

博斯腾湖湖滨湿地优势植物叶片碳、氮、磷化学计量特征的季节动态及其影响因子

郁国梁^{a,b,c}, 王军强^{a,b,c}, 马紫荆^{a,b,c}, 刘彬^{a,b,c,①}, 尤思学^{a,b,c}, 樊佳辉^{a,b,c}

(新疆师范大学: a. 新疆特殊环境物种保护与调控生物学实验室, b. 新疆特殊环境物种多样性应用与调控重点实验室, c. 生命科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要: 本研究以博斯腾湖湖滨湿地为研究对象,分析了不同季节(春季、夏季和秋季)刚毛柽柳(*Tamarix hispida* Willd.)、盐地碱蓬[*Suaeda salsa* (Linn.) Pall.]、白刺(*Nitraria tangutorum* Bobr.)、芦苇[*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.]和盐穗木[*Halostachys caspica* (Bieb.) C. A. Mey.]5种优势植物叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比的变化及其影响因子。结果表明:从5种优势植物的总体看,叶片碳含量、氮含量和磷含量分别为350.27、25.04和1.99 mg·g⁻¹;叶片碳含量变异系数最小(16.89%),叶片磷含量变异系数最大(65.71%)。刚毛柽柳和芦苇叶片碳含量显著($P<0.05$)高于白刺、盐穗木和盐地碱蓬,而氮含量和磷含量较低。夏季刚毛柽柳叶片碳含量显著高于春季和秋季,而芦苇和盐地碱蓬叶片碳含量则是在夏季最低;由春季至秋季,5种优势植物叶片氮含量呈递减趋势,碳氮比呈递增趋势,磷含量先降低后升高,碳磷比和氮磷比总体先升高后降低。刚毛柽柳、白刺和芦苇在春季受氮和磷共同限制,在夏季主要受磷限制;盐穗木和盐地碱蓬在春季和夏季受氮和磷共同限制;5种优势植物在秋季均受氮限制。5种优势植物叶片碳含量与土壤因子的相关性不显著($P>0.05$),主要受生活型影响。叶片氮含量、磷含量、碳氮比、碳磷比和氮磷比与土壤因子的相关性相对较强,且主要受季节影响。基于以上研究结果,建议在博斯腾湖湖滨湿地生态环境治理和土壤条件改善时可以在夏季施加磷肥,秋季施加氮肥。

关键词: 博斯腾湖; 湖滨湿地; 生态化学计量; 季节动态; 优势植物; 土壤因子

中图分类号: Q948.113; Q948.15 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2022)05-0009-10

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2022.05.02

Seasonal dynamics of carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometric characteristics of leaves of dominant plants in the lakeside wetland of Bosten Lake and their influencing factors

YU Guoliang^{a,b,c}, WANG Junqiang^{a,b,c}, MA Zijiang^{a,b,c}, LIU Bin^{a,b,c,①}, YOU Sixue^{a,b,c}, FAN Jiahui^{a,b,c}

(Xinjiang Normal University: a. Xinjiang Key Laboratory of Special Species Conservation and Regulatory Biology, b. Key Laboratory of Special Environment Biodiversity Application and Regulation in Xinjiang, c. College of Life Sciences, Urumqi 830054, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2022, 31(5): 9-18

Abstract: In this study, the lakeside wetland of Bosten Lake was taken as the research object, and the variations of contents of carbon, nitrogen, and phosphorus and their stoichiometric ratios in leaves of five dominant plants of *Tamarix hispida* Willd., *Suaeda salsa* (Linn.) Pall., *Nitraria tangutorum* Bobr., *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., and *Halostachys caspica* (Bieb.) C. A. Mey. in different seasons (spring, summer, and autumn) and their influencing factors were analyzed. The results show that in terms of overall situations of five dominant plants, contents of carbon, nitrogen, and phosphorus in leaves are 350.27, 25.04, and 1.99 mg·g⁻¹, respectively; the coefficient of variation of leaf carbon

收稿日期: 2022-05-19

基金项目: 国家自然科学基金地区基金项目(31360039; 32160271)

作者简介: 郁国梁(1998—),男,河南周口人,硕士研究生,主要从事植物群落构建方面的研究。

①通信作者 E-mail: onlinelb@163.com

引用格式: 郁国梁, 王军强, 马紫荆, 等. 博斯腾湖湖滨湿地优势植物叶片碳、氮、磷化学计量特征的季节动态及其影响因子[J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31(5): 9-18.

content is the smallest (16.89%), while that of leaf phosphorus content is the largest (65.71%). The leaf carbon contents of *T. hispida* and *P. australis* are significantly ($P < 0.05$) higher than those of *N. tangutorum*, *H. caspica*, and *S. salsa*, while contents of nitrogen and phosphorus are relatively low. The leaf carbon content of *T. hispida* in summer is significantly higher than those in spring and autumn, while those of *P. australis* and *S. salsa* are the lowest in summer; from spring to autumn, leaf nitrogen contents of five dominant plants show a tendency to decrease, the carbon/nitrogen ratios show a tendency to increase, the phosphorus contents first decrease and then increase, and the carbon/phosphorus ratios and nitrogen/phosphorus ratios first increase and then decrease in general. *T. hispida*, *N. tangutorum*, and *P. australis* are constrained by both nitrogen and phosphorus in spring, and mainly constrained by phosphorus in summer; *H. caspica* and *S. salsa* are constrained by both nitrogen and phosphorus in spring and summer; five dominant plants are all constrained by nitrogen in autumn. The correlations of leaf carbon contents of five dominant plants with soil factors are not significant ($P > 0.05$), and are mainly affected by life forms. The correlations of nitrogen contents, phosphorus contents, carbon/nitrogen ratios, carbon/phosphorus ratio, and nitrogen/phosphorus ratios in leaves with soil factors are relatively strong, and are mainly affected by seasons. Based on above results, it is suggested to apply phosphorus fertilizer in summer and nitrogen fertilizer in autumn to improve the ecological environment and soil condition of the lakeside wetland of Bosten Lake.

Key words: Bosten Lake; lakeside wetland; ecological stoichiometry; seasonal dynamics; dominant plant; soil factor

生态化学计量学主要研究植物养分的平衡及相互作用^[1],其不仅在将全球范围内的生物地球化学循环与细胞或生物水平联系起来方面发挥至关重要的作用,还可以进一步反映植物在养分利用效率和面临特定生长条件时的适应策略^[2],代表生物体对自然资源的需求^[3]。目前有关植物叶片化学计量变化特征的研究多集中在海拔^[4]、坡向^[5]、元素添加^[6]及演替阶段^[7]等方面,且以往研究多采集单一时间点的成熟叶片来分析其化学计量特征,而对其不同季节变化的研究尚有不足^[8]。

不同季节植物生长速率不同,其叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比也会发生一定变化^[9]。Liu等^[10]在对敦煌阳关湿地芦苇 [*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.] 叶片化学计量季节动态的研究中发现,叶片碳含量没有明显的季节变化,氮和磷含量由春季到秋季逐渐降低,碳、氮、磷化学计量比由春季到秋季则逐渐增大;Fu等^[11]研究发现,从春季到秋季,洞庭湖短尖藨草 (*Carex brevicuspis* C. B. Clarke) 叶片碳含量在低海拔地区显著降低,而在高海拔地区先降低后升高;Li等^[12]研究认为,不同树龄华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii* Mayr) 叶片碳含量在不同生长季没有显著变化;氮含量在生长旺季最高,生长后期最低;磷含量在生长早期最高,生长后期最低。这些研究结果表明,在不同研究区域,不同物种叶片碳、氮、磷化学计量的季节变化不同。此外,不同功能类

群植物间叶片碳、氮、磷含量及其比值的季节性变化不同步^[13],因此有必要探究局部区域下具有重要生态价值的物种叶片碳、氮、磷化学计量的季节动态及其影响因子^[14,15]。

博斯腾湖地处干旱区,生境恶劣,夏季炎热,冬季寒冷,春季气候多变,秋季降温迅速,其湖滨湿地植被格局受环境因子的影响与制约较为明显^[16],季节和土壤因子变化可能会对当地优势植物的功能性状和生长策略造成巨大影响,导致不同季节不同植物叶片化学计量指标出现较大差异,因此,博斯腾湖是研究植物叶片碳、氮、磷化学计量指标季节变化及其影响因子的理想区域。本研究以博斯腾湖湖滨湿地为研究对象,采集研究区内典型植物群落中5种优势植物叶片及样地土壤样品,探究5种优势植物叶片碳、氮、磷化学计量特征及其变异来源、季节动态和影响因子,以期为博斯腾湖湖滨湿地碳储存能力评估以及针对不同季节、不同物种的植物保护和生态环境治理提供科学依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州博斯腾湖(东经 86°40' ~ 87°25'、北纬 41°45' ~ 42°14'),地处封闭的山间盆地,是南、北疆气候的过

渡带,80%以上的降水集中在5月至9月。博斯腾湖湖滨湿地植被种类单一,生态结构简单,木本植物主要有刚毛柽柳(*Tamarix hispida* Willd.)、白刺(*Nitraria tangutorum* Bobr.)和盐穗木[*Halostachys caspica* (Bieb.) C. A. Mey.]等,草本植物主要有盐地碱蓬[*Suaeda salsa* (Linn.) Pall.]、芦苇、蒲公英(*Taraxacum mongolicum* Hand.-Mazz.)、芨芨草[*Achnatherum splendens* (Trin.) Nevski]、海乳草[*Lysimachia maritima* (Linn.) Galasso, Banfi et Soldano]、鸭葱(*Scorzonera austriaca* Willd.)和菖蒲(*Acorus calamus* Linn.)等。根据中国植物群落分类原则和群落样地中物种的重要值^[17],博斯腾湖湖滨湿地的群丛类型分为刚毛柽柳-

芦苇群丛(Ass. *Tamarix hispida-Phragmites australis*)、盐穗木-芦苇群丛(Ass. *Halostachys caspica-Phragmites australis*)、刚毛柽柳-盐地碱蓬群丛(Ass. *Tamarix hispida-Suaeda salsa*)、刚毛柽柳+黑果枸杞群丛(Ass. *Tamarix hispida+Lycium ruthenicum*)、盐穗木群丛(Ass. *Halostachys caspica*)和白刺群丛(Ass. *Nitraria tangutorum*)。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集和处理 在对博斯腾湖湖滨带植被大量踏查的基础上,在博斯腾湖湖滨带西岸按不同植被类型设置18个面积60 m×60 m的样地,样地的基本信息见表1。

表1 博斯腾湖湖滨湿地样地的基本信息

Table 1 Basic information of sample plots in the lakeside wetland of Bosten Lake

样地编号 No. of sample plot	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Elevation	主要植物 Main plant
1	E86°44'57"	N41°58'21"	1 049	刚毛柽柳 <i>Tamarix hispida</i> , 芦苇 <i>Phragmites australis</i> , 黑果枸杞 <i>Lycium ruthenicum</i>
2	E86°44'57"	N41°58'19"	1 046	刚毛柽柳 <i>Tamarix hispida</i> , 戟叶鹅绒藤 <i>Cynanchum acutum</i> subsp. <i>sibiricum</i> , 芦苇 <i>Phragmites australis</i>
3	E86°45'00"	N41°58'20"	1 047	刚毛柽柳 <i>Tamarix hispida</i> , 芦苇 <i>Phragmites australis</i>
4	E86°44'48"	N41°57'52"	1 051	白刺 <i>Nitraria tangutorum</i> , 盐穗木 <i>Halostachys caspica</i> , 芦苇 <i>Phragmites australis</i>
5	E86°45'01"	N41°57'51"	1 041	盐穗木 <i>Halostachys caspica</i> , 芦苇 <i>Phragmites australis</i> , 盐节木 <i>Halocnemum strobilaceum</i>
6	E86°44'55"	N41°57'51"	1 040	芦苇 <i>Phragmites australis</i> , 盐节木 <i>Halocnemum strobilaceum</i> , 盐爪爪 <i>Kalidium foliatum</i>
7	E86°45'09"	N41°49'06"	1 046	刚毛柽柳 <i>Tamarix hispida</i> , 黑果枸杞 <i>Lycium ruthenicum</i> , 盐地碱蓬 <i>Suaeda salsa</i> , 海乳草 <i>Lysimachia maritima</i>
8	E86°45'06"	N41°45'06"	1 045	盐地碱蓬 <i>Suaeda salsa</i> , 刚毛柽柳 <i>Tamarix hispida</i> , 芦苇 <i>Phragmites australis</i> , 黑果枸杞 <i>Lycium ruthenicum</i>
9	E86°44'55"	N41°49'02"	1 067	刚毛柽柳 <i>Tamarix hispida</i> , 黑果枸杞 <i>Lycium ruthenicum</i> , 海乳草 <i>Lysimachia maritima</i>
10	E86°44'51"	N41°48'59"	1 042	刚毛柽柳 <i>Tamarix hispida</i> , 芦苇 <i>Phragmites australis</i> , 白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>
11	E86°44'53"	N41°49'09"	1 043	盐地碱蓬 <i>Suaeda salsa</i> , 刚毛柽柳 <i>Tamarix hispida</i>
12	E86°44'55"	N41°49'03"	1 042	刚毛柽柳 <i>Tamarix hispida</i> , 芦苇 <i>Phragmites australis</i> , 盐地碱蓬 <i>Suaeda salsa</i>
13	E86°47'18"	N42°01'03"	1 043	盐穗木 <i>Halostachys caspica</i> , 盐地碱蓬 <i>Suaeda salsa</i>
14	E86°47'17"	N42°01'04"	1 043	盐穗木 <i>Halostachys caspica</i> , 盐地碱蓬 <i>Suaeda salsa</i>
15	E86°46'37"	N42°01'14"	1 044	刚毛柽柳 <i>Tamarix hispida</i> , 盐穗木 <i>Halostachys caspica</i> , 盐爪爪 <i>Kalidium foliatum</i>
16	E86°46'36"	N42°01'11"	1 046	盐穗木 <i>Halostachys caspica</i>
17	E86°46'28"	N42°01'17"	1 046	刚毛柽柳 <i>Tamarix hispida</i> , 白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>
18	E86°46'31"	N42°01'20"	1 044	盐穗木 <i>Halostachys caspica</i> , 泡果白刺 <i>Nitraria sphaeocarpa</i>

分别于2020年9月(秋季)、2021年5月(春季)和2021年7月(夏季)对样地进行重复调查。每个样地设置3个面积10 m×10 m的灌木样方,在每个灌木样方内沿对角线设置3个面积1 m×1 m的草本样方。记录各样方内所有植物的种类和株数。使用卷尺(精度0.1 cm)测量所有植物的株高和冠幅,根据

公式“盖度=冠幅/样方面积”计算盖度。根据物种株数、所在样地数和盖度计算各物种重要值。重要值的计算公式为重要值=(相对密度+相对频度+相对盖度)/3^[18],其中,相对密度=(样地内某种植物的株数/样地内全部植物的总株数)×100%,相对频度=(某种植物样方出现的次数/所有种出现的总次数)×

100%, 相对盖度 = (某种植物的盖度/所有种的盖度之和) × 100%。利用 GPS 仪记录各样地的经度、纬度和海拔。参考文献[19], 选取样地内重要值排名前 5 的优势植物, 其物种信息见表 2。选取各优势植物中长势良好、大小基本一致的植株, 在各植株不同方向随机采集成熟、完整的叶片 10~15 枚, 贴好标签后装入保鲜箱带回实验室。在各样方内随机挖取 0~20 cm 表层土 200 g, 带回实验室后在室温条件下自然风干, 剔除土壤中杂质, 研钵研磨后过 60 目筛, 装入密封袋中用于后续指标的测定。

1.2.2 叶片和土壤元素含量及土壤理化性质测定
5 种优势植物的叶片样品在 65 °C 烘箱中烘干 24 h, 研钵研磨后过 60 目筛。叶片和土壤有机碳含量采用重铬酸钾-外加热法^{[20]30-34}测定; 叶片和土壤全氮含量采用半微量开氏法^{[20]42-44}, 使用福斯 1035 全自动定氮仪(丹麦福斯分析仪器公司)测定; 叶片和土壤全磷含量采用 HClO₄-H₂SO₄法^{[20]74-76}, 使用安捷伦 CARY60 紫外可见分光光度计[安捷伦科技(中国)有限公司]测定。土壤全钾含量采用 NaOH 熔融-原

子吸收法^{[20]101-103}, 使用赛默飞 S 系列原子吸收光谱仪[赛默飞世尔科技(中国)有限公司]测定; 土壤速效磷含量采用 0.5 mol · L⁻¹ NaHCO₃法^{[20]81-83}测定; 土壤速效钾含量采用乙酸铵浸提-火焰光度法^{[20]106-107}测定; 土壤硝态氮含量采用酚二磺酸比色法^{[20]50-52}测定; 土壤铵态氮含量采用 2 mol · L⁻¹ KCl 浸提-蒸馏法^{[20]53-56}测定。叶片和土壤的碳氮比为有机碳含量与全氮含量的比值, 碳磷比为有机碳含量与全磷含量的比值, 氮磷比为全氮含量与全磷含量的比值。土壤总盐含量采用残渣烘干法-质量法^{[20]187-188}测定; 土壤 pH 值使用雷磁 PHS-3C 型 pH 计(上海大普仪器有限公司)测定; 使用精度 0.001 g 的天平先称量土样的原土质量, 再在 105 °C 的烘箱内将土样烘 6~8 h 至恒质量, 称取质量后, 根据公式“土壤含水量 = [(原土质量 - 烘干土质量) / 烘干土质量] × 100%”计算土壤含水量。各指标重复测定 3 次, 结果取平均值。下文有关叶片有机碳含量、全氮含量和全磷含量分别用叶片碳含量、氮含量和磷含量代替。

表 2 博斯腾湖湖滨湿地样地内 5 种优势植物的物种信息

Table 2 Species information of five dominant plants in sample plots of the lakeside wetland of Bosten Lake

种类 Species	生活型 Life form	多度 Abundance	冠幅/cm ² Crown width	所在样地数 Number of sample plots	重要值/% Importance value
刚毛怪柳 <i>Tamarix hispida</i>	灌木 Shrub	247	63 908.79	11	24.09
盐地碱蓬 <i>Suaeda salsa</i>	一年生草本 Annual herb	4 305	49.87	6	19.39
白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	灌木 Shrub	23	54 903.07	7	15.37
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	多年生草本 Perennial herb	2 334	201.72	9	13.67
盐穗木 <i>Halostachys caspica</i>	灌木 Shrub	752	21 172.17	11	13.06

1.3 数据分析

采用单因素 Kruskal-Wallis 检验不同物种之间以及同一物种不同季节之间植物叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比的差异显著性, 并对数据进行正态检验, 使用 rstatix 程序包进行球形检验, 对不满足球形假设的结果进行 Greenhouse-Geisser sphericity 校正, 使用 Dunn's test 进行多重比较; 通过 Pearson 相关性分析和冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 检验植物叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比与土壤因子之间的相关性, *P* 值进行 bonferroni 校正, 通过显著性检验确定对植物叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比有显著影响的土壤因子; 采用协方差分析 (ANCOVA) 比较生活型、季节及二者的交互作用对植物叶片碳、

氮、磷含量及其化学计量比变异的贡献率, 因变量为各叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比, 自变量为生活型、季节以及二者的交互作用, 分析中所用回归模型为 $y \sim$ 生活型 + 季节 + 生活型 × 季节。所有数据分析均在 R 4.1.1 软件中进行, 使用 Origin 2021 软件和 R 4.1.1 软件绘图。

2 结果和分析

2.1 5 种优势植物叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比的比较

博斯腾湖湖滨湿地 5 种优势植物叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比见表 3。由表 3 可知: 从博斯腾

湖湖滨湿地 5 种优势植物的总体看,叶片碳含量、氮含量、磷含量、碳氮比、碳磷比和氮磷比分别为 $350.27 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $25.04 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $1.99 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、15.91、223.61 和 15.43。刚毛柽柳和芦苇叶片碳含量、碳氮比和碳磷比总体上显著 ($P < 0.05$) 高于白刺、盐穗木和盐地碱蓬。盐穗木叶片氮含量和磷含量总体上显著高于刚毛柽柳和芦苇;白刺叶片氮含量和磷含量显著高于刚毛柽柳,但与芦苇叶片氮含量和磷含量差异不显著;盐地碱蓬叶片磷含量也较高,但与其他 4 种优势植物间差异不显著。5 种优势植物间叶片氮磷比无显著 ($P > 0.05$) 差异。

由表 3 还可知:5 种优势植物叶片碳、氮、磷化学计量指标总体的变异系数中,叶片磷含量的变异系数最大(65.71%);叶片碳磷比和氮磷比的变异系数也较大,分别为 49.51%和 47.11%;叶片氮含量和碳氮比的变异系数较小,分别为 38.15%和 37.95%;叶片碳含量的变异系数最小(16.89%)。5 种优势植物中,盐地碱蓬叶片化学计量指标的变异总体较大,其叶片磷含量和氮磷比的变异系数分别为 77.27%和 65.92%;刚毛柽柳和芦苇叶片化学计量指标的变异总体较小。

表 3 博斯腾湖湖滨湿地 5 种优势植物叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 3 Carbon, nitrogen, and phosphorus contents and their stoichiometric ratios in leaves of five dominant plants in the lakeside wetland of Bosten Lake ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

种类 Species	叶片碳含量/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Leaf carbon content	叶片氮含量/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Leaf nitrogen content	叶片磷含量/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Leaf phosphorus content	叶片碳氮比 Leaf carbon/nitrogen ratio	叶片碳磷比 Leaf carbon/phosphorus ratio	叶片氮磷比 Leaf nitrogen/phosphorus ratio
Th	$380.31 \pm 29.92a$ (7.87%)	$21.54 \pm 5.49b$ (25.51%)	$1.53 \pm 0.58c$ (38.39%)	$18.88 \pm 5.27a$ (27.93%)	$284.56 \pm 106.74a$ (37.51%)	$15.98 \pm 6.37a$ (39.87%)
Nt	$335.42 \pm 55.42b$ (16.52%)	$32.85 \pm 10.54a$ (32.11%)	$2.15 \pm 0.68ab$ (31.73%)	$11.11 \pm 3.44b$ (30.99%)	$170.48 \pm 57.87b$ (33.94%)	$16.71 \pm 7.23a$ (43.29%)
Hc	$299.21 \pm 39.73b$ (13.28%)	$30.82 \pm 11.77a$ (38.21%)	$2.74 \pm 2.02a$ (73.81%)	$11.34 \pm 5.13b$ (45.23%)	$138.67 \pm 55.68b$ (40.16%)	$14.44 \pm 6.79a$ (47.07%)
Pa	$399.60 \pm 18.36a$ (4.60%)	$23.87 \pm 6.06ab$ (25.39%)	$1.72 \pm 0.69bc$ (40.39%)	$17.83 \pm 4.86a$ (27.27%)	$270.40 \pm 108.69a$ (40.20%)	$16.26 \pm 7.71a$ (47.45%)
Ss	$271.04 \pm 40.00b$ (14.76%)	$22.49 \pm 12.07b$ (53.68%)	$2.47 \pm 1.91abc$ (77.27%)	$14.85 \pm 6.55ab$ (44.15%)	$148.55 \pm 60.26b$ (40.57%)	$13.08 \pm 8.62a$ (65.92%)
T	350.27 ± 59.17 (16.89%)	25.04 ± 9.55 (38.15%)	1.99 ± 1.31 (65.71%)	15.91 ± 6.03 (37.95%)	223.61 ± 109.91 (49.15%)	15.43 ± 7.27 (47.11%)

¹⁾ Th: 刚毛柽柳 *Tamarix hispida* Willd.; Nt: 白刺 *Nitraria tangutorum* Bobr.; Hc: 盐穗木 *Halostachys caspica* (Bieb.) C. A. Mey.; Pa: 芦苇 *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.; Ss: 盐地碱蓬 *Suaeda salsa* (Linn.) Pall.; T: 总体 Total. 同列中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) difference. 括号中百分数为变异系数 The percentages in the brackets are coefficients of variation.

2.2 5 种优势植物叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比的季节变化

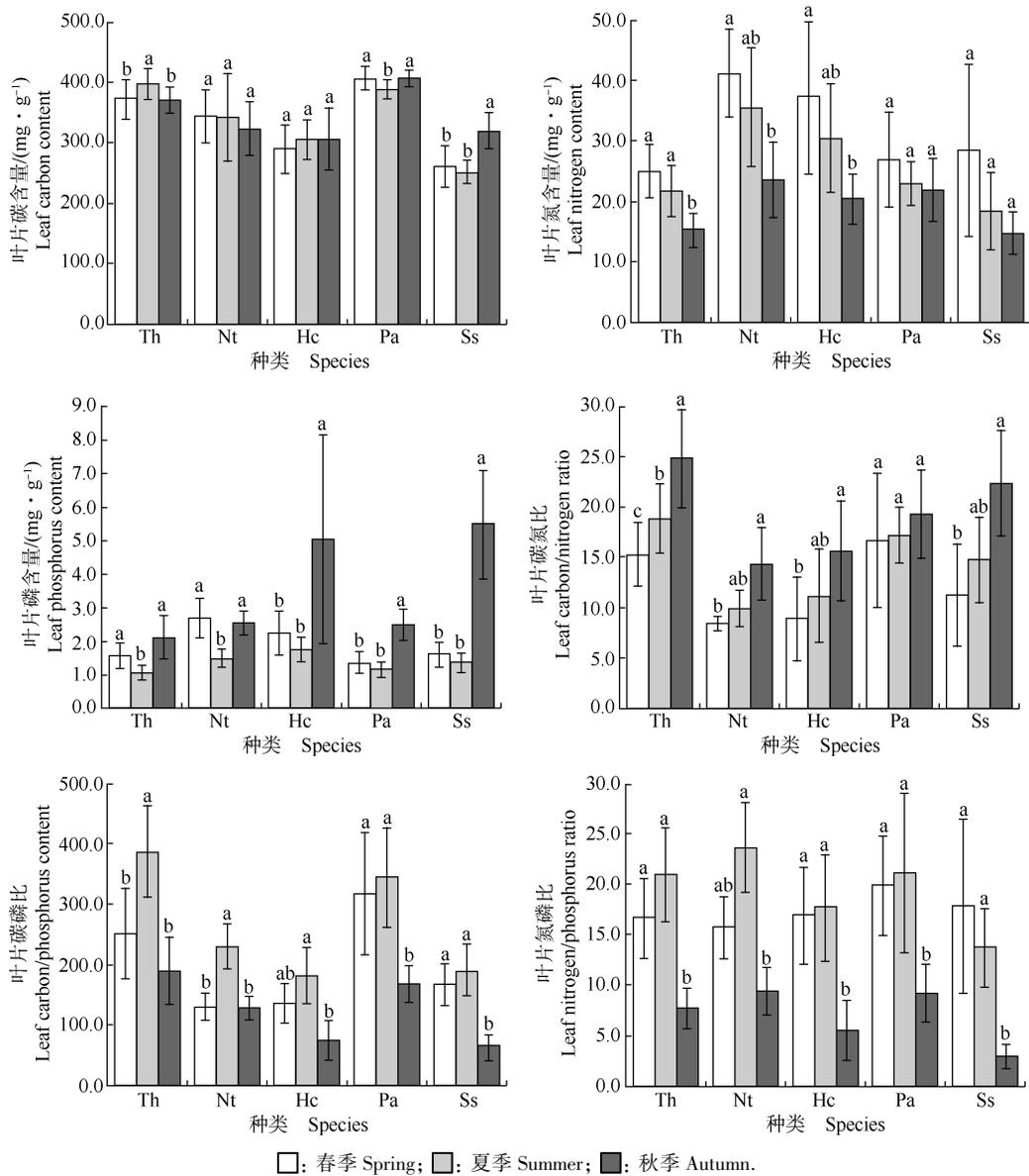
博斯腾湖湖滨湿地 5 种优势植物叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比的季节变化见图 1。由图 1 可知:夏季刚毛柽柳叶片碳含量显著 ($P < 0.05$) 高于春季和秋季,芦苇和盐地碱蓬叶片碳含量在夏季最低,白刺和盐穗木叶片碳含量在不同季节间无显著 ($P > 0.05$) 变化。5 种优势植物叶片氮含量由春季至秋季呈递减趋势;叶片磷含量总体为夏季最低,秋季最高;叶片碳氮比由春季至秋季呈递增趋势;叶片碳磷比和氮磷比呈相似的变化趋势,总体为夏季最高,春季次之,秋季最低,仅盐地碱蓬叶片氮磷比由春季至秋季呈递减趋势。

2.3 优势植物叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比的影响因子

2.3.1 优势植物叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比与土壤因子的关系 博斯腾湖湖滨湿地优势植物叶

片碳、氮、磷含量及其化学计量比与土壤因子的相关系数见表 4。由表 4 可知:优势植物叶片碳含量与土壤因子均无显著 ($P > 0.05$) 相关关系;叶片氮含量与土壤的有机碳含量、全磷含量和铵态氮含量均呈极显著 ($P < 0.01$) 正相关;叶片磷含量与土壤铵态氮含量呈显著 ($P < 0.05$) 负相关,与土壤速效钾含量呈显著正相关;叶片碳氮比则与土壤的全磷含量和铵态氮含量均呈极显著负相关;叶片碳磷比与土壤的铵态氮和硝态氮含量均呈极显著正相关;叶片氮磷比与土壤的有机碳含量、全磷含量、铵态氮含量、硝态氮含量和含水量均呈极显著正相关,与土壤 pH 值呈极显著负相关,与土壤速效磷含量呈显著正相关,与土壤速效钾含量呈显著负相关。此外,优势植物叶片的碳含量、氮含量、磷含量、碳氮比和碳磷比与土壤理化性质(包括土壤总盐含量、土壤含水量和土壤 pH 值)均无显著相关关系。

博斯腾湖湖滨湿地优势植物叶片碳、氮、磷含量



Th: 刚毛柽柳 *Tamarix hispida* Willd.; Nt: 白刺 *Nitraria tangutorum* Bobr.; Hc: 盐穗木 *Halostachys caspica* (Bieb.) C. A. Mey.; Pa: 芦苇 *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.; Ss: 盐地碱蓬 *Suaeda salsa* (Linn.) Pall.

同一植物同一指标中不同小写字母表示不同季节间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases of the same index of the same species indicate the significant ($P < 0.05$) difference among different seasons.

图1 博斯腾湖湖滨湿地优势植物叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比的季节变化
Fig. 1 Seasonal variations of carbon, nitrogen, and phosphorus contents and their stoichiometric ratios in leaves of dominant plants in the lakeside wetland of Bosten Lake

表4 博斯腾湖湖滨湿地优势植物叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比与土壤因子的相关性¹⁾
Table 4 Correlations of carbon, nitrogen, and phosphorus contents and their stoichiometric ratios in leaves of dominant plants with soil factors of the lakeside wetland of Bosten Lake¹⁾

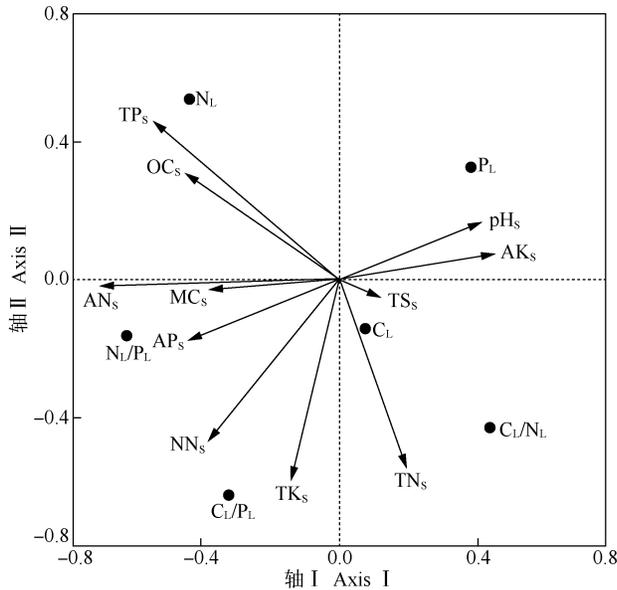
叶片化学计量指标 Leaf stoichiometric index	与土壤因子的相关系数 Correlation coefficients with soil factors										
	OC _s	TN _s	TP _s	TK _s	AN _s	NN _s	AP _s	AK _s	TS _s	MC _s	pH _s
C _L	-0.04	0.12	-0.04	-0.02	-0.01	-0.01	-0.06	0.03	-0.04	-0.02	-0.07
N _L	0.30 **	-0.18	0.39 **	-0.07	0.36 **	0.08	0.14	-0.17	-0.08	0.19	-0.20
P _L	-0.11	0.01	-0.16	-0.16	-0.26 *	-0.17	-0.26	0.27 *	0.01	-0.12	0.15

续表4 Table 4 (Continued)

叶片化学计量指标 Leaf stoichiometric index	与土壤因子的相关系数 Correlation coefficients with soil factors										
	OC _s	TN _s	TP _s	TK _s	AN _s	NN _s	AP _s	AK _s	TS _s	MC _s	pH _s
C _L /N _L	-0.25	0.21	-0.32 **	0.04	-0.32 **	-0.11	-0.22	0.24	0.06	-0.15	0.15
C _L /P _L	0.08	0.06	0.07	0.19	0.27 **	0.29 **	0.20	-0.16	-0.03	0.14	-0.21
N _L /P _L	0.31 **	-0.09	0.34 **	0.13	0.52 **	0.30 **	0.27 *	-0.27 *	-0.10	0.30 **	-0.31 **

¹⁾ C_L: 叶片碳含量 Leaf carbon content; N_L: 叶片氮含量 Leaf nitrogen content; P_L: 叶片磷含量 Leaf phosphorus content; C_L/N_L: 叶片碳氮比 Leaf carbon/nitrogen ratio; C_L/P_L: 叶片碳磷比 Leaf carbon/phosphorus ratio; N_L/P_L: 叶片氮磷比 Leaf nitrogen/phosphorus ratio; OC_s: 土壤有机碳含量 Soil organic carbon content; TN_s: 土壤全氮含量 Soil total nitrogen content; TP_s: 土壤全磷含量 Soil total phosphorus content; TK_s: 土壤全钾含量 Soil total potassium content; AN_s: 土壤铵态氮含量 Soil ammonium nitrogen content; NN_s: 土壤硝态氮含量 Soil nitrate nitrogen content; AP_s: 土壤速效磷含量 Soil available phosphorus content; AK_s: 土壤速效钾含量 Soil available potassium content; TS_s: 土壤总盐含量 Total soil salt content; MC_s: 土壤含水量 Soil moisture content; pH_s: 土壤 pH 值 Soil pH value. *: P<0.05; **: P<0.01.

及其化学计量比与土壤因子的 RDA 排序图见图 2。由图 2 可知:轴 I 和轴 II 对优势植物叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比与土壤因子关系的解释变量分别为 83.42% 和 11.71%, 累计为 95.13%, 说明前 2 轴能够较好地说明叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比与



C_L: 叶片碳含量 Leaf carbon content; N_L: 叶片氮含量 Leaf nitrogen content; P_L: 叶片磷含量 Leaf phosphorus content; C_L/N_L: 叶片碳氮比 Leaf carbon/nitrogen ratio; C_L/P_L: 叶片碳磷比 Leaf carbon/phosphorus ratio; N_L/P_L: 叶片氮磷比 Leaf nitrogen/phosphorus ratio; OC_s: 土壤有机碳含量 Soil organic carbon content; TN_s: 土壤全氮含量 Soil total nitrogen content; TP_s: 土壤全磷含量 Soil total phosphorus content; TK_s: 土壤全钾含量 Soil total potassium content; AN_s: 土壤铵态氮含量 Soil ammonium nitrogen content; NN_s: 土壤硝态氮含量 Soil nitrate nitrogen content; AP_s: 土壤速效磷含量 Soil available phosphorus content; AK_s: 土壤速效钾含量 Soil available potassium content; TS_s: 土壤总盐含量 Total soil salt content; MC_s: 土壤含水量 Soil moisture content; pH_s: 土壤 pH 值 Soil pH value.

图 2 博斯腾湖湖滨湿地优势植物叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比与土壤因子的 RDA 排序图
Fig. 2 RDA ranking chart of carbon, nitrogen, and phosphorus contents and their stoichiometric ratios in leaves of dominant plants with soil factors of the lakeside wetland of Bosten Lake

土壤因子的关系。

博斯腾湖湖滨湿地土壤因子的显著性检验结果见表 5。由表 5 可知:土壤的铵态氮和硝态氮含量是影响叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比的主要因子。各土壤因子对植物叶片碳、氮、磷化学计量指标的影响由大到小依次为土壤硝态氮含量、土壤铵态氮含量、土壤有机碳含量、土壤全氮含量、土壤含水量、土壤速效钾含量、土壤速效磷含量、土壤 pH 值、土壤全磷含量、土壤总盐含量、土壤全钾含量。

2.3.2 优势植物叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比的变异来源 博斯腾湖湿地优势植物叶片化学计量指标的协方差分析参数见表 6。由表 6 可知:优势植物叶片碳含量分别受生活型及生活型和季节交互作

表 5 博斯腾湖湖滨湿地土壤因子的显著性检验¹⁾
Table 5 Significance test on soil factors of the lakeside wetland of Bosten Lake¹⁾

土壤因子 Soil factor	轴 I 得分 Axis I score	轴 II 得分 Axis II score	R ²	P 值 P value
OC _s	-0.45	0.32	0.04	0.14
TN _s	0.20	-0.55	0.04	0.84
TP _s	-0.55	0.47	0.01	0.40
TK _s	-0.14	-0.59	0.00	0.52
AN _s	-0.73	-0.02	0.08	0.04 *
NN _s	-0.39	-0.47	0.13	0.00 **
AP _s	-0.44	-0.18	0.01	0.31
AK _s	0.45	0.08	0.03	0.21
TS _s	0.12	-0.05	0.00	0.48
MC _s	-0.39	-0.03	0.03	0.21
pH _s	0.42	0.17	0.01	0.35

¹⁾ OC_s: 土壤有机碳含量 Soil organic carbon content; TN_s: 土壤全氮含量 Soil total nitrogen content; TP_s: 土壤全磷含量 Soil total phosphorus content; TK_s: 土壤全钾含量 Soil total potassium content; AN_s: 土壤铵态氮含量 Soil ammonium nitrogen content; NN_s: 土壤硝态氮含量 Soil nitrate nitrogen content; AP_s: 土壤速效磷含量 Soil available phosphorus content; AK_s: 土壤速效钾含量 Soil available potassium content; TS_s: 土壤总盐含量 Total soil salt content; MC_s: 土壤含水量 Soil moisture content; pH_s: 土壤 pH 值 Soil pH value. *: P<0.05; **: P<0.01.

表6 博斯腾湖湖滨湿地优势植物叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比的协方差分析(ANCOVA)参数¹⁾Table 6 Analysis of covariance (ANCOVA) parameters of carbon, nitrogen, and phosphorus contents and their stoichiometric ratios in leaves of dominant plants in the lakeside wetland of Bosten Lake¹⁾

变异来源 Source of variation	叶片碳含量 Leaf carbon content			叶片氮含量 Leaf nitrogen content			叶片磷含量 Leaf phosphorus content		
	离差平方和 SS	均方 MS	F 值 F value	离差平方和 SS	均方 MS	F 值 F value	离差平方和 SS	均方 MS	F 值 F value
生活型 Life form	37 108.00	37 108.00	11.25 **	349.00	348.80	3.88	1.66	1.66	0.96
季节 Season	11 286.00	11 286.00	3.26	2 769.00	2 768.60	36.88 **	46.69	46.69	32.26 **
生活型×季节 Life form × Season	17 571.00	17 571.00	5.55 *	3.25	3.25	0.04	12.25	12.25	8.89 **

变异来源 Source of variation	叶片碳氮比 Leaf carbon/nitrogen ratio			叶片碳磷比 Leaf carbon/phosphorus ratio			叶片氮磷比 Leaf nitrogen/phosphorus ratio		
	离差平方和 SS	均方 MS	F 值 F value	离差平方和 SS	均方 MS	F 值 F value	离差平方和 SS	均方 MS	F 值 F value
生活型 Life form	10.00	9.88	0.27	33 222.00	33 222.00	2.77	72.00	72.24	1.37
季节 Season	1 233.00	1 233.20	42.22 **	126 854.00	126 854.00	11.14 **	2 411.00	2 411.20	62.51 **
生活型×季节 Life form × Season	9.31	9.31	0.31	9 534.90	9 534.90	0.84	96.01	96.01	2.53

¹⁾ * : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$.

用的极显著和显著影响。叶片氮含量、碳氮比、碳磷比和氮磷比仅受季节的极显著影响,生活型以及生活型和季节交互作用对这4个指标均无显著影响。叶片磷含量主要受季节及生活型和季节交互作用的极显著影响。

3 讨论和结论

3.1 5种优势植物叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比总体特征

碳、氮、磷化学计量特征能反映植物的养分利用和元素平衡状况,是植物生长发育所必需的大量元素^[21]。本研究区植物叶片碳含量低于全球平均水平($461.6 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[22],这表明博斯腾湖湖滨湿地植物碳储存能力较弱;叶片氮含量高于全球平均水平($20.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)^[22],可能是因为博斯腾湖湖滨湿地地处干旱区,降水较少,土壤有效氮的淋溶较少,使其得到了有效保留,促进了植物对氮素的吸收及叶片氮含量升高。植物叶片碳氮比和碳磷比能反映植物对氮和磷的利用效率,氮磷比能反映植物受氮或磷相对限制的情况^[13]。本研究中,植物叶片碳氮比和碳磷比均低于全球平均水平(分别为23.8和300.9)^[22],表明5种优势植物氮和磷的利用效率较弱,干旱区恶劣环境下植物叶片在生长季会适当降低生长速率,保留一定量的氮和磷,主要是因为研究区的植物长期遭受盐胁迫,植物通过增加叶片养分含量可以快速合成额外的光合储存产物^[10],这在渗透调节和保护中起到

了至关重要的作用^[23]。已有研究结果表明:植物叶片氮磷比小于10时,植物生长受氮限制,氮磷比大于20时则主要受磷限制^[24]。本研究中,5种优势植物叶片氮磷比在10~20范围内,表明博斯腾湖湖滨湿地植物在整个生长季受氮和磷的共同限制。刚毛柽柳和芦苇叶片碳含量、碳氮比和碳磷比总体上显著高于白刺、盐穗木和盐地碱蓬,而白刺和盐穗木叶片氮含量和磷含量总体上显著高于刚毛柽柳和芦苇,说明5种优势植物中刚毛柽柳和芦苇叶片中养分合成有机物的能力即氮和磷的利用效率强于白刺、盐穗木和盐地碱蓬。同时,在长期遭受盐胁迫区域,植物叶片保留氮和磷是植物适应环境的结果^[23],所以白刺、盐穗木和盐地碱蓬对本研究区的环境适应性更强。

不同植物叶片化学计量指标的变异大小不同,反映了植物叶片碳、氮、磷含量的内稳性及其对生态环境变化的敏感性不同。本研究中,5种优势植物叶片碳含量的变异系数最小,而氮和磷含量变异系数较大,主要是因为碳是植物干物质的最主要元素,约占植物生物量的一半,对植物生长起决定性作用^[25],氮和磷是植物生长所必需的限制性营养元素^[26],其含量会随植物体发育阶段变化而变化,这与周磊等^[27]对不同林分红皮云杉(*Picea koraiensis* Nakai)针叶养分含量及生态化学计量特征研究结果一致。盐地碱蓬叶片化学计量指标变异较大,芦苇和刚毛柽柳叶片化学计量指标变异较小,可能是因为盐地碱蓬为一年生草本植物,而芦苇和刚毛柽柳均为多年生植物,其生长策略不同,且芦苇和刚毛柽柳根系较为发达,可

以吸收更多的土壤养分以维持叶片碳、氮、磷含量的稳定。

3.2 5种优势植物叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比的季节动态

叶片化学计量指标的季节差异主要反映了植物自身在不同物候期的生物学特征^[13]。本研究中,夏季刚毛怪柳叶片碳含量显著高于春季和秋季,可能是因为夏季植物处于快速生长期,光合作用较强,碳固定速率加快,秋季叶片生长减弱、枯萎导致了叶片碳含量的减少^[28]。夏季芦苇和盐地碱蓬叶片碳含量最低,可能与二者都是草本植物有关,具体机制还需进一步研究。5种优势植物叶片氮含量由春季到秋季递减,磷含量由春季到夏季降低,主要是因为生长在春季前期,植物叶片细胞快速增殖需要大量吸收氮和磷合成蛋白质和核酸,随着植物的生长,夏季植物叶片细胞中氮和磷快速转化积累的有机物,导致叶片氮含量和磷含量快速降低,所以春季植物叶片氮含量和磷含量高于夏季。5种优势植物叶片碳氮比由春季到秋季递增,碳磷比由春季到夏季升高,分别与叶片氮含量和磷含量季节变化趋势相反,表明植物叶片碳氮比和碳磷比的季节变化主要由叶片氮含量和磷含量主导^[13]。除盐地碱蓬外,其他4种优势植物叶片氮磷比均为夏季最高,春季次之,秋季最低,其中春季刚毛怪柳、白刺和芦苇叶片氮磷比在10~20之间,夏季这3种优势植物叶片氮磷比大于20,表明这3种植物在春季受氮和磷共同限制,在夏季主要受磷限制;盐穗木和盐地碱蓬叶片氮磷比在春季和夏季处于10~20之间,受氮和磷共同限制;秋季5种优势植物叶片氮磷比小于10,主要受氮限制。为减小研究区植物受氮和磷限制的程度,可以在夏季施加磷肥,秋季施加氮肥。不同植物受氮和磷的限制不同可能与不同植物对氮和磷的特异性吸收有关。

3.3 5种优势植物叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比的影响因子

土壤作为植物养分的主要来源,土壤与植物元素关系密切,二者相互促进、相互制约^[29,30]。植物在生长季会加快土壤养分吸收速率,以维持自身的快速生长,植物叶片碳、氮、磷含量也会和土壤养分表现出较强的相关性。本研究中,优势植物叶片碳含量与土壤因子无显著相关关系,但受植物生活型的极显著影响,主要是因为叶片碳含量与植物碳固定速率有关^[27],而不同生活型的植物具有不同的生长策略,碳

固定速率不同。叶片氮含量和碳氮比与土壤因子具有相反的相关性,进一步验证了叶片碳氮比的变化主要受叶片氮含量主导^[13,31]。叶片氮含量、碳氮比、氮磷比与土壤因子有较强的相关性,主要是因为本研究区土壤铵态氮和硝态氮含量是叶片碳、氮、磷含量及其化学计量比的主要影响因子,且植物叶片氮含量与土壤氮含量具有强烈的耦合关系,同时植物叶片氮和磷主要来源于对土壤养分的吸收。优势植物叶片氮含量、碳磷比和氮磷比与土壤含水量呈正相关,而与土壤pH值呈负相关,主要是因为研究区位于干旱区,降水较少且土壤盐渍化比较严重,土壤pH值普遍大于8,且适宜的土壤含水量和pH值更有利于植物吸收土壤养分,调节自身叶片化学计量。叶片氮磷比与多数土壤因子表现出的显著相关关系表明5种优势植物氮和磷的限制情况受土壤因子的显著影响,在缓解植物养分限制时需首先考虑土壤因子。5种优势植物叶片氮含量、磷含量、碳氮比、碳磷比和氮磷比主要受季节的影响,而受生活型影响不显著,可能是因为氮和磷主要参与植物体内蛋白质和核酸的合成^[4],不同季节的气候和土壤等条件不同,导致植物生长速率不同,植物叶片氮含量和磷含量有较大差异。可知研究区不同生活型物种间氮和磷的利用效率及其限制情况差异较小,物种保护时需要考虑在不同季节制定相应的保护措施。

参考文献:

- [1] RONG Q, LIU J, CAI Y, et al. Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Tamarix chinensis* Lour. in the Laizhou Bay coastal wetland, China[J]. Ecological Engineering: the Journal of Ecotechnology, 2015, 76: 57-65.
- [2] YAN W, ZHONG Y, ZHENG S, et al. Linking plant leaf nutrients/stoichiometry to water use efficiency on the Loess Plateau in China [J]. Ecological Engineering: the Journal of Ecotechnology, 2016, 87: 124-131.
- [3] HU Y F, SHU X Y, HE J, et al. Storage of C, N and P affected by afforestation with *Salix cupularis* in an alpine semi-arid desert ecosystem[J]. Land Degradation and Development, 2018, 29(1): 188-198.
- [4] 陈昊轩, 刘欣蕊, 孙天雨, 等. 长白山栎属树种叶片生态化学计量特征沿海拔梯度的变化规律[J]. 生态学报, 2021, 41(11): 4503-4512.
- [5] CAO J, WANG X, ADAMOWSKI J F, et al. Response of leaf stoichiometry of *Oxytropis ochrocephala* to elevation and slope aspect [J]. Catena, 2020, 194: 104772.
- [6] 黄菊莹, 赖荣生, 余海龙, 等. N添加对宁夏荒漠草原植物和土

- 壤 C : N : P 生态化学计量特征的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(11): 2850-2856.
- [7] 周正虎, 王传宽. 生态系统演替过程中土壤与微生物碳氮磷化学计量关系的变化[J]. 植物生态学报, 2016, 40(12): 1257-1266.
- [8] 田地, 严正兵, 方精云. 植物生态化学计量特征及其主要假说[J]. 植物生态学报, 2021, 45(7): 682-713.
- [9] 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(6): 585-598.
- [10] LIU D, ZHANG J, BISWAS A, et al. Seasonal dynamics of leaf stoichiometry of *Phragmites australis*: a case study from Yanggwan Wetland, Dunhuang, China[J]. *Plants*, 2020, 9(10): 1323.
- [11] FU X, LI F, ZHU L, et al. Change in ecological stoichiometry of *Carex brevicuspis* in response to sampling time and elevation in Dongting Lake, China[J]. *Nordic Journal of Botany*, 2018, 36(7): e01821.
- [12] LI H, CRABBE M J C, XU F, et al. Seasonal variations in carbon, nitrogen and phosphorus concentrations and C : N : P stoichiometry in different organs of a *Larix principis-rupprechtii* Mayr. plantation in the Qinling Mountains, China[J]. *PLOS ONE*, 2017, 12(9): e0185163.
- [13] 熊星烁, 蔡宏宇, 李耀琪, 等. 内蒙古典型草原植物叶片碳氮磷化学计量特征的季节动态[J]. 植物生态学报, 2020, 44(11): 1138-1153.
- [14] KANG H, ZHUANG H, WU L, et al. Variation in leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry in *Picea abies* across Europe: an analysis based on local observations [J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(2): 195-202.
- [15] AI Z, HE L, XIN Q, et al. Slope aspect affects the non-structural carbohydrates and C : N : P stoichiometry of *Artemisia sacrorum* on the Loess Plateau in China[J]. *Catena*, 2017, 152: 9-17.
- [16] 张海燕, 刘彬. 博斯腾湖湖滨湿地植被数量分类与排序[J]. 植物科学学报, 2015, 33(1): 36-43.
- [17] 杨筑筑, 吕晓涛, 宋彦涛, 等. 草原植物群落分类方法的比较研究: 以呼伦贝尔草原为例[J]. 生态学杂志, 2017, 36(8): 2375-2384.
- [18] 王育松, 上官铁梁. 关于重要值计算方法的若干问题[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2010, 33(2): 312-316.
- [19] 陈胜仙, 张喜亭, 余丹琦, 等. 森林植物多样性、树种重要值与土壤理化性质对球囊霉素相关土壤蛋白的影响[J]. 生物多样性, 2022, 30(2): 51-63.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] 卞福花, 吴秋堂, 吴梦迪, 等. 不同水盐生境下芦苇湿地植被及土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2022, 33(2): 385-396.
- [22] REICH P B, OLEKSYN J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [23] CASTELLANOS A E, LLANO-SOTELO J M, MACHADO-ENCINAS L I, et al. Foliar C, N and P stoichiometry characterize successful plant ecological strategies in the Sonoran Desert [J]. *Plant Ecology*, 2018, 219(7): 775-788.
- [24] GÜSEWELL S. N : P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance [J]. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 243-266.
- [25] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林优势物种不同生长阶段叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2015, 39(1): 52-62.
- [26] ELSER J J, FAGAN W F, KERKHOFF A J, et al. Biological stoichiometry of plant production: metabolism, scaling and ecological response to global change[J]. *New Phytologist*, 2010, 186(3): 593-608.
- [27] 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.
- [28] 魏亚伟, 张彤, 刘静, 等. 红松叶片与土壤有机碳、氮、磷、钙的空间分布及其化学计量学特征[J]. 沈阳农业大学学报, 2021, 52(4): 419-427.
- [29] 李月芬, 刘泓杉, 王月娇, 等. 退化草地的生态化学计量学研究现状及发展动态[J]. 吉林农业大学学报, 2018, 40(3): 253-257.
- [30] 高雯萱, 张静, 周晓兵, 等. 准噶尔西部山地新疆野苹果叶片化学计量特征及其影响因子分析[J]. 植物资源与环境学报, 2020, 29(5): 48-57.
- [31] 牛得草, 李茜, 江世高, 等. 阿拉善荒漠区6种主要灌木植物叶片 C : N : P 化学计量比的季节变化[J]. 植物生态学报, 2013, 37(4): 317-325.

(责任编辑: 张明霞)