

基于环境因子的串珠藻科 *Batrachospermaceae* 濒危机制分析*

张国涛, 魏彩花, 郭伟楠, 南芳茹, 冯佳, 谢树莲**

(山西大学生命科学学院, 特色植物资源研究与利用山西省重点实验室, 太原 030006)

摘要: 串珠藻科 *Batrachospermaceae* 属于淡水红藻, 藻体丝状。该科的许多种类种群小而少, 已处于濒危状态。本研究采用单因素方差分析、主成分分析、随机森林模型和多元线性回归等多种分析方法, 分析串珠藻科植物环境数据之间的关系, 并与同为大型丝状淡水藻的双星藻科 *Zygnemataceae* 和刚毛藻科 *Cladophoraceae* 进行比较, 探究串珠藻科的濒危机制。结果表明: (1) 串珠藻科环境数据中的水体温度、pH、溶解氧、电导率、溶解性总固体、盐度、氨氮、总磷和化学需氧量的分布范围都小于双星藻科和刚毛藻科, 说明串珠藻科对环境的适应能力弱, 对生境要求严苛; (2) 水体温度、总磷、总氮和化学需氧量都是影响串珠藻科分布的重要环境因素, 与双星藻科和刚毛藻科相比, 该科重要环境因子多, 说明串珠藻科在生长过程中受到更多因素的影响和制约, 导致该科种群的濒危状态。研究结果可为串珠藻科植物的保护和恢复提供科学依据。

关键词: 串珠藻科; 环境因子; 濒危机制

Study on Endangered Mechanism of *Batrachospermaceae* (Rhodophyta) Based on Environmental factors

Zhang Guotao, Wei Caihua, Guo Weinan, Nan Fangru, Feng Jia, Xie Shulian

(School of Life Science, Shanxi Key Laboratory for Research and Development of Regional Plants, Shanxi University, Taiyuan 030006, P.R.China)

Abstract: *Batrachospermaceae* is a family of freshwater red algae characterized by filamentous fronds, many species of which are endangered due to the scarcity of their populations. This study applied a suite of analytical methods—including one-way ANOVA, principal component analysis, random forest modeling, and multiple linear regression—to examine the environmental preferences of *Batrachospermaceae* and compare them with those of two other common filamentous freshwater algal families, *Zygnemataceae* and *Cladophoraceae* (green algae), with the aim of elucidating the mechanisms underlying the endangerment of *Batrachospermaceae*. The results demonstrated that: (1) The distribution ranges of water temperature (WT), pH, dissolved oxygen (DO), specific conductivity (SPC), total dissolved solids (TDS), salinity (SAL), $\text{NH}_4^+\text{-N}$, total phosphorus (TP), and chemical oxygen demand (COD) in habitats where *Batrachospermaceae* occurred were narrower than those of *Zygnemataceae* and *Cladophoraceae*, indicating that *Batrachospermaceae* has lower environmental adaptability and stricter habitat requirements. (2) WT, TP, total nitrogen (TN), and COD were identified as important environmental factors influencing the distribution of *Batrachospermaceae*. Compared with *Zygnemataceae* and *Cladophoraceae*, *Batrachospermaceae* was influenced by a greater number of key environmental factors, suggesting that its growth is subject to more constraints, which contributes to its endangered status. These findings provide a scientific basis for the conservation and restoration of *Batrachospermaceae*.

Key words: *Batrachospermaceae*; environmental factors; endangered mechanism

串珠藻科 *Batrachospermaceae* 隶属于红藻门 *Rhodophyta*、真红藻纲 *Florideophyceae*、串珠藻目 *Batrachospermales*, 是淡水红藻中种类最多的一个分类群^[1]。串珠藻科植物的生活环境要求特殊, 一般生活在低温、弱光、高溶氧且洁净流动的泉水和溪流中, 多固着生长于岩壁或石块上, 也可生长在其他植物体或某些动物体上, 对维持溪流生态平衡具有重要作用^[2]。随着社会经济的发展, 工业化、城市化的规模不断扩大, 水污染日益严重, 淡水资源减少成为一个严峻问题^[3]。随之而来的是串珠藻科的生存环境不断减少, 加上植物本身多为脆弱物种, 适应性差, 该科的有些种类已经处于濒危状态^[4-5]。

关于串珠藻科生长与环境因子的关系有过一些研究报道。Drerup and Vis 研究了胶串珠藻 *Batrachospermum gelatinosum* 在俄亥俄州两条溪流中的物候特征, 发现水深、电导率、流速和日照时长与藻类盖度百分比成正相关, pH 也被确定为藻类覆盖百分比的强预测因子, 但在不同的溪流之间没有观察到显著差异^[6]。Simić and Đorđević 记录了 2006 年至 2015 年在塞尔维亚 10 个地点采集的串珠藻属 *Batrachospermum* Roth, 1797 几个种的分布和生态状况, 发现其生态参数范围是狭窄的, 栖息地的每一次变化都可能对这些物种种群的生存构成严重威胁^[7]。Bautista-Saraiva et al. 分析了紫外线辐射下可疑蕨野藻 *Kumanoa ambigua* 培养物中孢子体和配子体阶段的光合性能, 发现与孢子体相比, 配子体在培养条件下对紫外线辐射 (尤其是 UVA) 的敏感性较低^[8]。Nan et al. 对弧形希斯藻 *Sheathia arcuata* 进行了转录组分析, 发现在不同辐射照度下基因表达水平不同, 光合作用相关通路在弱光下明显上调^[9]。邱明

* 2025-06-23 收稿; 2025-07-22 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (32170204)、山西省水利厅项目 (2025GM38) 和山西省三晋英才项目资助。

** 通信作者; E-mail: xiesl@sxu.edu.cn.

宇等通过对中国分布的串珠藻属 *Batrachospermum* Roth, 1797、熊野藻属 *Kumanoa* Entwisle & al., 2009 和希斯藻属 *Sheathia* Salomaki & M.L.Vis, 2014 三个属的研究发现, 海拔高度、平均相对湿度、大气压强、风速等环境因子是影响其地理分布的重要环境因素^[10]。Yang et al.对串珠藻科的地理分布和环境因子进行了分析, 结果表明影响该科所辖属区分的环境因子主要包括海拔、平均相对湿度、平均气温、最低气温, 其中海拔的影响最大^[11]。郭伟楠等通过对希斯藻属的地理分布和环境因子进行研究, 发现海拔高度、水温、流速和 pH 是影响其地理分布的重要环境因子^[12]。Qiu et al.通过对亚洲分布的串珠藻属、熊野藻属和希斯藻属三个属的研究发现, 它们的地理分布与海拔高度、大气压强、风速等环境因子存在明显差异^[2]。

虽然有一些研究串珠藻科生长与环境因子关系的报道, 但是仍然很少很不全面, 也没有关于这个类群植物濒危机制的专门报道。本研究通过调查采样, 记录该科植物生存环境的环境数据, 进一步分析其与环境因子的关系, 并与同为大型丝状淡水藻的双星藻科和刚毛藻科的环境因子数据进行比较, 进而分析串珠藻科植物的濒危机制, 以期为今后制定其保护策略提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样地点信息

本研究采样地点信息见表 1。

1.2 环境数据获取及处理

对采样点的环境数据进行测量和记录, 水温 (WT)、pH 值、溶解氧 (DO)、电导率 (SPC)、溶解性总固体 (TDS)、盐度 (SAL) 使用 YSI ProPlus (YSI Ins, Yellow Springs, OH, USA) 现场测取。采用一定面积 (50cm×50cm) 的样地网格作为研究范围, 将其分为 25 个小格, 每个小格面积 10cm×10cm。百分比盖度是先对每小格中研究类群所覆盖面积的百分比做目测估计, 然后对全部小格的目测结果进行统计后, 取其平均值^[6-13]。

将水样带回实验室, 测取总氮 (TN)、氨氮 (NH₄⁺-N)、总磷 (TP) 和化学需氧量 (COD), TN 以碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测得^[14], NH₄⁺-N 以纳氏试剂分光光度法测得^[15], TP 以钼酸铵分光光度法测得^[16], COD 以重铬酸钾法测得^[17]。

1.3 研究方法

1.3.1 单因素方差分析 已分组的环境数据导入 GraphPad Prism 9.5 软件中, WT、pH、DO、SPC、TDS、SAL、TN、NH₄⁺-N、TP 和 COD 十个环境因子作为因变量, 串珠藻科、双星藻科和刚毛藻科作为自变量, 进行单因素方差分析和组间的多重检验比较, 根据 P 值结果标记组间的差异显著性。利用单因素方差分析可判断单一环境因子对不同样本的影响是否显著^[18]。

1.3.2 主成分分析 以串珠藻科、双星藻科和刚毛藻科为对象, 以环境数据为指标, 使用 Origin Pro 2022b 进行主成分分析 PCA^[19]。

1.3.3 随机森林模型 以串珠藻科、双星藻科和刚毛藻科为对象, 以环境数据为指标, 使用 R 语言进行随机森林模型分析。利用随机森林可以对影响三科分类结果环境因子重要性进行排序, 筛选出重要的环境因子^[20]。

1.3.4 多元线性回归 以百分比盖度为因变量, 环境数据为自变量, 导入 SPSS Statistics 27.0 中, 进行多元线性回归, 预测每个科百分比盖度与环境因子之间的线性关系, 比较各环境因子参数对百分比盖度的相对重要性^[21]。

2 结果

2.1 不同科植物环境因子分布范围的差异分析

根据串珠藻科、双星藻科和刚毛藻科的环境数据, 得到对应的结果 (图 1)。可以看出, 串珠藻科、双星藻科和刚毛藻科在环境因子方面存在很大差异, 主要体现在 WT、pH、DO、SPC、TDS、SAL、NH₄⁺-N、TP 和 COD。从 WT 分布范围来看, 串珠藻科比双星藻科和刚毛藻科都小, 串珠藻科的最大值也较其它两科低。从 pH 的分布范围来看, 串珠藻科比双星藻科和刚毛藻科都小, 串珠藻科的最大值甚至比双星藻科的最小值还小。从 DO 来看, 串珠藻科的分布范围比双星藻科和刚毛藻科都小, 串珠藻科的最大值比其他两科都低。从 SPC、TDS 和 SAL 来看, 串珠藻科的分布范围比双星藻科和刚毛藻科低, 串珠藻科的最小值大于双星藻科和刚毛藻科的最小值。从 NH₄⁺-N 来看, 串珠藻科的分布范围比双星藻科和刚毛藻科的小, 串珠藻科 NH₄⁺-N 的最大值小于双星藻科和刚毛藻科的最大值。从 TP 看, 串珠藻科的分布范围比双星藻科和刚毛藻科的小, 串珠藻科的最大值小于双星藻科和刚毛藻科的最大值。从 COD 来看, 串珠藻科的分布范围比双星藻科和刚毛藻科的小, 并且串珠藻科的最大值小于双星藻科和刚毛藻科的最小值。总体分析, 串珠藻科环境数据的分布范围小于双星藻科和刚毛藻科。

采用 GraphPad Prism 9.5 软件对各科的环境数据进行单因素方差分析, 可以看出三个科环境数据中, pH、TN 和 COD 具有显著性差异^[18]。进行多重比较发现, 串珠藻科的 pH 和 COD 显著低于双星藻科和刚毛藻科, TN 显著高于刚毛藻科。

2.2 不同环境因子的重要性分析

通过 R 语言对串珠藻科、双星藻科和刚毛藻科的环境因子进行主成分分析, 结果如图 2 所示。可以看出, 第一主成分和第二主成分贡献度之和达 66.2%, 能够很好的反映出三个科之间的降维情况。在主成分图中, 相似性越强、联系越密切的样本在图中的距离越接近, 相反联系越小相似性越小的样本会互相远离。从图中可以看出, 串珠藻科的聚类效果最好, 双星藻科和刚毛藻科的聚类效果较差, 说明串珠藻科与双星藻科和刚毛藻科在环境数据上具有明显差异。

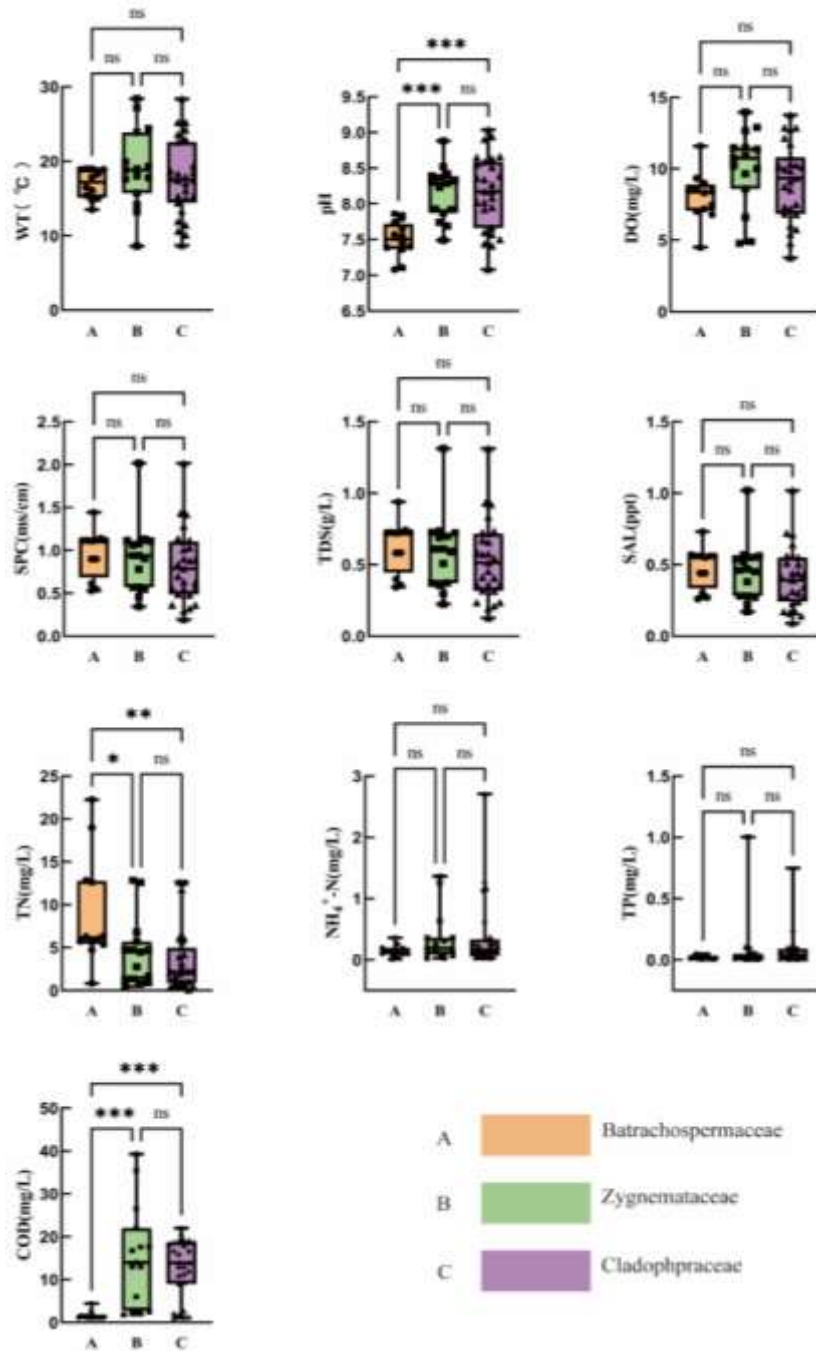
表 1 本研究的采样点信息

Tab. 1 Sampling collection information of this study					
科名	样本编号	采样时间	采样地点	经纬度	
串珠藻科 Batrachospermaceae	YQ1	2023 年 4 月	山西省阳泉市	37.96°N, 113.89°E	
	YQ2	2023 年 4 月	山西省阳泉市	37.96°N, 113.89°E	
	YQ3	2023 年 4 月	山西省阳泉市	37.96°N, 113.89°E	
	YQ4	2023 年 4 月	山西省阳泉市	37.96°N, 113.89°E	
	JN1	2023 年 6 月	山东省济南市	36.66°N, 117.01°E	
	JN2	2023 年 6 月	山东省济南市	36.66°N, 117.01°E	
	CZ1	2023 年 9 月	山西省长治市	36.37°N, 113.39°E	
	CZ1	2023 年 9 月	山西省长治市	36.37°N, 113.39°E	
	LF1	2023 年 10 月	山西省临汾市	36.28°N, 111.75°E	
	LF2	2023 年 10 月	山西省临汾市	36.28°N, 111.75°E	
	SZ	2023 年 10 月	山西省朔州市	39.38°N, 112.56°E	
	TY	2023 年 10 月	山西省太原市	37.71°N, 112.43°E	
	双星藻科 Zygnemataceae	YQ1	2023 年 4 月	山西省阳泉市	37.96°N, 113.89°E
		YQ2	2023 年 4 月	山西省阳泉市	37.96°N, 113.89°E
YQ3		2023 年 4 月	山西省阳泉市	37.96°N, 113.89°E	
BD		2023 年 4 月	河北省保定市	38.95°N, 115.98°E	
RQ		2023 年 4 月	河北省任丘市	38.89°N, 116.05°E	
JN1		2023 年 6 月	山东省济南市	36.66°N, 117.01°E	
JN2		2023 年 6 月	山东省济南市	36.66°N, 117.01°E	
LF		2023 年 7 月	山西省临汾市	36.28°N, 111.75°E	
TY1		2023 年 7 月	山西省太原市	36.66°N, 117.01°E	
TY2		2023 年 7 月	山西省太原市	36.66°N, 117.01°E	
LS		2023 年 7 月	西藏自治区拉萨市	30.61°N, 91.59°E	
TY3		2023 年 8 月	山西省太原市	36.66°N, 117.01°E	
SY		2023 年 10 月	辽宁省沈阳市	42.73°N, 123.32°E	
SZ		2023 年 10 月	山西省朔州市	39.38°N, 112.56°E	
刚毛藻科 Cladophraceae	TY4	2023 年 10 月	山西省太原市	37.71°N, 112.43°E	
	YQ	2023 年 4 月	山西省阳泉市	37.96°N, 113.89°E	
	BD	2023 年 4 月	河北省保定市	38.95°N, 115.98°E	
	JN1	2023 年 5 月	山东省济宁市	35.10°N, 116.72°E	
	JN2	2023 年 5 月	山东省济宁市	35.10°N, 116.72°E	
	TY1	2023 年 5 月	山西省太原市	37.73°N, 112.54°E	
	JN1	2023 年 6 月	山东省济南市	36.66°N, 117.01°E	
	JN2	2023 年 6 月	山东省济南市	36.66°N, 117.01°E	
	LF1	2023 年 7 月	山西省临汾市	36.28°N, 111.75°E	
	TY2	2023 年 7 月	山西省太原市	36.66°N, 117.01°E	
	TY3	2023 年 7 月	山西省太原市	36.66°N, 117.01°E	
	TY4	2023 年 8 月	山西省太原市	37.86°N, 112.56°E	
	TY5	2023 年 9 月	山西省太原市	37.89°N, 112.53°E	
	TY6	2023 年 9 月	山西省太原市	37.89°N, 112.53°E	
	TY7	2023 年 9 月	山西省太原市	37.89°N, 112.53°E	
	CZ1	2023 年 9 月	山西省长治市	36.37°N, 113.39°E	
	CZ2	2023 年 9 月	山西省长治市	36.37°N, 113.39°E	
	CZ3	2023 年 9 月	山西省长治市	36.37°N, 113.39°E	
	LF2	2023 年 10 月	山西省临汾市	36.29°N, 111.74°E	
HRB1	2023 年 10 月	黑龙江省哈尔滨市	45.95°N, 126.72°E		
CC	2023 年 10 月	吉林省长春市	43.79°N, 125.45°E		
SY	2023 年 10 月	辽宁省沈阳市	42.74°N, 123.32°E		
WH1	2023 年 11 月	湖北省武汉市	30.54°N, 114.39°E		
WH2	2023 年 11 月	湖北省武汉市	30.54°N, 114.39°E		
JJ	2023 年 12 月	江西省九江市	29.24°N, 116.21°E		
YY	2023 年 12 月	湖南省岳阳市	29.37°N, 113.08°E		
YX	2023 年 12 月	云南省玉溪市	24.61°N, 102.84°E		
KM	2023 年 12 月	云南省昆明市	24.96°N, 102.64°E		

为了探究三个科之间环境数据对分类结果的重要性排序, 采用 R 语言对各科的环境数据进行随机森林分析, 结果如图 3 所示。可以发现, COD 是影响各科之间分类结果最重要的环境因子, 其次是 DO、pH 和 TN, TP、WT、NH₄⁺-N、SPC、TDS 和 SAL 也影响其分类结果, 但没有起到主要作用。

2.3 多重环境因子对研究类群百分比盖度的影响分析

为了避免环境因子引起多重共线性而导致模型过度拟合, 对 10 个环境因子进行 Pearson 相关性分析, 结合随机森林重要性排序和相关系数绝对值进行筛选, 当两个环境因子相关系数绝对值 $|r|>0.8$ 时, 删除重要性排序靠后的环境因子^[22]。经过筛选, 最终保留了 6 个关键的环境因子。重新选取这 6 个数据和百分比盖度组成新的数据集, 进行分析。将三个科的新数据集导入 SPSS Statistics 27.0 软件, 以百分比盖度作为因变量, 6 个环境因子设为自变量, 进行多元线性回归, 得到影响百分比盖度的环境因子, 结果如表 2 所示。



* $P < 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$

图1 三个科样本环境数据的分布范围及单因素方差分析结果
Fig.1 Distribution range of environmental data of Batrachospermaceae, Zygnemataceae and Cladophraceae and One-way ANOVA results

可以看出，串珠藻科的模型公式为：百分比盖度 = $-0.657 - 0.045 \cdot WT + 0.174 \cdot pH + 0.023 \cdot SPC + 0.019 \cdot TN - 7.453 \cdot TP + 0.104 \cdot COD$ ，模型 R^2 值为 0.875，意味着 WT、pH、SPC、TN、TP 和 COD 可以解释百分比盖度 87.5% 的变化原因。D-W 值在数字 2 附近，说明模型不存在自相关性，样本数据之间并没有关联关系，模型较好。对模型进行 F 检验发现，模型通过 F 检验 ($F=5.807$, $p=0.036 < 0.05$)，说明 WT、pH、SPC、TN、TP 和 COD 中至少一项会对百分比盖度产生影响关系。其中 WT 的回归系数数值为 -0.045 ($t=-2.798$, $p=0.038 < 0.05$)，意味着 WT 会对百分比盖度产生显著的负向影响关系。TN 的回归系数数值为 0.019 ($t=3.823$, $p=0.012 < 0.05$)，意味着 TN 会对百分比盖度产生显著的正向影响关系。TP 的回归系数数值为 -7.453 ($t=-3.018$, $p=0.029 < 0.05$)，意味着 TP 会对百分比盖度产生显著的负向影响关系。COD 的回归系数数值为 0.104 ($t=3.448$, $p=0.018 < 0.05$)，意味着 COD 会对百分比盖度产生显著的正向影响关系。总结分析可知，TN 和 COD 会对百分比盖度产生显著的正向影响关系，WT 和 TP 会对百分比盖度产生显著的负向影响关系，但是 pH 和 SPC 并不会对百分比盖度产生显著影响。双

星藻科的模型公式为：百分比盖度 $=-0.660-0.004*WT + 0.198*pH + 0.121*SPC-0.006*TN + 0.141*TP-0.017*COD$ ，模型 R^2 值为 0.319，意味着 WT、pH、SPC、TN、TP 和 COD 可以解释百分比盖度 31.9% 的变化原因。D-W 值在数字 2 附近，说明模型不存在自相关性，样本数据之间并没有关联关系，模型较好。对模型进行 F 检验发现，模型没有通过 F 检验 ($F=0.625, p=0.708>0.05$)，说明 WT、pH、SPC、TN、TP 和 COD 并不会对百分比盖度产生显著影响。刚毛藻科的模型公式为：百分比盖度 $=2.973 + 0.028*WT-0.340*pH-0.305*SPC-0.001*TN-0.074*TP + 0.004*COD$ ，模型 R^2 值为 0.282，意味着 WT、pH、SPC、TN、TP 和 COD 可以解释百分比盖度 28.2% 的变化原因。D-W 值在数字 2 附近，说明模型不存在自相关性，样本数据之间并没有关联关系，模型较好。对模型进行 F 检验发现，模型没有通过 F 检验 ($F=1.312, p=0.297>0.05$)，说明 WT、pH、SPC、TN、TP 和 COD 不会对百分比盖度产生显著影响。

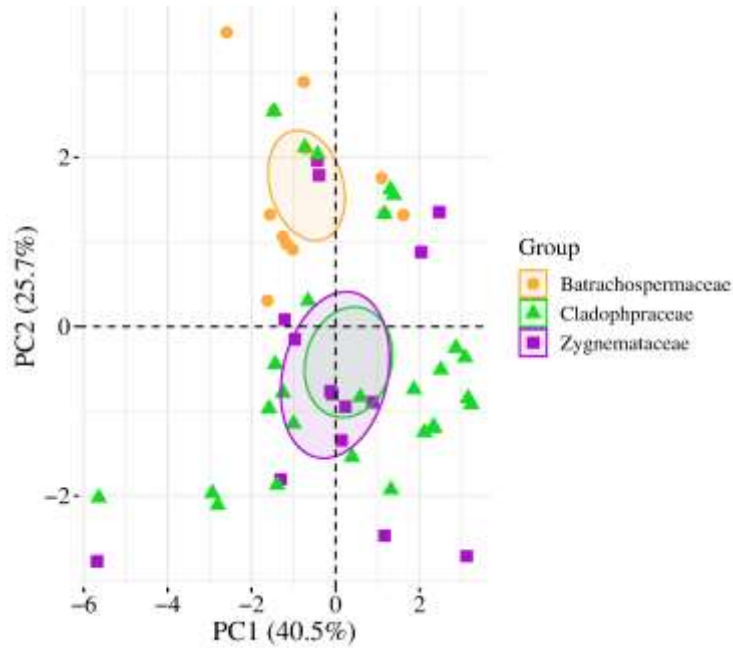


图 2 串珠藻科、双星藻科和刚毛藻科之间环境因子的主成分分析结果
Fig. 2 Results of Principal Component Analysis between families of Batrachospermaceae, Zygnemataceae and Cladophraceae

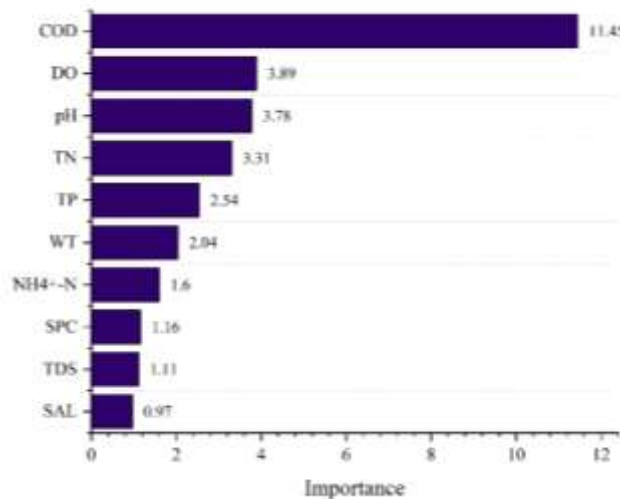


图 3 串珠藻科、双星藻科和刚毛藻科环境因子的随机森林重要性排序
Fig. 3 Importance ranking of environmental data for Random Forest Modeling of Batrachospermaceae, Zygnemataceae and Cladophraceae

3 讨论

对濒危植物的濒危机制研究是植物多样性和保护生物学研究的最核心内容之一。串珠藻科的许多种类已处于濒危状态^[4-5]。从研究结果看，串珠藻科环境数据的分布范围小于同为大型丝状淡水藻的双星

藻科和刚毛藻科, 说明该科植物的环境适应性弱。随着环境污染加剧, 适宜其居群分布的生境濒危, 适宜的生境局限, 加上其生长缓慢、繁殖困难等生物特性, 造成了串珠藻科许多种类已处于濒危状态。从研究结果看, 水温 (WT)、总磷 (TP)、总氮 (TN) 和化学需氧量 (COD) 都是影响串珠藻科分布的重要环境因素, 与双星藻科和刚毛藻科相比, 其重要环境因子多, 说明在其生长过程中受到更多因素的影响和制约。环境适应性弱加上音响和制约因素多, 是导致串珠藻科植物濒危的主要原因。

表 2 多重环境因子对串珠藻科、双星藻科和刚毛藻科百分比盖度的影响
Tab. 2 Results of Multiple Linear Regression of environmental factors of Batrachospermaceae, Zygnemataceae and Cladophraceae

科名		<i>B</i>	<i>t</i>	<i>P</i>	VIF
串珠藻科 Batrachospermaceae	常数	-0.657	-0.718	0.505	-
	WT	-0.045	-2.798	0.038*	2.649
	pH	0.174	1.536	0.185	2.068
	SPC	0.023	0.244	0.817	1.902
	TN	0.019	3.823	0.012*	2.545
	TP	-7.453	-3.018	0.029*	3.294
	COD	0.104	3.448	0.018*	2.132
	<i>R</i> ²			0.875	
	<i>F</i>			<i>F</i> (6,5)=5.807, <i>p</i> =0.036	
	D-W 值			2.595	
双星藻科 Zygnemataceae	常数	-0.660	-0.137	0.894	-
	WT	-0.004	-0.171	0.869	2.076
	pH	0.198	0.363	0.726	4.620
	SPC	0.121	0.377	0.716	1.920
	TN	-0.006	-0.135	0.896	3.826
	TP	0.141	0.255	0.805	2.198
	COD	-0.017	-1.127	0.292	3.463
	<i>R</i> ²			0.319	
	<i>F</i>			<i>F</i> (6,8)=0.625, <i>p</i> =0.708	
D-W 值			1.702		
刚毛藻科 Cladophraceae	常数	2.973	2.109	0.048	-
	WT	0.028	1.406	0.175	3.246
	pH	-0.340	-1.930	0.068	2.550
	SPC	-0.305	-1.214	0.239	3.436
	TN	-0.001	-0.039	0.969	3.720
	TP	-0.074	-0.145	0.886	1.660
	COD	0.004	0.240	0.813	3.887
	<i>R</i> ²			0.282	
	<i>F</i>			<i>F</i> (6,20)=1.312, <i>p</i> =0.297	
D-W 值			2.663		

因变量: 百分比盖度. * *P*<0.05 ** *P*<0.01

串珠藻科植物生长在较清洁淡水环境中, 如泉水或溪流^[23]。从研究结果看, 串珠藻科水温的分布范围是 13.5-19°C, 小于双星藻科和刚毛藻科的 8.6-28.4°C 和 8.7-28.4°C。在一定范围内, 随着水温的上升, 植物的光合作用和呼吸作用强度可能会增加, 从而促进其生长。然而, 当水温超过一定阈值时, 植物的生长可能会受到抑制。适宜的水温有助于提高植物生理过程的速率, 从而增加植物的生物量和活性。因而, 水温对串珠藻科的影响是多方面的, 包括生长速度、生理特性和分布与生存等方面^[24]。

磷是植物生长过程中不可或缺的营养元素之一, 对植物的生长、增殖等发挥重要作用。从研究结果看, 串珠藻科总磷的分布范围是 0.004-0.05mg/L, 小于双星藻科和刚毛藻科的 0.004-1.003mg/L 和 0.004-0.748mg/L。在磷含量适宜的水体中, 植物能够充分吸收利用磷元素, 促进其生长和繁殖, 当水体中的磷含量过低时, 可能会阻断细胞周期, 影响植物的正常生长和发育^[25]。通过监测水体中的总磷含量, 可以及时了解串珠藻科的生长状况和水体质量变化趋势, 为生态保护和环境治理提供科学依据。

氮是构成蛋白质、核酸以及许多细胞生命活动必需的酶和其它分子的基本元素^[26]。从研究结果看, 串珠藻科总氮的分布范围是 0.83-22.27 mg/L, 高于双星藻科和刚毛藻科的 0.475-12.87 mg/L 和 0.051-12.64 mg/L。但是, 这不一定能反应客观情况。分析其原因, 可能是串珠藻科植物在山东济南的采样点, 位于护城河边, 由于水利条件较差, 水体自然流动性慢, 加上护城河周边分散污水(包括路面降雨径流雨水)的汇入, 导致水体的总氮含量偏高。当溪流中的总氮含量适宜时, 可以加快植物的生长和生物量的增加。如果溪流中的总氮含量过高, 超过植物自然生长所需的水平, 则会引起水体富营养化, 可能导致原有的水生生态系统结构发生改变, 生物多样性降低。从实际情况看, 这个采集点的串珠藻种群确实生长状况较差。因此, 控制溪流中的总氮含量, 防止水体富营养化, 是维护水生生态系统健康和稳定的重要措施^[27]。

化学需氧量是衡量水体中有机物质污染程度的重要指标, 可以反映水体中还原性物质的含量, 主要是有机物的含量^[28]。从研究结果看, 串珠藻科植物化学需氧量的分布范围是 1.082-4.417 mg/L, 小于双星藻科和刚毛藻科的 1.799-39.3 mg/L 和 1.07-22 mg/L。化学需氧量值升高可能意味着水体中存在较多的有毒有害物质, 如重金属、有机溶剂等, 这些物质可能对植物的生理活动产生负面影响, 如抑制光合作用、影响呼吸作用等。串珠藻科植物适宜生长在低化学需氧量的环境中, 对生长环境要求严格。为了维护其正常生长和生态系统的稳定, 需要加强对水体化学需氧量值的监测和控制, 减少有机物的排放和污染。

据相关文献报道, 繁殖策略对于物种的分布同样具有重要的生物学意义^[29-31]。对于串珠藻科类群而言, 它们具有世代交替的生活史。在生活史中, 主要包括配子体、丝状体和果孢子体三个重要阶段, 其中参与有性生殖的配子体阶段占绝对优势^[29]。但是, 由于不动精子没有鞭毛, 需要依靠水流与果胞结合, 进而完成受精作用。因此, 这样的繁殖策略极大地限制了该类群的生长、繁殖和物种分布。对于双星藻科类群而言, 它们主要依赖丝状体的断裂和再生能力完成营养繁殖, 而其有性生殖过程较为复杂, 涉及到配子体的形成、结合以及合子的发育等多个阶段^[30]。对于刚毛藻科类群而言, 它们通常利用带鞭毛的游动孢子进行有丝分裂, 并通过侧枝的远端细胞进行无性繁殖^[31]。相对而言, 双星藻科和刚毛藻科类群繁殖的限制条件较少, 环境适应能力更强, 因此分布更为广泛。

综上所述, 在制定串珠藻科植物的保护策略时, 需要充分考虑环境因子的重要性, 选取适合其生长的生境, 建立有针对性的专项自然保护区或保护单元, 同时要严格限制人类活动对这些区域的干扰, 定期对栖息地环境因子进行监测和评估, 确保其生态环境的质量和稳定。

本研究主要从环境因子方面考虑串珠藻科的濒危机制, 未来研究可进一步探索其藻际环境, 分析其与藻际微生物之间的相互作用机制, 从藻菌共生方面研究分析其濒危机制。

4 结论

(1) Batrachospermaceae 环境数据中的 WT、pH、DO、SPC、TDS、SAL、NH₄⁺-N、TP 和 COD 的分布范围都小于双星藻科和刚毛藻科, 说明串珠藻科植物对环境的适应能力弱, 对生境要求严苛。

(2) WT、TP、TN 和 COD 都是影响串珠藻科植物分布的重要环境因素, 与双星藻科和刚毛藻科相比, 串珠藻科重要环境因子多, 说明串珠藻科植物在生长过程中受到更多因素的影响和制约, 这是导致串珠藻科植物濒危的主要原因。

5 参考文献

- [1] Fischer E, Gerlach J, Killmann D, et al. The freshwater red algae (Batrachospermales, Rhodophyta) of Africa and Madagascar I. New species of *Kumanoa*, *Sirodotia* and the new genus *Ahidranoa* (Batrachospermaceae). *Plant and Fungal Systematics*, 2020, **65**(1): 147-166.
- [2] Qiu MY, Wang F, Nan FR, et al. Geographical distribution of Batrachospermaceae genera in Asia and its environmental factors. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2023, **41**(3): 972-990.
- [3] Tao S. Pollution reduction by rationalization hypothesis and water pollution in China. *Humanities and Social Sciences Communications*, 2024, **11**(1): 1-11.
- [4] Chou JY, Wen YD, Wang WL. Morphological and molecular data confirm new records of three freshwater red algae, *Batrachospermum macrosporum*, *Nemalionopsis tortuosa* and *Caloglossa lepreurii* in Taiwan. *Nova Hedwigia*, 2014, **98**(1-2): 233-246.
- [5] Fu K, Ccaron, Iacute, et al. A new record of the rare freshwater red alga *Tuomeya americana* (Batrachospermaceae, Rhodophyta) from Connecticut. *Rhodora*, 2015, **117**(971): 342-353.
- [6] Drerup SA, Vis ML. Varied phenologies of *Batrachospermum gelatinosum* gametophytes (Batrachospermales, Rhodophyta) in two low-order streams[J]. *Fottea*, 2014, **14**(2): 121-127.
- [7] Simić SB, Đorđević NB. New data on distribution and ecology of *Batrachospermum* (Rhodophyta) in Serbia[J]. *Botanica Serbica*, 2017, **41**(1): 65-70.
- [8] Bautista-Saraiva AIN, Bonomi-Barufi J, Figueroa FL, et al. UV-radiation effects on photosynthesis and photoprotection in gametophytic and sporophytic stages of the freshwater red alga *Kumanoa ambigua* (Rhodophyta, Batrachospermales)[J]. *Phycological Research*, 2018, **66**(2): 108-116.
- [9] Nan FR, Feng J, Lv JP, et al. Transcriptome analysis of the typical freshwater rhodophytes *Sheathia arcuata* grown under different light intensities[J]. *PloS one*, 2018, **13**(5): e0197729.
- [10] Qiu M Y, Wang F, Nan FR, et al. Geographical distribution and relationship with environmental factors of batrachospermaceae in china[J]. *Journal of Hydrobiology*, 2021, **45**(2): 455-463.
- [11] Yang QQ, Nan FR, Liu XD, et al. Association between the Classification of the Genus of Batrachospermaceae (Rhodophyta) and the Environmental Factors Based on Machine Learning[J]. *Plants*, 2022, **11**(24): 3485-3485.
- [12] Guo WN, Wang F, Nan FR, et al. Geographical distribution and relationship with environmental factors of sheathia in the world[J]. *Acta hydrobiologica sinica*, 2023, **47**(11): 1778-1786.
- [13] Maestre FT, Quero JL, Gotelli NJ, et al. Plant Species Richness and Ecosystem Multifunctionality in Global Drylands[J]. *Science*, 2012, **335**(6065): 214-218.
- [14] 国家环境保护部. HJ 636—2012. 水质-总氮的测定-碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.

- [15] 国家环境保护部. HJ 535-2009. 水质- 氨氮的测定- 纳氏试剂分光光度法. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [16] 国家技术监督局. GB/T 11893-89. 水质- 总磷的测定- 钼酸铵分光光度法. 北京: 中国标准出版社, 1990.
- [17] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 22597-2014. 再生水中化学需氧量的测定 - 重铬酸钾法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [18] Ostertagová E, Ostertag O. Methodology and application of one-way ANOVA[J]. American Journal of Mechanical Engineering, 2013, 1(7): 256-261.
- [19] Abdi H, Williams LJ. Principal component analysis[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2010, 2(4): 433-459.
- [20] Svetnik V, Liaw A, Tong C, et al. Random forest: a classification and regression tool for compound classification and QSAR modeling[J]. Journal of Chemical Information and Computer Sciences, 2003, 43(6): 1947-1958.
- [21] Uyanık GK, Güler N. A study on multiple linear regression analysis[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2013, 106: 234-240.
- [22] Yang XQ, Kushwaha SPS, Saran S, et al. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills[J]. Ecological Engineering, 2013, 51: 83-87.
- [23] Xie SL, Shi ZX. Three new species of *Batrachospermum Roth* (Batrachospermaceae, Rhodophyta) in China[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2005, 23(2): 204-209.
- [24] Jimenez JC, Fatjo GV. Survey and distribution of Batrachospermaceae (Rhodophyta) in tropical, high-altitude streams from central Mexico[J]. Cryptogam. Algol, 2007, 28(3): 271-282.
- [25] Correll DL. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: a review[J]. Journal of Environmental Quality, 1998, 27(2): 261-266.
- [26] Chen JH, Zhang H, Gao M, et al. Differences in carbon, nitrogen and phosphorus release of decomposed branch litter due to potential sea level rise[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2023, 295: 108563.
- [27] Carmona J, Bojorge-García M, Beltrán Y, et al. Phenology of *Sirodotia suecica* (Batrachospermaceae, Rhodophyta) in a high-altitude stream in central Mexico[J]. Phycological Research, 2009, 57(2): 118-126.
- [28] Shao S, Yang Z, Xu L, et al. Environmental protection experience of secretaries and effectiveness of environmental governance: Evidence from COD discharge in China[J]. Journal of Economic Behavior and Organization, 2024, 220: 237-253.
- [29] 施之新, 谢树莲, 华栋. 中国淡水藻志, 第 13 卷, 红藻门和褐藻门. 北京: 科学出版社, 2006: 1-77.
- [30] Takano T, Ikegaya H, Nozaki H, et al. Induction of sexual reproduction reveals the presence of heterothallic *Spirogyra* strains (Zygnematophyceae, Streptophyta). Phycological Research, 2020, 68(4): 263-268.
- [31] 滕林宏. 中国刚毛藻目海藻的形态及系统发育学研究——兼 DNA 条形码技术在刚毛藻目的应用初探[学位论文]. 中国科学院大学, 2011.