J. Lake Sci.(湖泊科学),2013,**25**(6):907-915
http://www.jlakes.org. E-mail:jlakes@niglas.ac.cn

西藏尼洋河水生生物群落时空动态及与环境因子关系:2. 着生藻类*

刘海平[1,2,3],叶少文[2],杨雪峰[4],张良松[5],钟国辉[1],何勇平[6],李钟杰[2**]
(1:西藏大学农牧学院,林芝 860000)
(2:中国科学院水生生物研究所,淡水生态与生物技术国家重点实验室,武汉 430072)
(3:中国科学院大学,北京 100049)
(4:锡林浩特市第六中学,锡林浩特 026000)
(5:福建省水产技术推广总站,福州 350003)
(6:西藏自治区林芝地区农牧局,林芝 860000)

摘　要:本文于2008-2009年按照季节调查了西藏地区尼洋河着生藻类群落的组成、丰度和多样性,并运用多元统计方法定量分析了着生藻类的空间和季节变化特征及其与主要环境因子之间的关系.结果显示,尼洋河着生藻类共计6门30科49属,其中硅藻为优势着生藻类.着生藻类的Shannon-Wiener多样性指数在尼洋河中游最高,在中上游河段和中下游河段呈下降趋势,符合中间高度膨胀(mid-altitude bulge)假说.着生藻类的总丰度、物种丰富度以及Shannon-Wiener多样性指数在尼洋河沿程不存在显著差异,总丰度在各个季节之间不存在显著差异,但物种丰富度在秋季和冬季存在显著差异,夏、秋季着生藻类的Shannon-Wiener多样性指数显著高于冬、春季.主成分分析(PCA)表明,随着海拔的升高,着生藻类的物种丰富度和总丰度呈递减趋势;典范对应分析(CCA)表明,尼洋河部分硅藻与理化因子相关联,如:双壁藻(*Diploneis*)的丰度与总磷相关联,窗纹藻(*Epithemia*)的丰度与铵态氮相关联,双菱藻属(*Surirella*)的丰度与pH值相关联;部分绿藻与理化因子相关联,如:小球藻属(*Chlorella*)、栅藻属(*Scenedesmus*)、溪菜属(*Prasiola*)的丰度与水温相关联,小椿藻(*Characium*)的丰度与硬度相关联,转板藻(*Mougeotia*)的丰度与表层溶氧、矿化度相关联,新月藻属(*Closterium*)的丰度与碱度相关联;分类回归树(CART)模型预测了尼洋河着生藻类时空分布与主要环境因子之间的定量关系,即低海拔水域的着生藻类总丰度较高海拔高,高矿化度水域的着生藻类总丰度较低矿化度的高,不能用影响尼洋河着生藻类种类和数量的环境因子来解释着生藻类的Shannon-Wiener多样性指数.这些关键环境因子对尼洋河水域着生藻类的时空变化有着重要的指示作用,建议加强对着生藻类及这些环境因子的关注,保障尼洋河水域生态环境的可持续发展.
关键词:西藏;尼洋河;着生藻类;时空动态;主成分分析;典范对应分析;分类回归树

Spatio-temporal dynamics of aquatic organism community and their relationships to environment in Niyang River, Tibet:2. periphytic algae

LIU Haiping[1,2,3], YE Shaowen[2], YANG Xuefeng[4], ZHANG Liangsong[5], ZHONG Guohui[1], HE Yongping[6] & LI Zhongjie[2]
(1: *Agricultural and Animal Husbandry College of Tibet University*, *Linzhi* 860000, *P. R. China*)
(2: *State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology*, *Institute of Hydrobiology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Wuhan* 430072, *P. R. China*)
(3: *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *P. R. China*)
(4: *NO.* 6 *Middle School Xilinhot*, *Xilinhot* 026000, *P. R. China*)
(5: *Fujian Marine Products Technical Promotion Station*, *Fuzhou* 350003, *P. R. China*)
(6: *Tibet Autonomous Region Linzhi Area Agricultural and Animal Husbandry Bureau*, *Linzhi* 860000, *P. R. China*)

Abstract: We have seasonally investigated the constitution, abundance and diversity of periphytic algae (PA) in Niyang River, the

---

* 西藏科技厅地区基金重点项目资助. 2013-01-14收稿;2013-04-28收修改稿. 刘海平,男,1981年生,博士研究生,讲师;E-mail: luihappying@163.com.
** 通信作者; E-mail: zhongjie@ihb.ac.cn.

branch of the Yarlung Zangbo River, Tibet from year of 2008 to 2009, and taken quantitative analysis on the spatio-temporal PA characteristics and their relationships with environment factors using multivariate statistics method. The results are listed as follows. Firstly, PA in Niyang River belongs to 6 phyla 30 families 49 genus, among which bacillariophyta is dominant. Secondly, Shannon-Wiener diversity pattern for Niyang River justified the theory of mid-altitude bulge, with higher Shannon-Wiener diversity index in the middle of the river. Thirdly, using Duncan comparison method to judge the difference among sampling sites and seasons for species richness, total abundance and Shannon-Wiener diversity index, there are no significant differences among four sampling sites for three indices mentioned above. In terms of sampling season, there is no significant difference for total abundance. There is significant difference between autumn and winter for species richness, and also significant difference exists between summer, autumn and winter, spring for Shannon-Wiener diversity index. Fourthly, based on the PCA method, total abundance and species richness of periphytic algae descended with the elevation ascending. Even more, based on the CCA method, portion of bacillariophyta and chlorophyta are related with environment factors. Last but not least, we predict the relationship between total PA abundance and environment factors, and the relationship between PA Shannon-Wiener diversity and environment factors based on CART method. The results reveal that PA total abundance from lower elevation of Niyang River is higher than that of higher elevation, and total abundance from higher degree of mineralization of Niyang River is lower than that in lower degree of mineralization. The environment factors that influence the PA quantity should not be applied to PA Shannon-Wiener diversity index. This paper also suggests paying close attention to PA and the environment factors mentioned above owing to their important indication function, in order to warrantee the sustainable development of Niyang River aquatorium ecology.

Keywords: Tibet; Niyang River; periphytic algae; spatio-temporal dynamic; PCA; CCA; CART

着生藻类(periphytic algae)又称为周丛藻类,是一个微型级、复合的群落,在物质循环过程中发挥着重要的作用[1].着生藻类种类和数量与其粘附的介质以及水体深度有很大的关系[2],一般来说,附植藻类和附石藻类的种类较附泥藻类丰富[1],硅藻门着生藻类与大型水生植物存在着密切的联系,非硅藻门着生藻类与大型水生植物联系较为微弱[3].着生藻类群落会随着光线以及水质理化(pH值、水温、离子组成、氯离子、总氮、总磷等)的变动表现出较为明显的时空异质性[4],因此可以利用着生藻类丰度来判别河流的水质状况[5].马沛明[6]探索性证明了以丝状藻类为主的着生藻类对氮磷具有较高的吸收率和良好的去除效果;孙巍[7]指出藻类的初始投加量与N、P营养物的去除呈正相关,磷元素可以成为着生藻类生长的限制性因子,总磷值过低时藻类生长速率降低;况琪军等[8]指出刚毛藻(*Cladophora oligoclona*)在净化污染水体、修复受损湖泊及防治水体富营养化等方面具有潜在的应用前景.鉴于着生藻类对水体生态环境的响应的差异性和敏感性,不同水域须筛选出不同的生态敏感指示着生藻类[9],从而有效推动水域生态系统健康发展.

1 实验设计和数据处理

关于研究区域概况、采样点设置、采样时间、环境因子的采集和分析和数据统计和分析等内容在文献[10]中进行了介绍,这里就不再赘述.

着生藻类的采集和分析:预先放置20 cm×20 cm的玻璃板于采样点的河道中,14 d后,用毛刷清洗玻璃板,收集附着在其上的着生藻类,用鲁哥试剂固定,带回实验室进行定量分析,每个样品观察2片,每片30个视野,鉴定到种或属[11-12].按照如下公式对着生藻类进行定量分析:

$$着生藻类=\frac{计数框面积}{显微镜视野面积\times观察视野个数}\times\frac{保存样品体积}{分析样品的体积}\times\frac{分析样品藻类的个数}{采集样品的面积} \quad (1)$$

使用Shannon-Wiener多样性指数(H')、物种丰富度、总丰度、出现频率和相对丰度来判别尼洋河着生藻类的多样性.

Shannon-Wiener多样性指数H'[13]计算公式为:

$$H' = -\sum_{i=1}^{S} p_i \ln p_i \quad (2)$$

式中,S为着生藻类种类数,p_i为着生藻类i占所有着生藻类的比例(%).

物种丰富度指某一采样点或者季节出现的物种个数.

总丰度指某一采样点或者季节单位面积出现的着生藻类个体数量(cells/cm^2).

出现频率指某一着生藻类出现的次数占所有调查样点数的百分比.

相对丰度指某一着生藻类个体数占所有物种个体数的百分比.

2 结果与分析

2.1 尼洋河着生藻类种类以及优势种

尼洋河共有着生藻类6门30科49属,包括硅藻门、蓝藻门、绿藻门、隐藻门、黄藻门和裸藻门,其中硅藻门9科21属,绿藻门12科17属,蓝藻门5科7属,裸藻门2科2属,黄藻门和隐藻门各出现1科1属(表1).

表1 尼洋河着生藻类出现频率和相对丰度

Tab. 1 Occurrence frequency and relative abundance of periphytic algae species in Niyang River

门	科	属	编号	出现频率	相对丰度
硅藻门 Bacillariophyta	圆筛科 Coscinodiscaceae	直链藻 *Melosira*	PAB1	50.00%	0.07%
		小环藻 *Cyclotella*	PAB2	43.75%	0.14%
	脆杆藻科 Fragilariaceae	针杆藻 *Synedra*	PAB3	100.00%	0.89%
		脆杆藻 *Fragilaria*	PAB4	100.00%	4.18%
		等片藻 *Diatoma*	PAB5	100.00%	5.72%
		蛾眉藻 *Ceratoneis*	PAB6	93.75%	0.87%
	舟形藻科 Naviculaceae	双壁藻 *Diploneis*	PAB7	6.25%	0.02%
		美壁藻 *Caloneis*	PAB9	31.25%	0.01%
		羽纹藻 *Pinnularia*	PAB11	12.50%	0.00%
		舟形藻 *Navicula*	PAB12	93.75%	3.58%
	桥弯藻科 Cymbellaceae	双眉藻 *Amphora*	PAB13	37.50%	0.05%
		桥弯藻 *Cymbella*	PAB14	100.00%	18.38%
	异极藻科 Gomphonemaceae	双楔藻 *Didymosphenia*	PAB15	43.75%	0.06%
		异极藻 *Gomphonema*	PAB16	100.00%	7.48%
	曲壳藻科 Achnanthaceae	卵形藻 *Cocconeis*	PAB17	62.50%	0.14%
		真卵形藻 *Eucocconeis*	PAB18	81.25%	0.43%
		曲壳藻 *Achnanthes*	PAB19	100.00%	49.60%
	窗纹藻科 Epithemiaceae	窗纹藻 *Epithemia*	PAB20	18.75%	0.01%
	菱板藻科 Nitzschiaceae	菱形藻 *Nitzschia*	PAB21	100.00%	6.65%
	双菱藻科 Surirellaceae	波缘藻 *Cymatopleura*	PAB22	6.25%	0.00%
		双菱藻 *Surirella*	PAB23	37.50%	0.16%
绿藻门 Chlorophyta	衣藻科 Chlamydomonadaceae	扁孢藻 *Platymona*	PACH1	6.25%	0.01%
		衣藻 *Chlamydomonas*	PACH2	6.25%	0.00%
	小椿藻科 Characiaceae	小椿藻 *Characium*	PACH3	43.75%	0.03%
	绿球藻科 Chlorococaceae	绿球藻 *Chlorococcum*	PACH4	25.00%	0.08%
	小球藻科 Chlorellaceae	小球藻 *Chlorella*	PACH5	62.50%	0.11%
	栅藻科 Scenedsmaceae	栅藻 *Scenedesmus*	PACH6	12.50%	0.01%
	丝藻科 Ulotrichaceae	丝藻 *Ulothrix*	PACH7	56.25%	0.10%
		克里藻 *Klebsormidium*	PACH8	6.25%	0.08%
	微孢藻科 Microsporaceae	微孢藻 *Microspora*	PACH9	6.25%	0.00%
	胶毛藻科 Chaetophoraceae	毛枝藻 *Stigeoclonium*	PACH11	6.25%	0.00%
	溪菜科 Prasiolaceae	溪菜 *Prasiola*	PACH12	25.00%	0.02%
	鞘藻科 Oedogoniaceae	鞘藻 *Oedogonium*	PACH13	6.25%	0.00%
	双星藻科 Zygnemataceae	链枝藻 *Ctenocladu*	PACH10	6.25%	0.02%
		转板藻 *Mougeotia*	PACH14	12.50%	0.03%
		水绵 *Spirogyra*	PACH15	12.50%	0.00%
	鼓藻科 Desmidiaceae	新月藻 *Closterium*	PACH16	6.25%	0.03%
		鼓藻 *Cosmarium*	PACH17	6.25%	0.00%
蓝藻门 Cyanophyta	色球藻科 Chroococcaceae	平裂藻 *Merismopedia*	PAC1	6.25%	0.00%
		蓝纤维藻 *Dactylococcopsis*	PAC2	31.25%	0.03%
	胶须藻科 Rivulariaceae	尖头藻 *Raphidiopsis*	PAC3	6.25%	0.02%
	颤藻科 Osicillatoriaceae	颤藻 *Oscollatoria*	PAC4	68.75%	0.15%
		胶鞘藻 *Phormidium*	PAC5	81.25%	0.56%
	念珠藻科 Nostocaceae	念珠藻 *Nostoc*	PAC6	12.50%	0.00%
	颤藻科 Osicillatoriaceae	微鞘藻 *Microcolus*	PAC7	6.25%	0.02%
隐藻门 Cryptophyta	隐鞭藻科 Cryptmonadaceae	隐藻 *Cryptomonas*	PACR	43.75%	0.22%
黄藻门 Xanthophyta	黄丝藻科 Tribonemataceae	黄丝藻 *Tribonena*	PAX	6.25%	0.00%
裸藻门 Euglenophyta	裸藻科 Euglenaceae	囊裸藻 *Trachelomonas*	PAE1	43.75%	0.04%
	楔胞藻科 Sphenomonadaceae	楔胞藻 *Sphenomonas*	PAE2	6.25%	0.00%

将着生藻类出现频率在 90% 以上的定义为优势种,以此可知,尼洋河着生藻类优势类群以硅藻为主(表 1),脆杆藻科有 4 属,包括脆杆藻属、等片藻属、针杆藻属、蛾眉藻属,舟形藻科的舟形藻属,桥弯藻科的桥弯藻属,异极藻科的异极藻属,曲壳藻科的曲壳藻属,菱板藻科的菱形藻属,如上几种硅藻相对丰度之和达97.35%,其中以曲壳藻属相对丰度最大,达 49.60%,其实是桥弯藻属和菱形藻属,分别占 18.38% 和 6.65%.

2.2 尼洋河着生藻类时空变化特征

用 PCA 方法分析尼洋河着生藻类时空特征(图 1),采样点Ⅳ囊括的着生藻类最多,其次依次为采样点Ⅲ、Ⅱ和Ⅰ. 可以初步判断,随着海拔的升高,着生藻类的物种丰富度和总丰度呈递减趋势. 季节方面,以冬季囊括的着生藻类最多,接下来是春季、夏季和秋季. 在底质方面,砂石底质较黏土底质囊括的着生藻类较多.

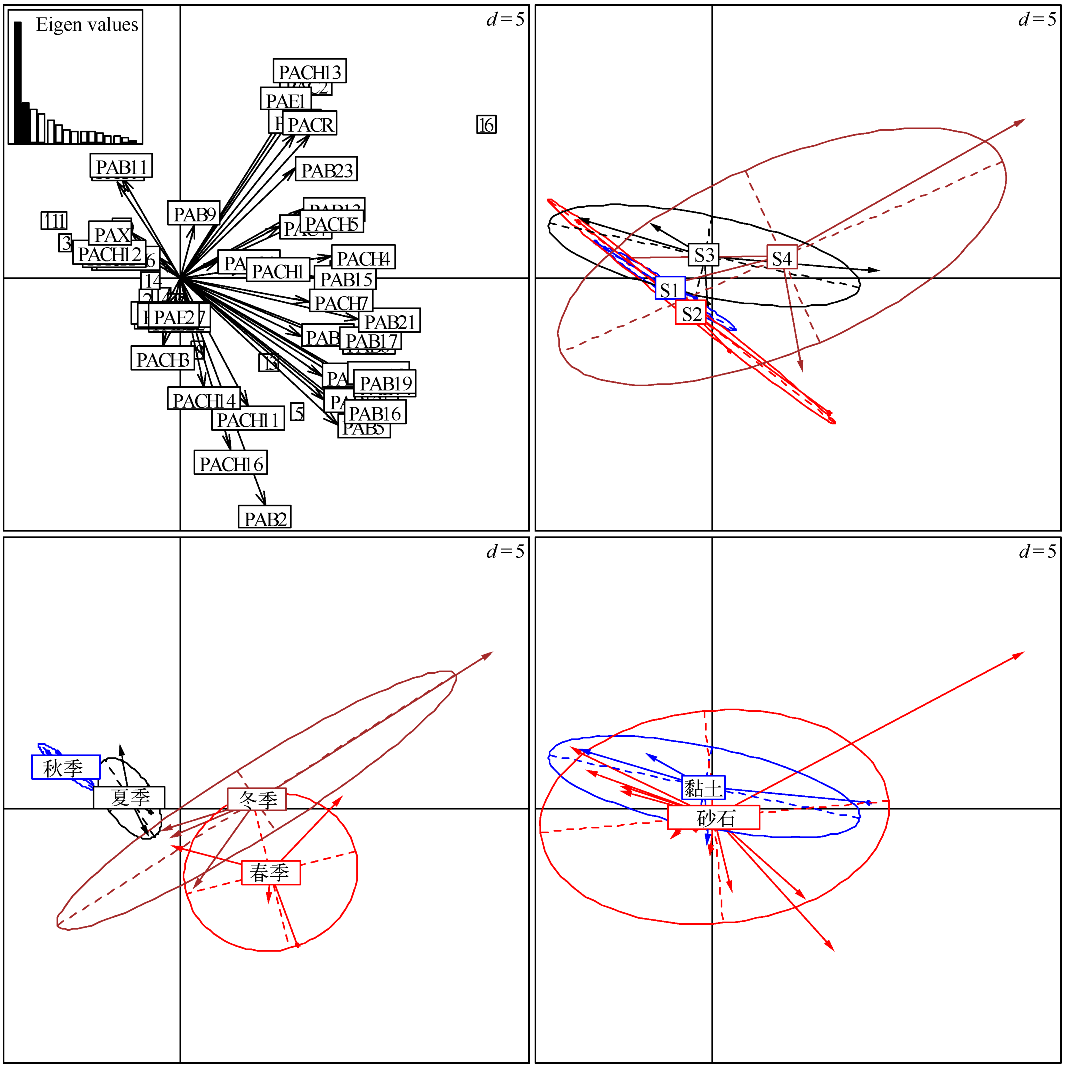

图 1 基于 PCA 分析尼洋河着生藻类时空特征(图中数字为样点标记,其中 1～4 分别代表采样点Ⅰ的春、夏、秋、冬;5～8 分别代表采样点Ⅱ的春、夏、秋、冬;9～12 分别代表采样点Ⅲ的春、夏、秋、冬;13～16 分别代表采样点Ⅳ的春、夏、秋、冬. S1 为采样点Ⅰ,S2 为采样点Ⅱ,S3 为采样点Ⅲ,S4 为采样点Ⅳ. 第一主成分解释率为 34.6%(图中左上图第一条黑色柱所示),第二主成分解释率为 11.5%(图中左上图第二条黑色柱所示))

Fig. 1 Spatio-temporal characteristics for periphytic algae in Niyang River based on PCA

为了更好地区分尼洋河各个采样点和季节着生藻类群落的时空特征以及差异性,采用 Duncan 检验法对各采样点以及季节之间着生藻类物种丰富度、总丰度和 Shannon-Wiener 多样性指数进行差异性分析. 结果显示,尼洋河着生藻类物种丰富度、总丰度和 Shannon-Wiener 多样性指数在各个采样点之间均无显著差异($P>0.05$),尼洋河中下游较中上游着生藻类物种丰富度大,交汇处(采样点Ⅱ为巴河和尼洋河交汇处,采样点Ⅳ为尼洋河和雅鲁藏布江交汇处)的着生藻类总丰度较其他河段(采样点Ⅰ和Ⅲ)大,以尼洋河中游为分界,中上游河段和中下游河段着生藻类 Shannon-Wiener 多样性指数均呈下降趋势(图 2).

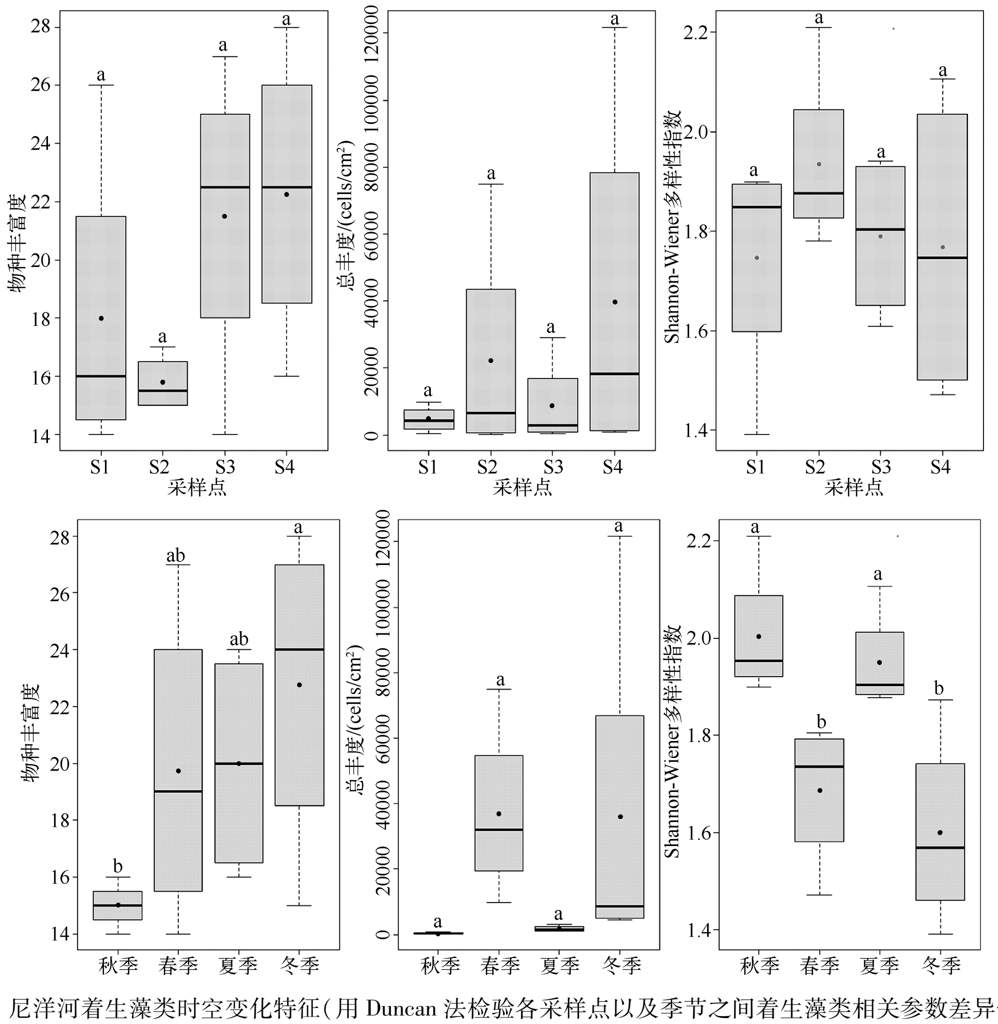

图 2 尼洋河着生藻类时空变化特征(用 Duncan 法检验各采样点以及季节之间着生藻类相关参数差异性,包括总丰度、物种丰富度和 Shannon-Wiener 多样性指数,不同字母表示差异达显著水平($P<0.05$))

Fig. 2 Spatio-temporal dynamic characteristics for periphytic algae in Niyang River

秋、冬季着生藻类物种丰富度存在显著差异($P<0.05$),并且以秋、春、夏和冬季顺序物种丰富度逐渐递增,着生藻类总丰度在各个季节之间不存在显著差异($P>0.05$),以冬、春季的总丰度最高,夏、秋季与冬、春季着生藻类 Shannon-Wiener 多样性指数存在显著差异($P<0.05$)(图 2). 夏、秋季的着生藻类 Shannon-Wiener 多样性指数较高,在 1.8 以上,冬、春季的着生藻类 Shannon-Wiener 多样性指数较低,在 1.8 以下.

2.3 尼洋河着生藻类与环境因子关系及关键预测因子

为了更加清晰地阐释尼洋河着生藻类与环境因子之间的关系,我们将着生藻类分为 3 个类群与 9 项环境指标进行 CCA 分析,这 3 个类群是硅藻、绿藻以及以蓝藻、隐藻、裸藻、黄藻为一类的藻类,9 项环境指标

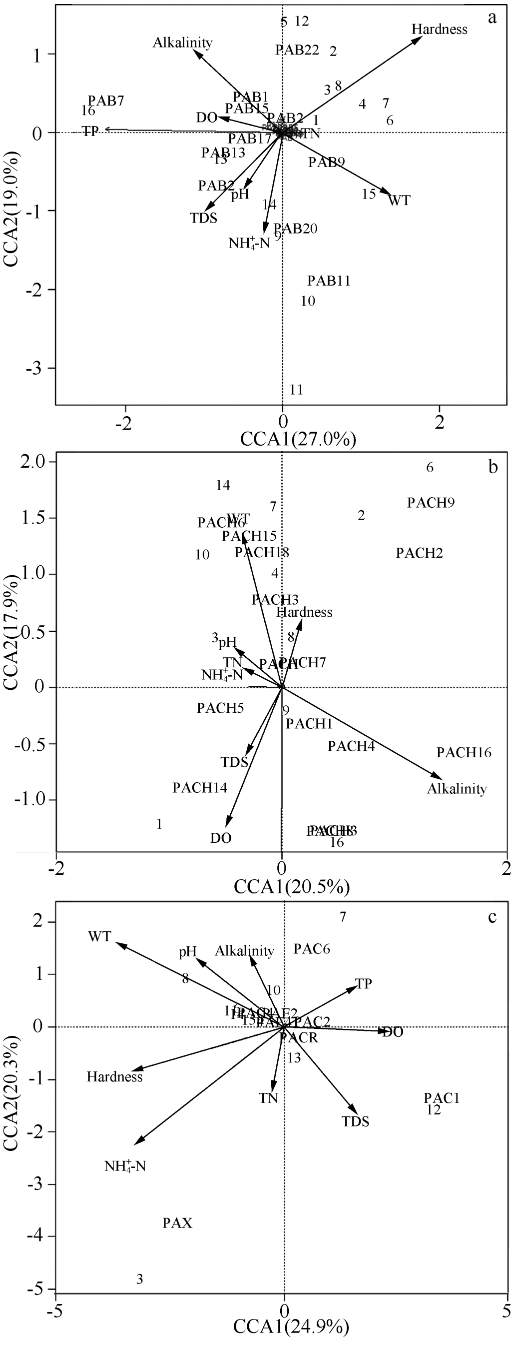

图3 基于CCA方法分析尼洋河着生硅藻(a)、绿藻(b)和其它藻类(c)的丰度、环境因子、样点之间的关系

Fig. 3 Relationships among abundance of periphytic algae(a: Bacillariophyta; b: Chlorophyta; C: others), environment factors and sampling sites in Niyang River based on CCA

包括表层水温、表层pH、硬度、矿化度、表层溶解氧、总氮、铵态氮、总磷、总碱度(图3)，对于硅藻门，尼洋河部分硅藻与理化因子相关联，如：双壁藻属(*Diploneis*)的丰度与总磷相关联，窗纹藻属(*Epithemia*)的丰度与铵态氮相关联，双菱藻属(*Surirella*)的丰度与pH值相关联；绿藻门部分藻类丰度与理化因子相关联，如：小球藻属(*Chlorella*)、栅藻属(*Scenedesmus*)、溪菜属(*Prasiola*)的丰度与水温相关联，小椿藻属(*Characium*)的丰度与硬度相关联，转板藻属(*Mougeotia*)的丰度与溶解氧、矿化度相关联，新月藻属(*Closterium*)的丰度与碱度相关联. 蓝藻门、隐藻门、裸藻门、黄藻门的藻类分布与尼洋河各河段以及理化因子3者之间关联性均较弱.

用CART预测了尼洋河着生藻类总丰度与环境因子之间的关系(图4a). 当水温≥12.98℃时，尼洋河着生藻类总丰度为266.66 cells/cm^2；当水温介于12.4～12.98℃之间时，尼洋河着生藻类总丰度为967.28 cells/cm^2；当水温<12.4℃且为冬季时，尼洋河着生藻类总丰度为4442.41 cells/cm^2；当水温<12.4℃且非冬季，同时海拔<3068 m时，尼洋河着生藻类总丰度为29127.25 cells/cm^2；当水温<12.4℃且非冬季，同时海拔≥3068 m、矿化度≥92.06 mg/L时，尼洋河着生藻类总丰度为363.63 cells/cm^2；当水温<12.4℃且非冬季，同时海拔≥3068 m、矿化度<92.06 mg/L时，尼洋河着生藻类总丰度为203.02 cells/cm^2. 综上所述，在一定的水温范围之内(12.98℃≥水温≥12.4℃)，较低水温时的着生藻类总丰度比较高水温的高；低海拔水域的着生藻类总丰度较高海拔高，高矿化度水域的着生藻类总丰度较低矿化度的高.

用CART预测了尼洋河着生藻类Shannon-Wiener多样性指数与环境因子之间的关系(图4b). 当水温<8.12℃且非冬季时，尼洋河着生藻类Shannon-Wiener多样性指数为1.529；当水温<8.12℃且非冬季时，尼洋河着生藻类Shannon-Wiener多样性指数为1.471；当水温≥8.12℃且矿化度<83.35 mg/L时，尼洋河着生藻类Shannon-Wiener多样性指数为1.878；当水温≥8.12℃且矿化度≥83.35 mg/L，同时底质为黏土时，尼洋河着生藻类Shannon-Wiener多样性指数为1.918；当水温≥8.12℃且矿化度≥83.35 mg/L，同时底质为砂石、硬度≥2.57°DH时，尼洋河着生藻类Shannon-Wiener多样性指数为1.780；当水温≥8.12℃且矿化度≥83.35 mg/L，同时底质为砂石、硬度<2.57°DH时，尼洋河着生藻

类 Shannon-Wiener 多样性指数为 1.391. 综上所述,在水温低于 8.12℃时,尼洋河着生藻类冬季的 Shannon-Wiener 多样性指数较春季的高;另外,尼洋河底质为黏土的着生藻类 Shannon-Wiener 多样性指数较砂石的高;尼洋河高硬度河段的着生藻类 Shannon-Wiener 多样性指数较低硬度河段高.

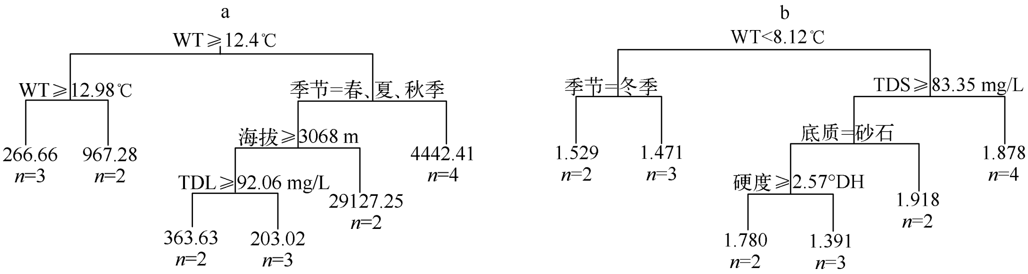

图 4 基于分类回归树分析尼洋河着生藻类总丰度(a)、Shannon-Wiener 多样性指数(b)与环境因子之间的关系(分支左侧代表条件成立,右侧代表相反条件成立)

Fig. 4 Relationships between total abundance(a) and Shannon-Wiener diversity index(b) of periphytic algae and environment factors in Niyang River based on CART

3 讨论

3.1 影响着生藻类种类和数量的因子

海拔决定了一个地区的温度和光照等环境因素的变化,属于宏观尺度的环境因子,通常情况下,由于海拔的升高、水域温度降低、冰冻期延长[14-15],物种的丰富度也随之降低[16],优势种群随之发生改变,并且随着海拔的上升,水温对着生藻类群落结构的影响愈发重要[17]. 通常情况下,着生藻类物种丰富度与水温呈正相关[18],不同着生藻类群落对温度的响应机制有所区别,如运动型(motile ecological guild)的硅藻对温度较为敏感,而喜静水型(low profile guild)以及喜流水型(high profile guild)的硅藻则受总氮、总磷等理化因子驱动作用更多一些[4]. 本研究中,尼洋河中下游较中上游(低海拔)着生藻类物种丰富度大,尼洋河交汇处(低海拔)的着生藻类总丰度较其他河段大.

随着水温的降低,尤其到了冬季,较雨季而言,着生藻类生物量呈现增加趋势[19],加之在这段时间,降雨量或者融雪量极大地减少,河流处于处于枯水期,流速降低,流速会直接影响到着生藻类的群落结构. 由于水体的冲刷作用,流速快的地方,着生藻类生物量较低[1],某些硅藻门着生藻类,如 *Didymosphenia geminata* 更偏好于生存在具有稳定水流的环境之中[20]. 另外水流速度与河床的底质存在着相关性. 就尼洋河而言,但凡流速快的地方,底质为砂石,流速慢的地方,底质则为黏土或者细砂,往往粗糙的基质上着生的着生藻类物种丰富度较光滑基质上的大,而总丰度则没有明显的区别[21]. 因此,本研究中尼洋河底质为黏土河段的着生藻类物种丰富度和总丰度较底质为砂石的河段大.

值得注意的是,鱼类的习性以及摄食行为也会对着生藻类群落结构产生影响. 研究资料表明,西藏不乏以着生藻类为食的本土鱼类,如异齿裂腹鱼[22]、拉萨裸裂尻[23]等,以及以着生藻类为食的外来鱼,如鲫鱼[24],从一定程度上讲,着生藻类的丰度是影响以其为食的西藏鱼类种群数量较为关键的生物因子[25]. 不容忽视的是,随着水温的降低,鱼类的摄食行为也在减弱,在以着生藻类为食的鱼类所生存的水域,着生藻类群落结构在冬季也会因此产生响应.

本实验中,矿化度是根据水体的残渣量得来的,总氮和总磷是残渣量重要的组成成分,也是影响着生藻类群落结构的重要水环境因子[26],总磷浓度迅速上升会导致叶绿素 a 含量和着生藻类数量急剧增加[27],在较高的照度,较高的氮、磷浓度的水体中,着生藻类总丰度也比较高[28],部分非硅藻门着生藻类与总氮或者总磷存在负相关[18],当总氮和总磷浓度均较高时,无法明确判断其与着生藻类生物量的关系[19],鉴于一些着生藻类自身具有固氮作用,磷元素可以成为着生藻类生长的限制性因子,总磷值过低时藻类生长速率会降低[7]. 本研究中,尼洋河高矿化度河段的着生藻类总丰度较低矿化度的高.

残渣量还与水体的浑浊度有着密切的联系,4—7 月为尼洋河涨水期,水体较其他时间浑浊,光线变弱,有资料表明,光线对着生藻类的生物量有着重要的影响,随着光线的减弱,着生藻类的生物量也在减弱[29]. 本文中,尼洋河冬季以着生藻类为食的西藏本土鱼类以及外来鱼类摄食行为减弱,同时,此阶段尼洋河水体能够沐浴充足的光线,着生藻类总丰度和物种丰富度有所增加.

3.2 影响着生藻类多样性的因子

影响着生藻类多样性的因子包括水流、水深、浊度、溶解氧和水温等[30],值得强调的是,由于空间的异质性,导致了环境条件的多样化,生态系统中着生藻类多样性主要依存于空间的异质性[31],流域上游的着生藻类 Shannon-Wiener 多样性指数较其他河段低[32]. 中间高度膨胀(mid-altitude bulge)理论指出,往往在中间海拔区域内,物种的 Shannon-Wiener 多样性指数较高,在低海拔或者高海拔区域内,物种的 Shannon-Wiener 多样性指数较低[33]. 本研究中,尼洋河着生藻类 Shannon-Wiener 多样性指数符合中间高度膨胀理论,即:尼洋河中游着生藻类 Shannon-Wiener 多样性指数最大,中上游河段和中下游河段呈下降趋势.

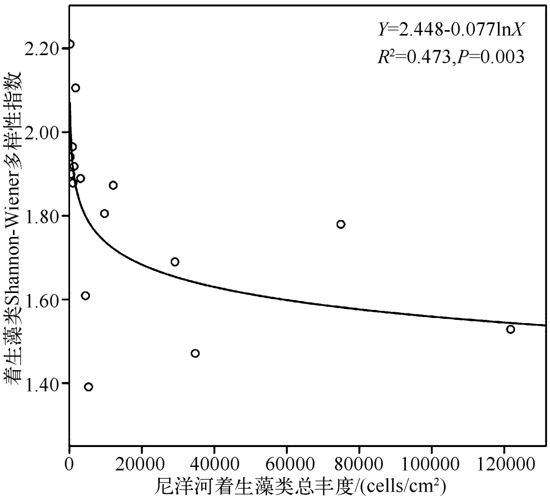

图 5 尼洋河着生藻类 Shannon-Wiener 多样性指数与总丰度关系拟合

Fig. 5 Relationship fitting between Shannon-Wiener diversity index and total abundance of periphytic algae in Niyang River

另外,着生藻类的 Shannon-Wiener 多样性指数也可以折射出流域的污染情况以及季节的差异性等信息,如夏季着生藻类的 Shannon-Wiener 多样性指数较低[34],往往随着生藻类生物量增加,着生藻类的 Shannon-Wiener 多样性指数有降低的趋势[31]. 鉴于此,为了更清楚地阐释 Shannon-Wiener 多样性指数和总丰度之间的关系,拟合了对数函数,即:

$$Y = a + b \cdot \ln X \tag{3}$$

式中,a、b 为常量,Y 和 X 是变量. 结果如图 5 所示,拟合效果较好. 同时,因拟合的函数为对数函数,尼洋河着生藻类总丰度与 Shannon-Wiener 多样性指数之间不存在线性相关,而是与 Shannon-Wiener 多样性指数的自然对数呈线性负相关,说明不能用影响着生藻类种类和数量的因子来解释着生藻类的多样性.

4 参考文献

[1] 刘建康等. 高级水生生物学. 北京:科学出版社,1999:260-277.

[2] Yang H, Flower RJ. Effects of light and substrate on the benthic diatoms in an oligotrophic lake: a comparison between natural and artificial substrates. *J Phycol*, 2012, **48**(5): 1166-1177.

[3] Schneider SC, Lawniczak AE, Picinska-Faltynowicz J *et al*. Diatoms and non-diatom benthic algae give redundant information? Results from a case study in Poland. *Limnologica*, 2012, **42**(3): 204-211.

[4] Stenger-Kovacs C, Lengyel E, Crossetti LO *et al*. Diatom ecological guilds as indicators of temporally changing stressors and disturbances in the small Torna-stream, Hungary. *Ecol Indic*, 2013, **24**: 138-147.

[5] 凌旌瑾,顾咏洁,许春梅等. 黄浦江和苏州河的着生藻类与水质因子关系的多元分析. 环境科学研究,2008,**21**(5):184-189.

[6] 马沛明. 利用着生藻类去除 N、P 营养物质的研究[学位论文]. 武汉:中国科学院水生生物研究所,2005.

[7] 孙 巍. 着生藻类去除微污染水体中氮磷的实验研究[学位论文]. 成都:西南交通大学,2008.

[8] 况琪军,凌晓欢,马沛明等. 着生刚毛藻处理富营养化湖泊水. 武汉大学学报:理学版,2007,**53**(2):213-218.

[9] 袁信芳,施华宏,王晓蓉. 太湖着生藻类的时空分布特征. 农业环境科学学报,2006,**25**(4):1035-1040.

[10] 刘海平,叶少文,杨雪峰等. 西藏尼洋河水生生物群落时空动态及与环境因子关系:1. 浮游植物. 湖泊科学,2013,**25**(5):695-706.

[11] 朱蕙忠,陈嘉佑. 中国西藏硅藻. 北京:科学出版社,2000.
[12] 胡鸿钧,李尧英,魏心印等. 中国淡水藻类. 上海:上海科学技术出版社,1980.
[13] Shannon EE, Weaver W. The mathematical theory of communication. London: University Illinois Press, 1949: 125.
[14] Rundle SD, Jenkins A, Ormerod SJ. Macroinvertebrate communities in streams inHimalaya, Nepal. *Freshwater Biol*, 1993, **30**(1): 169-180.
[15] Ao M, Alfred JRB, Gupta A. Studies on some lotic systems in the north-eastern hill regions ofIndia. *Limnologica*, 1984, **15**(1): 135-141.
[16] Suren AM. Macroinvertebrate communities of streams in western Nepal: Effects of altitude and land use. *Freshwater Biol*, 1994, **32**(2): 323-336.
[17] Eli-Anne L, Stein W, Johansen *et al*. Periphyton in running waters- long-term studies of natural variation. *Hydrobiologia*, 2004, **521**(1/2/3): 63-86.
[18] Stancheva R, Fetscher AE, Sheath RG. A novel quantification method for stream-inhabiting, non-diatom benthic algae, and its application in bioassessment. *Hydrobiologia*, 2012, **684**(1): 225-239.
[19] Kohler TJ, Heatherly TN, El-Sabaawi RW *et al*. Flow, nutrients, and light availability influence Neotropical epilithon biomass and stoichiometry. *Freshwater Science*, 2012, **31**(4): 1019-1034.
[20] Kirkwood AE, Shea T, Jackson LJ *et al*. Didymosphenia geminata in two Alberta headwater rivers: an emerging invasive species that challenges conventional views on algal bloom development. *Can J Fish Aquat Sci*, 2007, **64**(12): 1703-1709.
[21] Schneck F, Schwarzbold A, Melo A. Substrate roughness affects stream benthic algal diversity, assemblage composition, and nestedness. *J N Am Benthol Soc*, 2011, **30**(4): 1049-1056.
[22] 季 强. 异齿裂腹鱼食性的初步研究. 水利渔业,2008,**28**(3):51-53,82.
[23] 杨学峰. 拉萨裸裂尻鱼的食性及食物选择的研究[学位论文]. 武汉:华中农业大学,2011.
[24] 陈 锋,陈毅峰. 拉萨河鱼类调查及保护. 水生生物学报,2010,**34**(2):278-285.
[25] 季 强. 六种裂腹鱼类摄食消化器官形态学与食性的研究[学位论文]. 武汉:华中农业大学,2008.
[26] 文 航,蔡佳亮,苏 玉等. 滇池流域入湖河流丰水期着生藻类群落特征及其与水环境因子的关系. 湖泊科学,2011,**23**(1):40-48.
[27] 王朝晖,胡 韧,谷阳光等. 珠江广州河段着生藻类的群落结构及其与水质的关系. 环境科学学报,2009,**29**(7):1510-1516.
[28] Sanches LF, Guariento RD, Caliman A *et al*. Effects of nutrients and light on periphytic biomass and nutrient stoichiometry in a tropical black-water aquatic ecosystem. *Hydrobiologia*, 2011, **669**(1): 35-44.
[29] Bowes MJ, Ings NL, McCall SJ *et al*. Nutrient and light limitation of periphyton in the River Thames: Implications for catchment management. *Sci of the Total Environ*, 2012, **434**(SI): 201-212.
[30] Sharma RC, Bahuguna M, Chauhan P. Periphytonic diversity in Bhagirathi: Preimpoundment study of Tehri Dam Reservoir. *J Environ Sci Eng*, 2008, **50**(4): 255-262.
[31] Saravia LA, Giorgi A, Momo F. Multifractal spatial patterns and diversity in an ecological succession. *PloS One*, 2012, **7**(3): 1-8.
[32] Mihalic KC, Vilicic D, Ahel M *et al*. Periphytic algae development in the upper reach of the Zrmanja Estuary (Eastern Adriatic Coast). *Vie Milieu*, 2008, **58**(3/4): 203-213.
[33] 贺金生,陈伟烈. 陆地植物群落物种多样性的梯度变化特征. 生态学报,1996,**7**(1):91-99.
[34] Morin S, Duong TT, Dabrin A *et al*. Long-term survey of heavy-metal pollution, biofilm contamination and diatom community structure in the Riou Mort watershed, South-West France. *Environ Pollut*, 2008, **151**(3): 532-542.