

饶瀚云,董发勤,刘明学,等.黄龙风景区藻席嗜冷硅藻群落结构变化及其驱动因子分析[J].中国岩溶,2023,42(3):482-494.

DOI: 10.11932/karst20230301

黄龙风景区藻席嗜冷硅藻群落结构变化及其驱动因子分析

饶瀚云^{1,2},董发勤^{2,3},刘明学¹,安德军⁴,代群威^{3,5},
李琼芳¹,张强⁶,刘轶凡¹,刘泽灵¹,张钰婷¹

(1.西南科技大学生命科学与工程学院,四川绵阳621010; 2.西南科技大学固体废物处理与资源化教育部重点实验室,四川绵阳621010; 3.西南科技大学环境与资源学院,四川绵阳621010; 4.黄龙国家级风景名胜区管理局,四川松潘624000; 5.西南科技大学核废物与环境安全国防重点学科实验室,四川绵阳621010; 6.中国地质科学院岩溶地质研究所,广西桂林541004)

摘要:硅藻群落对环境变化十分敏感,是自然河流水质变化的指示生物。为了解黄龙风景区藻席及藻席嗜冷硅藻群落结构与环境变量的关系,对景区内8个典型景点进行水样和藻席的采集并分析。结果表明,黄龙风景区藻席是以钙华作为基底,丝状藻作为骨架,栖息着大量硅藻的高寒岩溶微生态系统,共鉴定出25属72种硅藻,其中优势种13种,以桥弯藻属(*Cymbella*)为主。通过冗余分析发现,水温($F=2.8, P=0.02$)和溶解硅($F=2.3, P=0.04$)是影响黄龙风景区藻席嗜冷硅藻群落结构特征的主要驱动因子, TN是潜在驱动因子。硅藻可以为高寒岩溶区地表水监测提供重要的补充信息,建立完整的硅藻物种数据库,有利于区域水质监测。

关键词:黄龙风景区;藻席;硅藻;群落结构;驱动因子;环境变量

中图分类号: Q948 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2023)03-0482-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

黄龙风景区内钙华沉积区的水流覆盖处滋生着大量藻类,在钙华表面形成一层藻席,对钙华有增色作用,同时藻席也参与钙华沉积,其分泌的胞外产物也会溶蚀钙华景观^[1-2]。硅藻大量存在于黄龙风景区藻席中,是一种对环境变化特别敏感的单细胞植物,普遍生存在海洋、湖泊和潮湿泥土中,营养、pH、光照和温度等环境变量都会影响其群落结构,因此具

有广泛存在性和环境敏感性的硅藻群落已被作为指示生物,大量应用于水生生态系统健康监测与评估^[3-4]。黄龙风景区有着长达半年的冰冻期,期间冰雪覆盖且温度极冷,年平均温度仅为1.1℃,即使在温度最高的夏季,水温也仅约8℃冰点附近^[5-6]。在这种寒冷环境下仍能正常繁殖生长的硅藻属于嗜冷型微生物^[7]。有研究表明^[8],在寒冷条件下的硅藻更易受到环境影响,因此嗜冷硅藻更适合作为高寒环境下水质检测的指示生物。

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFE0203200);国家自然科学基金项目(U21A2016,41877288,41831285,51974261);自然资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室开放基金项目(YRSW2021634)

第一作者简介:饶瀚云(1997-),男,硕士研究生,主要从事环境微生物学研究。E-mail: hanyun_rao@163.com。

通信作者:董发勤(1963-),男,教授,博士研究生导师,主要研究方向为环境矿物学、固体废弃物处理及资源化利用。E-mail: fqdong@swust.edu.cn。

收稿日期:2022-10-12

藻席作为一种在水中或岩石表面形成的位置相对固定的微生物垫, 相比于浮游硅藻, 藻席硅藻能更准确地反映一定范围内水质变化情况和生态环境质量^[9]。目前已有大量研究讨论硅藻群落结构与环境变量的关系, 但得出的结论不尽相同, 这明显与硅藻生长的原生环境有关。Gushulak 等^[10]认为水体深度(光照)是美国东鸥湖湖泊硅藻分布的重要驱动因子, Bojorge 等^[11]发现显著影响热带山区溪流底栖硅藻群落物种丰富度和多样性的环境变量是水温, Zhang 等^[12]认为水温和硅酸盐是影响长江中下游大型水库中硅藻生长的主要驱动因子, Bae 等^[13]认为盐度是高盐环境中影响硅藻群落结构的关键因素。作为世界自然遗产的黄龙风景区, 地处于高寒岩溶区, 以其宏大艳丽的钙华景观闻名于世, 水、钙华和生物共同构建了美轮美奂的黄龙绝景。目前, 针对这种高寒岩溶区的相关研究仍然较少。

因此, 本研究旨在分析黄龙风景区藻席嗜冷硅藻群落结构与驱动因子, 以为黄龙风景区硅藻物种库的建立与高寒岩溶区内河流水环境监测和管理提供依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况与采样点设置

黄龙风景区位于四川省阿坝藏族羌族自治州松潘县, 全长 3 500 m, 宽 250 m, 海拔 3 145~3 588 m, 年均降水量 929.5 mm, 属高原温带亚寒带季风气候。雪山融水、大气降水和地下岩溶水是黄龙风景区中的水体来源, 水体顺流而下, 沿途遍布钙华景观, 后汇入涪江。水体中饱含钙华沉积所需各种离子, 同时也为参与钙华沉积的各种生物提供了适合的生境^[14], 但凡有水流经过之处, 钙华景观表面会形成厚达 2 mm 的藻席^[2]。根据黄龙沟地理位置、钙华分布和水体情况等因素, 本研究沿海拔向下和钙华分布处, 选择了具有大量藻席的 8 个典型环境(图 1): #1 转花泉、#2 五彩池、#3 争艳彩池、#4 盆景池、#5 激湍湖、#6 金沙铺地、#7 飞瀑流辉、#8 迎宾池作为采样点。采集水样和藻席样。

1.2 现场测试

样品采集前一周黄龙景区内无大规模雨雪天气, 景区内水流量正常, 为保证准确性, 在一天内完成测

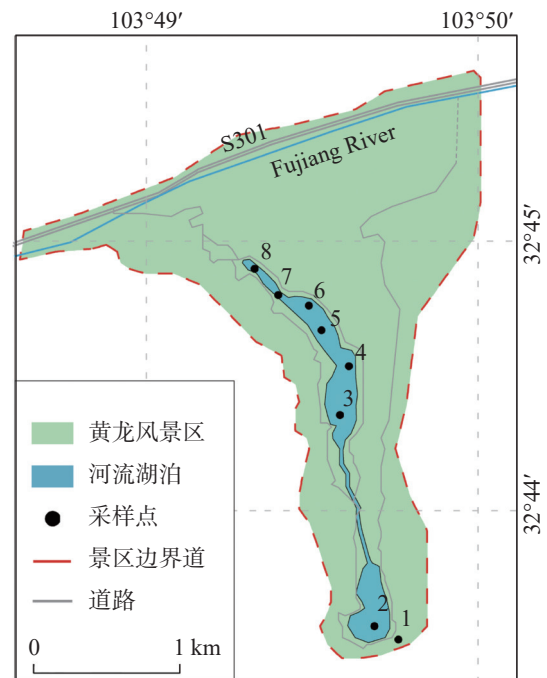


图 1 黄龙风景区位置及采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling points in Huanglong Scenic and Historic Interest Area

试和样品采集。2021 年 10 月 12 日, 在景区选定的 8 个采样点中藻席覆盖处, 采用便携式水质测试仪 (DDB - 303A 电导率仪、GTPH30 pH 计) 现场测定水温(T)、pH、电导率(Ec), 并使用手持 GPS 记录采样点的经纬度和海拔数据。使用酸碱滴定法现场测定水体中的 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 含量。

1.3 样品采集

现场测试完成后, 采集水样和藻席样。采样点的水深约为 0.1~1.2 m。使用采样桶采集水样, 该采样桶用采样点的水冲洗 3 次后, 重复采集 3 次水样, 将水样混合后转移储存入无菌采样瓶中。在水样采集点处划定 5 cm×10 cm 的面积, 使用地质铲采集藻席, 重复采样 3 次进行混合, 装入无菌采样袋中, 加入 5% 甲醛固定保存。与 #1 - #8 点对应, 水样被标记为 HLSY1 - HLSY8, 藻席样被标记为 HLZX1 - HLZX8。对于测定阴阳离子含量的水样, 使用 0.45 μm 滤膜过滤后, 测试阳离子的水样还要滴加浓硝酸使其 pH < 2; 对于测定 TN、TP 的水样, 滴加浓硫酸使其 pH < 2 进行保存。水样和藻席样处理好后, 低温保存, 48 h 内带回实验室待测。

1.4 水化学

使用电感耦合等离子体光谱仪(iCAP6500)测定

溶解硅(DSi)^[15]和阳离子(Mg²⁺, Al³⁺, K⁺)含量,使用离子色谱仪(ICS-900)测定阴离子(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻)含量,并采用原子吸收光谱仪(PinAAcle900T)测定Ca²⁺含量。采用中国国家环境保护标准(HJ636-2012)进行TN测试;采用国标法(GB 11893-89)进行TP测试。使用杨诗笛等^[16]的方法计算pCO₂。

1.5 藻席结构及组分分析

取藻席样在60℃烘箱中干燥24h,使用扫描电子显微镜(SEM, Ultra55)对样品进行结构分析;研磨已烘干藻席后,过200目筛,使用元素分析仪(Vario EL CUBE)测定C、H、N、S元素含量;使用X射线衍射仪(XRD, XPertpro)进行常规衍射图谱扫描,并结合Jade 6.0比对标准样品PDF卡对藻席矿物成份进行分析;使用傅里叶变换红外光谱仪(FTIR, Spectrum One)测定官能团或化学键。

1.6 硅藻计数与鉴定

称取1g烘干藻席放入烧杯,按照张纪晖等^[17]的方法处理样品并计算了硅藻丰度,每片计数100个视野,在徕卡光学显微镜(DM 500)下进行鉴定,放大倍率为1000×油镜,随机逐行统计硅藻属种与数量,对于不完整的硅藻,若是超过一半则视为整体。硅藻分类框架参照Round等^[18]的标准,鉴定参考中国淡水藻类鉴定相关图书^[19-22],以及北美硅藻数据库^[23]。

1.7 数据分析

计算Shannon-Weiner多样性指数(H)、Simpson多样性指数(D)、Pielou均匀度指数(J)和Mcnaughton优势度指数(Y),计算公式如下^[24-25]:

$$H = -\sum_{i=1}^s P_i \log_2 P_i \quad (1)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2 \quad (2)$$

$$J = \frac{H}{\log_2 S} \quad (3)$$

$$Y = P_i \cdot f_i \quad (4)$$

式中:S为采集样品中的物种总种;P_i为第i种在样品中的数量比率;f_i为该种在各样品中出现的频率,Y>0.02的种类为优势种。

利用描述性统计分析所有环境变量,通过主成分分析(PCA)判断影响黄龙风景区水体的主要驱动因子,并用Spearman相关性分析,剔除相关性较大的两个环境变量中的一个。对藻席硅藻物种丰度

进行除趋势对应分析(DCA),可以得出物种的单峰影响值梯度SD,若SD>4,则进行典范对应分析(CCA),若SD<3,则进行冗余分析(RDA),若3<SD<4,则CCA和RDA均可。RDA分析中,物种缩写规则为属名和种名前四个英文字母的组合,如极小曲丝藻(*Achnanthe minutissimum*),缩写为AchnMinu。以上分析,使用IBM SPSS Statistics 25.0进行变异系数计算,使用GraphPad Prism 9.0进行Spearman相关性分析,使用Canoco 5.0进行PCA、DCA和RDA。

2 结果与分析

2.1 采样点水质分析

表1为采样点的地理信息和水环境的物理化学参数,不同采样点的T、pH、DSi、Mg²⁺、Cl⁻和SO₄²⁻差异较小,变异系数均小于20%,除转花泉的pH为弱酸性,其余采样点均为弱碱性。相比之下,pCO₂、CO₃²⁻、HCO₃⁻、TN和TP在各采样点之间的差异较大(>50%),其中pCO₂的变异系数最高,达到249.54%。Ec、Ca²⁺、Al³⁺、K⁺和NO₃⁻也有差异,变异系数在20%~50%之间,转花泉和五彩池的Ca²⁺和HCO₃⁻浓度远高于其他采样点。

总体而言,黄龙风景区位于高海拔地区,常年水温较低,水体中的Ca²⁺和HCO₃⁻浓度较高,大部分水质属HCO₃-Ca型,少数属HCO₃-Ca-Mg型。

2.2 黄龙风景区藻席结构组成

根据目视,采集的藻席呈黑色、黄色和白色。SEM结果表明(图2a, b),黄龙风景区的藻席主要由钙华颗粒与丝状藻、硅藻构成,元素分析结果表明(图2c),黑色藻席中C(17.68%)、H(3.61%)和N(0.99%)含量最高;黄色藻席中硫元素含量(0.23%)最高;而白色藻席中C(12.66%)、H(0.66%)、N(0.08%)和S(0.15%)含量最低。FT-IR分析(图2d),各样品均在3417cm⁻¹处出现了水分子或酚类分子内缔合的O-H伸缩振动;在2925cm⁻¹处出现了有机酸类或脂肪酸类C-H键的伸缩振动;各样品在1425cm⁻¹处、黄色藻席和白色藻席还在875cm⁻¹和711cm⁻¹处出现了[CO₃]²⁻伸缩振动,这些属于典型碳酸盐矿物红外光谱^[26];在1090cm⁻¹处出现了多糖或类多糖C-O伸缩振动^[27]。除此之外,黑色藻席

表 1 黄龙风景区采样点地理信息和水样物理化学参数
Table 1 Geographic information of sampling points and physicochemical parameters of water samples

编号	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	变异系数/%
采样点	转花泉	五彩池	争艳彩池	盆景池	湫湫湖	金沙铺地	飞瀑流辉	迎宾池	n.a.
海拔/m	3 588.00	3 574.00	3 432.00	3 328.00	3 297.00	3 239.00	3 226.00	3 220.00	n.a.
经度	103°49'28"E	103°49'58"E	103°49'51"E	103°49'44"E	103°49'37"E	103°49'29"E	103°49'36"E	103°49'25"E	n.a.
纬度	32°43'28"N	32°43'30"N	32°44'23"N	32°44'47"N	32°44'50"N	32°45'1"N	32°45'2"N	32°45'4"N	n.a.
T/℃	7.20	6.50	7.70	7.60	7.30	9.60	7.60	8.30	11.82
pH	6.78	7.50	8.10	8.44	8.57	8.40	8.49	8.50	7.87
Ec/us	1 116.00	1 075.00	627.00	523.00	507.00	515.00	510.00	501.00	39.43
pCO ₂ /Pa	0.15	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	249.54
CO ₃ ²⁻ /mg·L ⁻¹	0.00	0.00	0.00	15.005	0.00	0.00	0.00	30.01	198.41
HCO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	1 006.83	732.24	366.12	274.59	335.61	282.22	320.36	221.20	62.63
TN/mg·L ⁻¹	0.02	0.04	0.19	0.11	0.15	0.14	0.12	0.26	59.94
TP/mg·L ⁻¹	0.05	0.05	0.13	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	58.78
Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	227.80	190.60	122.30	100.90	94.30	135.30	84.90	107.80	38.03
Al ³⁺ /mg·L ⁻¹	0.06	0.06	0.04	0.03	0.03	0.01	0.03	0.03	46.48
K ⁺ /mg·L ⁻¹	0.56	0.92	0.37	0.37	0.42	0.35	0.40	0.37	41.19
Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	23.10	22.39	15.16	15.33	15.63	15.57	15.96	15.76	19.22
DSi/mg·L ⁻¹	2.69	2.74	2.00	1.96	1.97	1.99	1.93	1.92	16.28
Cl ⁻ /mg·L ⁻¹	0.74	1.08	0.90	0.78	0.91	0.98	0.70	0.83	14.75
NO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	0.27	0.39	0.88	1.26	1.26	1.45	1.21	1.29	44.43
SO ₄ ²⁻ /mg·L ⁻¹	57.44	41.14	53.94	48.52	47.96	54.75	46.93	47.24	10.61

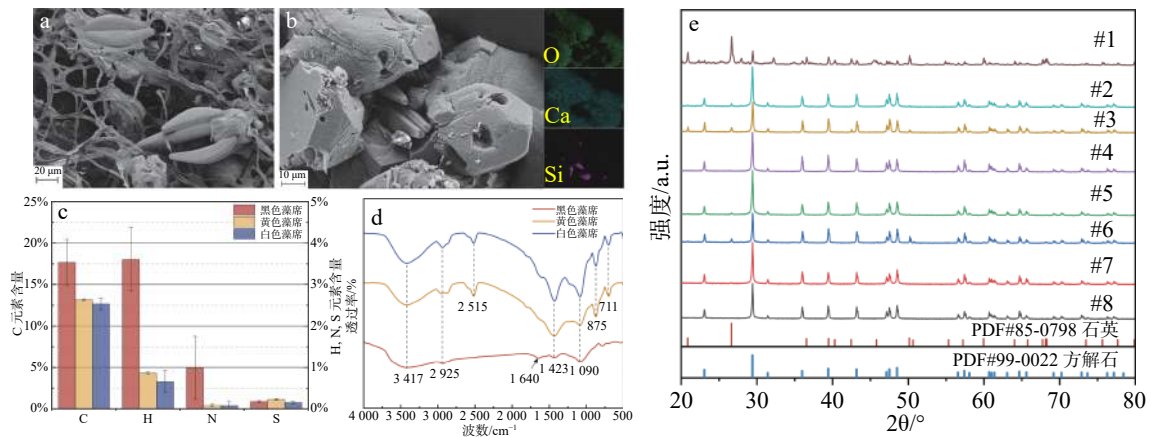


图 2 藻席结构和组成解析

a-b. 使用 SEM-EDS 分析藻席微观结构; c. 使用元素分析仪分析不同颜色藻席的 C, H, N, S 元素含量; d. 使用 FTIR 分析不同颜色藻席的官能团或化学键; e. 使用 XRD 分析藻席中的矿相成分。

Fig. 2 Structure and composition analysis of algal mats

a-b. the analysis of the microstructure of algal mats by SEM-EDS; c. the analysis of the content of C, H, N and S elements of different colors of algal mats by elemental analyzer; d. the analysis of the functional groups or chemical bonds of different colors of algal mats by FTIR; e. the analysis of the mineral phase components of algal mats by XRD

还在 1 640 cm⁻¹ 处出现了氨基酸、蛋白质和多肽物质中 N-H 酰胺的弯曲振动。XRD 分析表明(图 2e),

各藻席中均出现了以 CaCO₃ 为主的方解石特征衍射峰, 其中, #1 转花泉中还出现了以 SiO₂ 为主的石英

特征衍射峰。

2.3 藻席硅藻群落结构分析

本研究采集的藻席样品共鉴定出硅藻 25 属 72 种(表 2), 其中总相对丰度大于 2% 的硅藻有 16 种, 贡献物种数最多的是桥弯藻属(14 种), 等片藻属(8 种), 弯肋藻属(7 种), 美壁藻属(4 种)和针杆藻属(4 种); 各采样点中, #7 飞瀑流辉的硅藻物种丰度最高, 发现了 62 种硅藻; #3 争艳彩池的硅藻物种数最低, 观察到 31 种。

黄龙风景区藻席硅藻优势种共 13 种(表 3), 其中桥弯藻属占 4 种, 从属层面而言, 桥弯藻属占绝对优势($Y_{\text{总}} = 0.132$); 在种层面, 各优势种的优势度指数差异不大($0.023 \leq Y \leq 0.053$), 其中 *Diatoma vulgare* 的优势度指数最大, 线形弯肋藻的优势度指数最小。

对于黄龙风景区硅藻丰度和多样性分析(图 3), 各样点硅藻的绝对丰度变化范围为(2.50~37.10)×10⁷ cell/g, 均值为 13.7×10⁷ cell/g; Shannon-Wiener 指数变化范围为 4.64~5.45, 均值为 5.10; Simpson 多样性指数变化范围为 0.95~0.97, 均值为 0.96; Pielou 均匀度指数变化范围为 0.75~0.88, 均值为 0.83, 变化趋势基本一致。#3 争艳彩池的 Shannon-Wiener 指数($H = 4.64$)、Simpson 多样性指数($D = 0.95$)和 Pielou 均匀度指数($J = 0.75$)最低; #5 湫澗湖的 Shannon-Wiener 指数($H = 5.45$)、Simpson 多样性指数($D = 0.97$)和 Pielou 均匀度指数($J = 0.88$)最高。

各样点硅藻优势种组成占比(图 4)表明, #1 转花泉、#5 湫澗湖和#7 飞瀑流辉的绝对优势种是极小曲丝藻, #2 五彩池的绝对优势种是等片藻属的 *Diatoma vulgare*, #3 争艳彩池的绝对优势种是二哇长篦藻, #4 盆景池的绝对优势种是新月形桥弯藻, #6 金沙铺地的绝对优势种是近北极桥弯藻, #8 迎宾池的绝对优势种是线形弯肋藻。

2.4 藻席硅藻与环境变量相关性分析

对黄龙风景区 16 项环境变量进行了主成分分析(图 5a), 第 1 主成分和第 2 主成解释率分别 0.63 和 0.13, 第 1、第 2 主成分累积解释率为 77%, 因此保留第 1、第 2 主成分轴绘制排序图, 明显区分了 #1 转花泉、#2 五彩池和其他采样点: 第 1 主成分轴与 pH 和 NO₃⁻呈正相关, 与 Ec、Mg²⁺、DSi 和 HCO₃⁻等呈负相关; 第 2 主成分轴与 Cl⁻和 K⁺呈正相关, 与

SO₄²⁻呈负相关。其中, CO₃²⁻与 TP 的贡献度很低, 在后续分析中予以剔除。

根据 Spearman 相关性分析结果(图 5b), 在显著相关的两个环境变量中剔除一个。T 和 K⁺显著负相关; pCO₂ 与 pH 显著负相关, 与 Ec 显著正相关; 同时, NO₃⁻与 HCO₃⁻、Al³⁺相关性极强。因此剔除 K⁺、pH、Ec、HCO₃⁻ 和 Al³⁺; 保留其余环境变量, 用于与藻席硅藻的相关性分析。

根据 DCA 结果, 排序前 4 轴最大值为 2.36, 小于 3, 因此选择 RDA 分析环境变量和硅藻群落的关系。将海拔和剩余 9 种环境变量(T、pCO₂、TN、DSi、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、NO₃⁻和 SO₄²⁻)作为变量, 并选择相对丰度大于 1% 的 34 种硅藻进行冗余分析。RDA 结果表明(图 6), 前两轴的特征值分别为 0.43 和 0.24, 共同解释了硅藻群落物种数据累积方差值的 67.68%。环境变量与藻席硅藻群落结构的相关性为 T > DSi > pCO₂ > TN > Mg²⁺ > Ca²⁺ > 海拔, Cl⁻、NO₃⁻与 SO₄²⁻三种环境变量相关性极低, 予以剔除。通过蒙特卡罗检验对各因子影响程度进行显著性检验发现, T($F = 2.8, P = 0.02$)和 DSi($F = 2.3, P = 0.04$)是显著影响藻席藻类群落结构的环境变量。

在 RDA 排序图中, pCO₂ 是与第一轴相关性最大的正相关因子, 极小曲丝藻(AchnMinu)、眼斑双壁藻(DiplOcul)、线型曲壳藻(AchnOren)、窄弯肋藻(CymbAngs)、短纹异极藻(GompAbbr)、窄异极藻(GompProd)、弯曲卵形藻(CoccFlex)和近缘桥弯藻(CymbAffi)的相对丰度与 pCO₂ 呈正相关关系, 而椭圆双壁藻(DiplElli)、箱型桥弯藻(CymbCist)、斯图施拜桥弯藻(CymbStux)、簇生舟形藻(NavcGreg)和平滑桥弯藻(CymbLaev)则表现出相反的趋势。而 TN 是与第一轴相关性最大的负相关因子, 新月形桥弯藻(CymbCymb)、二哇长篦藻(NeidBisl)、库尔伯斯弯肋藻(CymbKuel)、新箱型桥弯藻(CymbNeoc)和奥地利弯肋藻(CymbAust)的相对丰度与其呈正相关。DSi 是与第二轴相关性最大的正相关因子, 毛利曲壳藻(AchnMaui)的相对丰度与其呈正相关, 同时也与 Mg²⁺和海拔呈正相关。T 是与第二轴相关性最大的负相关因子, 草鞋形波缘藻(CytmSole)、近轴桥弯藻(CymbProx)、近北极桥弯藻(CymbSubr)、微细桥弯藻(CymbParv)和纤细桥弯藻(CymbGrac)与其呈正相关, 而隐头舟形藻(NaviCryp)与其呈负相关。Ca²⁺与第一轴的相关性更大且呈正相关, 高山美壁藻

表 2 黄龙风景区藻席硅藻种类名录
Table 2 List of diatom species in the algal mats of Huanglong Scenic and Historic Interest Area

属	种	属	种
曲壳藻属 (<i>Achnanthes</i>)	线型曲壳藻 <i>A. orenulata</i>	等片藻属 (<i>Diatoma</i>)	念珠等片藻 <i>D. moniliformis</i>
	披针形曲壳藻 <i>A. lanceolata</i>		冬生等片藻 <i>D. hiemale</i>
	毛利曲壳藻 <i>A. mauiensis</i>		巨大等片藻 <i>D. maximum</i>
曲丝藻属 (<i>Achnantheidium</i>)	*极小曲丝藻 <i>A. minutissimum</i>	双壁藻属 (<i>Diploneis</i>)	普通等片藻 <i>D. vulgare</i>
	高山美壁藻 <i>C. alpestris</i>		中型等片藻 <i>D. mesodon</i>
	偏肿美壁藻 <i>C. ventricosa</i>		纤细等片藻 <i>D. tenue</i>
美壁藻属 (<i>Caloneis</i>)	舒曼美壁藻 <i>C. schumanniana</i>	双壁藻属 (<i>Diploneis</i>)	椭圆双壁藻 <i>D. elliptica</i>
	美丽美壁藻 <i>C. pulchra</i>		卵圆双壁藻长圆变种 <i>D. ovalis var. oblongella</i>
	弯曲卵形藻 <i>C. flexella</i>		眼斑双壁藻 <i>D. oculata</i>
卵形藻属 (<i>Cocconeis</i>)	扁圆卵形藻 <i>C. placentula</i>	内丝藻属 (<i>Encyonema</i>)	西里西亚内丝藻 <i>E. silesiacum</i>
	可辨小环藻 <i>C. distinguenda</i>		簇生内丝藻 <i>E. cespitosum</i>
小环藻属 (<i>Cyclotella</i>)	梅尼小环藻 <i>C. meneghiniana</i>	内丝藻属 (<i>Encyonopsis</i>)	纤细内丝藻 <i>E. gracile</i>
	*草鞋形波缘藻 <i>C. solea</i>		斯托特拟内丝藻 <i>E. stodderi</i>
波缘藻属 (<i>Cymatopleura</i>)	新箱型桥弯藻 <i>C. neocistula</i>	脆杆藻属 (<i>Fragilaria</i>)	赛萨特拟内丝藻 <i>E. cesatii</i>
	背弯桥弯藻 <i>C. dorsenotata</i>		两头脆杆藻 <i>F. biceps</i>
桥弯藻属 (<i>Cymbella</i>)	近轴桥弯藻 <i>C. proxima</i>	异极藻属 (<i>Gomphonema</i>)	狭辐节脆杆藻 <i>F. leptostauron</i>
	近淡黄桥弯藻 <i>C. subhelvetica</i>		短纹异极藻 <i>G. abbreniatum</i>
桥弯藻属 (<i>Cymbella</i>)	近平截桥弯藻 <i>C. subtruncata</i>	直链藻属 (<i>Melosira</i>)	*窄异极藻 <i>G. productum</i>
	*新月形桥弯藻 <i>C. cymbiformis</i>		变异直链藻 <i>M. varians</i>
桥弯藻属 (<i>Cymbella</i>)	*箱型桥弯藻 <i>C. cistula</i>	舟型藻属 (<i>Navicula</i>)	颗粒直链藻极狭变种 <i>M. granulate var. angustissima</i>
	斯图施拜桥弯藻 <i>C. stuxbergii</i>		隐头舟形藻 <i>N. cryptocephala</i>
桥弯藻属 (<i>Cymbella</i>)	膨胀桥弯藻 <i>C. tumida</i>	长篦藻属 (<i>Neidium</i>)	簇生舟形藻 <i>N. gregaria</i>
	平滑桥弯藻 <i>C. laevis</i>		*二哇长篦藻 <i>N. bisulcatum</i>
桥弯藻属 (<i>Cymbella</i>)	微细桥弯藻 <i>C. parva</i>	菱形藻属 (<i>Nitzschia</i>)	优美长篦藻 <i>N. mirabile</i>
	*纤细桥弯藻 <i>C. gracillis</i>		细长菱形藻 <i>N. gracilis</i>
桥弯藻属 (<i>Cymbella</i>)	*近北极桥弯藻 <i>C. subarctica</i>	羽纹藻属 (<i>Pinnularia</i>)	细端菱形藻 <i>N. dissipata</i>
	近缘桥弯藻 <i>C. affinis</i>		中型羽纹藻 <i>P. intermedia</i>
桥弯藻属 (<i>Cymbella</i>)	*奥地利弯肋藻 <i>C. austriaca</i>	弯楔藻属 (<i>Rhoicosphenia</i>)	弯形弯楔藻 <i>R. curvata</i>
	库尔伯斯弯肋藻 <i>C. kuelbsii</i>		*沼泽辐节藻 <i>S. palustris</i>
弯肋藻属 (<i>Cymbopleura</i>)	矩圆弯肋藻 <i>C. oblongata</i>	十字脆杆藻属 (<i>Staurosira</i>)	凸腹十字脆杆藻 <i>S. venter</i>
	杂种弯肋藻 <i>C. hybrida</i>		肘状针杆藻 <i>S. ulna</i>
等片藻属 (<i>Diatoma</i>)	*窄弯肋藻 <i>C. angustata</i>	针杆藻属 (<i>Synedra</i>)	双头针杆藻 <i>S. amphicephala</i>
	双头弯肋藻 <i>C. amphicephala</i>		尖针杆藻 <i>S. acus</i>
等片藻属 (<i>Diatoma</i>)	*线形弯肋藻 <i>C. linearis</i>	平板藻属 (<i>Tabellaria</i>)	平片针杆藻 <i>S. tabulata</i>
	<i>D. hyemalis</i>		窗格平板藻 <i>T. fenestrata</i>
	* <i>D. vulgaris</i>	四环藻属 (<i>Tetracyclus</i>)	湖沼四环藻 <i>T. lacustris</i>

注: *代表优势种。Note: * represents dominant species.

(CaloAlpe)和矩圆弯肋藻(CymbOblo)与其呈正相关,而沼泽辐节藻(StauPals)和膨胀桥弯藻(CymbTumi)与Ca²⁺呈负相关。

3 讨论

黄龙风景区地处高原温带亚寒带季风气候区,

表 3 黄龙风景区藻席硅藻优势种

Table 3 Dominant species of diatom in Huanglong Scenic and Historic Interest Area

属	种	优势度(Y)
曲丝藻属(<i>Achnantheidium</i>)	极小曲丝藻 <i>A. minutissimum</i>	0.039
波缘藻属(<i>Cymatopleura</i>)	草鞋形波缘藻 <i>C. solea</i>	0.045
	箱型桥弯藻 <i>C. cistula</i>	0.027
	新月形桥弯藻 <i>C. cymbiformis</i>	0.030
	近北极桥弯藻 <i>C. subarctica</i>	0.032
桥弯藻属(<i>Cymbella</i>)	纤细桥弯藻 <i>C. gracillis</i>	0.043
	线形弯肋藻 <i>C. linearis</i>	0.023
	弯肋藻属(<i>Cymbopleura</i>)	窄弯肋藻 <i>C. angustata</i>
	奥地利弯肋藻 <i>C. austriaca</i>	0.028
等片藻属(<i>Diatoma</i>)	<i>D. vulgare</i>	0.053
异极藻属(<i>Gomphonema</i>)	窄异极藻 <i>G. productum</i>	0.035
长篦藻属(<i>Neidium</i>)	二哇长篦藻 <i>N. bisulcatum</i>	0.048
辐节藻属(<i>Stauroneis</i>)	沼泽辐节藻 <i>S. palustris</i>	0.026

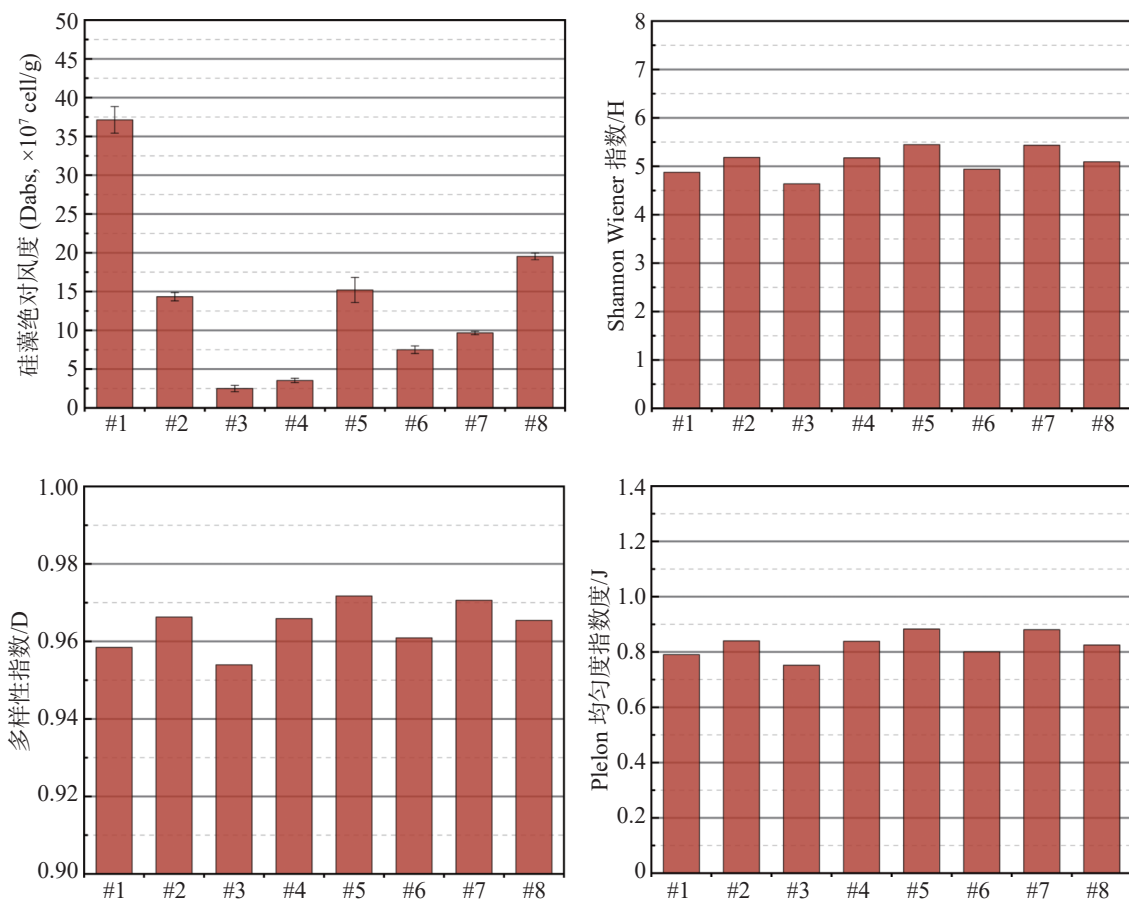


图 3 各采样点藻席的硅藻绝对丰度(Dabs)、Shannon-Weiner 指数(H)、Simpson 多样性指数(D)、Pielou 指数(J)

Fig. 3 Absolute abundance, Shannon Wiener index, Simpson's diversity index, and Pielou's species evenness index of diatoms

在岩溶水、水动力条件等非生物因素和生物模板、产物诱导等生物因素共同作用下,形成了大量钙华景观^[28]。同时,在岩溶水流经处的钙华表面会形成

一层厚达 2 mm 的藻席,这可能是由于钙华沉积过程中逸出的大量 CO_2 促进了硅藻和丝状藻等藻类生长^[29-30]。Gomez 等^[31]在阿根廷一处高海拔高盐碱湖

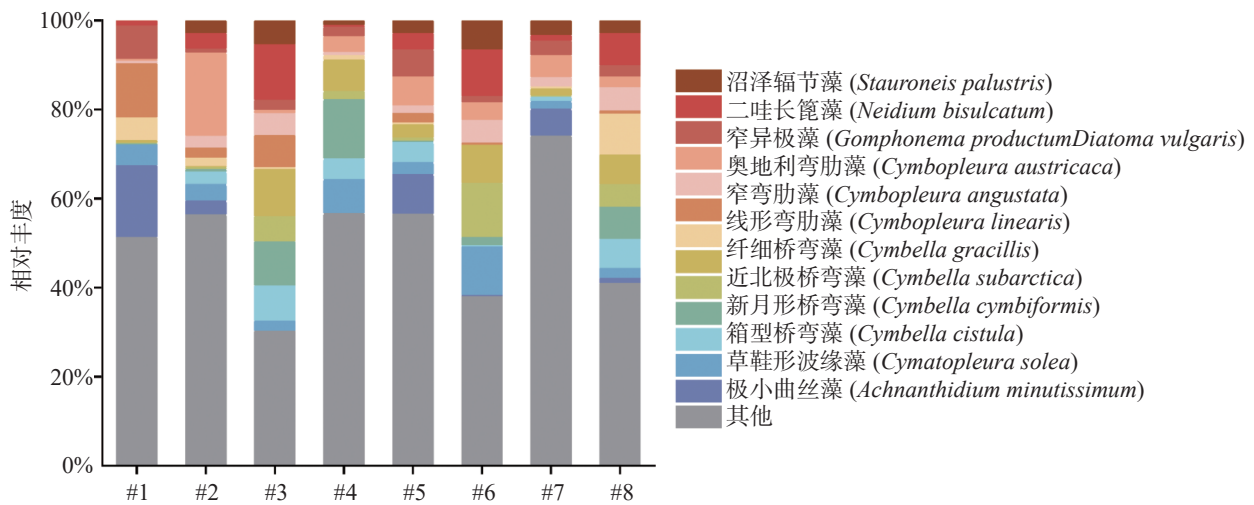


图 4 各样点硅藻优势种组成占比

Fig. 4 Proportion of dominant species of diatom in each site in Huanglong Scenic and Historic Interest Area

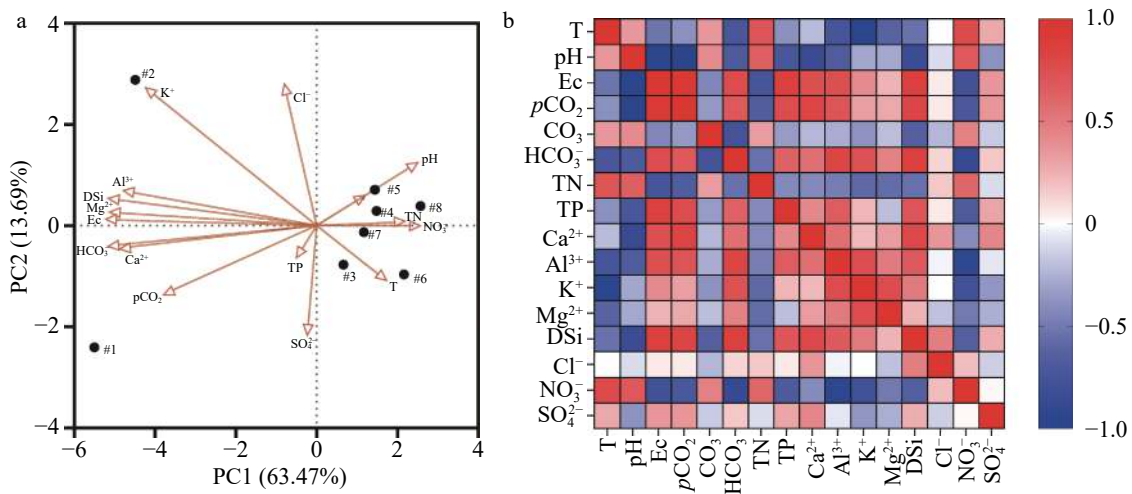


图 5 采样点水环境因子的主成分分析与 Spearman 相关系数

Fig. 5 PCA and Spearman correlation coefficient of water environmental factors at sampling points

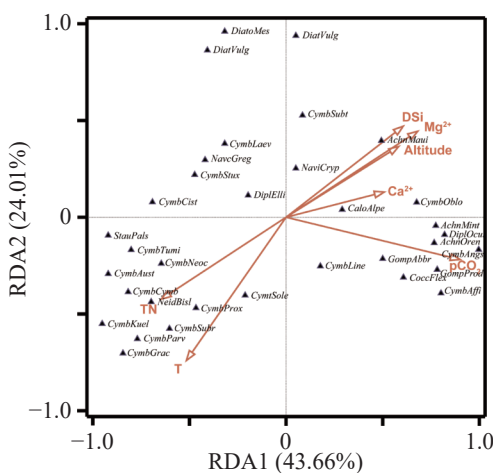


图 6 环境因子与藻席硅藻的冗余分析

Fig. 6 RDA between environmental factors and algal mat diatoms

中也发现了富含硅藻并同时伴有文石和方解石沉积的藻席，但不同的是，该处藻席中存在的是硅藻-细菌聚集体，包括紫色硫细菌等，并使藻席呈现褐色、绿色和黑色，而黄龙藻席主要为黄色和白色，少量藻席为黑色。SEM 结果表明(图 2a, b)，藻席中含有大量矿物颗粒、丝状藻和硅藻；元素分析结果(图 2c)表明，黑色藻席中碳、氢、氮元素含量明显高于黄色和白色藻席。Kuypers 等^[32]认为氮是所有生物体的重要组成部分，也是限制地球生命的主要营养物质，因此氮元素含量可以作为藻席中生物成分的量化标准。FTIR 结果(图 2d)也表明黑色藻席中有更多的氨基酸、蛋白质和多肽的弯曲振动。因此，我们认为生物因素影响黄龙藻席的颜色。XRD 结果(图 2e)表明，藻席中的矿物成分主要是方解石型碳酸钙，即钙

华,同时部分样品中还检测出了石英。石英可能来源于钙华沉积速率缓慢地段,藻席中混有的泥沙^[33]。因此,黄龙藻席构成了黄龙风景区所特有的钙华-生物高寒岩溶微生态系统(图 2a):以钙华作为基底,丝状藻作为骨架,栖息着大量硅藻。

位于高寒岩溶区的黄龙风景区,各样点硅藻物种丰富度较高,但硅藻群落结构受环境影响存在较大差异。总体而言,黄龙风景区各样点平均硅藻种类数为 48 种,贡献物种数最多的是桥弯藻属(14 种),这是因为黄龙风景区海拔高常年温度较低,桥弯藻属是低温指示种,且适应在高溶解氧、高 pH 值水体中生存^[34-35]。在其他低海拔常温区,硅藻优势种以曲丝藻属、舟形藻属和异极藻属等为主^[36-38]。*Diatoma vulgaris* 等 13 个物种为黄龙风景区藻席硅藻优势种,其中优势种极小曲丝藻作为低营养浓度的指示物种^[39],大量聚集在游客无法直接到达且水质几乎无污染的#1 转花泉中。从藻席中的硅藻绝对丰度而言,硅藻数量与钙华颗粒有关。#1 转花泉的硅藻最多,#3 争艳彩池的硅藻最少,因为#1 转花泉水质呈弱酸性,不易形成钙华,因而相同重量的藻席中硅藻较多;#3 争艳彩池钙华沉积速率快,因而藻席中含有大量钙华。从多样性指数而言,各样点的 Shannon-Weiner 指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 指数存在一定差异,沿着海拔降低,#1 - #8 的多样性指数呈波动状,即不断地上升后下降。这可能与黄龙水循环系统有关,泉眼中涌出的地下水汇入地表水系后导致水环境发生变化,从而对生物多样性产生一定影响^[40-41]。

PCA 结果表明,#1 转花泉和#2 五彩池与其他样点差异很大,这是因为#1 转花泉为泉眼处,该泉眼会不断逸出 CO₂ 导致水体呈弱酸性,并且此地人为影响较少且几乎无污染;#2 五彩池的 K⁺浓度较高可能与附近土壤与植被较多有关,土壤 K⁺随水淋溶而损失进入水体中^[42]。RDA 结果表明,T 和 DSi 显著影响黄龙风景区藻席硅藻群落结构,TN 对硅藻群落结构也有一定影响。在本研究中,水温是影响黄龙风景区藻席硅藻群落结构的最显著因素,这可能是由于黄龙硅藻属于嗜冷型硅藻,其群落结构对水温变化十分敏感。Ouyang 等^[43]对与黄龙风景区相距不远的九寨沟高寒岩溶湖泊硅藻群落结构进行了研究,同样发现水温是其主要影响因素。溶解硅会显著影响硅藻群落结构,主要因为硅是硅藻生长的必需元

素,用于形成硅质壳以及色素合成、细胞分裂等多种生长代谢过程,而不同硅藻所需的最适硅浓度也不同^[44]。Sun 等^[45]也发现硅浓度对硅藻群落变化有显著影响。TN 作为典型人为影响因子,水体富营养化指标之一,是影响硅藻群落结构的重要驱动因子,这与前人研究一致^[46]。Lin 等^[47]认为水体中 TN > 0.2 mg·L⁻¹, TP > 0.02 mg·L⁻¹ 时处于富营养化状态。黄龙水体为连续水系,#1 转花泉为泉眼处,位于黄龙水体上游,离景区观光栈道较远,游客无法直接到达,因此污染较少;其余采样点均为景点,人为污染较大,样点水体存在富营养化趋势。各样点间距离较近,但 TN 和 TP 差异较大,因此我们认为这些差异是人为而非自然导致。目前,TN 虽不是影响黄龙风景区藻席硅藻的最显著的驱动因子,但是景区的水质存在富营养化趋势,而水体富营养化会影响藻类群落结构^[48]。因此,TN 可能是潜在驱动因子。黄龙风景区作为世界自然遗产地,每天都会接待大量的游客,景区管理方应当对人为污染加以管控,防范水体污染。

4 结 论

(1) 黄龙风景区藻席是以钙华作为基底,丝状藻作为骨架,栖息着大量硅藻的高寒岩溶微生态系统;

(2) 硅藻的绝对丰度变化范围为(2.50~37.10)×10⁷ cell/g,共鉴定出 25 属 72 种硅藻,其中优势种 13 种,以桥弯藻属(*Cymbella*)为主;

(3) 通过冗余分析发现,水温和溶解硅是黄龙风景区藻席硅藻群落结构变化的重要驱动因子,人为影响因子 TN 是潜在驱动因子。

参 考 文 献

- [1] 傅华龙,韩福山,周绪纶,刘子福.四川黄龙钙华景观中的藻类植物[J].资源开发与保护,1989(3):40-41,44.
FU Hualong, HAN Fushan, ZHOU Xulun, LIU Zifu. Algae in the travertine landscape of Huanglong, Sichuan[J]. Resource Development and Protection, 1989(3): 40-41, 44.
- [2] 汪智军,殷建军,郝秀东,王培,张强,蓝高勇,张清明.基于微岩相分析的藻类在钙华沉积中的作用研究:以四川黄龙为例[J].中国岩溶,2021,40(1):44-54.
WANG Zhijun, YIN Jianjun, HAO Xiudong, WANG Pei, ZHANG Qiang, LAN Gaoyong, ZHANG Qingming. Role of algae in travertine deposition revealed by microscale observations: A case study of Huanglong, Sichuan, China[J]. Carsol-

- ica Sinica, 2021, 40(1): 44-54.
- [3] Lavoie I, Campeau S, Zugic-Drakulic N, Winter J G, Fortin C. Using diatoms to monitor stream biological integrity in Eastern Canada: An overview of 10 years of index development and ongoing challenges[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 475: 187-200.
- [4] Ramkumar M, Kumaraswamy K, Mohanraj R. Environmental management of river basin ecosystems[M]. Berlin: Springer, 2015.
- [5] Wang HJ, Yan H, Liu ZH. Contrasts in variations of the carbon and oxygen isotopic composition of travertines formed in pools and a ramp stream at Huanglong Ravine, China: Implications for paleoclimatic interpretations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 125: 34-48.
- [6] Wang HJ, Liu ZH, Zhang JL, Sun HL, An DJ, Fu RX, Wang XP. Spatial and temporal hydrochemical variations of the spring-fed travertine-depositing stream in the Huanglong Ravine, Sichuan, SW China[J]. *Acta Carsologica* 2010, 39(2): 247-259.
- [7] 雷婷婷, 陈良仲, 陈绍兴, 沈亮. 微生物对低温极端环境适应性的研究进展[J]. *微生物学报*, 2022, 62(6): 2150-2164. LEI Tingting, CHEN Liangzhong, CHEN Shaoxing, SHEN Liang. Progress in research on the adaptability of microorganisms to extremely cold environments[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2022, 62(6): 2150-2164.
- [8] Stanish L F, Nemergut D R, Mcknight D M. Hydrologic processes influence diatom community composition in Dry Valley streams[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2011, 30(4): 1057-1073.
- [9] Frantz C, Petryshyn V, Corsetti F. Grain trapping by filamentous cyanobacterial and algal mats: Implications for stromatolite microfabrics through time[J]. *Geobiology*, 2015, 13(5): 409-423.
- [10] Gushulak C A, Laird K R, Bennett J R, Cumming B F. Water depth is a strong driver of intra-lake diatom distributions in a small boreal lake[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2017, 58(2): 231-241.
- [11] Bojorge-García M, Carmona J, Ramírez R. Species richness and diversity of benthic diatom communities in tropical mountain streams of Mexico[J]. *Inland Waters*, 2014, 4(3): 279-292.
- [12] Zhang Yun, Peng Chengrong, Wang Jun, Huang Shun, Hu Yao, Zhang Jinli, Li Dunhai. Temperature and silicate are significant driving factors for the seasonal shift of dominant diatoms in a drinking water reservoir[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2019, 37(2): 568-579.
- [13] Bae H, Park J, Ahn H, Kim J S. Shift in benthic diatom community structure and salinity thresholds in a hypersaline environment of solar saltern, Korea[J]. *Algae*, 2020, 35(4): 361-373.
- [14] Fouke B W. Hot-spring systems geobiology: Abiotic and biotic influences on travertine formation at Mammoth Hot Springs, Yellowstone National Park, USA[J]. *Sedimentology*, 2011, 58(1): 170-219.
- [15] 郝卓, 高扬, 张晴雯, 熊佰炼. 典型喀斯特流域旱雨季交替下溶解硅的输送特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(24): 9681-9690. HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Qingwen, XIONG Bailian. Characteristics of dissolved silicon transport in typical karst watershed in alternating wet and dry season[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(24): 9681-9690.
- [16] 杨诗笛, 吴攀, 曹星星, 刘闪, 廖家豪. 岩溶湿地表层水体CO₂分压时空分布特征及其扩散通量[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(3): 854-865. YANG Shidi, WU Pan, CAO Xingxing, LIU Shan, LIAO Jiahao. Spatiotemporal distribution of carbon dioxide partial pressure and its diffusion flux in surface water of karst wetland[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(3): 854-865.
- [17] 张纪晖, 周成旭, 李冬玲, 林忠洲, 邱悦, 沙龙滨. 福建建江口表层沉积硅藻空间分布特征[J]. *热带亚热带植物学报*, 2021, 29(6): 597-604. ZHANG Jihui, ZHOU Chengxu, LI Dongling, LIN Zhongzhou, QIU Yue, SHA Longbin. Diatom distribution in surface sediments of Aojiang river estuary in Fujian, China[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2021, 29(6): 597-604.
- [18] Round F E, Crawford R M, Mann D G. Diatoms: Biology and morphology of the genera[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [19] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006. HU Hongjun, WEI Yinxin. The freshwater algae of China: Systematics, taxonomy and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [20] 施之新. 中国淡水藻志: 第十六卷, 硅藻门, 桥弯藻科[M]. 北京: 科学出版社, 2013. SHI Zhixin. Flora Algarum Sinicarum Aquae Dulcis: Timus 16, Bacillariophyta, Cymbellaceae[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [21] 李家英, 齐雨藻. 中国淡水藻志: 第十四卷, 硅藻门, 舟形藻科(I)[M]. 北京: 科学出版社, 2010. LI Jiaying, QI Yuzao. Flora Algarum Sinicarum Aquae Dulcis: Timus 14, Bacillariophyta, Naviculaceae (I)[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [22] 李家英, 齐雨藻. 中国淡水藻志: 第十九卷, 硅藻门, 舟形藻科(II)[M]. 北京: 科学出版社, 2014. LI Jiaying, QI Yuzao. Flora Algarum Sinicarum Aquae Dulcis: Timus 19, Bacillariophyta, Naviculaceae (II)[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [23] Spaulding S A, Potapova M G, Bishop I W, Lee S S, Gasperak T S, Jovanoska E, Furey P C, Edlund M B. Diatoms. org: Supporting taxonomists, connecting communities[J]. *Diatom Research*, 2021, 36(4): 291-304.
- [24] 吴瑞, 高亚辉, 蓝东兆, 兰彬斌, 方琦. 象山港底栖硅藻群落结构特征[J]. *热带作物学报*, 2016, 37(3): 439-445. WU Rui, GAO Yahui, LAN Dongzhao, LAN Binbin, FANG Qi. The benthic diatom community of Xiangshan bay[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2016, 37(3): 439-445.
- [25] 谢纯林, 王涛, 胡俊杰, 阎春兰, 裴国凤. 赤水河流域秋季底栖

- 硅藻群落结构特征及水质评价[J]. 水生态学杂志, 2022, 43(6): 43-50.
- XIE Chunlin, WANG Tao, HU Junjie, YAN Chunlan, PEI Guofeng. Autumn benthic diatom community structure and water quality assessment in the Chishui river basin[J]. *Journal of Hydroecology*, 2022, 43(6): 43-50.
- [26] 刘嘉钧, 罗洁, 岳素伟, 徐亚兰. “黄蜂石”的矿物成分及谱学特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(6): 1936-1941.
- LIU Jiajun, LUO Jie, YUE Suwei, XU Yalan. Study on the mineral composition and spectral characteristics of "Bumblebee Stone"[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(6): 1936-1941.
- [27] 张钰, 李杰庆, 李涛, 刘鸿高, 王元忠. 不同部位矿质元素与红外光谱数据融合对美味牛肝菌产地溯源研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(10): 3070-3076.
- ZHANG Yu, LI Jieqing, LI Tao, LIU Honggao, WANG Yuanzhong. Discrimination of geographical origins of boletus edulis using data fusion combined mineral elements with FTIR spectrum of different parts[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(10): 3070-3076.
- [28] 董发勤, 代群威, 饶瀚云, 王富东, 赵学钦, 蒋忠诚, 张强, 李博文, Alexander I. Malov, Enrico Capezuoli, Augusto Auler. 黄龙与黄石钙华微生物沉积作用比较研究[J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 264-272.
- DONG Faqin, DAI Qunwei, RAO Hanyun, WANG Fudong, ZHAO Xueqin, JIANG Zhongcheng, ZHANG Qiang, LI Bowen, Alexander I. Malov, Enrico Capezuoli, Augusto Auler. Comparative study on microbial deposition of travertine in Huanglong Scenic Area and Yellowstone National Park[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 264-272.
- [29] Tsai D D W, Chen P H, Ramaraj R. The potential of carbon dioxide capture and sequestration with algae[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 98: 17-23.
- [30] Iwasaki K, Evenhuis C, Tamburic B, Kuzhiumparambil U, O'Connor W, Ralph P, Szabó M. Improving light and CO₂ availability to enhance the growth rate of the diatom, *Chaetoceros muelleri*[J]. *Algal Research*, 2021, 55: 102234.
- [31] Gomez F J, Mlewski C, Boidi F J, Fariás M E, Gérard E. Calcium carbonate precipitation in diatom-rich microbial mats: The Laguna Negra hypersaline lake, Catamarca, Argentina[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2018, 88(6): 727-742.
- [32] Kuypers M M, Marchant H K, Kartal B. The microbial nitrogen-cycling network[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, 16(5): 263-276.
- [33] 马芊红, 张科利. 西南喀斯特地区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2018, 33(11): 1130-1141.
- MA Qianhong, ZHANG Keli. Progresses and prospects of the research on soil erosion in karst area of Southwest China[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(11): 1130-1141.
- [34] 孙亚玲, 刘进琪, 邹松兵. 渭河上游浮游植物群落结构对空间环境响应的差异性研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(7): 144-152.
- SUN Yaling, LIU Jinqi, ZOU Songbing. Study on difference of response from phytoplankton community structure to spatial environment in upper Weihe river[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(7): 144-152.
- [35] Phartiyal B, Singh R, Nag D, Sharma A, Agnihotri R, Prasad V, Yao T, Yao P, Karthick B, Joshi P, Gahlaud S K, Thakur B. Reconstructing climate variability during the last four millennia from trans-Himalaya (Ladakh-Karakoram, India) using multiple proxies[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 562: 110142.
- [36] 杨宋琪, 杨江山, 陈成, 祖廷勋, 罗光宏. 张掖黑河湿地附植硅藻群落初步研究: 以张掖国家湿地公园为例[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(3): 77-84.
- YANG Songqi, YANG Jiangshan, CHEN Cheng, ZU Tingxun, LUO Guanghong. A preliminary study on the epiphytic diatom community in Zhangye Heihe Wetland: A case study of Zhangye National Wetland Park[J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, 41(3): 77-84.
- [37] 薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋. 汤旺河着生硅藻群落及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1256-1264.
- XUE Hao, WANG Yeyao, MENG Fansheng, ZHENG Binghui, ZHANG Lingsong, CHENG Peixuan. Community of benthic diatoms and their relationship with aquatic environmental factors in the Tangwang river, China[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(3): 1256-1264.
- [38] 米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书晗, 吴忠兴. 三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1636-1647.
- MI Wenmei, SHI Junqiong, YANG Yanjun, YANG Songqi, HE Shuhan, WU Zhongxing. Changes in epilithic algae community and its relationship with environmental factors in the Meixi river, a tributary of the Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(4): 1636-1647.
- [39] Potapova M, Charles D F. Diatom metrics for monitoring eutrophication in rivers of the United States[J]. *Ecological Indicators*, 2007, 7(1): 48-70.
- [40] 刘馨泽, 孙东, 曹楠, 袁楠楠, 黄何平, 田长宝, 张清明, 唐淑, 李大猛, 周大吉, 董发勤. 黄龙核心景区多层次水循环系统结构研究[J]. 中国岩溶, 2021, 40(1): 19-33.
- LIU Xinze, SUN Dong, CAO Nan, YUAN Nannan, HUANG Heping, TIAN Changbao, ZHANG Qingming, TANG Shu, LI Dameng, ZHOU Daji, DONG Faqin. Study on the structure of multi-layer water circulation system in the core scenic spot of Huanglong[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(1): 19-33.
- [41] 代群威, 党政, 彭启轩, 董发勤, 李琼芳, 罗尧东, 王富东, 赵学钦, 安德军, 张清明. 钙华天然海绵地质体多孔特性及其对水循环调节意义: 以四川黄龙为例[J]. 矿物学报, 2019, 39(2): 219-225.
- DAI Qunwei, DANG Zheng, PENG Qixuan, DONG Faqin, LI

- Qiongfang, LUO Yaodong, WANG Fudong, ZHAO Xueqin, AN Dejun, ZHANG Qingming. Porosity of travertine natural sponge geological bodies and its significance in regulating water circulation: A case study of travertine at Huanglong Ravine, Sichuan Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2019, 39(2): 219-225.
- [42] 董艳红, 王火焰, 周健民, 任正文. 不同土壤钾素淋溶特性的初步研究[J]. *土壤*, 2014, 46(2): 225-231.
- DONG Yanhong, WANG Huoyan, ZHOU Jianmin, REN Zhengwen. Preliminary study on potassium leaching characteristics of different soils[J]. *Soils*, 2014, 46(2): 225-231.
- [43] OUYANG Lili, PAN Yangdong, HUANG Chengmin, TANG Ya, DU Jie, XIAO Weiyang. Water quality assessment of benthic diatom communities for water quality in the subalpine karstic lakes of Jiuzhaigou, a world heritage site in China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(9): 1632-1644.
- [44] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components[J]. *Science*, 1998, 281(5374): 237-240.
- [45] Sun Xiuming, Wu Naicheng, Faber Claas, Fohrer Nicola. Effects of hydrological variables on structuring morphological trait (cell size) of diatom community in a lowland river[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 207-217.
- [46] 张存凯, 李琼芳, 唐淑, 张清明, 陈超, 吕治州, 张文静. 影响黄龙藻类群落结构的环境因子分析[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(2): 224-231.
- ZHANG Cunkai, LI Qiongfang, TANG Shu, ZHANG Qingming, CHEN Chao, LV Zhizhou, ZHANG Wenjing. Effects of environmental factors on algal community structure in Huanglong Scenic Area[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(2): 224-231.
- [47] Lin YJ, He ZL, Yang YG, Stoffella PJ, Philips EJ, Powell CA. Nitrogen versus phosphorus limitation of phytoplankton growth in Ten Mile Creek, Florida, USA[J]. *Hydrobiologia*, 2008, 605(1): 247-258.
- [48] 蒋忠诚, 代群威, 董发勤, 张强, 党政, 汪智军, 刘凡. 国内外钙华岩溶景观的研究进展与展望[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(1): 4-10.
- JIANG Zhongcheng, DAI Qunwei, DONG Faqin, ZHANG Qiang, DANG Zheng, WANG Zhijun, LIU Fan. Review of research progress and prospect of tufa/travertine karst landscape at home and abroad[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(1): 4-10.

Changes and driving factors of psychrophilic diatom community structure of algal mats in Huanglong Scenic Area

RAO Hanyun^{1,2}, DONG Faqin^{2,3}, LIU Mingxue¹, AN Dejun⁴, DAI Qunwei^{3,5},
LI Qiongfang¹, ZHANG Qiang⁶, LIU Yifan¹, LIU Zeling¹, ZHANG Yuting¹

(1. School of Life Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 2. Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Resource Recycle, Ministry of Education, Mianyang, Sichuan 621010, China; 3. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 4. Huanglong National Scenic Area Administration, Songpan, Sichuan 624000, China; 5. Fundamental Science on Nuclear Wastes and Environmental Safety Laboratory, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 6. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract Huanglong Scenic Area, located in Songpan county, Sichuan Province, China, is listed as the World Natural Heritage, and is covered with travertine landscape at an altitude of about 3,145-3,588 m. With the plateau temperate sub-frigid monsoon climate, the melt water from snow mountains, the atmospheric precipitation and the underground karst water are the main water sources of Huanglong Scenic Area. In addition, covered by ice and snow at extremely low temperatures, Huanglong Scenic Area has a half-year-long freezing period with an annual average temperature of only 1.1 °C. A large number of algae, mainly psychrophilic diatoms, grow in the water coverage of the travertine deposition area in the scenic area. The diatom community, an indicator of water quality change, is very sensitive to environmental changes in natural rivers. At present, there are still few studies related to this alpine karst area. In order to explore the structure of algal mats as well as the relationship between the community structure of psychrophilic diatoms in algal mats and environmental variables in Huanglong Scenic Area, we analyzed water samples and algae mats from 8 typical scenic spots in October 2021. The water temperature (T), pH and conductivity (Ec) as well as the concentrations of HCO_3^- and CO_3^{2-} of the sampling points were measured on site. At the same time, the geographic data of the sampling points were recorded. The concentrations of dissolved silicon (Dsi), cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , K^+), anions (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}), TN and TP were determined in the laboratory. The structural compositions of the algal mats and the characteristics of the diatom community structure were analyzed. The main driving factors

affecting the water of Huanglong Scenic Area were judged by Principal Component Analysis (PCA), and one of the two environmental variables with greater correlation was eliminated by Spearman Correlation Analysis. After Detrend Correspondence Analysis (DCA) of diatom species abundance in algal mats, Redundancy Analysis (RDA) was selected to analyze the relationship between environmental variables and diatom communities. The results show that the concentrations of Ca^{2+} and HCO_3^- in the waterbody is high, and water mainly belongs to the $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ type, followed by the $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ type. The algal mats are mainly composed of travertine particles, filamentous algae and diatoms. The study area is an alpine karst micro-ecosystem with travertine as the base and filamentous algae as the skeleton, inhabiting a large number of diatoms. 72 species of diatoms from 25 genera are identified from algal mats, among which 16 species have a total relative abundance greater than 2%. The genus *Cymbella* (14 species), *Diatoma* (8 species), *Cymbopleura* (7 species), *Caloneis* (4 species) and *Synedra* (4 species) contribute the most. There are 13 dominant species of diatoms in Huanglong Scenic Area. 4 species from the genus *Cymbella* have absolute advantage ($Y_{\text{total}} = 0.132$) at the genus level. At the species level, there is little difference in the dominance index of each dominant species ($0.023 \leq Y \leq 0.053$), among which the dominance index of *Diatoma vulgare* is the largest, and that of *Cymbopleura linearis* is the smallest. In terms of the diversity index, there are some differences in the Shannon-Weiner index, Simpson diversity index and Pielou index at various sampling points. As the altitude decreases, the diversity index from #1 to #8 fluctuates, rising and then falling repeatedly. This may be related to the water circulation system of Huanglong Scenic Area. The analyses of the relationship between environmental variables and diatom communities by RDA show that the eigenvalues of the first two axes are 0.43 and 0.24, respectively, explaining 67.68% of the cumulative variance of data about diatom community species. The correlation between environmental variables and diatom community structure in algal mats is $\text{T} > \text{DSi} > \text{pCO}_2 > \text{TN} > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{altitude}$, and the three environmental variables of Cl^- , NO_3^- and SO_4^{2-} are excluded because of the low correlations. The significance test of the influence degree of each factor by Monte Carlo test finds that T ($F=2.8, P=0.02$) and DSi ($F=2.3, P=0.04$) are environmental variables that significantly affect the algae community structure of the algal mats. In addition, although TN is not the most significant driving factor affecting diatoms of the algal mats in Huanglong Scenic Area, there is a trend of eutrophication in the waterbody of the scenic spot, which will affect the algal community structure, so TN may be a potential driving factor. The above conclusions can provide a basis for the establishment of the diatom species bank in Huanglong Scenic Area and the monitoring and management of the river water environment in the plateau karst area.

Key words Huanglong Scenic Area, algal mats, diatoms, community structure, driving factors, environmental variables

(编辑 张玲)