DOI: 10.5846/stxb202004090847

胡聪,胡刚,张忠华,李峰.广西澄江喀斯特湿地沉水植物碳、氮、磷化学计量特征.生态学报,2021,41(13):5300-5308. Hu C, Hu G, Zhang Z H, Li F.Stoichiometric characteristics of submerged macrophytes in the Chengjiang karst wetland, Guangxi, China.Acta Ecologica Sinica,2021,41(13):5300-5308.

广西澄江喀斯特湿地沉水植物碳、氮、磷化学计量特征

胡 聪^{1,2},胡 刚^{1,2},张忠华^{1,2,*},李 峰^{3,4}

1 南宁师范大学环境与生命科学学院,南宁 530001
2 南宁师范大学北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室,南宁 530001
3 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室,长沙 410125
4 中国科学院洞庭湖湿地生态系统观测研究站,长沙 410125

摘要:沉水植物是水生生态系统中重要的初级生产者。当前有关沉水植物生态化学计量特征的研究主要集中在非喀斯特区,而 在喀斯特区的相关研究较为缺乏。因此,以广西澄江喀斯特典型湿地中的7种沉水植物为研究对象,分析沉水植物地上部分及 底泥的碳(C)、氮(N)、磷(P)化学计量特征。结果显示,(1)7种沉水植物地上部分总碳、总氮和总磷平均含量最大值均出现在 小萎藻(Najas minor)分别为(325.4±5.01)g/kg、(33.07±1.59)g/kg和(3.79±0.16)g/kg;C:N、C:P、N:P平均值分别为10.14± 0.18、96.23±3.56和9.47±0.32,C:N最大值(11.89±0.54)出现在苦草(Vallisneria natans),C:P和N:P最大值(113.27±18.14和 11.13±1.63)均出现在穗花狐尾藻(Myriophyllum spicatum)。(2)底泥有机碳、总氮、总磷、碱解氮和速效磷含量平均值分别为 (15.05±0.56)g/kg、(2.06±0.08)g/kg、(0.58±0.01)g/kg、(162.53±9.16)mg/kg和(21.73±0.86)mg/kg,有机碳、总氮、总磷、碱 解氮和速效磷的平均含量最大值均出现在小茨藻(N. minor)分别为(18.54±1.04)g/kg、(2.55±0.25)g/kg、(0.66±0.03)g/kg、 (214.82±32.05)mg/kg和(26.37±3.31)mg/kg;底泥的C:N、C:P和N:P平均值分别是7.33±0.14、25.7±0.72和3.53±0.09,C: N、C:P和N:P最大值分别出现在金鱼藻(Ceratophyllum demersum)(7.45±0.32)、小茨藻(N. minor)(28.29±1.29)和黑藻 (Hydrilla verticillata)(3.89±0.25)。(3)沉水植物的地上部分总碳与底泥的有机碳和总氮均呈显著负相关性;沉水植物的地上 部分总氮与底泥有机碳、碱解氮、C:P均呈显著正相关性;沉水植物地上部分 C:N、C:P均与底泥有机碳、总氮、总磷、碱解氮、C:P、N:P呈显著负相关,表明不同喀斯特湿地沉水植物和底泥之间的养分耦联性不同。本研究为喀斯特湿地生态系统生态化 学计量学研究提供理论依据。

关键词:沉水植物;生态化学计量学;喀斯特湿地

Stoichiometric characteristics of submerged macrophytes in the Chengjiang karst wetland, Guangxi, China

HU Cong^{1, 2}, HU Gang^{1, 2}, ZHANG Zhonghua^{1, 2, *}, LI Feng^{3, 4}

1 School of Environment and Life Science, Nanning Normal University, Nanning 530001, China

2 Key Laboratory of Beibu Gulf Environment Change and Resources Utilization of Ministry of Education, Nanning Normal University, Nanning 530001, China

3 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

4 Dongting Lake Station for Wetland Ecosystem Research, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

Abstract: Submerged macrophytes are important primary producers in aquatic ecosystems and play an important role in maintaining clean water, nutrient cycling, and ecosystem structure. Ecological stoichiometry is used to study the

收稿日期:2020-04-09; 修订日期:2021-04-10

基金项目:国家自然科学基金(31760128,31960275); 广西自然科学基金(2017GXNSFDA198003)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: gxtczzh@ 126.com

relationships between the balance of several chemical elements and energy in ecological interactions. At present, the research on the stoichiometric characteristics of submerged macrophytes focus on non-karst areas, but it is a lack of research on karst wetland. To research community level stoichiometric characteristics of submerged macrophytes and their factors, the study analyzed the submerged macrophytes and sediment in Chengjiang karst wetland in Guangxi, southwestern China. Results showed that (1) the mean contents of total carbon (TC), total nitrogen (TN) and total phosphorous (TP) of seven submerged macrophytes were (297.59±4.38) g/kg, (29.78±0.52) g/kg and (3.4±0.13) g/kg, respectively. The highest contents of TC, TN and TP were in *Najas minor* with (325.4±5.01) g/kg, (33.07±1.59) g/kg and (3.79±0.16) g/kg, respectively. The mean ratios of C:N, C:P and N:P of submerged macrophytes were 10.14±0.18, 96.23±3.56 and 9.47± 0.32, respectively. The highest C:N ratio was in Vallisneria natans (11.89 ± 0.54) , while the highest ratios of C:P and N:P were in Myriophyllum spicatum (113.27 ± 18.14 and 11.13 ± 1.63). (2) The mean contents of soil organic carbon (SOC), TN, TP, alkaline hydrolysis nitrogen (AN) and available phosphorus (AP) of sediment were (15.05±0.56) g/ kg, (2.06±0.08) g/kg, (0.58±0.01) g/kg, (162.53±9.16) mg/kg, and (21.73±0.86) mg/kg, respectively. The highest contents of SOC, TN, TP, AN and AP were in N. minor with (18.54±1.04) g/kg, (2.55±0.25) g/kg, (0.66± 0.03) g/kg, (214.82±32.05) mg/kg and (26.37±3.31) mg/kg, respectively. The mean ratios of C:N, C:P and N:P of submerged macrophytes were 7.33±0.14, 25.7±0.72 and 3.53±0.09, respectively. The highest ratios of C:N, C:P and N:P were in Ceratophyllum demersum (7.45 ± 0.32) , N. minor (28.29 ± 1.29) , and Hydrilla verticillata (3.89 ± 0.25) . (3) There were significantly negative correlations between TC of submerged macrophytes and SOC, TN of sediment, while significantly positive correlations were found between TN of submerged macrophytes and SOC, AN and C:P of sediment. In addition, ratios of C:N and C:P of submerged macrophytes showed significantly negative correlation with the SOC, TN, TP, AN, C:P and N:P of sediment, indicating that nutrient correlations are different between submerged macrophytes and sediment. Based on the ecological stoichiometric, it was preliminarily inferred that V. natans and M. spicatum may be more suitable as pioneer species for the restoration of submerged macrophytes in eutrophic karst wetland. The results support the research of ecological stoichiometry wetland ecosystems in karst areas.

Key Words: submerged macrophytes; ecological stoichiometry; karst wetland

生态化学计量学是结合生态学、化学和物理学的基本原理,利用生态过程中多重化学元素(主要是碳(C)、氮(N)、磷(P))的平衡关系,研究生态系统过程中这些元素的耦合关系的一种研究方法^[1]。生态化学 计量学主要揭示生态系统中组分养分比例的调控机制以了解养分比例在生态系统的过程和功能中的作用,对 揭示元素之间相互作用与制约的变化规律,以及实现自然资源的可持续利用具有重要意义^[2]。在生态系统 水平上,生产者、消费者、分解者及土壤等环境的 C、N、P 组成决定了生态系统的主要过程,其比值对生态系统 中能量流动、物质循环和养分限制等生态过程具有重要的指示作用。如 C : N 和 C : P 代表植物吸收营养元素 时同化 C 的能力,及植物对营养元素的利用效率^[3];N : P 是决定群落结构和功能的关键指标,可以用于指示 对生产力起限制作用的营养元素^[4];植物和土壤之间 C : N : P 比的差异还可用于解释生态系统结构的动态 变化^[2,5]。。

喀斯特湿地是一类特殊的湿地。受岩溶裂隙和地质构造的影响,其水文过程具有补给排泄迅速、水位流量季节变化剧烈、水体富钙偏碱、易损性高等特点^[6-7]。快速的水文过程也极易引起生态过程的变化,导致喀斯特湿地生态系统极为敏感而脆弱^[8],进而导致植物对环境变化具有生态敏感性与群落分布不稳定性特点。随着社会生产的发展,剧烈人类活动干扰导致部分岩溶湿地面积大幅度萎缩、生态功能严重退化、生物多样性丧失,引发人们对喀斯特湿地生态服务功能下降的担忧^[9]。例如,广西桂林会仙湖泊湿地面积持续缩小,水体富营养化日益突出,水生生态系统遭到严重破坏^[10];由于耕作和排干等人为活动导致云南纳帕海高原沼泽湿地面积不断缩小,生物多样性减少,水质恶化^[11]。因此,正确认识环境变化对喀斯特湿地植被群落的影响,

对生物多样性保护及生态管理具有重要意义。

沉水植物是水生生态系统中重要的初级生产者,在维持清水状态、养分循环和生态系统结构等方面起着 重要的作用^[12],如吸附悬浮颗粒物、吸收氮磷营养、抑制藻类生长等^[13]。沉水植物衰退和消亡被认为是湿地 生态系统退化的重要标志之一^[14-15],如郝贝贝^[16]研究发现云南 10 个高原湖泊普遍为磷过剩而氮相对不足, 导致沉水植物物种多样性下降;Su^[17]通过研究长江中下游湖泊发现沉水植物内稳性与湖泊的富营养化有关。 然而,目前有关广西喀斯特湿地沉水植物化学计量特征的研究较为缺乏。因此,本文以广西典型喀斯特河流 湿地——澄江湿地的沉水植物为研究对象,利用生态化学计量学的理论方法,分析典型沉水植物地上部分及 其底泥的 C、N、P 的化学计量特征,以期为我国喀斯特湿地沉水植物生态化学计量学研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

广西都安县澄江河流湿地(23°48′48″—25°24′30″N,107°46′19″—108°18′50″E),位于广西中部,都安县的 中南部,马山县以北的红水河段。澄江发源于大兴乡九顿村地下河出口处,向南流经大兴、高岭、澄江等乡镇, 至红渡村汇入红水河,流程41 km,流域面积986 km²,为南亚热带季风气候,年均气温19.6℃,年均降水量约 1700 mm,时空分布不均匀且降雨强度较大,集中在5—8月,占全年雨量的80%以上^[18]。该湿地现有的沉水 植物主要为海菜花(Ottelia acuminata)、黑藻(Hydrilla verticillata)、穗花狐尾藻(Myriophyllum spicatum)、金鱼 藻(Ceratophyllum demersum)、苦草(Vallisneria natans)、小茨藻(Najas minor)、竹叶眼子菜(Potamogeton malaianus)。

1.2 样品采集与处理

2019年7月,本研究于广西都安县澄江湿地选取7个优势种为研究对象,分别为海菜花、黑藻、穗花狐尾 藻、金鱼藻、苦草、小茨藻、竹叶眼子菜。本次采样共设置10个采样点,其中相邻两个样点间隔约2km(图1, 表1);每个样点设置3个面积约为0.2m²的样方,且相邻样方的间隔约为10m;采样过程中,每个样方进行3 次重复采集并将土样混合。用柱状采泥器采集每种植物集中分布斑块的表层底泥(0—10 cm),充分混匀后 装入贴有标签的自封袋并带回实验室分析测定。用重锤和绳尺测量采样点水深;使用手柄可延长的自制水下 镰刀(面积约0.2m²)采集深水区沉水植物地上部分混合样;在岸边水深约为1m的浅水区,采样人员踏入河

中徒手采集植物地上部分混合样。每个样方采集到的 沉水植物经洗去泥沙和杂物与分拣种类后,每个物种取 5—10 株地上部分装进贴有标签的自封袋并带回实验 室进一步处理分析。

沉水植物样品沥干浮水后放入 80℃烘箱里烘干至 恒重,研磨成粉状后过 100 目筛。植物叶片总碳(TC)、 总氮(TN)含量用 C/N 元素分析仪(2400II CHNS/O Elemental Analyzer, Perkin-Elmer, USA)测定;叶片总磷 (TP)含量采用浓硫酸—高氯酸消煮连续流动分析仪法 测定。采集的底泥去除可见的动物和植物残体后自然 风干,过筛 60 目(筛孔尺寸 0.25 mm),用于测定土壤有 机质(SOC)、总氮(TN)、总磷(TP)、土壤碱解氮(AN) 和土壤速效磷(AP)。SOC 测定采用重铬酸钾—外加热 法^[19]; TN 采用 C/N 元素分析仪(2400II CHNS/O Elemental Analyzer, Perkin-Elmer, USA)测定; TP 采用 氢氧化钠碱熔—钼锑抗比色法; 土壤 AN 采用碱解扩散







Table 1 Water le

法^[20];AP 采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗分光光度法^[21]。C、N、P 测定结果以单位质量的养分含量表示(g/kg), AN 和 AP 测定结果以单位质量的养分含量表示(mg/kg),C、N、P 化学计量比均采用摩尔比表示。

采样点 Sampling site	平均水位/m Mean water level	优势物种 Dominant species	环境特征 Environment characteristic
1	2.1	海菜花、苦草、金鱼藻	人为干扰少
2	1.8	海菜花、苦草、金鱼藻、小茨藻	人为干扰少
3	2.2	海菜花、苦草、竹叶眼子菜	人为干扰少
4	2.0	海菜花、黑藻、金鱼藻、小茨藻、穗花狐尾藻	人为干扰少
5	2.0	海菜花、金鱼藻、穗花狐尾藻、黑藻	人为干扰少
6	2.1	海菜花、苦草、金鱼藻、黑藻、竹叶眼子菜、穗花狐尾藻	靠近村庄,人为干扰较大
7	1.9	海菜花、苦草、金鱼藻、黑藻、穗花狐尾藻	靠近村庄,人为干扰较大
8	2.0	海菜花、苦草、金鱼藻、竹叶眼子菜	靠近村庄,人为干扰较大
9	1.8	海菜花、苦草、金鱼藻、黑藻、小茨藻、竹叶眼子菜	靠近村庄,人为干扰较大
10	1.8	海菜花、苦草、金鱼藻、小茨藻 靠近村庄,人为干打	

	J	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		- l	- f	- J l i i	
ver.	dominant spec	ies, and	environment	cnaracteristic	or submerge	ed macrophyte	communities

1.3 数据分析

采用单因子方差分析法(One-way ANOVA)分析沉水植物和底泥的C、N、P含量及其化学计量特征(如C:N比、C:P比、N:P比);采用 Pearson 相关分析方法分析沉水植物C、N、P、C:N比、C:P比、N:P比与其表层底泥C、N、P、C:N比、C:P比、N:P比之间的相关性,显著性检验采用双尾检验。所有数据分析均采用 SPSS 21.0,作图在 Origin 8.0 中完成。

2 结果

2.1 沉水植物地上部分碳氮磷化学计量特征

7 种沉水植物 TC、TN 和 TP 含量平均值分别(297.59±4.38) g/kg、(29.78±0.52) g/kg 和(3.4±0.13) g/kg。 如图 2 所示, TC、TN 和 TP 平均含量最大值均出现在小茨藻,分别为(325.40±5.01) g/kg,(33.07±1.59) g/kg 和(3.79±0.16) g/kg。 TC 平均含量最小值出现在黑藻为(259.57±16.73) g/kg, TN 和 TP 平均含量的最小值均出现在苦草,分别为(25.74±0.68) g/kg 和(2.88±0.12) g/kg。 TC 与 TN 在各沉水植物间呈显著差异 (P<0.05), 仅 TP 平均含量在各沉水植物间无显著差异(P>0.05)。

同时,7种沉水植物的C:N、C:P和N:P平均值分别为10.14±0.18、96.23±3.56和9.47±0.32。C:N最大 值和最小值分别出现在苦草(11.89±0.54)和海菜花(9.46±0.25)。C:P和N:P最大值均出现在穗花狐尾藻, 分别为113.27±18.14和11.13±1.63。而C:P和N:P最小值均出现在黑藻,分别为76.35±6.11和7.79±0.38。 C:N、C:P和N:P比值在各沉水植物间均呈显著差异(P<0.05)。

2.2 底泥碳氮磷化学计量特征

结果表明,沉水植物所在区域的底泥 SOC、TN、TP、AN 和 AP 含量平均值分别为(15.05±0.56) g/kg、(2.06±0.08) g/kg、(0.58±0.01) g/kg、(162.53±9.16) mg/kg和(21.73±0.86) mg/kg。如图 3 所示,底泥 SOC、TN、TP、AN 和 AP 的平均含量最大值均出现在小茨藻,分别为(18.54±1.04) g/kg,(2.55±0.25) g/kg,(0.66±0.03) g/kg,(214.82±32.05) mg/kg和(26.37±3.31) mg/kg。底泥 SOC、TN、TP 平均含量最小值均出现在苦草,分别为(12.95±1.47) g/kg,(1.82±0.22) g/kg和(129.3±24.07) g/kg,AN 和 AP 的平均含量最小值分别出现在黑藻和穗花狐尾藻,为(19.87±2.63) mg/kg和(0.54±0.04) mg/kg。











底泥 C:N、C:P 和 N:P 平均值分别为 7.33±0.14、25.7±0.72 和 3.53±0.09。C:N 最大值和最小值分别出 现在金鱼藻和竹叶眼子菜,分别为 7.45±0.32 和 6.9±0.59。C:P 和 N:P 最大值分别出现在小茨藻和黑藻,分 别为 28.29±1.29 和 3.89±0.25。而 C:P 和 N:P 最小值均出现在苦草,分别为 22.8±2.05 和 3.17±0.28。除 SOC 外,TN、TP、C:N、C:P 和 N:P 在不同沉水植物的底泥间均无显著差异(*P*>0.05)。

2.3 沉水植物与底泥碳氮磷化学计量特征的相关性分析

Pearson 相关分析结果表明(表 2),沉水植物地上部分 TC 和 TN、C:N、C:P、N:P 呈显著正相关性;沉水植物地上部分 TN 和 TP 呈显著正相关性,和 C:P 呈显著负相关性;沉水植物地上部分 TP 和 C:N、C:P、N:P 呈显著负相关性。底泥 SOC、TN、TP、AN 和 AP 之间呈不同程度的显著相关性。沉水植物 TC 与底泥 SOC、TN 相关系数分别是 0.242、0.258,呈显著负相关关系(P<0.05);沉水植物 TN 与底泥 SOC、AN、C:P 相关系数分别 是 0.296、0.263,呈显著正相关关系(P<0.05);沉水植物 C:N、C:P 均与底泥 SOC、TN、TP、AN、C:P、N:P 呈显 著负相关(P<0.05)。而沉水植物 N:P 与底泥养分含量及其化学计量比均无显著相关相关性(P>0.05)。

3 讨论

澄江喀斯特湿地沉水植物地上部分 C 平均含量(297.59 g/kg)低于我国植物 C 平均含量(423.8—530.2 g/kg)^[22]、长江中下游植物群落的 C 平均含量(386.93 g/kg)^[23]、及抚仙湖 9 种沉水植物 C 平均含量(381.89 g/kg)^[24]。原因可能是在不同植物中同种元素含量的分布区间存在差异^[25];另外,喀斯特湿地岩溶区土壤母质中碳酸盐在水淹条件下溶解电离出大量的 CO₃²⁻、HCO₃⁻,使得底泥呈弱碱性也会影响植物对土壤养分吸收的有效性^[26]。有研究表明,岩溶区石灰土中丰富的钙镁会降低营养元素的供给速率及生物有效性,导致植物体内养分含量较少,因此喀斯特岩溶区主要受 N、P 共同限制^[27]。然而,澄江喀斯特湿地沉水植物地上部分 N、P 平均含量(29.18 g/kg 和 3.4 g/kg)均高于全球植物(17.7 g/kg 和 1.58 g/kg)和中国湿地植物(16.07 g/kg 和 1.85 g/kg)^[27-28]和长江中下游沉水植物群落(26.10 g/kg 和 2.64 g/kg)^[23]。原因可能是澄江喀斯特湿地附近生活污水和农业废水排放,导致河流内 N、P 养分含量较高,并进一步被沉水植物吸收,使得研究区沉水植物体内具有相对较高的 N、P 含量。

在化学计量学研究中,N:P 是判断湿地植物养分限制的标准。当N:P<14时,N 是限制性营养元素,而当N:P>16时,P 则是限制性营养元素,当14<N:P<16时,N 或P 是限制性营养元素,或者二者均为该植物的限制性营养元素^[29]。中国湿地植物N限制比例最高为59%(N和P 共同限制为33%,P 限制为8%),一方面是由于湿地植物P含量高于陆地生态系统,另一方面是湿地生态系统的N沉降和N输入较高导致湿地生态系统的固N能力下降^[30]。本研究中沉水植物地上部分N:P 平均值为9.47(N:P<14),其略高于中国湿地植物N:P 平均值(8.67)和抚仙湖植物N:P 平均值(9.21)^[24,30],低于长江中下游湖泊沉水植物群落平均值(10.99)^[23],表明澄江喀斯特湿地沉水植物P 过量而N相对不足。本研究中沉水植物的C:N和C:P 平均值(10.14和96.23)均低于长江中下游湖泊沉水植物群落的C:N和C:P 平均值(15.35和171.43),这可能与澄江喀斯特湿地沉水植物N、P 含量相对较高有关。另外,环境营养浓度、气候、物种组成、测量方法等因素也能导致不同地区沉水植物氮磷含量及其化学计量特征不同。

通过分析单一物种的化学计量比,沉水植物地上部分的 TC、TN 和 TP 平均含量的最大值均出现在小茨 藻,而 TC 平均含量最小值出现在黑藻,TN 和 TP 平均含量最小值均出现在苦草。植物体 C:P 和 N:P 比值变 化是植物内部调节机制与外界环境之间权衡的表现,较高的生长速率对应着较低的 C:P 和 N:P 比值^[31]。澄 江喀斯特湿地中 C:P 和 N:P 的最大值和最小值分别为穗花狐尾藻和黑藻,表明黑藻的生长速率较高而穗花 狐尾藻生长速率较低。另外,植物体 C:N 和 C:P 反映了植物吸收利用 N 和 P 养分同化 C 的能力,反映植物 对土壤营养元素的利用效率^[16,32]。澄江喀斯特湿地沉水植物地上部分 C:N 和 C:P 最小值分别出现在海菜 花和黑藻,而最大值分别出现在苦草和穗花狐尾藻。这与苏豪杰^[23]研究结果相似,其表明 C:N 和 C:P 较高 的沉水植物具有更强的竞争优势。李威^[33]研究表明苦草对光照强弱的适应能力较强且在不同水深下具有

		Table 2 Pe	arson correlat	tions between	nutrients and	d stoichiomet	tric character	ristics of sub	merged macro	phytes and s	ediment			
	P-TC	P-TN	P-TP	S-OC	NT-S	S-AN	S-AP	S-TP	P-C :N	P-C : P	P-N : P	S-C :N	S-C : P	d: N-S
P-TC	-													
P-TN	0.38 ***	1												
P-TP	-0.016	0.401 ***	1											
S-OC	-0.242 *	0.296^{**}	0.23 *	1										
NIL-S	-0.258 *	0.217	0.179	0.898 ***	1									
NA-2	-0.196	0.245 *	0.217	0.807 ***	0.81 ***	1								
S-AP	-0.032	0.115	0.112	0.462^{***}	0.585 ***	0.747 ***	1							
S-TP	-0.129	0.195	0.185	0.695 ***	0.695 ***	0.625 ***	0.67 ***	1						
P-C :N	0.472 ***	-0.621 ***	-0.386***	-0.484 ***	-0.403 ***	-0.379 ***	-0.118	-0.281 *	1					
P-C : P	0.43 ***	-0.14	-0.832 ***	-0.378 ***	-0.301 **	-0.336 **	-0.127	-0.242 *	0.502 ***	1				
P-N : P	0.253 *	0.198	-0.758***	-0.13	-0.096	-0.137	-0.061	-0.101	0.031	0.871 ***	1			
N: D-S	0.028	0.213	0.145	0.336**	-0.103	0.092	-0.217	0.057	-0.221	-0.209	-0.09	1		
S-C :P	-0.184	$0.263 \ ^{*}$	0.186	0.83 ***	0.667 ***	0.572 ***	0.065	0.205	-0.42 ***	-0.345 **	-0.127	0.469 ***	1	
d∶N-S	-0.222	0.143	0.104	0.705 ***	0.832 ***	0.589 ***	0.236^{*}	0.203	-0.313 **	-0.233 *	-0.073	-0.165	0.79***	1
***代表 P<0.001;	**代表 P<0.	01; * 代表 P	<0.05; P-TC:	:植物全碳 Pla	nt total carbor	1;P-TN:植物	J全氛 Plant t	otal nitrogen;	P-TP:植物全	磷 Plant total	phosphorus;	S-0C:底泥有	i机碳 Sedim	ent organic
carbon;S-TN:底泥总氮S	ediment total ni	trogen;S-AN:	底泥碱解氮S	sediment alkali	ne hydrolysis r	nitrogen;S-AP	:底泥速效碳	Sediment av	ailable phosphc	orus;S-TP:底	泥全磷 Sedin	nent total phos	phorus; P-C :	N:植物碳
氮比 Plant C :N ratio; P-C	】:P:植物碳磷I	ΕŁ Plant C :P	ratio;P-N:P;4	植物氮磷比 P.	lant N :P ratio	u;S-C∶N∶底纱	尼碳氮 比 Sedi	ment C:N ra	tio;S-C:P;底∛	尼碳磷比 Sedi	ment C :P ra	tio;S-N:P:底	泥氮磷比 Se	diment N:
P ratio														

表 2 沉水植物与底泥 C、N、P 含量及化学计量特征的相关性分析

http://www.ecologica.cn

较强的内稳性;冠层型植物穗花狐尾藻为了减弱低光照的胁迫,通过伸长茎以获得光照从而导致其C:N和C :P 较高^[23]。因此,苦草和穗花狐尾藻可能更适合作为富营养化喀斯特湿地沉水植物恢复的先锋物种。但在 选择苦草和穗花狐尾藻生长环境时,还需综合考虑水体的光照条件以及水文环境对沉水植物的影响。

本研究表明广西澄江喀斯特湿地 7 种沉水植物地上部分 TC 和 TN 呈显著正相关性,其原因可能是碳元 素合成碳水化合物能提供植物充足的转运能量,氮含量的增加有利于叶绿素氮含量的增加,增强植物光合作 用,提高碳含量^[34];TN和TP也呈显著正相关性,表明植物氮磷含量的相对一致性,也验证了氮磷含量在植物 化学计量学中呈正相关的规律^[35]。底泥 SOC、TN、TP、AN 和 AP 之间呈不同程度的显著相关性,表明澄江喀 斯特湿地底泥养分之间的关系密切。植物体中化学元素主要来源于土壤,其含量高低与土壤中含量密切相 关^[3]。沉水植物地上部分 TC 与底泥 SOC、TN 呈显著负相关性,地上部分 TN 与底泥 SOC、AN、C:P 呈正相关 性,地上部分 TP 与底泥 SOC 呈正相关性,表明植物和底泥之间的不同养分耦联性不同。然而,该结论与喀斯 特陆地生态系统相关研究不完全一致^[36-37],原因可能与喀斯特湿地生态水文过程有关^[9]。

本研究初步分析广西澄江喀斯特湿地沉水植物地上部分 C、N、P 生态化学计量特征,通过生态化学计量 比值初步推断苦草和穗花狐尾藻可能更适合作为富营养化喀斯特湿地沉水植物恢复的先锋物种。由于喀斯 特湿地水文地质结构特殊,其生态系统结构和功能与其他湿地类型有显著差异,下一步我们将结合广西喀斯 特湿地典型水文情势及土壤特征深入研究喀斯特湿地植被化学计量特征,为喀斯特湿地植被重建与 C、N、P 生物地球化学循环研究提供理论依据。

致谢:感谢南宁师范大学周元慧、黄侩侩、庞庆玲等对野外采样给予的帮助。

参考文献(References):

- [1] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索. 植物生态学报, 2005, 29(6): 1007-1019.
- [2] 王绍强,于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [3] Herbert D A, Williams M, Rastetter E B. A model analysis of N and P limitation on carbon accumulation in Amazonian secondary forest after alternate land-use abandonment. Biogeochemistry, 2003, 65(1): 121-150.
- [4] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. Journal of Applied Ecology, 2003, 40(3): 523-534.
- [5] 程滨,赵永军,张文广,安树青.生态化学计量学研究进展.生态学报,2010,30(6):1628-1637.
- [6] 何师意,冉景丞,袁道先,谢运球.不同岩溶环境系统的水文和生态效应研究.地球学报,2001,22(3):265-270.
- [7] Ford D C, Williams P W. Karst Hydrogeology and Geomorphology. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.
- [8] Hartmann A, Baker A. Modelling karst vadose zone hydrology and its relevance for paleoclimate reconstruction. Earth-Science Reviews, 2017, 172: 178-192.
- [9] 陈静,罗明明,廖春来,马瑞,周宏,邹胜章,陈植华.中国岩溶湿地生态水文过程研究进展.地质科技情报,2019,38(6):221-230.
- [10] 文云峰. 会仙岩溶湿地水体富营养化现状及对策研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2013.
- [11] 田昆,陆梅,常凤来,莫剑锋,黎良才,杨永兴.云南纳帕海岩溶湿地生态环境变化及驱动机制.湖泊科学,2004,16(1):35-42.
- [12] 马祖陆, 蔡德所, 蒋忠诚. 岩溶湿地分类系统研究. 广西师范大学学报: 自然科学版, 2009, 27(2): 101-106.
- [13] Ferreira T F, Crossetti L O, Marques D M L M, Cardoso L, Fragoso Jr C R, van Nes E H. The structuring role of submerged macrophytes in a large subtropical shallow lake: Clear effects on water chemistry and phytoplankton structure community along a vegetated-pelagic gradient. Limnologica, 2018, 69: 142-154.
- [14] Jeppesen E, Søndergaard M, Meerhoff M, Lauridsen T L, Jensen J P. Shallow lake restoration by nutrient loading reduction-some recent findings and challenges ahead. Hydrobiologia, 2007, 584(1): 239-252.
- [15] 王琦,高晓奇,肖能文,刘高慧,吕凤春,韩煜,史娜娜,全占军. 滇池沉水植物的分布格局及其水环境影响因子识别. 湖泊科学, 2018, 30(1): 157-170.
- [16] 郝贝贝,吴昊平,史俏,刘贵华,邢伟.云南高原10个湖泊沉水植物的碳、氮、磷化学计量学特征.湖泊科学,2013,25(4):539-544.
- [17] Su H J, Wu Y, Xia W L, Yang L, Chen J F, Han W X, Fang J Y, Xie P. Stoichiometric mechanisms of regime shifts in freshwater ecosystem. Water Research, 2019, 149: 302-310.

13 期

[18]	苏广实, 王世杰, 胡宝清,	汤 小青. 喀斯特小流域不同土地利用方式对土壤物理性状和微生物的影响——以广西都安澄江小流域为例.
	地球与环境,2013,41(1)	29-36.

- [19] Pansu M, Gautheyrou J. Handbook of Soil Analysis: Mineralogical, Organic and Inorganic Methods. New York: Springer, 2006.
- [20] Liu R T, Zhao H L, Zhao X Y, Drake S. Facilitative effects of shrubs in shifting sand on soil macro-faunal community in Horqin Sand Land of Inner Mongolia, Northern China. European Journal of Soil Biology, 2011, 47(5): 316-321.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京:中国农业出版社, 2000.
- [22] 刘立斌,钟巧连,倪健.贵州高原型喀斯特次生林 C、N、P 生态化学计量特征与储量.生态学报, 2019, 39(22): 8606-8614.
- [23] 苏豪杰,吴耀,夏午来,谢平,曹特.长江中下游湖泊群落水平下沉水植物碳、氮、磷化学计量特征及其影响因素.湖泊科学,2017,29 (2):430-438.
- [24] 李威, 符辉, 曹特, 张霄林, 钟家有, 倪乐意, 谢平, 樊后保. 抚仙湖沉水植物分布及其碳、氮和磷化学计量学特征. 湖泊科学, 2017, 29 (2): 448-457.
- [25] 张婷婷, 刘文耀, 黄俊彪, 胡涛, 汤丹丹, 陈泉. 植物生态化学计量内稳性特征. 广西植物, 2019, 39(5): 701-712.
- [26] 李艳琼, 沈育伊, 黄玉清, 徐广平, 蒲高忠, 何成新, 王新桂, 莫凌. 桂林会仙喀斯特湿地不同植物群落土壤养分分布差异与微生物活性 特征. 生态科学, 2018, 37(4): 24-34.
- [27] 曹建华,袁道先,潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤. 地球科学进展, 2003, 18(1): 37-44.
- [28] Elser J J, Fagan W F, Denn R F, Dobberfuhl D R, Folarin A, Huberty A, Interlandi S, Kilham S S, McCauley E, Schulz K L, Siemann E H, Sterner R W. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. Nature, 2000, 408(6812): 578-580.
- [29] Güsewell S, Bailey K M, Roem W J, Bedford B L. Nutrient limitation and botanical diversity in wetlands: can fertilisation raise species richness? Oikos, 2005, 109(1): 71-80.
- [30] 胡伟芳,章文龙,张林海,陈晓艳,林伟,曾从盛,仝川.中国主要湿地植被氮和磷生态化学计量学特征.植物生态学报,2014,38(10): 1041-1052.
- [31] Yu Q, Wu H H, He N P, Lü X T, Wang Z P, Elser J J, Wu J G, Han X G. Testing the growth rate hypothesis in vascular plants with above- and below-ground biomass. PLoS One, 2012, 7(3): e32162.
- [32] 曾昭霞,王克林,刘孝利,曾馥平,宋同清,彭晚霞,张浩,杜虎.桂西北喀斯特森林植物-凋落物-土壤生态化学计量特征.植物生态学报,2015,39(7):682-693.
- [33] 李威,何亮,朱天顺,曹特,张霄林,倪乐意. 洱海苦草(Vallisneria natans)水深分布和叶片 C、N、P 化学计量学对不同水深的响应. 湖泊 科学,2014,26(4):585-592.
- [34] Gross K L, Mittelbach G G, Reynolds H L. Grassland invasibility and diversity: responses to nutrients, seed input, and disturbance. Ecology, 2005, 86(2): 476-486.
- [35] Sterner R W, Elser J J. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere. Princeton, Oxford: Princeton University Press, 2002.
- [36] 俞月凤, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 文丽, 范夫静. 喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C、N、P 化学计量特征. 应用生态学报, 2014, 25(4): 947-954.
- [37] Zhang W, Zhao J, Pan F J, Li D J, Chen H S, Wang K L. Changes in nitrogen and phosphorus limitation during secondary succession in a karst region in Southwest China. Plant and Soil, 2015, 391(1/2): 77-91.