量和再吸收率的比较及其线性回归分析 [J]. 植物资源与环境学报, 2017, 26(1): 39-46.
- [27] ELSER J J, FAGAN W F, DENNO R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs [J]. Nature, 2000, 408: 578-580.
- [28] HAN W, FANG J, GUO D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. New Phytologist, 2005, 168: 377-385.
- [29] AERTS R. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: are there general patterns? [J]. Journal of Ecology, 1996, 84(4): 597-608.
- [30] SKUJINS J. Nitrogen cycling in arid ecosystems [J]. Ecological

- Bulletins, 1981, 33: 477-491.
- [31] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6581-6590.
- [32] 潘复静, 张伟, 王克林, 等. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落叶 C : N : P 生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2011, 31(2): 335-343.
- [33] 张珂, 陈永乐, 高艳红, 等. 阿拉善荒漠典型植物功能群氮、磷化学计量特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1261-1267.
- [34] PATTERSON T B, GUY R D, DANG Q L. Whole-plant nitrogen- and water-relations traits and their associated trade-offs in adjacent muskeg and upland boreal spruce species [J]. *Oecologia*, 1997, 110: 160-168.
- [35] LIVINGSTON N J, GUY R D, ETHIER G J. The effects of nitrogen stress on the stable carbon isotope composition, productivity and water use efficiency of white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) seedlings [J]. *Plant, Cell and Environment*, 1999, 22: 281-289.
- [36] GÜSEWELL S. N : P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. *New Phytologist*, 2004, 164: 243-266.
- [37] THOMPSON K, PARKINSON J A, BAND S R, et al. A comparative study of leaf nutrient concentrations in a regional herbaceous flora[J]. *New Phytologist*, 1997, 136(4): 679-689.
- [38] 孙书存, 陈灵芝. 东灵山地区辽东栎叶养分的季节动态与回收效率[J]. 植物生态学报, 2001, 25(1): 76-82.
- [39] 李雪峰, 韩士杰, 张岩. 降水量变化对蒙古栎落叶分解过程的间接影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2): 261-266.
- [40] 刘增文, 陈凯, 米彩虹, 等. 陕西关中地区常见树种落叶前 N、P、K 养分回流现象的研究[J]. 西北农林科技大学学报, 2009, 37(12): 98-104.
- [41] VERGUTZ L, MANZONI S, PORPORATO A, et al. Global resorption efficiencies and concentrations of carbon and nutrients in leaves of terrestrial plants [J]. *Ecological Monographs*, 2012, 82(2): 205-220.
- [42] 付爱红, 陈亚宁, 李卫红. 新疆塔里木河下游胡杨不同叶形水势变化研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(1): 83-88.
- [43] 司建华, 常宗强, 苏永红, 等. 胡杨叶片气孔导度特征及其对环境因子的响应[J]. 西北植物学报, 2008, 28(1): 125-130.
- (责任编辑: 郭严冬)

(上接第 41 页 Continued from page 41)

- [23] DANG H, ZHANG Y, ZHANG K, et al. Climate-growth relationships of subalpine fir (*Abies fargesii*) across the altitudinal range in the Shennongjia Mountains, central China [J]. *Climatic Change*, 2013, 117(4): 903-917.
- [24] 陈礼芬, 黄小凤, 蔡楚雄, 等. 东莞生态公益林改造树种的早期生长季节节律及其与气候条件的关系[J]. 广东林业科技, 2007, 23(1): 28-33.
- [25] SUN J, LIU Y. Age-independent climate-growth response of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis* Carrière) in North China [J]. *Trees*, 2015, 29: 397-406.
- [26] 夏冰, 兰涛, 贺善安, 等. 西天目山黄山松阔叶林的冠层干扰与动态推测[J]. 植物资源与环境, 1995, 4(3): 15-20.
- [27] 李亚男. 黄土高原油松人工林碳储量与径向生长对气候的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学水土保持研究所, 2020: 27-35.
- [28] 杨建伟, 梁宗锁, 韩蕊莲, 等. 不同土壤水分下刺槐和油松的生理特征[J]. 植物资源与环境学报, 2004, 13(3): 12-17.
- [29] 许玲玲, 同小娟, 张劲松, 等. 山西灵空山油松径向生长对气候变化的响应[J]. 中国农业气象, 2020, 41(6): 357-367.
- [30] 许大全, 李德耀, 沈允钢, 等. 田间小麦叶片光合作用“午睡”现象的研究[J]. 植物生理学报, 1984, 10(3): 269-276.
- [31] 张爽, 董然, 董妍, 等. 不同空气相对湿度对槭叶草生长及光合生理特性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(3): 24-27, 36.
- [32] 王琰, 陈建文, 狄晓艳. 不同油松种源光合和荧光参数对水分胁迫的响应特征[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7031-7038.
- [33] 张晴, 于瑞德, 郑宏伟, 等. 天山东部不同海拔西伯利亚落叶松对气候变暖的响应分析[J]. 植物研究, 2018, 38(1): 14-25.
- [34] 乔晶晶, 王童, 潘磊, 等. 不同海拔和坡向马尾松树轮宽度对气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2231-2240.

(责任编辑: 佟金凤)