

张露, 李滔, 章叶飞, 涂昆, 张朝晖, 胡余楠, 周赛霞, 杨军. 2025. 九岭山国家级自然保护区底栖硅藻群落结构特征及水质评价. 生态学杂志, 44(2): 530–537.

Zhang L, Li T, Zhang YF, Tu K, Zhang CH, Hu YN, Zhou SX, Yang J. 2025. The benthic diatom community structure and water quality assessment in Jiulingshan National Nature Reserve. *Chinese Journal of Ecology*, 44(2): 530–537.

九岭山国家级自然保护区底栖硅藻群落结构特征及水质评价

张露¹ 李滔¹ 章叶飞¹ 涂昆² 张朝晖² 胡余楠³ 周赛霞^{3*} 杨军^{1,4*}

(¹长江大学农学院, 湖北荆州 434025; ²江西九岭山国家级自然保护区管理局, 江西宜春 330699; ³江西省、中国科学院庐山植物园, 江西九江 332900; ⁴长江大学湿地生态与农业利用教育部工程研究中心, 湖北荆州 434025)

摘要 为探讨九岭山国家级自然保护区夏季底栖硅藻群落特征及水质变化情况, 2022年7—8月, 于宝峰站(BF)、大杞山站(DQ)、璆都站(ZD)和青山站(QS)选取56个代表性样点, 调查九岭山国家级自然保护区溪流水体理化指标和底栖硅藻群落组成, 并运用多样性指数和硅藻属指数评价水质状况。结果显示, 九岭山国家级自然保护区4个保护站共鉴定出底栖硅藻25属77种, 优势属13属, 其中BF、DQ、ZD和QS分别包括优势属9、6、4和6属, 主要优势属为舟形藻属(*Navicula*)、异极藻属(*Gomphonema*)和卵形藻属(*Cocconeis*)。BF、DQ、ZD和QS底栖硅藻丰度分别为 $0.03 \times 10^5 \sim 20.27 \times 10^5$ 、 $0.05 \times 10^5 \sim 7.96 \times 10^5$ 、 $0 \sim 14.65 \times 10^5$ 和 $0 \sim 12.85 \times 10^5$ ind · cm⁻², 生物量分别为 $0.02 \sim 8.11$ 、 $0.01 \sim 3.44$ 、 $0 \sim 5.86$ 和 $0 \sim 5.14$ mg · cm⁻², 以BF底栖硅藻丰度和生物量最高, DQ最低。底栖硅藻多样性结果显示, 各保护站Margalef、Pielou和Shannon指数结果均表现为QS高于BF、DQ和ZD。基于多样性指数和硅藻属指数的水质评价结果表明, 各保护站水质整体表现为清洁—污染型, 均以QS水质最好, BF最差。多元线性回归分析结果表明, 总磷、总氮、铵态氮和海拔对九岭山国家级自然保护区底栖硅藻群落结构的影响较大。本研究可为九岭山国家级自然保护区水域生态环境保护和健康维持提供参考依据。

关键词 九岭山; 底栖硅藻; 多样性指数; 硅藻属指数; 水质

The benthic diatom community structure and water quality assessment in Jiulingshan National Nature Reserve. ZHANG Lu¹, LI Tao¹, ZHANG Yefei¹, TU Kun², ZHANG Chaohui², HU Yunan³, ZHOU Saixia^{3*}, YANG Jun^{1,4*} (¹College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434025, Hubei, China; ²Jiangxi Jiulingshan National Nature Reserve Administration, Yichun 330699, Jiangxi, China; ³Lushan Botanical Garden, Jiangxi Province and Chinese Academy of Sciences, Jiujiang 332900, Jiangxi, China; ⁴Engineering Research Center of Ecology and Agricultural Use of Wetland, Ministry of Education, Yangtze University, Jingzhou 434025, Hubei, China).

Abstract: To investigate the characteristics of benthic diatom communities and changes in water quality in Jiulingshan National Nature Reserve during summer, a survey was conducted at 56 sampling sites in the stream waters of the Baofeng Station (BF), Daqishan Station (DQ), Zaodu Station (ZD), and Qingshan Station (QS) in July and August 2022. Physicochemical parameters of the water and the composition of benthic diatom communities were assessed. Diversity and diatom indices were used to assess water quality. A total of 77 species from 25 genera of benthic diatoms were identified at the four stations. A total of 13 genera were identified as dominant ones, with 9, 6, 4, and 6 dominant genera being observed at the BF, DQ, ZD, and QS stations, respectively. The main dominant genera included *Navicula*, *Gomphonema*, and *Cocconeis*. The total abundance of benthic diatoms in BF, DQ, ZD, and QS stations ranged from 0.03×10^5 to 20.27×10^5 , 0.05×10^5 to 7.96×10^5 , 0 to 14.65×10^5 , and 0 to 12.85×10^5 ind · cm⁻², respectively. The biomass of benthic diatoms in these stations ranged from 0.02 to 8.11 , 0.01 to 3.44 , 0 to 5.86 , and 0 to 5.14 mg · cm⁻², respectively. The total abundance and biomass of benthic diatoms were lower in DQ than in other stations, and the highest at the BF station. The Margalef, Pielou, and Shannon indices were higher at the QS station. Based on the results of diversity index and generic index of diatom (GI), water quality in

江西九岭山国家级自然保护区综合科学考察项目(2021)资助。

收稿日期: 2023-12-14 接受日期: 2024-09-02

* 通信作者 E-mail: junyang2@yangtzeu.edu.cn; zhouxs@lsbg.cn

Jiulingshan National Nature Reserve was generally classified as clean-moderately polluted. The water quality at QS was the best and that at BF was the worst. Multiple linear regression analysis showed that total phosphorus, total nitrogen, ammonium nitrogen, and altitude had strong impacts on benthic diatom communities. Our results provide valuable information for the conservation and maintenance of aquatic ecological environment in Jiulingshan National Nature Reserve.

Keywords: Jiulingshan; benthic diatoms; diversity index; generic index of diatom; water quality

近年来,水域生态系统保护、维持和修复问题已成为全社会共同关注话题,水质评价作为水生态系统的重要方法之一,一方面对水域现存问题进行诊断和评价,另一方面对水域生态系统修复的进程进行监测,为水域健康维持提供参考依据(谢纯林等, 2022)。底栖硅藻作为水生态系统重要的初级生产者,具有物种多样性高、分布广泛和生长周期短等特征,同时其耐受性差异较大,能提供相对固定的生境信息(赵杨等, 2020; 张昆等, 2021),其群落结构被广泛应用于水生态系统监测和评价(秦波等, 2016; Benito *et al.*, 2018)。Schneider 等(2012)研究表明,硅藻与蓝、绿藻相比能更快地反映水环境变化情况,更适用于水环境健康评价。当前,基于底栖硅藻评价的方法有很多,包括多样性指标法、硅藻属指数法(generic index of diatom, GI)等,其中硅藻属指数因计算方便,能很好地反映水体污染状况,逐渐在我国水环境评价中发挥重要作用(胡建成等, 2020; 赵杨等, 2020)。

江西省九岭山国家级自然保护区地处长江中下游,位于鄱阳湖平原与洞庭湖平原之间,总面积 11541 hm^2 ,保护区内生境复杂多变,其间栖息着数十种国家级保护动植物,区内海拔落差大,森林覆盖率达 97.82%(杨远发等, 2022),是许多动植物种类的栖身之地,其环境质量对区域生态系统的保护、健康维持至关重要。目前,关于九岭山保护区水体底栖硅藻的研究较少。本研究通过对九岭山国家级自然保护区不同保护站底栖硅藻群落和相关理化指标进行调查,综合分析底栖硅藻群落结构特征、多样性和环境因子间的关系,并对水质状况进行评价,识别影响九岭山国家级自然保护区水域状况的主要环境胁迫因子,从而为保护区水域健康的适应性管理和保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

九岭山国家级自然保护区位于江西省西北部的靖安县内(28°49′06″—29°03′19″N, 115°03′25″—115°24′23″E, 图1),地处长江中下游以南,鄱阳湖与

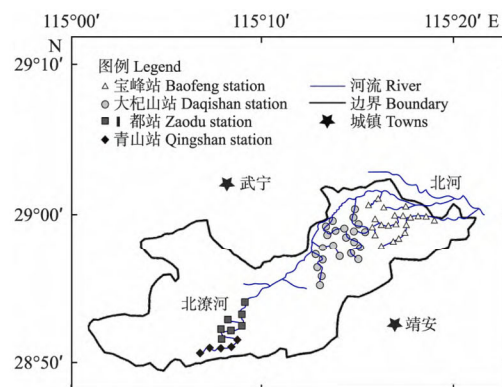


图1 九岭山国家级自然保护区采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Jiulingshan National Nature Reserve

洞庭湖平原之间的九岭山脉与幕阜山脉腹地,是境内南北潦河支流的发源地之一,属亚热带季风气候。研究期间(2022年7—8月),月平均气温 29.5 $^{\circ}\text{C}$,月平均降雨量 118.65 mm,相对湿度 60%~70%,天气以晴转多云为主。

1.2 样品采集与分析

于2022年7—8月对九岭山保护区内的4个保护站:宝峰站(BF)、大杞山站(DQ)、璪都站(ZD)和青山站(QS)所属水域进行调查,分别设置21、23、7和5个采样点,每个样点采集0.5 L水样用于水化学指标的测定。现场用GPS定位系统获取和记录采样点经度、纬度和海拔(ALT)。水样带回实验室后,立即进行理化指标测定,测定方法参照《水和废水监测分析方法》(魏复盛, 2002),其中总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,总磷(TP)采用钼酸铵分光光度法测定,可溶性活性磷(SRP)采用钼锑抗法测定,硝态氮(NO_3^--N)采用分光光度法,铵态氮(NH_4^+-N)采用靛酚蓝比色法。

底栖硅藻样品采集参考刘静等(2014),采样地点选择地势开阔无遮挡水域,每个采样点随机挑选一定面积的鹅卵石至少10块,无鹅卵石的地方选择坚硬的底质,并用干净的刷子对石头或坚硬底质等向阳面进行刷洗,将采集样品装入100 mL透明瓶中,且现场用4%的甲醛固定。底栖硅藻样品带回实验室后用浓硝酸和浓硫酸(比例1:1)进行酸化

处理,并制成硅藻封片,在 Olympus 生物显微镜下进行鉴定与计数,每个封片观察到底栖硅藻细胞数不得少于 400 个,鉴定方法参照 Krammer(2002)、胡鸿钧等(2006)和施之新(2013)。

1.3 数据分析

1.3.1 底栖硅藻丰度和生物量 底栖硅藻丰度计算公式参照孙世鹏等(2021)进行:

$$N = \sum \frac{N_i V_2}{V_1 S}$$

式中, N 为一定体积底栖硅藻样品中底栖硅藻丰度 ($\text{ind} \cdot \text{cm}^{-2}$), N_i 为第 i 种底栖硅藻的物种数, V_1 为 1 mL 硅藻样品, V_2 为底栖硅藻样品的总体积, S 为刮去石头面积 (cm^2)。

硅藻生物量计算公式参照 Battarbee 等(2001)进行:

$$D_{\text{abs}} = (N \times V) \times (V_1 \times W)$$

式中, D_{abs} 为底栖硅藻生物量 ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$), N 表示样品中所有硅藻物种丰度之和, V 为硅藻提取液体积, V_1 表示永久制片所使用硅藻溶液体积, W 为称取样品干质量。

1.3.2 底栖硅藻优势属采用 McNaughton 优势度指数判定底栖硅藻优势属的组成(薛浩等,2020),选取优势度指数 $Y \geq 0.02$ 的底栖硅藻为优势属(Lampitt *et al.*,1993):

$$Y = (n_i / N) \times f_i$$

式中, n_i 为第 i 种底栖硅藻的细胞总数, N 为所有底栖硅藻的总细胞数, f_i 为第 i 种底栖硅藻在所有样点中的出现频率。

1.3.3 多样性指数根据底栖硅藻丰度数据采用 Margalef 指数 (D)、Pielou 指数 (J)、Shannon 指数 (H) 计算底栖硅藻的多样性,计算公式如下:

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$D = (S-1) / \ln S$$

$$J = H / \log_2 S$$

式中, S 表示物种数, N 表示所有物种的总个体数, P_i 表示物种 i 的个体数占总个体数的比例。采用 Margalef 指数、Pielou 指数和 Shannon 指数评价九岭山国家级自然保护区水体状况,评价标准参照高远等(2009)进行。

1.3.4 硅藻属指数采用硅藻属指数 (GI) 对九岭山国家级自然保护区水体状况进行评价。GI 的计算公式为(Wu *et al.*,2002):

$$GI = \frac{a_{\text{Ach}} + a_{\text{Coc}} + a_{\text{Cyc}}}{a_{\text{Cym}} + a_{\text{Mel}} + a_{\text{Nit}}}$$

式中, a_{Ach} 表示曲壳藻属 (*Achnanthes*) 的相对丰度, a_{Coc} 表示卵形藻属 (*Cocconeis*) 的相对丰度, a_{Cyc} 表示小环藻属 (*Cyclotella*) 的相对丰度, a_{Cym} 表示桥弯藻属 (*Cymbella*) 的相对丰度, a_{Mel} 表示直链藻属 (*Melosira*) 的相对丰度, a_{Nit} 表示菱形藻属 (*Nitzschia*) 的相对丰度。

硅藻属指数评价标准: <1.5 为重度污染, 1.5~5 为中度污染, 5~11 为轻度污染, 11~30 为微污染, >30 为极轻微污染。

1.3.5 多元统计分析 相似性分析 (ANOSIM) 是一种非参数检验,常用作检测组间差异是否大于组内差异,从而判断分组是否有意义,减低极值对数据分析的影响,降低数值间的差异(赵梓屹等,2023)。本研究利用群落相似性分析探讨九岭山国家级自然保护区不同保护站之间底栖硅藻群落的差异性,通过底栖硅藻样本检验物种丰富度差异。多元线性回归模型通常用于解释多个自变量对结果变量的影响关系(高惠璇,2005),本研究通过对数据进行多元线性回归分析并筛选影响底栖硅藻的主要环境因子,剔除无显著影响的环境因子。运用 Bray-Curtis 相似度和二维非度量多维尺度 (NMDS) 分析底栖硅藻群落演变过程。使用 Excel 2019、SPSS 19.0、Primer 5 和 Origin 2021 等软件进行数据统计和绘图。

2 结果与分析

2.1 环境因子变化特征

九岭山国家级自然保护区各保护站水体环境因子变化存在差异(表1)。保护区内水体总氮 (TN)、总磷 (TP)、可溶性活性磷 (SRP)、硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 和海拔 (ALT) 分别为 1.07~6.65 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、10.00~170.00 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、7.99~33.98 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、0.23~1.29 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、0.47~0.54 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 124.53~1045.92 m。各保护站表现为 BF 和 DQ 的营养盐含量较高, QS 和 ZD 较低; QS 的 ALT 最高, BF 最低。各保护站间除 TN 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 差异不显著 ($P>0.05$) 外,其他环境因子均差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 底栖硅藻种类组成

调查期间,九岭山国家级自然保护区共鉴定出底栖硅藻 25 属 77 种,其中 BF、DQ、ZD 和 QS 分别鉴定出硅藻 22 属 62 种、21 属 63 种、11 属 34 种、11 属 35 种。各保护站以舟形藻属 (*Navicula*) 种类数

表 1 九岭山国家级自然保护区各保护站环境因子变化特征
Table 1 Variation characteristics of environmental factors in protection stations of Jiulingshan National Nature Reserve

保护站 Station	总氮 TN ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总磷 TP ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	可溶性活性磷 SRP ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	硝态氮 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	铵态氮 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	海拔 ALT (m)
BF	2.58 ± 0.18	96.70 ± 10.80	28.50 ± 5.50	0.58 ± 0.05	0.49 ± 0.00	353.51 ± 37.05
DQ	2.14 ± 0.13	24.80 ± 2.20	15.00 ± 1.80	0.65 ± 0.03	0.48 ± 0.00	504.97 ± 45.31
ZD	2.47 ± 0.19	21.10 ± 3.10	5.00 ± 1.00	0.42 ± 0.06	0.47 ± 0.00	539.22 ± 53.53
QS	2.56 ± 0.25	15.60 ± 1.20	10.40 ± 6.50	0.32 ± 0.03	0.48 ± 0.00	850.49 ± 71.46

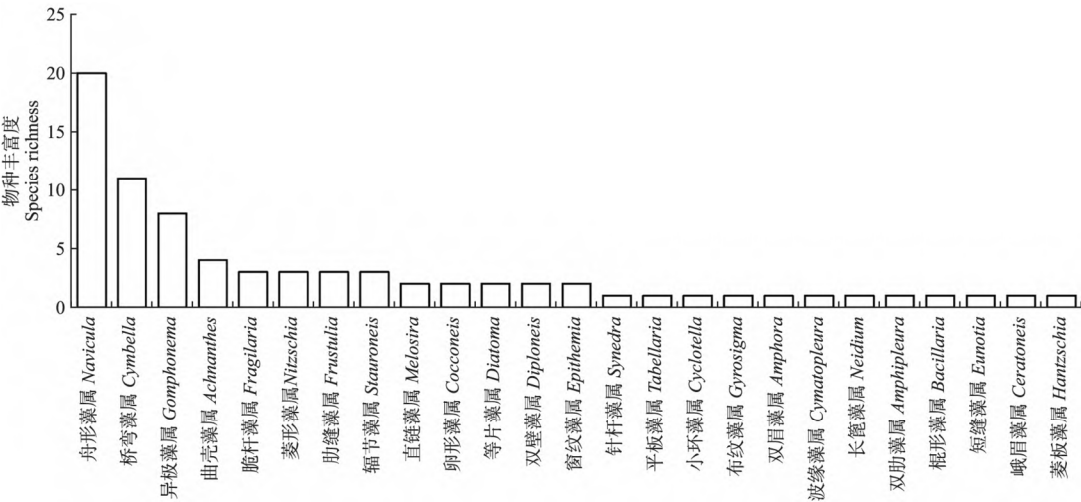


图 2 九岭山国家级自然保护区底栖硅藻各属种类数
Fig.2 Genus number of benthic diatoms in Jiulingshan National Nature Reserve

最多, 达 20 种, 其次是桥弯藻属和异极藻属 (*Gomphonema*), 分别为 11 种和 8 种, 其余藻属均未超过 5 种(图 2)。

如图 3 所示, BF 以其他藻属占比最高, 为 29.03%; 其次为舟形藻属, 为 25.81%。DQ 以舟形藻和其他藻占比最高, 均为 28.57%。ZD 和 QS 均以

舟形藻属占比最高, 分别为 32.35%和 40%。桥弯藻属、异极藻属、曲壳藻属和卵形藻属均在 ZD 占比最高, 分别为 14.71%、20.59%、5.88%和 5.88%; 脆杆藻属(*Fragilaria*) 在 QS 占比最高, 为 5.72%。

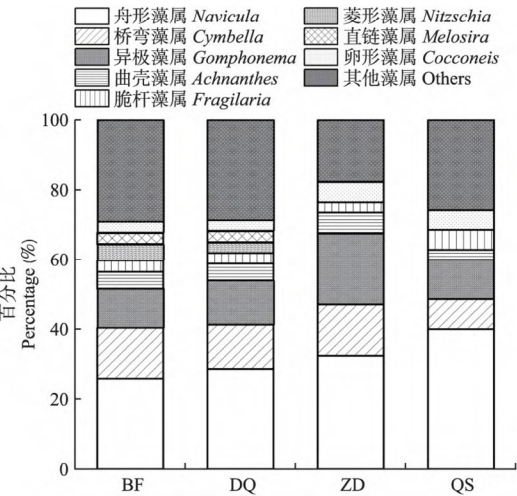
2.3 底栖硅藻优势属

九岭山国家级自然保护区各保护站底栖硅藻优势属和优势度见表2, 选取McNaughton优势度指数

表 2 九岭山国家级自然保护区各保护站底栖硅藻优势属 ($Y \geq 0.02$)
Table 2 Dominant genera of benthic diatoms in protection stations of Jiulingshan National Nature Reserve ($Y \geq 0.02$)

优势属 Dominant genus	优势度 Dominance			
	BF	DQ	ZD	QS
舟形藻属 <i>Navicula</i>	0.07	0.07	0.04	0.13
桥弯藻属 <i>Cymbella</i>	0.04			
异极藻属 <i>Gomphonema</i>	0.53	0.41	0.67	0.30
曲壳藻属 <i>Achnanthes</i>		0.03	0.04	0.04
脆杆藻属 <i>Fragilaria</i>				0.04
卵形藻属 <i>Cocconeis</i>	0.09	0.35	0.19	0.39
等片藻属 <i>Diatoma</i>	0.03	0.04		
针杆藻属 <i>Synedra</i>				0.04
平板藻属 <i>Tabellaria</i>		0.02		
双壁藻属 <i>Diploneis</i>	0.03			
小环藻属 <i>Cyclotella</i>	0.03			
长篳藻属 <i>Neidium</i>	0.08			
双肋藻属 <i>Amphipleura</i>	0.02			

图 3 九岭山国家级自然保护区各保护站底栖硅藻组成
Fig.3 Composition of benthic diatoms in protection stations of Jiulingshan National Nature Reserve



$Y \geq 0.02$ 为优势属。调查结果显示,各保护站共鉴定出优势属 13 属,其中 BF、DQ、ZD 和 QS 分别包括优势属 9、6、4、6 属,舟形藻属、异极藻属和卵形藻属为九岭山水域主要优势属。

2.4 底栖硅藻丰度和生物量

九岭山国家级自然保护区各保护站底栖硅藻丰度组成存在差异(图 4)。BF、DQ、ZD 和 QS 底栖硅藻丰度分别为 $0.03 \times 10^5 \sim 20.27 \times 10^5$ 、 $0.05 \times 10^5 \sim 7.96 \times 10^5$ 、 $0 \sim 14.65 \times 10^5$ 和 $0 \sim 12.85 \times 10^5$ ind $\cdot$ cm $^{-2}$,各保护站总丰度表现为 BF>ZD>QS>DQ,其中 BF、DQ、ZD 和 QS 均以舟形藻属占比最高(图 4a),分别为 46.69%、45.49%、38.8% 和 62.88%。桥弯藻属在 BF 占比最高,为 16.03%。异极藻属和曲壳藻属均在 ZD 占比最高,分别为 29.01% 和 6.70%。卵形藻属在 DQ 占比最高,为 24.10%。

调查期间,BF、DQ、ZD 和 QS 底栖硅藻生物量分别为 0.02~8.11、0.01~3.44、0~5.86 和 0~5.14 mg $\cdot$ cm $^{-2}$ (图 4b)。各保护站底栖硅藻总生物量表现为 BF>ZD>QS>DQ,BF、ZD 和 QS 均以舟形藻属占比最高,分别为 33.33%、33.49% 和 52.26%,而 DQ 以卵形藻属占比最高,为 36.43%。桥弯藻属和其他藻属均在 BF 占比最高,分别为 31.37% 和 16.73%。

异极藻属在 ZD 占比最高,为 17.08%。

2.5 底栖硅藻多样性

如图 5 所示,调查期间,九岭山国家级自然保护区各保护站底栖硅藻多样性指数总体表现为 QS 大于 BF、DQ 和 ZD,且各保护站间差异均不显著($P > 0.05$)。Margalef 指数、Pielou 指数和 Shannon 指数空间分布均呈现出先下降后上升的趋势,其中 Margalef 指数在 QS 最高(2.16 ± 0.09),ZD 最低(1.09 ± 0.06);Pielou 指数在 QS 最高(0.83 ± 0.02),DQ 最低(0.80 ± 0.01);Shannon 指数在 QS 最高(2.44 ± 0.04),DQ 最低(2.22 ± 0.09)。

2.6 底栖硅藻群落变化特征

采用二维非度量多维尺度(NMDS)分析对九岭山国家级自然保护区各保护站底栖硅藻群落变化特征进行分析(图 6),胁强系数(Stress)为 0.20,表明二维 NMDS 分析具有较好的拟合效果。Bray-Curtis 相似性和 ANOSIM 结果显示,不同保护站间底栖硅藻群落组成存在差异(Global $R=0.11$, $P=0.02$),其中 BF 与其他站点底栖硅藻群落组成差异显著。

2.7 营养状态评价

根据多样性指数和硅藻属指数对九岭山国家级自然保护区水质进行评价,结果显示,各保护站水体

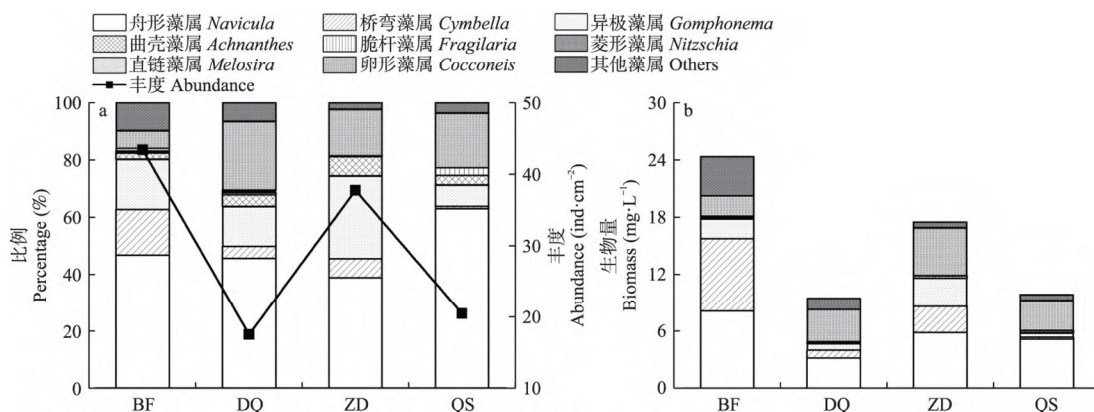


图 4 九岭山国家级自然保护区各保护站底栖硅藻丰度和生物量

Fig.4 Abundance and biomass of benthic diatoms in protection stations of Jiulingshan National Nature Reserve

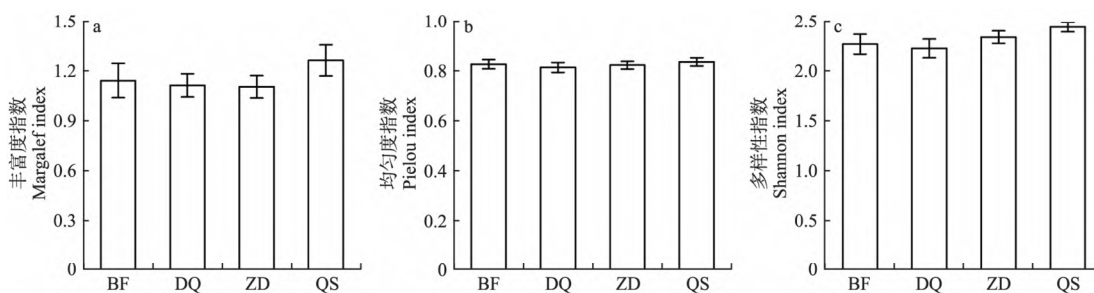


图 5 九岭山国家级自然保护区各保护站底栖硅藻多样性指数

Fig.5 The diversity indices of benthic diatoms in protection stations of Jiulingshan National Nature Reserve

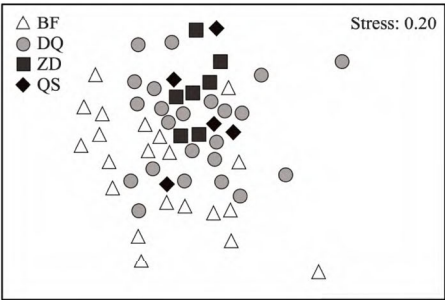


图 6 九岭山国家级自然保护区各保护站底栖硅藻群落的 NMDS 分析
Fig.6 NMDS analysis of benthic diatoms communities in protection stations of Jiulingshan National Nature Reserve

营养状况存在差异(表 3)。根据多样性指数水质评价方法,各保护站 Margalef 指数对应的水质类型为 α -中污型; Pielou 指数对应水质类型为清洁型; Shannon 指数对应水质类型为 β -中污型。硅藻属指数结果表明, BF、ZD、DQ 和 QS 对应水质类型分别为重度污染、中度污染、轻度污染和微污染。综上, 九岭山国家级自然保护区中 BF 和 ZD 水质较差为中污染型, DQ 和 QS 为清洁-中污染型。

2.8 底栖硅藻与环境因子间关系

BF 底栖硅藻优势属主要受 TN、SRP 和 NH_4^+-N 的影响, 其中曲壳藻属与 TN 呈显著正相关; 直链藻属与 SRP 呈显著正相关, 卵形藻属与 NH_4^+-N 呈显著负相关(表 4)。DQ 底栖硅藻优势属主要受 TP、ALT 和 NH_4^+-N 的影响, 其中桥弯藻属与 NH_4^+-N 呈显著负相关; 曲壳藻属与 TP 和 ALT 呈显著负相关; 直链藻属与 ALT 呈显著负相关。ZD 底栖硅藻优势属主要受 TN 和 NO_3^--N 的影响, 其中桥弯藻属和曲壳藻属均与 TN 呈显著负相关, 脆杆藻属与 TN 呈显著正相关, 卵形藻属与 TN 和 NO_3^--N 呈显著负相关。QS 底栖硅藻优势属主要受 NH_4^+-N 的影响, 其

表 3 九岭山国家级自然保护区各保护站水质评价结果
Table 3 Water quality evaluation results in protection stations of Jiulingshan National Nature Reserve

保护站 Station	硅藻属指数 Generic index of diatom	丰富度指数 Margalef index	均匀度指数 Pielou index	多样性指数 Shannon index	综合水质类型 Comprehensive water quality type
BF	0.53	1.14	0.82	2.27	中污染型
	重度污染	α -中污染	清洁型	β -中污型	
DQ	5.64	1.11	0.80	2.22	清洁-中污型
	轻度污染	α -中污染	清洁型	β -中污型	
ZD	3.51	1.10	0.81	2.34	中污染型
	中度污染	α -中污染	清洁型	β -中污型	
QS	23.58	1.26	0.83	2.44	清洁-中污型
	微污染	α -中污染	清洁型	β -中污型	

表 4 九岭山国家级自然保护区各保护站底栖硅藻丰度多元线性回归模型
Table 4 Linear regression model explaining the phytoplankton abundance at various protection stations in Jiulingshan National Nature Reserve

保护站 Station	硅藻属 Diatom genus	线性模型 Linear model	R^2	F
BF	曲壳藻属 <i>Achnanthes</i>	$-7.45^{**} + 18.74^{**} \lg \text{TN}$	0.39	12.30
	直链藻属 <i>Melosira</i>	$1.10 + 188.59^{*} \lg \text{SRP}$	0.20	4.80
	卵形藻属 <i>Cocconeis</i>	$42.27^{**} - 220.96^{**} \lg \text{NH}_4^{+}-\text{N}$	0.31	8.43
	桥弯藻属 <i>Cymbella</i>	$98.31^{**} - 555.57^{**} \lg \text{NH}_4^{+}-\text{N}$	0.28	8.23
DQ	曲壳藻属 <i>Achnanthes</i>	$19.68^{**} - 5.94^{**} \lg \text{ALT} - 49.91^{*} \lg \text{TP}$	0.36	5.55
	直链藻属 <i>Melosira</i>	$9.18^{*} - 3.20^{*} \lg \text{ALT}$	0.25	6.84
	桥弯藻属 <i>Cymbella</i>	$33.47^{**} - 55.40^{**} \lg \text{TN}$	0.81	20.78
	曲壳藻属 <i>Achnanthes</i>	$9.64^{**} - 7.98^{*} \lg \text{TN}$	0.87	34.40
ZD	脆杆藻属 <i>Fragilaria</i>	$-22.70^{**} + 43.56^{**} \lg \text{TN}$	0.87	34.40
	卵形藻属 <i>Cocconeis</i>	$9.15^{***} - 5.57^{**} \lg \text{NO}_3^{-}-\text{N}$	0.95	38.81
	曲壳藻属 <i>Achnanthes</i>	$108.05^{*} - 611.476^{*} \lg \text{NH}_4^{+}-\text{N}$	0.84	15.78
	桥弯藻属 <i>Cymbella</i>	$33.47^{**} - 55.40^{**} \lg \text{TN}$	0.81	20.78

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.

中曲壳藻属与 NH_4^+-N 呈显著负相关。

3 讨论

3.1 九岭山国家级自然保护区底栖硅藻群落变化特征

底栖硅藻是水域生态系统的重要组成部分, 对维持水生态环境的稳定至关重要(孙世鹏等, 2021)。本研究共鉴定出底栖硅藻 25 属 77 种, 并主要以舟形藻属、异极藻属和卵形藻属为主, 其原因可能与降雨有关, 此次采样时间为丰水期, 水体浊度和营养盐浓度等较高, 更有利于舟形藻属、异极藻属和卵形藻属等抗逆性强和耐污的硅藻生长, 而不利于菱形藻属等敏感藻类的生长(孙世鹏等, 2021; 陈慈等, 2022; 谢纯林等, 2022)。相对于宝峰站底栖硅藻的群落组成, 青山站、璆都站和大杞山站的硅藻群落和优势属组成差异不大且优势度不高, 表明青山站、璆都站和大杞山站底栖硅藻分布较为均匀, 水环境系统较为稳定。此外, 九岭山国家级自然保护区不同底栖硅藻丰度和生物量在不同站点中表现为宝峰站 > 璆都站 > 青山站 > 大杞山站, 其原因可能是因为宝峰站样点多位于保护区边缘, 受人类干扰(如水库养殖和农业面源污染等)影响较大, 导致宝峰站水体氮磷等营养盐浓度增加, 从而有利于底栖硅藻

生长(李巧玉等,2017;许秀梅等,2017),而其他保护站样点多位于保护区内,植被覆盖率高且人为干扰因素少,水体氮磷等营养盐浓度较低,不利于耐污底栖硅藻属种的生长(杨鸿雁等,2014;李博韬等,2020)。

底栖硅藻作为水域生态环境中的初级生产者之一,常用其物种多样性指数反映生物群落稳定性和复杂度(孙世鹏等,2021)。本研究中,青山站多样性指数高于宝峰站、大柘山站和璩都站,其原因可能是因为青山站位于山区,植被覆盖以森林为主,多处于水域源头,无支流汇入,水体流速较快,水质较好,底栖硅藻多样性较高(陈慈等,2022),而大柘山站、璩都站和宝峰站接近保护区边界,人类活动频繁,干扰较大,水体流速较为平稳,水质较差(易燃等,2016)。

3.2 九岭山国家级自然保护区底栖硅藻与环境因子的关系

底栖硅藻的生长和繁殖受多种环境因子协同作用,不同环境条件下,底栖硅藻群落结构表现出一定规律性变化(孙世鹏等,2021)。其中,小型河流中营养盐浓度和比例对底栖硅藻生长和繁殖具有调控作用,营养盐浓度过低会限制底栖硅藻生长,反之过高则会产生毒害作用(邱礼城等,2016)。本研究中,可溶性活性磷、总氮和铵态氮是限制九岭山保护区不同保护站底栖硅藻群落结构的重要环境因子,且底栖硅藻群落组成和优势属在不同保护站具有显著差异,这与许秀梅等(2017)和谢纯林等(2022)研究结果相似。其原因可能是因为本次对九岭山水域采样时间处于丰水期,降雨带来的水体扰动有利于舟形藻属等底栖硅藻对营养盐的吸收,导致这一时期的舟形藻属优势度较高(孙世鹏等,2021)。此外,降雨后流域的陆源输入增加,各水域营养盐浓度升高,从而导致可溶性活性磷、总氮和铵态氮等成为影响九岭山不同保护站和水域底栖硅藻群落结构的重要环境因子(谢纯林等,2022)。同时,随着营养盐浓度的增加,底栖硅藻由清洁型向耐污型转化,为舟形藻属、直链藻属和卵形藻属等耐污底栖硅藻属种提供了适宜的生长环境,导致其总丰度和生物量在宝峰站较高(韦丽雨等,2015;王珊珊等,2020)。此外,本研究中曲壳藻属在宝峰站与总氮呈显著正相关,而璩都站呈显著负相关,说明同一藻属在不同生境条件下的影响因素存在差异,其响应机制亦不同(Wu,2016)。

海拔可通过影响一个地区温度、光照和降雨等

间接对水域生态环境产生影响(彭朵等,2023),从而构成底栖硅藻群落差异的重要环境因子(张浩然等,2018)。本研究中保护区底栖硅藻均与海拔呈显著性相关,这与陈慈等(2022)研究结果一致,这可能是因为宝峰站、青山站、璩都站采样点多位于低海拔区,地势和水流较为平坦,导致营养盐聚集程度增加,有利于硅藻的生长和繁殖(黄向阳等,2023),而大柘山站采样点主要位于高海拔区内,周围以森林为主,各样点温度、降水、水质和栖息地环境较低海拔存在差异,可直接和间接地对底栖硅藻群落结构产生影响(易燃等,2015)。

3.3 九岭山国家级自然保护区水质特征

不同种类底栖硅藻对水环境适应能力各不相同,其群落组成会因水体理化指标的改变而不断演替变化,因此,底栖硅藻群落组成、优势种和多样性指数等常被用于衡量水体的营养状况(吕亚红等,2002)。本研究分别采用了多样性指数和硅藻属指数两种方法对九岭山国家级自然保护区的水质进行评价,两种指数作为水质健康评价的常用方法,可高效、快速和准确地反映水域环境状况(刘麟菲等,2016)。Margalef、Pielou 和 Shannon 指数结果显示,九岭山国家级自然保护区中4个保护站的底栖硅藻群落物种多样性指数均较高,对应的水质类型均为清洁-中污染型。硅藻属指数结果显示,宝峰站为重度污染,璩都站为中度污染,大柘山站和青山站为轻微污染,导致4个保护站水质存在差异的原因可能是因为宝峰站大部分采样点处于保护区边缘和溪流下游,受人为活动(如农牧业活动和废水排放)等干扰因素的影响较大,进一步加剧了水体的富营养化(左婷等,2012;赵杨等,2020)。

近年来,人类活动对淡水生态系统的影响日趋严重,底栖硅藻作为水环境评价指示生物之一,被广泛应用于水域生态系统研究(赵杨等,2020)。本文调查了九岭山国家级自然保护区底栖硅藻群落结构特征,研究结果可为九岭山水域底栖硅藻群落数据库建立奠定基础,也为九岭山国家级自然保护区生态环境保护和健康维持提供参考。

4 结 论

本研究选取了九岭山国家级自然保护区4个站点内的溪流水域为研究区域,对不同保护站底栖硅藻群落结构和水质进行分析。研究期间共鉴定底栖硅藻25属77种,其中优势属13属,主要优势属为舟形藻属、异极藻属和卵形藻属,不同保护站底栖硅

藻丰度和生物量表现为宝峰站>噪都站>青山站>大杞山站。多样性指数和硅藻属指数结果表明, 九岭山国家级自然保护区内各保护站水质类型为清洁-中污染型, 以青山站和大杞山站水质较好, 宝峰站和噪都站水质较差。总磷、总氮、铵态氮和海拔为影响九岭山国家级自然保护区各保护站和不同水域底栖硅藻群落组成的重要环境因子。

参考文献

- 陈 慈, 谭 琳, 卓全龙. 2022. 流溪河底栖硅藻群落组成及其对水环境的季节响应研究. 广东水利水电, (12): 7-13.
- 高惠璇. 2005. 应用多元统计分析. 北京: 北京大学出版社.
- 高 远, 慈海鑫, 仵树财, 等. 2009. 沂河4条支流浮游植物多样性季节动态与水质评价. 环境科学研究, 22(2): 176-180.
- 胡鸿钧, 魏印心. 2006. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态. 北京: 科学出版社.
- 胡建成, 郭姝含, 唐 涛, 等. 2020. 基于着生硅藻多参数指标评价赤水河生态状况. 中国环境监测, 36(3): 94-104.
- 黄向阳, 艾孙阳, 何 鑫, 等. 2023. 河流型水库浮游植物群落结构及与环境因子关系研究. 水生态学杂志, 44(6): 96-103.
- 李巧玉, 刘 瑞, 向 蓉, 等. 2017. 三峡库区支流底栖硅藻功能群特征及其驱动因子分析: 以汝溪河为例. 湖泊科学, 29(6): 1464-1472.
- 李博韬, 刘 凌, 朱 燕, 等. 2020. 利用浮游植物生物完整性对河流健康进行评价. 人民黄河, 42(6): 73-78.
- 刘 静, 林秋奇, 邓培雁, 等. 2014. 东江水系底栖硅藻群落与生物监测. 北京: 中国环境出版社.
- 刘麟菲, 徐宗学, 殷旭旺, 等. 2016. 应用硅藻指数评价渭河流域水生态健康状况. 北京师范大学学报(自然科学版), 52(3): 317-321.
- 吕亚红, 顾泳洁. 2002. 苏州河沉积物中的硅藻及其污染指示作用. 上海环境科学, 21(10): 633-636.
- 彭 朵, 蒋小明, 孙 兴, 等. 2023. 青海湖入湖河流浮游植物群落时空格局及其影响因子. 环境科学学报, 44(1): 491-502.
- 秦 波, 郑 敏, 陈 旭, 等. 2016. 武汉市树生苔藓硅藻组成及其生态分布. 生态学杂志, 35(11): 2983-2990.
- 邱礼城, 韦桂峰, 李湘姣, 等. 2016. 广东鉴江水系底栖硅藻多样性与时空分布特征. 热带亚热带植物学报, 24(2): 197-207.
- 施之新. 2013. 中国淡水藻志第16卷硅藻门桥弯藻科. 北京: 科学出版社.
- 孙世鹏, 孔 超, 陆欣鑫, 等. 2021. 暴雨期前后库里泡底栖硅藻群落结构变化及其环境因子相关性. 海洋与湖沼, 52(1): 162-174.
- 王珊珊, 刘东艳, 王玉珏, 等. 2020. 渤海3个河口区底栖硅藻群落的时空变化特征. 海洋学报, 42(8): 101-114.
- 魏复盛. 2002. 水和废水监测分析方法. 北京: 中国环境科学出版社.
- 韦丽丽, 周 琼, 谢从新, 等. 2015. 新疆伊犁河周丛藻类群落结构及其水质生物学评价. 水生态学杂志, 36(6): 29-38.
- 谢纯林, 王 涛, 胡俊杰, 等. 2022. 赤水河流域秋季底栖硅藻群落结构特征及水质评价. 水生态学杂志, 43(6): 43-50.
- 许秀梅, 陈佳喜, 柴方营, 等. 2017. 多布库尔自然保护区水体浮游植物分布及水质综合评价. 湿地科学, 15(3): 457-463.
- 薛 浩, 郑丙辉, 孟凡生, 等. 2020. 甘河着生藻类群落结构及其与环境因子的关系. 生态环境学报, 29(2): 118-126.
- 杨鸿雁, 罗绪强. 2014. 雷公山自然保护区水体浮游植物群落结构及水质评价. 贵州农业科学, 42(5): 219-222.
- 杨远发, 涂 磊, 邹 杨, 等. 2022. 九岭山国家级自然保护区蜘蛛多样性与区系分布特征. 南昌大学学报(理科版), 46(5): 563-569.
- 易 燃, 蔡德所, 张永祥, 等. 2015. 龙江底栖硅藻群落特征及与环境因子的关系. 环境科学与技术, 38(4): 40-46.
- 易 燃, 蔡德所, 张永祥, 等. 2016. 广西龙江底栖硅藻水质生物监测方法. 环境工程学报, 10(6): 3345-3353.
- 张浩然, 蔡德所, 林金城, 等. 2018. 龙江与刁江底栖硅藻群落结构及影响因子. 广西师范大学学报(自然科学版), 36(1): 132-141.
- 张 昆, 蔡德所, 林金城, 等. 2021. 硅藻指数在龙江与刁江流域生态健康评价中的应用. 中国农村水利水电, (4): 98-106.
- 赵 杨, 陆欣鑫, 马 煜, 等. 2020. 阿什河流域底栖硅藻群落特征及水环境健康评价. 海洋与湖沼, 51(2): 307-317.
- 赵梓屹, 刘 凌, 刘瑞艳, 等. 2023. 基于NMDS的长江江苏段浮游植物群落结构特征及其环境因子关系. 科学与技术工程, 23(22): 9711-9718.
- 左 婷, 姬永杰, 陈福艳, 等. 2012. 不同类型养殖大水域主要理化因子动态变化分析. 南方农业学报, 43(12): 2092-2098.
- Battarbee RW, Jones VJ, Flower RJ, et al. 2001. Diatoms// Smol JP, Birks HJB, Last WM, eds. Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Benito X, Fritz SC, Steinitz-Kannan M, et al. 2018. Geo-climatic factors drive diatom community distribution in tropical South American freshwaters. *Journal of Ecology*, 106: 1660-1672.
- Krammer K. 2002. Diatoms of Europe. Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats. Ruggell: A.R.G. Gantner Verlag K.G.
- Lampitt RS, Wishner KF, Turley CM, et al. 1993. Marine snow studies in the Northeast Atlantic Ocean: Distribution, composition and role as a food source for migrating plankton. *Marine Biology*, 116: 689-702.
- Schneider SC, Lawniczak AE, Picińska-Faltynowicz J, et al. 2012. Do macrophytes, diatoms and non-diatom benthic algae give redundant information? Results from a case study in Poland. *Limnologia*, 42: 204-211.
- Wu JT, Kow LT. 2002. Applicability of a generic index for diatom assemblages to monitor pollution in the tropical River Tsanwun, Taiwan. *Journal of Applied Phycology*, 14: 63-69.
- Wu YH. 2016. Periphyton: Functions and Application in Environmental Remediation. Netherlands: Elsevier Publisher.

作者简介 张 露,女,1999年生,硕士研究生,主要从事水环境与水生态研究. E-mail: 1743538621@qq.com

责任编辑 牟 琳