

雅砻江(锦屏段)及其主要支流底栖藻类 群落与环境因子的关系

吴乃成¹, 唐 涛¹, 黎道丰¹, 刘瑞秋¹, 曹 明^{1,2}, 蔡庆华^{1,*}

(1. 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; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 分别于 2004 年 5 月和 11 月对雅砻江(锦屏段)及其主要支流 22 个采样点的底栖藻类进行研究。共采获底栖藻类 150 种, 分属 3 门(硅藻、绿藻和蓝藻), 37 属。其中硅藻门占绝对优势(96.5%), 线性曲壳藻(*Achnanthes linearis*) 和 *Achnanthes deflexa* 为绝对优势种, 其相对丰富度分别为 35.3% 和 11.0%。细端菱形藻(*Nitzschia dissipata*) 和小型异极藻(*Gomphonema parvulum*) 是雅砻江(锦屏段)干流的优势种, 而线性曲壳藻、扁圆卵形藻(*Cocconeis placentula*) 和 *Achnanthes deflexa* 是其他支流的优势种。基于底栖藻类的物种组成和相对丰度, 对两次的采样点进行去势对应分析(DCA), 结果发现: 两次采样雅砻江(锦屏段)干流样点与其他支流样点在 DCA 第一轴上得到了很好的分化, 表明研究区域底栖藻类群落存在明显的空间差异, 这主要是由干流的特殊生境所致。典范对应分析(CCA)结果显示不同季节影响底栖藻类群落结构的环境因子有所差异。总磷(TP)是 5 月份影响底栖藻类空间分布的最主要因素; 11 月份影响底栖藻类空间分布的最主要环境因子为氨氮(NH₄-N)和海拔(Elevation)。

关键词: 底栖藻类; 雅砻江; 群落结构; 去势对应分析; 典范对应分析

文章编号: 1000-0933(2009)04-1697-07 中图分类号: Q178 文献标识码: A

Benthic algal communities in Jinping reach of Yalong River and its main tributaries in relation to environmental variables

WU Nai-Cheng¹, TANG Tao¹, LI Dao-Feng¹, LIU Rui-Qiu¹, CAO Ming^{1,2}, CAI Qing-Hua^{1,*}

1 State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 1697 ~ 1703.

Abstract: An investigation was carried out on the benthic algal communities at 22 sites in the Jinping reach of Yalong River and its main tributaries in May and November 2004, aimed to study the relationships between benthic algal distribution and environmental variables. A total of 150 taxa (mostly to species level) in 37 genera were observed, which belonged to Bacillariophyta, Chlorophyta and Cyanophyta. Diatoms comprised 96.5% of the total taxa. *Achnanthes linearis* and *Achnanthes deflexa* were the most abundant species, and the relative abundances were 35.3% and 11.0% of the total abundance, respectively. In May and November, *Nitzschia dissipata* and *Gomphonema parvulum* were the dominant species in Jinping reach of Yalong River, while *Achnanthes linearis*, *Cocconeis placentula* and *Achnanthes deflexa* dominated in its tributaries. Based on the species composition and their relative abundance, detrended correspondence analysis (DCA) showed that sites belonging to Yalong River and its tributaries were well separated on DCA axis 1. This may be explained by the special habitats of Yalong River like high velocity, wide channel width. Canonical correspondence analysis (CCA) on the relationships between benthic algal community structure and environmental variables indicated that in May, TP was the

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(30330140); 国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(2002CD412310); 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX2-YW-427); 国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2005AA60101003)

收稿日期: 2007-12-12; 修订日期: 2008-03-13

致谢: 非常感谢薛俊增、渠晓东、叶麟、邵美玲、傅小城及徐耀阳对本工作的帮助和支持。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qhcai@ihb.ac.cn

main environmental variable affecting the benthic algal distribution, while in November, $\text{NH}_4\text{-N}$ and elevation were the main ones.

Key Words: benthic algae; Yalong River; community structure; DCA; CCA

底栖藻类(benthic algae, periphyton or attached algae)作为河流的主要初级生产者,其生长位置相对固定、生活环境多样,并具有很高的物种多样性,且不同物种对环境的耐受性差异很大,因此,整个藻类群落可以提供丰富的生境状况信息。此外,藻类还具有生活史较短,对环境变化反映敏感,受干扰后群落恢复快^[1]以及藻类标本易于保存、分类学特征明显等特点。这些因素共同决定了它们成为河流生态学研究的主要对象^[2]。在欧洲、北美等地区,硅藻用于环境监测已经有很长的历史^[3],但国内有关底栖藻类与环境关系的研究相对较少。

雅砻江是金沙江的第一大支流,其水能资源蕴藏量居四川之首,因此流域内的水梯级开发严重。本研究地点位于锦屏二级电站所在区域。电站修建后,大量的江水被引入涵洞中到达锦屏二级电站,该区域的江水流量将急剧减小,将对这一河段的水生生物造成一定影响。因此在这一河段内开展水生生物多样性的调查,对于生物多样性和河流生态系统完整性的保护,以及减小水电开发对于水生生物多样性的影响,使河流的使用更加合理化都具有重要意义。分别于2004年5月和11月对雅砻江(锦屏段)及其主要支流的底栖藻类进行研究,旨在通过分析该区域的物种组成、空间分布特征及其与环境因子的关系,以期为该区域合理开发水电及河流管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

雅砻江发源于青海省玉树县境内的巴颜喀拉山南麓,干流全长1571 km,纵贯川西,流域面积约13万 km^2 ^[4],其干流在小金河口以下,因受锦屏山阻挡,流向骤然拐向东北,至九龙河口附近又转向南流至巴折,形成长达150 km的著名雅砻江大河湾,湾道颈部最短距离仅16 km,水头落差高达310 m。大河湾地区属川西高原气候区,主要受西风环流及西南季风影响,干湿季分明,每年11月至翌年4月份为干季,5~10月份为雨季。

雅砻江流域内干流有180条,流域面积约 $1.36 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。流域东西两侧分别与大渡河、金沙江相邻,北与黄河上游分界。全流域呈南北向条带状,河系为羽状发育,东、北、西三面大部分为海拔4000 m以上高山包围,南面为滇东北高原,分水岭高程约2000 m。锦屏二级电站建成后,九龙河将是锦屏二级下游主要的水源补充(图1),因此将九龙河也作为重点调查对象进行了研究。

1.2 样点设置

雅砻江(锦屏段)及其主要支流共设有22个样点(图1),分别于2004年5月和11月进行底栖藻类采集。其中,雅砻江干流共设有12个样点(YL1~YL12),九龙河及其两条主要支流(伍须海河与踏卡河)共有9个样点(JL1~JL7, WX和TK)。此外,在江口河也有1个样点(JK)。由于道路施工,5月份未能对雅砻江干流的4个样点(YL9~YL12)进行采集。

1.3 采样、鉴定及主要理化因子的测定

按照美国环保局(EPA)的方法^[5],在各样点随机选取3~5块该区域内主要类型的石块。现场用尼龙刷将藻类刷下,并用无藻水冲洗石块多次,以保证藻类尽量被刷下来。记录刷液总体积后,一部分装入50 ml标本瓶中,并立即用福尔马林进行固定,带回实验室参照文献对藻类进行分类、鉴定^[6~9];另取部分刷液移入另外一个100 ml塑料瓶中,0.8 μm 微孔滤膜抽滤后丙酮萃取,用UV-1601紫外分光光度计在750, 665, 645 nm和630 nm波段测定叶绿素a含量^[10]。取样石块在现场擦干后用保鲜膜包裹测定其表面积^[11],根据经验取70%作为底栖藻类有效生长面积。

以 HACH 便携式 pH 计对水温、pH、电导率进行现场测定;参照“中华人民共和国国家标准-地面水环境质量标准 (GHZB1-1999)”,对硬度、碱度、 SiO_2 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、TN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、TP 等进行测定。坐标、海拔高度(Elevation)用 GPS 315 现场测量;用 LJD 型打印式流速流量仪测定样点流速,卷尺测定样点河段的水面宽度和平均水深。

1.4 数据分析

本研究中方差分析使用的软件为 SPSS 11.5,去势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA)及典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)使用软件 CANOCO(Version 4.5)。

2 结果与讨论

2.1 群落结构特征

本研究共观察到底栖藻类 150 种(包括变种),分属硅藻、绿藻、蓝藻 3 个门,计 37 个属。对于两次采样的所有样点来说,硅藻门占绝对优势(96.5%),线性曲壳藻(*Achnanthes linearis*)和 *Achnanthes deflexa* 为绝对优势种,其相对丰富度分别为 35.3% 和 11.0%。总体上,雅砻江干流的物种组成与其他支流的差异较大,细端菱形藻(*Nitzschia dissipata*)和小型异极藻(*Gomphonema parvulum*)均是雅砻江(锦屏段)干流的优势种(表 1);在其他支流(九龙河、江口河、踏卡河、伍须海河),5 月份的优势种为线性曲壳藻和扁圆卵形藻(*Cocconeis placentula*),而 11 月份则是线性曲壳藻和 *Achnanthes deflexa*(表 1)。小型异极藻和细端菱形藻均是典型的流水物种^[12],分别属于有柄生长型(stalked)和俯伏生长型(prostrate)硅藻^[13],这两种生长型硅藻容易受到水文变化的影响^[14],表明雅砻江干流水文波动较大;线性曲壳藻是较好水质的指示物种^[15],它的优势地位表明其它支流区域的水质良好。

从底栖藻类密度来看,雅砻江干流的底栖藻类密度(5 月份 $3.49 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$;11 月份 $1.85 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$)显著低于其他支流(5 月份 $1.10 \times 10^9 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$;11 月份 $1.15 \times 10^{10} \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$)(单因素方差分析, $p < 0.01$);物种丰富度也表现出干流(5 月份 21.5;11 月份 20.4)显著低于其他支流(5 月份 26.5;11 月份 26.9)($p < 0.05$)。相对雅砻江干流,九龙河和江口河属于小型溪流,大部分河道均可涉水而过,因此其优势类群代表了整个河道底栖藻类的特征。而雅砻江干流水流湍急,采样局限于河岸边水流较缓区域,同时,较大的流速(多年平均流量 $1220 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)不利于底栖藻类的生长^[16],所以雅砻江(锦屏段)干流的优势种、密度及物种丰富度等与其他支流差异较大。

从时间上来看,两次采样底栖藻类优势类群的组成发生了一定变化(表 1),藻类密度及底栖藻类叶绿素 *a* 含量在 11 月份($5.22 \times 10^9 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$, $13.88 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$)也均高于 5 月份($6.13 \times 10^8 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$, $2.47 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$)。虽然 11 月份水温(9.74°C)较 5 月份(15.18°C)低,但 11 月份为雅砻江的干季,洪水少有发生,因此生境相对稳定、有利于藻类的生长^[17]。

在属水平上,本研究区域所观察到的物种与长江的另外两条支流(云南的冈曲河和湖北的香溪河)很相似,主要以曲壳藻(*Achnanthes*)、卵形藻(*Cocconeis*)、桥弯藻(*Cymbella*)、脆杆藻(*Fragilaria*)、异极藻(*Gomphonema*)为主^[18, 19]。Wang 等^[13]在美国 Interior Plateau Ecoregion 地区、Leland 和 Porter^[20]在 Illinois 河上游、Komulaynen^[21]在俄罗斯西北部也均发现了类似物种。然而,本区域的物种丰富度、均匀度及 Shannon-

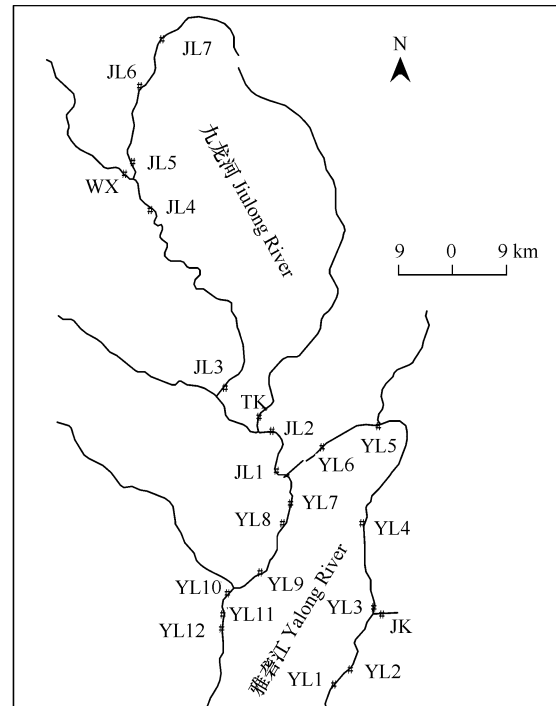


图 1 雅砻江水系图及样点分布图

Fig. 1 Yalong River system and locations of the sampling sites

Wiener 多样性指数(23.8、0.70、2.26)高于受人为干扰严重的香溪河(17.8、0.65、1.38),但低于生境保持良好的冈曲河(42.3、0.74、2.72)。这些差异可以解释为不同河流所处的地理位置及生境特征的不同^[22]。

表 1 雅砻江(锦屏段)及其主要支流底栖藻类的优势种

Table 1 Dominant species in Yalong River and its main tributaries

	雅砻江(锦屏段)干流 Jinping reach of Yalong River	其他支流 Other tributaries	所有样点 All sampling sites
5 月 May	细端菱形藻 <i>Nitzschia dissipata</i> (18.9%) *	线形曲壳藻 <i>Achnanthes linearis</i> (42.4%)	线形曲壳藻 <i>Achnanthes linearis</i> (42.3%)
	小型异极藻 <i>Gomphonema parvulum</i> (11.0%)	扁圆卵形藻 <i>Cocconeis placentula</i> (13.8%)	扁圆卵形藻 <i>Cocconeis placentula</i> (13.7%)
	线形曲壳藻 <i>Achnanthes linearis</i> (8.9%)	披针曲壳藻 <i>Achnanthes lanceolata</i> (5.8%)	披针曲壳藻 <i>Achnanthes lanceolata</i> (5.8%)
	细端菱形藻 <i>Nitzschia dissipata</i> (20.1%)	线形曲壳藻 <i>Achnanthes linearis</i> (34.7%)	线形曲壳藻 <i>Achnanthes linearis</i> (34.7%)
11 月 Nov.	小型异极藻 <i>Gomphonema parvulum</i> (18.4%)	<i>Achnanthes deflexa</i> (12.0%)	<i>Achnanthes deflexa</i> (12.0%)
	肘状针杆藻窄变种 <i>Synedra ulna</i> var. <i>contracta</i> (6.3%)	细端菱形藻 <i>Nitzschia dissipata</i> (8.1%)	细端菱形藻 <i>Nitzschia dissipata</i> (8.1%)

* 括号内数字表示相对丰富度 The numbers in brackets were the relative abundance

2.2 底栖藻类的空间分布特征

根据两次采样各样本底栖藻类物种组成特点及各分类单元的密度,对每次的采样点(5 月份 18 个,11 月份 22 个)共计 40 个样本进行 DCA 分析。结果表明:两次采样的底栖藻类群落结构排序图非常相似,即雅砻江(锦屏段)干流样点与其他支流样点在 DCA 第一轴上得到了很好的分化(图 2)。5 月份,所有 18 个样点被分为 2 组(图 2A):九龙河流域(包括 TK 和 WX)和江口河(JK)样点聚在一组,雅砻江干流样点(YL1 ~ YL8)成为一组;11 月份,雅砻江干流样点(YL1 ~ YL12)聚成一组,九龙河流域样点(JL1 ~ JL7)与 WX、TK、JK 组成第二组,但 WX、TK、JK 三者距离较近(图 2B)。上述分析再次表明:研究区域底栖藻类群落存在明显的空间差异,主要表现为雅砻江(锦屏段)干流的底栖藻类群落组成与其他支流样点的物种组成差异较大,这是由于干流的特殊生境所致(如流速较大、河面较宽等)。

2.3 底栖藻类与环境因子的关系

在 CCA 分析之前,为消除物种丰富度极端值对分类得分的影响,先对数据进行对数转换,并降低稀有物种的权重,以便使研究主要集中在丰富度高的物种上。鉴于环境因子的相关性,具有较高的偏相关系数($r > 0.80$)和变异波动指数(variance inflation factor)(> 20)的变量都被排除在外^[23]。

CCA 结果显示总磷(TP)是 5 月份影响底栖藻类空间分布的最主要因素($p = 0.002$),与 CCA 第一轴呈正相关($r = 0.87$)(图 3A);而氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)和海拔是 11 月份影响底栖藻类空间分布的最主要因素(p 分别为 0.002 和 0.006),其中, $\text{NH}_4\text{-N}$ 与 CCA 第一轴呈显著负相关($r = -0.76$),海拔与 CCA 第一轴呈显著正相关($r = 0.56$)(图 3B)。作为河流的主要营养元素,N、P 浓度是影响底栖藻类群落变动的主要因子^[20],本文的研究与 Christie 和 Smol^[24]及 Schönfelder 等^[25]的研究相似,他们也发现 TP 是影响底栖藻类空间分布的最主要因素之一($p < 0.05$)。氨氮同样作为营养元素决定底栖藻类的生产能力,并可以通过食物链的传递作用,决定以藻类等为食的刮食者和沉积物颗粒收集者的密度^[26],从而反作用于底栖藻类的分布。同时,氨氮在河流中可能对河流生物产生直接或协同的毒性效应^[27]。

海拔综合反映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,因此从根本上决定了底栖藻类的群落组成。March 等^[28]也发现海拔因素是影响底栖藻类分布的重要因子。然而,不同季节影响底栖藻类群落结构的环境因子有所差异,原因可能如下:(1)各个环境因子随季节变化而变化(如营养元素及海拔所决定的水温、光照等),某些环境因子在某一时期是限制因子,随季节的变动其限制性可能减弱或

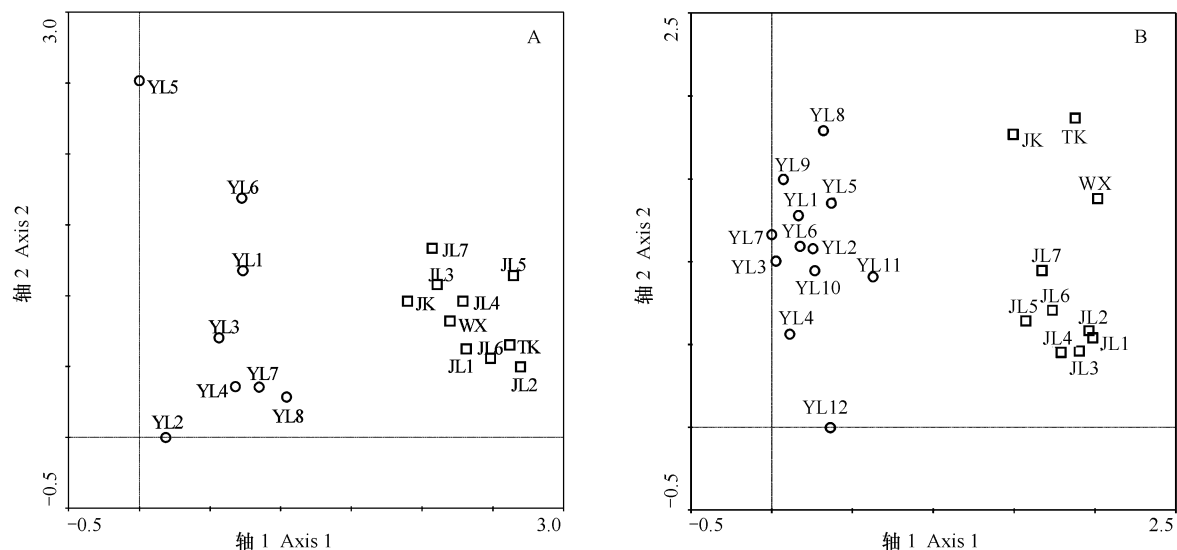


图2 雅砻江及其主要支流底栖藻类采样点的 DCA 排序图

Fig. 2 Distribution of sampling sites of Yalong River and its main tributaries in the DCA axis

A: 2004 年 5 月; B: 2004 年 11 月; ○: 雅鲁江干流样点; □: 其他支流样点 A: May 2004; B: Nov. 2004; ○: sites of Yalong River; □: sites of other tributaries

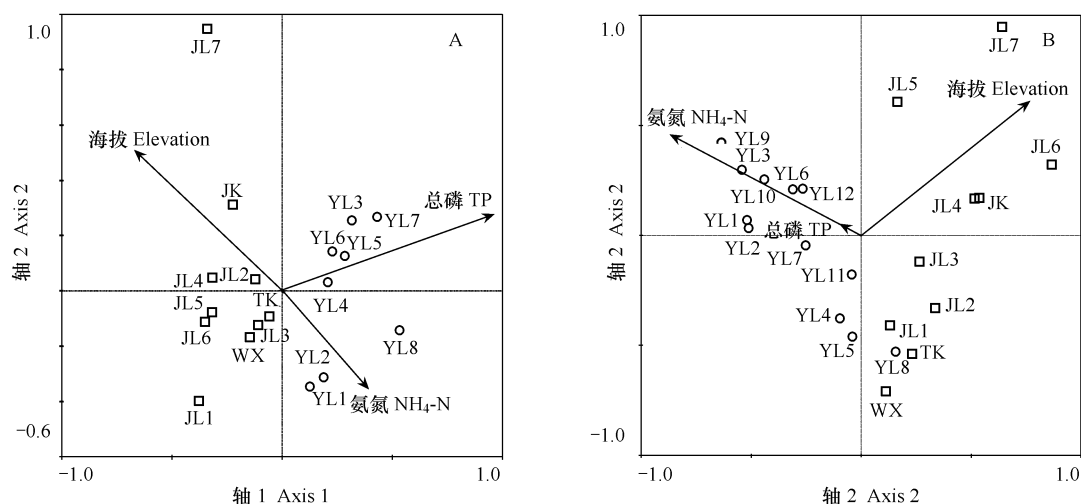


图3 雅砻江及其主要支流底栖藻类采样点与环境因子的 CCA 排序图

Fig. 3 CCA ordination diagrams of benthic algal communities between the sites and environmental variables

A: 2004 年 5 月; B: 2004 年 11 月; ○: 雅砻江干流样点; □: 其他支流样点 A: May 2004; B: Nov. 2004; ○: sites of Yalong River; □: sites of other tributaries

增加,并对底栖藻类的生长产生较大影响;(2)各类群生物的生活史不同,在不同季节对营养物质及物理因子的需求也不相同,这就决定了不同时期各种类群的消长;(3)底栖藻类不同类群及同一类群的不同发育阶段对不同的环境因子具有不同程度的适应性和需求。

3 结论

共观察到底栖藻类 150 种,分属硅藻、绿藻、蓝藻 3 个门,计 37 个属。硅藻门占绝对优势(96.5%),线性曲壳藻(*Achnanthes linearis*)和 *Achnanthes deflexa* 为绝对优势种。细端菱形藻(*Nitzschia dissipata*)和小型异极藻(*Gomphonema parvulum*)是雅砻江(锦屏段)干流的优势种,而线性曲壳藻(*Achnanthes linearis*)、扁圆卵形藻

(*Cocconeis placentula*) 和 *Achnanthes deflexa* 是其他支流的优势种。

DCA 分析发现:两次采样雅砻江(锦屏段)干流样点与其他支流样点在 DCA 第一轴上得到了很好的分化,表明研究区域底栖藻类群落存在明显的空间差异,这主要是由干流的特殊生境所致。

CCA 结果显示不同季节影响底栖藻类群落结构的环境因子有所差异。总磷(TP)是 5 月份影响底栖藻类空间分布的最主要因素;而氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)和海拔(Elevation)是 11 月份影响底栖藻类空间分布的最主要因素。

References:

- [1] Hambrook J A. Bioassessment of stream-water quality using benthic and planktonic algae collected along an Urban Intensity gradient in the Eastern Cornbelt Plains Ecoregion, Ohio, USA. *Journal of Phycology*, 2002, 38: 14—15.
- [2] Lowe R L, Pan Y D. Benthic Algal Communities as Biological Monitors. In: Stevenson R J, Bothwell M L, Lowe R L. eds. *Algal Ecology: Freshwater Benthic Ecosystem*. San Diego: Academic Press, 1996. 705—739.
- [3] Stevenson R J, Smol J P. Use of algae in environmental assessment. In: Wehr J D and Sheath R G. eds. *Freshwater algae of North America: ecology and classification*. New York: Academic Press, 2002. 775—804.
- [4] Duan B, Deng Q X, Ye L. The study of fish in the lower reaches of the Yalong River. *Journal of Sichuan Teachers College (Natural Science)*, 1995, 16(4): 347—351.
- [5] Lazorchak J M, Klemm D, Peck D V. Environmental Monitoring and Assessment Program -Surface Waters: Field Operations and Methods for Measuring the Ecological Condition of Wadeable Streams. EPA/620/R-94/004F, 1998. 119—132.
- [6] Hu H J, Li R Y, Wei Y X, *et al.* *Freshwater Algae in China*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1980.
- [7] The Comprehensive Scientific Expedition to the Qinghai-Xizang Plateau, Academia sinica. The algae of the Xizang Plateau. Beijing: Science Press, 1992.
- [8] Zhang Z S, Huang X F. *Research Methods for Freshwater Plankton*. Beijing: Science Press, 1991.
- [9] Zhu H Z, Chen J Y. *Bacillariophyta of the Xizang Plateau*. Beijing: Science Press, 2000.
- [10] Huang X F, ed. *Survey, observation and Analysis of Lake Ecosystem*. Beijing: China Standards Press, 1999. 77—79.
- [11] Naiman R J, Sedell J R. Relationship between metabolic parameters and stream order in Oregon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, 37: 834—847.
- [12] Hoagland K D, Roemer S C, Rosowski J R. Colonization and community structure of two periphyton assemblages, with emphasis on the diatoms (bacillariophyceae). *Amer. J. Bot.*, 1982, 69(2): 188—213.
- [13] Wang Y K, Stevenson R J, Metzmeier L. Development and evaluation of a diatom-based index of biotic integrity for the Interior Plateau Ecoregion, USA. *Journal of the North American Benthological Society*, 2005, 24(4): 990—1008.
- [14] Stevenson R J. An introduction to algal ecology in freshwater benthic habitats. In: Stevenson R J, Bothwell M L, Lowe R L. eds. *Algal Ecology: Freshwater Benthic Ecosystems*. New York: Academic Press, 1996. 3—30.
- [15] Yoshitake S, Fukushima H. Estimation of recovery of water quality in an urban water system by the diatom flora. In: Kociolek J P. ed. *Proceedings of the 11th International Diatom Symposium*. San Francisco: California Academy of Sciences, 1990.
- [16] Flinders C A, Hart D D, Charles D F, *et al.* River restoration via pulsed flows: effects of increased water velocity on benthic algae. The NABS Annual meeting, La Crosse, Wisconsin. 2001.
- [17] Tang T, Qu X D, Li D F, *et al.* Benthic algae of the Xiangxi River, China. *Journal of Freshwater Ecology*, 2004, 19(4): 597—604.
- [18] Tang T, Cai Q H, Liu R Q, *et al.* Distribution of Epilithic Algae in Xiangxi River System and Their Relationships with Environmental Factors. *Journal of Freshwater Ecology*, 2002, 17(3): 345—352.
- [19] Wu N C, Cai Q H, Tang T, *et al.* Benthic algae of the Gangqu River, Shangrila, China. *Journal of Freshwater Ecology*, 2007, 27: 151—153.
- [20] Leland H V, Porter S D. Distribution of benthic algae in the upper Illinois River basin in relation to geology and land use. *Freshwater Biology*, 2000, 44: 279—301.
- [21] Komulainen S. Use of phytoperiphyton to assess water quality in north-western Russian rivers. *Journal of Applied Phycology*, 2002, 14: 57—62.
- [22] Wu N C, Tang T, Qu X D, *et al.* Spatial distribution of benthic algae in the Gangqu River, Shangrila, China. *Aquatic Ecology*, 2007, doi: 10.

1007/s10452-007-9153-8.

- [23] Tang T, Cai Q H, Liu J K. Using epilithic diatom communities to assess ecological condition of Xiangxi River system. *Environmental monitoring and Assessment*, 2006, 112: 347—361.
- [24] Christie C E, Smol J P. Diatom assemblages as indicators of lake trophic status in Southeastern Ontario lakes. *Journal of Phycology*, 1993, 29: 575—586.
- [25] Schönfelder I, Gelbrecht J, Schönfelder J, *et al.* Relationships between littoral diatoms and their chemical environment in Northeastern German lakes and rivers. *Journal of Phycology*, 2002, 38: 66—89.
- [26] Qu X D, Cao M, Shao M L, *et al.* Macrobenthos in Jinping reach of Yalongjiang River and its main tributaries. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1): 158—162.
- [27] Newman R M, Perry J A. The combined effects of chlorine and ammonia on litter breakdown in outdoor experimental streams. *Hydrobiologia*, 1989, 184: 69—78.
- [28] March J G, Pringle C P, Townsend M J, *et al.* Effects of freshwater shrimp assemblages on benthic communities along an altitudinal gradient of a tropical island stream. *Freshwater Biology*, 2002, 47: 377—390.

参考文献:

- [4] 段彪, 邓其祥, 叶林. 雅砻江下游渔获物研究. *四川师范学院学报(自然科学版)*, 1995, 16(4): 347~351.
- [6] 胡鸿钧, 李尧英, 魏印心, 等. 中国淡水藻类. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- [7] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏硅藻. 北京: 科学出版社, 1992.
- [8] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.
- [9] 朱蕙忠, 陈嘉佑. 中国西藏硅藻. 北京: 科学出版社, 2000.
- [10] 黄祥飞主编. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 1999. 77~79.
- [26] 渠晓东, 曹明, 邵美玲, 等. 雅砻江(锦屏段)及其主要支流的大型底栖动物. *应用生态学报*, 2007, 18(1): 158~162.