

长江和澜沧江源区夏季浮游植物分布特征研究

李欢^{1,2}, 赵伟华^{1,2}, 赵良元^{1,2}, 李伟^{1,2}, 曹小欢^{1,2}

(1. 长江水利委员会长江科学院 流域水环境研究所, 湖北 武汉 430010;

2. 流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 鉴于长江和澜沧江源区水生态环境问题日益突出的现状, 而浮游植物是水生态系统物质循环和能量流动的重要环节, 探究流域浮游植物的分布特征与变化规律可为水生态环境评价与综合整治提供科学依据。为了解长江和澜沧江源区浮游植物资源现状, 通过对比分析2012—2016年长江和澜沧江源区浮游植物特征, 并采用冗余分析(RDA)揭示浮游植物群落结构与9种环境因子间的关系。结果显示, 长江源区共采集到浮游植物4门、44种(属), 其中蓝藻门5种(属), 绿藻门9种(属), 硅藻门29种(属), 隐藻门1种(属), 当曲和直门达2014年的浮游植物种类数最多, 为18种, 五道梁2012年种类数最少, 仅有6种; 浮游植物密度为 $2.53 \times 10^4 \sim 94.00 \times 10^4$ 个/L, 最小值出现在2015年的当曲样点, 最大值为2016年的唐古拉山样点; Shannon多样性指数、Margalef丰富度指数和Pielou均匀度指数分别为0.86~3.34、0.34~0.96、0.33~0.83, 最小值为2012年的五道梁样点。澜沧江源区共采集到浮游植物4门、32种(属), 其中蓝藻门5种(属), 绿藻门6种(属), 硅藻门20种(属), 隐藻门1种(属), 扎曲2014年鉴定出种类数最多, 为14种; 浮游植物密度为 $2.23 \times 10^4 \sim 38.64 \times 10^4$ 个/L, 最小值为扎那曲(2015年), 最大值为囊谦(2012年); Shannon、Margalef、Pielou多样性指数分别为0.86~3.21、0.36~0.78、0.25~0.91。长江和澜沧江源区的浮游植物密度总体较低, 水体处于贫营养状态, 浮游植物均匀度指数较高, 种类分布较为均匀, 群落结构较稳定。研究表明, 温度、浊度、流速和含沙量是影响长江和澜沧江源区浮游植物群落结构的主要环境因子。

关键词: 长江; 澜沧江; 浮游植物; 群落结构; 生物多样性

中图分类号: Q178.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2022)03-0077-09

长江和澜沧江源区位于青藏高原腹地, 素有“中华水塔”的美誉, 是国家重要的生态安全屏障, 在全国生态文明建设中具有重要地位, 同时也是气候和生态环境变化的敏感区和脆弱区。长江源区包括长江上游通天河楚玛尔河口以上的各个水系, 平均海拔4 760 m, 流域面积约13.82万km²。长江源区水系包括北源楚玛尔河水系、正源沱沱河水系、南源当曲水系以及干流通天河水系, 主要支流有日阿尺曲、莫曲、牙曲、北麓河、科欠曲、色吾曲、聂恰曲、登额曲、德曲、益曲等, 共有大小湖泊11 037个, 湖水面积约1 027 km²。澜沧江江源段称扎曲, 青海省境内干流河长454 km, 集水面积3.7万km²。澜沧江源区河网密集, 较大的一级支流有扎那曲、阿涌、布当曲、沙曲、班涌、各若涌、宁曲、子曲、昂曲等(徐平等, 2019)。近50年来, 在全球气候变化和人类活动的双重影响下, 源区内雪线上升、冰川退缩、水土流失、荒漠化和草地退化、水质恶化等环境问题凸显, 已直接威胁区域生态安全(罗小

勇和唐文坚, 2003; 韩晓军等, 2012)。因此, 需要高度重视长江和澜沧江源区的生态环境问题。浮游植物具有个体小、繁殖快、种类多、数量大及分布广泛的特点, 是主要的初级生产力, 处于生态系统食物链的基础环节, 对生态系统的物质循环和能量流动起着重要的作用; 此外, 浮游植物种群结构对水质变化非常敏感, 因而常常被用作水质变化的指示物种(Crossetti, 2008; 杨文等, 2014)。

由于长江和澜沧江源区地域位置特殊, 恶劣的自然条件加上交通不便和高寒缺氧, 源区成为水生态环境研究的薄弱区与研究“高地”。近年来, 已有学者开展了江源地区浮游植物研究(殷大聪等, 2017; 韩诤等, 2019), 但目前已有的研究还缺乏连续调查数据, 不能全面反映长江和澜沧江源区浮游植物群落时空分布特征, 开展长江和澜沧江源区浮游植物调查具有重要意义。本研究于2012—2016年夏季对长江和澜沧江源区进行了浮游植物调查, 分析其时空分布特征及其多样性, 评价了该流域的水环境质量, 旨在为该区域浮游植物的分类研究积累基础数据, 同时也为生态环境评价与综合整治提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样时间及样点设置

2012—2016年夏季对长江和澜沧江源区的调查时间及断面设置如表1和图1。按照从上游至下游的

收稿日期: 2020-12-03 修回日期: 2022-03-12

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费-江源地区水循环及水生态环境演变与适应性保护研究(CKSF2019292/SH)。

作者简介: 李欢, 1988年生, 女, 硕士研究生, 研究方向为浮游植物生态学。E-mail: lihuan@mail.crsri.cn

通信作者: 赵伟华, 1982年生, 男, 博士研究生, 主要从事水生生物研究。E-mail: zwh820305zwh@163.com

沿程顺序以及人类可以到达和开展调查的河段处设置采样点,由于人力和物力的限制,每年采样点可能有所不同。

表 1 调查时间及样点设置

Tab.1 Survey time and sampling site settings

河源	采样时间	样点设置
沱沱河	2012-07	唐古拉山
	2016-06	
通天河	2012-07	直门达
	2014-07	
	2015-07	
楚玛尔河	2012-07	五道梁
	2016-06	
当曲	2014-07	当曲 1、当曲 2、当曲 3 当曲 2
	2015-07	
扎曲	2012-07	杂多、囊谦 杂多、囊谦、扎阿曲、扎曲 杂多、囊谦、扎那曲 杂多
	2014-07	
	2015-07	
	2016-06	

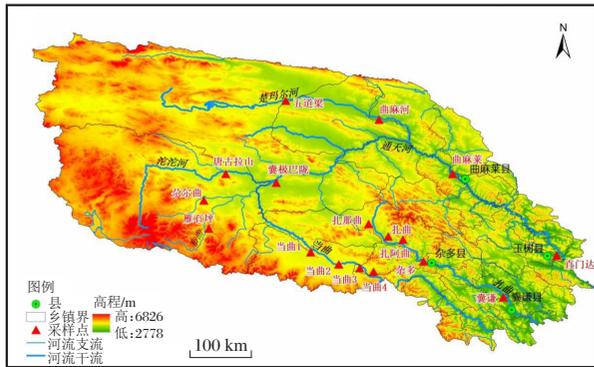


图 1 长江和澜沧江源区浮游植物调查样点分布

Fig.1 Sampling site locations

1.2 样品采集与指标测定

浮游植物分别采集定量和定性样品,采样方法参照《水和废水监测分析方法》(王心芳等,2002)。鉴定方法参照《中国淡水藻类系统、分类及生态》(胡鸿钧和魏印心,2006),采用视野计数法进行鉴定,尽量鉴定到种,无法鉴定到种的则鉴定到属。

现场监测的水质指标包括水温(WT)、pH、溶解氧(DO)、浊度(Tur)等,采用多功能水质参数分析仪(YSI EXO2)进行测试,流速(FV)采用直读式流速仪(FP211)测定。其他水质指标用有机玻璃采水器采集表层水样 1 L 装入聚乙烯塑料瓶中,带回实验室测定总氮(TN)、硝酸盐(Nit)、总磷(TP)、含沙量(San)。采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636-2012)测定总氮含量,采用钼酸铵分

光光度法(GB 11893-1989)测定总磷含量,硝酸盐采用紫外分光光度法(HJ/T 346-2007)测定,含沙量参照河流悬移质泥沙测验规范(GB/T 50159-2015)进行测量。

1.3 多样性分析与数据统计

分析各断面浮游植物的种类组成,计算细胞密度、优势度和生物多样性。浮游植物生物多样性分别计算 Shannon 多样性指数(H)、Margalef 丰富度指数(D)和 Pielou 均匀度指数(J)(Reynold,1984;秦娇娇和王艳,2014)。采用标准多元统计分析测试环境因子对浮游植物群落结构的影响。环境变量通过 $\ln(x+1)$ 或平方根转化以满足数据的正态分布和增加数据的同质性。首先采用降趋对应分析(DCA)确定浮游植物群落结构是适合线性分析还是单峰梯度分析。如果 DCA 结果小于 3,采用线性模型(RDA)分析;大于 3 则选择单峰模型(CCA)分析。本研究中,DCA 小于 3,因而采用 RDA 分析。分析软件使用 CANOCO4.5。

2 结果

2.1 水环境因子

长江及澜沧江源区 9 个采样点的水温、溶解氧、浊度等环境因子的测定结果见表 2。

2.2 浮游植物种类组成

长江源区共检出浮游植物 4 门、44 种(属);其中蓝藻门 5 种(属)、占 11.36%,硅藻门 29 种(属)、占 65.91%,绿藻门 9 种(属)、占 20.46%,隐藻门 1 种、占 2.27%。种类数最多的为当曲(2014 年)和直门达(2014 年),均为 18 种(属),五道梁(2012 年)鉴定出种类数最少,为 6 种(属)(图 2-a)。长江源区优势种为桥弯藻(*Cymbella* sp.)(优势度均值 0.31)和舟形藻(*Navicula* sp.)(优势度均值 0.24)。

澜沧江源区共检出浮游植物 4 门、32 种(属);其中蓝藻门 5 种(属)、占 15.63%,硅藻门 20 种(属)、占 62.5%,绿藻门 6 种(属)、占 18.75%,隐藻门 1 种、占 3.12%(图 2-b)。扎曲(2014 年)种类最多,为 14 种(属)。澜沧江源区优势种为桥弯藻(优势度均值 0.36)和等片藻(*Diatoma* sp.)(优势度均值 0.21)。

长江和澜沧江源区浮游植物名录见表 3。出现频率较高的藻类有桥弯藻和针杆藻(*Synedra* sp.),出现了 17 次;其次为脆杆藻(*Fragilaria* sp.),出现了 14 次;舟形藻、异极藻(*Gomphonema* sp.)出现了 12 次,曲壳藻(*Achnanthes* sp.)为 11 次,弧型蛾眉藻(*Cerato-*

表2 长江及澜沧江源区河流环境因子测定

Tab.2 Environmental factors in the source regions of the Yangtze River and Lancang River

源区	样点	采样时间	环境因子								
			WT/ °C	pH	DO/ mg.L ⁻¹	Tur/ NTU	FV/ m.s ⁻¹	San/ kg.m ⁻³	TN/ mg.L ⁻¹	Nit/ mg.L ⁻¹	TP/ mg.L ⁻¹
长江	唐古拉山	2012-07	8.90	8.47	6.00	60.30	1.56	0.39	0.61	0.60	0.07
		2016-06	7.40	8.31	7.83	61.89	0.23	0.11	0.40	0.32	0.03
	当曲	2014-07	11.27	8.54	6.51	72.88	1.90	0.14	0.35	0.29	0.03
		2015-07	13.33	8.57	6.90	38.94	0.88	0.15	0.37	0.21	0.07
	五道梁	2012-07	10.80	8.49	4.80	156.89	1.24	0.61	0.51	0.48	0.05
		2016-06	7.10	8.34	9.68	269.78	1.13	1.33	0.46	0.31	0.03
	直门达	2012-07	10.10	8.32	6.79	216.78	1.98	0.88	0.93	0.72	0.04
		2014-07	18.20	8.54	6.54	202.78	2.00	0.24	0.74	0.65	0.02
		2015-07	15.40	8.10	7.10	251.60	2.12	1.87	0.68	0.48	0.02
澜沧江	扎那曲	2015-07	11.30	8.57	6.64	449.20	2.50	0.67	0.68	0.57	0.07
	扎曲	2014-07	12.80	8.56	6.86	184.20	1.75	0.24	0.78	0.70	0.08
	扎阿曲	2014-07	13.10	8.68	6.74	584.90	1.60	0.23	0.64	0.58	0.06
		2012-07	11.80	8.31	7.02	854.70	1.14	0.68	0.58	0.47	0.05
	杂多	2014-07	12.41	8.41	6.95	985.40	1.75	0.24	0.78	0.64	0.07
		2015-07	14.83	8.74	7.01	841.20	1.55	0.34	0.72	0.58	0.07
		2016-06	9.69	8.33	6.95	972.50	2.68	0.80	0.65	0.49	0.05
	囊谦	2012-07	8.70	8.21	7.04	397.60	1.80	0.47	0.28	0.21	0.03
		2014-07	13.30	8.44	6.92	459.61	2.40	0.69	0.31	0.14	0.02
		2015-07	15.65	8.29	7.12	398.00	1.00	0.12	0.21	0.18	0.02

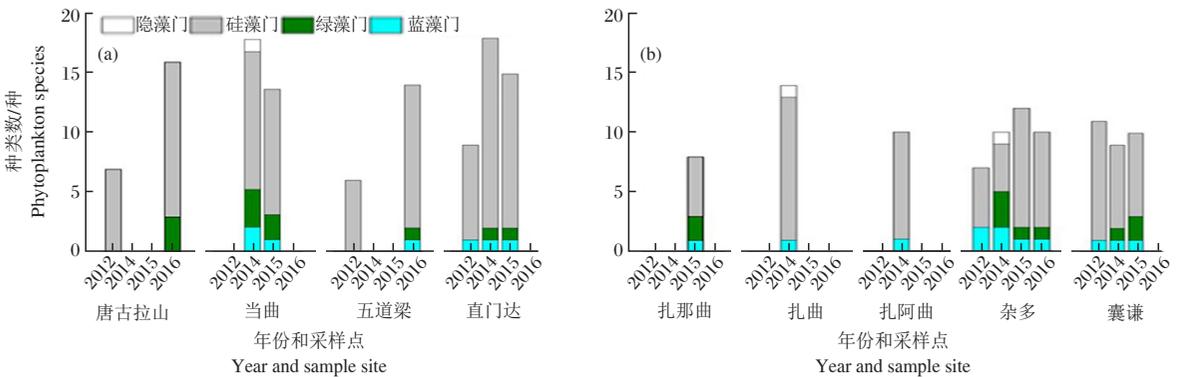


图2 长江(a)和澜沧江(b)源区浮游植物种类数量

Fig.2 Species number in each phytoplankton taxa in the source regions of the Yangtze River (a) and Lancang River (b)

neis arcus)和羽纹藻(Pinnularia sp.)出现10次。

2.3 浮游植物细胞密度及群落结构

唐古拉山浮游植物密度变化为 $21.62 \times 10^4 \sim 94.00 \times 10^4$ 个/L, 硅藻占优势。2012年只检出了硅藻, 2016年绿藻门密度为 1.50×10^4 个/L。当曲为 $2.53 \times 10^4 \sim 48.86 \times 10^4$ 个/L, 2014年蓝藻门密度为 1.03×10^4 个/L, 绿藻门为 1.28×10^4 个/L, 硅藻门为 46.26×10^4 个/L, 隐藻门为 0.29×10^4 个/L, 2015年蓝

藻门密度为 0.39×10^4 个/L, 绿藻门为 0.26×10^4 个/L, 硅藻门为 1.88×10^4 个/L。五道梁为 $11.89 \times 10^4 \sim 64.50 \times 10^4$ 个/L, 硅藻占优势。直门达为 $3.62 \times 10^4 \sim 46.48 \times 10^4$ 个/L, 最大值为2012年, 蓝藻门密度为 25.94×10^4 个/L, 硅藻门 20.54×10^4 个/L, 蓝藻占优势, 而2014年和2015年均均为硅藻占优势。长江源区浮游植物密度最高的为唐古拉山(2016年), 最低的为当曲(2015年)(图3-a)。

表 3 浮游植物名录
Tab.3 Phytoplankton species list

物种	唐古拉山	当曲	五道梁	直门达	扎那曲	扎曲	扎阿曲	杂多	囊谦
螺旋藻 <i>Spirulina</i> sp.		*							
美丽颤藻 <i>Oscillatoria formosa</i>		#	-	+*	#			+ -	+
巨颤藻 <i>Oscillatoria princeps</i>							*	+	*
蓝纤维藻 <i>Dactylococcopsis</i> sp.		*						*	
小席藻 <i>Phormidium tenue</i>		*						*	
色球藻 <i>Chroococcus</i> sp.		#		#		*		#	#
十字藻 <i>Crucigenia tetrapedia</i>	-								
骈胞藻 <i>Biraphidinales</i> sp.	-								
水绵 <i>Spirogyra</i> sp.	-		-						
卷曲纤维藻 <i>Ankistrodesmus convolutus</i>		*						-	*
丝藻 <i>Ulothrix</i> sp.								*	
小球藻 <i>Chlorella vulgaris</i>		*							
四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>		#		#	#			#	#
拟菱形弓形藻 <i>Schroederia nitzschioides</i>		*						*	
鼓藻 <i>Euastrum</i> sp.								*	
卵囊藻 <i>Oocystis</i> sp.		#			#				#
三角四角藻 <i>Tetraedron trigonum</i>				*					
箱形桥弯藻 <i>Cymbella cistula</i>	+			+				#	+
新月桥弯藻 <i>Cymbella cymbiformis</i>			+	+					
桥弯藻 <i>Cymbella</i> sp.	-	*#	+ -	*#		*	*	+*# -	+*#
卵圆双眉藻 <i>Amphora ovalis</i>		#							
脆杆藻 <i>Fragilaria</i> sp.	+ -	*#	-	+*#	#	*	*	+	+ #
钝脆杆藻 <i>Fragilaria capucina</i>	-		-					#	
针杆藻属 <i>Synedra</i> sp.	+	*#	+	*#	#	*	*	+ # -	+ #
尖针杆藻 <i>Synedra acus</i>	-		+ -	+ #				#	
肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i>	-		-	*					
平片针杆藻 <i>Synedra tabulata</i>		#							
尖布纹藻属 <i>Gyrosima acuminatum</i>	-		+	*#					
长圆舟形藻 <i>Navicula oblonga</i>			+						
线形舟形藻 <i>Navicula graciloides</i>								+	+
舟形藻属 <i>Navicula</i> sp.	+ -	*#	-	*#		*	*	# -	+
菱形藻属 <i>Nitzschia</i> sp.	+ -	*	-	*		*	*		+*
菱板藻属 <i>Acanthopeltis</i> sp.				+ #					
微细异极藻 <i>Gomphonema parvulum</i>	+			#					+ #
缢缩异极藻 <i>Gomphonema constrictum</i>	-	*	-	*		*	*	-	
异极藻 <i>Gomphonema</i> sp.	-	*	-	+*#		*	*	# -	+*
等片藻 <i>Diatom</i> asp.	+	#		+ #	#			#	#
弧型蛾眉藻 <i>Ceratoneis arcus</i>	-	*		*#		*	*	# -	*#
羽纹藻属 <i>Pinnularia</i> sp.	-	*		*		*	*	+*# -	*
短缝藻属 <i>Eunotia</i> sp.				+					
曲壳藻属 <i>Achnanthes</i> sp.	-	*#	-	*#	#	*		* -	#
极细微曲壳藻 <i>Achnanthes minutissima</i>		#			#				
扁圆卵形藻 <i>Cocconeis placentula</i>			-	*					
双头辐节藻 <i>Stauroneis anceps</i>						*		*	+
小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.		#		*#		*			*
波纹藻 <i>Cymatopleura</i> sp.		*	-	*					*
双菱藻 <i>Surirella</i> sp.				*					
卵形隐藻 <i>Cryptomonas ovata</i>		*				*		*	

注: +表示 2012 年 7 月, *表示 2014 年 7 月, #表示 2015 年 7 月, -表示 2016 年 6 月。

Note: + July 2012, * July 2014, # July 2015, - June 2016.

扎那曲(2015年)浮游植物密度为 2.23×10^4 个/L,其中蓝藻门 0.39×10^4 个/L,绿藻门为 0.20×10^4 个/L,硅藻门为 1.64×10^4 个/L。扎曲(2014年)为 10.74×10^4 个/L,其中蓝藻为 0.21×10^4 个/L,硅藻为 10.43×10^4 个/L,隐藻为 0.11×10^4 个/L。扎阿曲(2014年)为 3.11×10^4 个/L,其中蓝藻为 0.22×10^4 个/L,硅藻为 2.89×10^4 个/L。杂多为 $1.80 \times 10^4 \sim 12.10 \times 10^4$ 个/L,最大值为2012年,最小值为2014年。囊谦为 $2.36 \times 10^4 \sim 38.64 \times 10^4$ 个/L,最大值为2012年,最小值为2014年(图3-b)。

2.4 浮游植物生物多样性

长江源区及澜沧江源区浮游植物生物多样性变化见表4。

2.5 浮游植物与环境因子的关系

浮游植物物种与环境因子的RDA分析结果及生物多

样性与环境因子的Pearson相关性分析结果见图4和表5。

RDA 分析结果表明,从长江和澜沧江源区浮游植物种类组成来看,蓝藻、绿藻、硅藻、隐藻的种类数量主要受温度、浊度和溶解氧的影响,存在正相关关系,浊度和温度的影响大于溶解氧的影响。从浮游植物现存量来看,长江和澜沧江源区硅藻占优势,硅藻的密度主要受流速和含沙量的影响,且呈负相关关系,蓝藻的密度与流速呈正相关,与总磷和pH呈负相关,绿藻的密度与浊度和温度呈正相关,隐藻的密度与溶解氧呈正相关。

Pearson 分析结果表明,长江和澜沧江源区浮游植物 Shannon 多样性与溶解氧有显著的相关性, Margalef 丰富度与温度有显著的相关性,3种生物多样性之间存在显著的相关性。

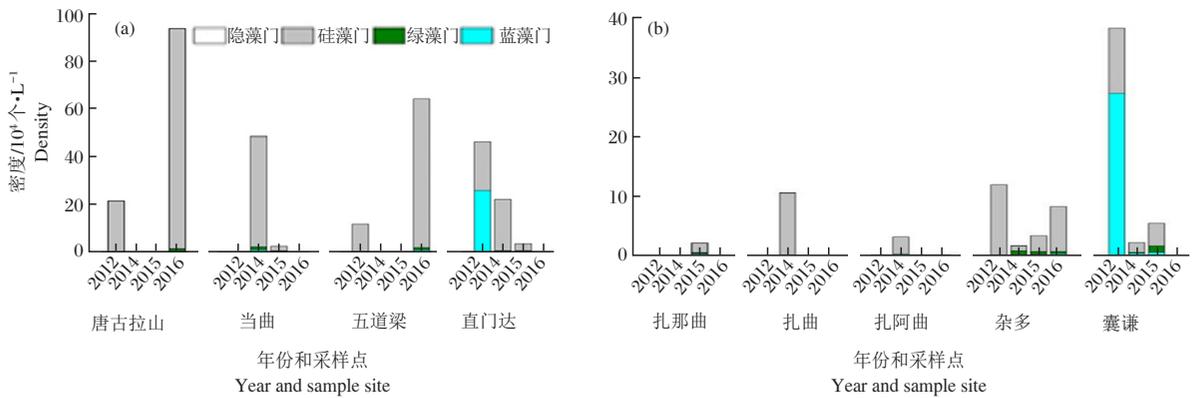


图3 长江(a)和澜沧江(b)源区浮游植物密度及群落结构

Fig.3 Phytoplankton density and community structure in the source regions of the Yangtze River (a) and Lancang River (b)

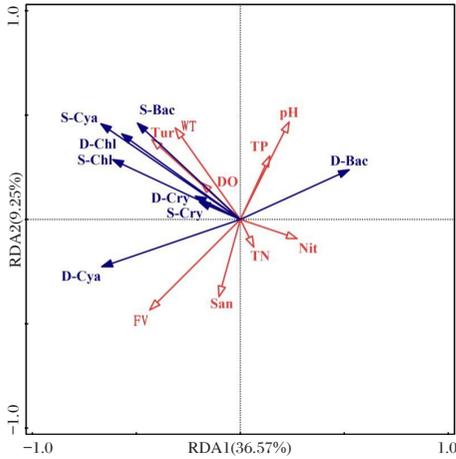
表4 长江和澜沧江源区浮游植物多样性

Tab.4 Phytoplankton diversity in the source regions of the Yangtze River and Lancang River

年份	指数	长江				澜沧江				
		唐古拉山	当曲	五道梁	直门达	扎那曲	扎曲	扎阿曲	杂多	囊谦
2012	H	1.67		0.86	1.53				1.61	0.86
	D	0.34		0.30	0.42				0.36	0.54
	J	0.59		0.33	0.48				0.57	0.25
2014	H		3.24		3.34		3.21	2.99	3.00	2.87
	D		0.90		0.96		0.78	0.60	0.64	0.55
	J		0.78		0.80		0.84	0.90	0.90	0.90
2015	H		2.64		2.74	1.99			2.29	2.72
	D		0.89		0.92	0.48			0.73	0.57
	J		0.69		0.70	0.66			0.64	0.82
2016	H	3.34		2.81					3.04	
	D	0.76		0.67					0.55	
	J	0.83		0.74					0.91	

注:H表示 Shannon 多样性指数,D表示 Margalef 丰富度指数,J表示 Pielou 均匀度指数。

Note: H - Shannon diversity index, D - Margalef richness index, J - Pielou evenness index.



S-Cya 表示蓝藻种类数, S-Chl 表示绿藻种类数, S-Bac 表示硅藻种类数, S-Cry 表示隐藻种类数, D-Cya 表示蓝藻密度, D-Chl 表示绿藻密度, D-Bac 表示硅藻密度, D-Cry 表示隐藻密度。

图 4 浮游植物群落结构与环境因子的关系

S-Cya, number of cyanophyta species; S-Chl, number of chlorophyte species; S-Bac, number of diatom species; S-Cry, number of cryptophyta species; D-Cya, density of cyanophyta; D-Chl, density of chlorophyte; D-Bac, density of diatom; D-Cry, density of cryptophyta.

Fig.4 Correlation analysis between phytoplankton community structure and environmental factors

3 讨论

3.1 长江及澜沧江源区浮游植物种群分布特征

整体来看,长江及澜沧江源区浮游植物种类数较少,种类组成中硅藻占优,主要是因为硅藻适宜生长的温度范围较广,并且喜低温、流水环境,这与许多河流浮游植物的组成一致(李喆等,2010;裴国凤等,2012;吴湘香等,2014)。陈燕琴等(2017)对沱沱河的浮游植物调查结果表明,浮游植物共 3 门、59 种(属),

其中蓝藻门 6 种,绿藻门 4 种,硅藻门 49 种;韩涓等(2019)调查认为长江源区浮游植物有 4 门、28 属、57 种,其中蓝藻门 5 种,绿藻门 6 种,硅藻门 46 种,隐藻门 1 种。本研究鉴定出的浮游植物种类数较少,差异主要是硅藻较少,仅 30 种(属)。种类数与采样频次存在较密切的关系,本研究受限于环境条件及人力物力资源,仅在每年的夏季采样(2013 年未采样),样点设置较少,且鉴定时可能遗漏某些物种,实际物种数应该更多一些;此外,本研究中舟形藻、菱形藻、羽纹藻、曲壳藻等大多只鉴定到了属,而未鉴定到种,这可能是本研究浮游植物种类数较其他研究较少的原因,但基本上反映了长江及澜沧江源区浮游植物种类和密度特征。长江源区浮游植物种类数最多为 2014 年的当曲和直门达,澜沧江源区浮游植物种类数最多为 2014 年的扎曲和 2015 年的杂多,可能是受温度的影响。表 2 结果表明,长江和澜沧江源区 2014 年和 2015 年水温显著高于其他年份,而相关性分析印证了这一点,RDA 分析结果表明,浮游植物种类组成主要受温度和浊度的影响,且呈正相关关系,Pearson 分析结果也表明,物种丰富度指数与温度有显著的正相关关系,这与其他学者的研究结果一致(王文君等,2019;朱永锋等,2019)。

3.2 环境因子对长江及澜沧江源区浮游植物密度影响

长江源区浮游植物密度为 $3.62 \times 10^4 \sim 94.00 \times 10^4$ 个/L,澜沧江源区显示为 $1.80 \times 10^4 \sim 38.64 \times 10^4$ 个/L。韩涓等(2019)研究得出长江源区浮游植物密度在 $6.06 \times 10^4 \sim 39.90 \times 10^4$ 个/L;陈燕琴等(2017)认为沱沱河浮游植物平均密度为 68.04×10^4 个/L,考虑到采样、样品浓缩及样品鉴定过程中的误差,三者的研究结

表 5 浮游植物生物多样性与环境因子的相关分析

Tab.5 Correlation analysis between phytoplankton biodiversity and environmental factors

指标	WT	pH	DO	Tur	FV	San	TN	Nit	TP	H	D
pH	0.268										
DO	-0.279	-0.301									
Tur	0.122	0.027	0.090								
FV	0.212	0.037	-0.238	0.319							
San	-0.117	-0.559*	0.300	0.046	0.335						
TN	0.160	0.211	-0.157	0.263	0.383	0.213					
Nit	0.144	0.302	-0.291	0.196	0.300	0.045	0.956**				
TP	-0.094	0.592**	-0.272	0.240	0.007	-0.314	0.461*	0.523*			
H	0.314	0.176	0.401*	0.017	0.015	-0.177	0.016	-0.034	-0.131		
D	0.447*	0.115	0.315	-0.252	-0.042	-0.069	-0.038	-0.115	-0.214	0.728**	
J	0.295	0.206	0.327	0.227	0.110	-0.176	0.053	0.009	-0.007	0.931**	0.464*

注:*表示相关性显著($P < 0.05$),**表示相关性极显著($P < 0.01$)。

Note: * significant correlation ($P < 0.05$), ** highly significant correlation ($P < 0.01$).

果基本一致。一般研究认为,水体浮游植物的密度低于 1×10^6 个/L为贫营养, $(1 \sim 40) \times 10^6$ 个/L为中营养,而高于 40×10^6 个/L为富营养(刘冬燕等,2005),说明长江及澜沧江源区浮游植物密度较低,水质较好;也有研究认为是由于海拔高、气候寒冷、冰山雪融水温度低、营养盐含量少、水流湍急、沙砾石底质泥沙含量大、透明度低等原因,不利于藻类的增殖(Steinberg & Hartmann, 2006; 殷大聪等,2017);影响浮游植物生长的环境因子很多,主要有营养盐、温度和光照、河流形态、水文、泥沙输移量等(裴国凤等,2012)。在营养盐水平较高的水体中($TN > 0.2$ mg/L, $TP > 0.02$ mg/L),营养盐对藻类的限制作用会下降(孟顺龙等,2011)。本研究中, TN 和 TP 营养盐均高于该浓度,且RDA和Pearson分析结果均显示,总氮、总磷和硝酸盐与浮游植物的相关性较弱,而浊度、温度、流速和含沙量与浮游植物的相关性较强。水体中泥沙不仅可以通过表面作用对氮、磷等营养物质进行吸附和解吸,从而影响水体中营养盐的分布与转化(Wang et al, 2010; 阮嘉玲,2014),还可以影响水体的浊度和透明度,从而改变浮游植物的生存环境(Azhikodan & Yokoyama, 2016)。胡俊等(2016)对黄河内蒙古河段的研究发现,较高泥沙含量区的浮游植物种类和数量明显降低。

本研究中,澜沧江源区的浮游植物密度低于长江源区,可能主要是受到浊度和流速的影响,因为长江源区各采样点的浊度平均值为 (147.98 ± 85.65) NTU、流速平均值为 (1.45 ± 0.59) m/s、含沙量为 (0.64 ± 0.58) kg/m³,而澜沧江源区的浊度为 (612.73 ± 265.72) NTU、流速为 (1.82 ± 0.53) m/s、含沙量为 (0.45 ± 0.23) kg/m³,可以看出澜沧江源区的浊度显著高于长江源区,但含沙量略低于长江源区,可能是还含有其他悬浮有机质和无机质,尚需进一步分析论证。本研究还发现,直门达(2012年)和囊谦(2012年)只鉴定出蓝藻和硅藻,蓝藻含量都比较高,为美丽颤藻,占比例分别为55.80%和71.43%;RDA分析表明,流速、总磷和pH是影响蓝藻密度的主要环境因子,这与吴可方等(2018)的研究结果一致。殷大聪等(2017)在对长江和澜沧江源区的考察过程中发现,江源地区很多地方存在过度放牧影响水生态环境的问题,而直门达和囊谦采样点都位于人类活动比较频繁的区域,可能由于人类生产和生活等活动导致水体质量下降,更适于蓝藻生存;此外,物种丰富度较低、缺乏与颤藻竞争的绿藻和隐藻也可能是颤藻密度较高的原因之一(王少沛等,2009)。

3.3 长江及澜沧江源区浮游植物多样性分布特征

浮游植物多样性指数是常用的水质评价指标,一般认为的Shannon多样性指数 $H > 3$ 时为轻污染或无污染, $1 \sim 3$ 时为中度污染, $0 \sim 1$ 时为中度污染(沈槁芬等,1990);Pielou均匀度指数在 $0 \sim 0.3$ 时为重污染, $0.3 \sim 0.5$ 时为中污染, $0.5 \sim 0.8$ 时为轻污染或无污染(秦娇娇和王艳,2014)。长江及澜沧江源区浮游植物的Shannon多样性指数变幅较大,最低为0.86,最高为3.34,均值为2.43;Margalef丰富度指数普遍都很低,这可能与该流域内浮游植物本身种类数较少有关;Pielou均匀度指数均较高,说明长江及澜沧江源区浮游植物群落分布较均匀且相对稳定。环境的稳定程度、群落发展的时间长短、种间竞争、空间异质性、捕食压力以及干扰等都是影响群落多样性的因素(Sanna et al, 2006)。

本研究中,影响浮游植物多样性的环境因子主要是温度和溶解氧,这与已有的研究结果一致(Robarts & Tamar, 1987; Chen et al, 2003);此外,捕食对浮游植物群落也存在影响(Matveeva & Matveeva, 1997; 胡梦红等,2014),长江和澜沧江源区水体中的腐殖质及有机碎屑较少,从而增大了浮游动物和鱼类对浮游植物的牧食压力,进而造成浮游植物密度及物种数量较少,但因本研究未同时调查浮游动物、鱼类等,故而该推测需进一步论证。

参考文献

- 陈燕琴,李柯懋,高桂香,2017. 长江源沱沱河浮游植物群落结构及多样性评价[J]. 青海农林科技, 58(2):1-5.
- 韩晓军,韩永荣,韩晓花,2012. 长江源水环境问题及保护对策[J]. 城市与减灾, (4):1-4.
- 韩谔,潘保柱,赵耿楠,等,2019. 长江源区浮游植物群落结构及分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 28(11):2621-2631.
- 胡鸿钧,魏印心,2006. 中国淡水藻类系统、分类及生态[M]. 北京:科学出版社.
- 胡俊,胡鑫,米玮洁,等,2016. 多沙河流浮游植物群落结构变化及水环境因子影响分析[J]. 生态环境学报, 25(12):1974-1982.
- 胡梦红,杨丽丽,刘其根,2014. 竞争捕食作用对千岛湖浮游动物群落结构的影响[J]. 湖泊科学,26(5):751-758.
- 李喆,姜作发,霍堂斌,等,2010. 黑龙江中游春、夏季浮游植物种群结构的初步研究[J]. 水产学杂志,23(4): 47-50.
- 刘冬燕,赵建夫,张亚雷,等,2005. 富营养水体生物修复中浮游植物的群落特征[J]. 水生生物学报,29(2): 177-183.
- 罗小勇,唐文坚,2003. 长江源生态环境问题及其防治对策[J]. 长江科学院院报,20(1): 47-49.
- 孟顺龙,陈家长,胡庚东,等,2011. 2009年秋季长江安徽-江苏

- 段浮游植物群落的种类组成与空间特征[J]. 中国农学通报, 27(3):391-398.
- 裴国风, 曹金象, 刘国祥, 2012. 尼洋河不同河段浮游植物群落多样性差异研究[J]. 长江流域资源与环境, 21(1): 24-29.
- 秦娇娇, 王艳, 2014. 浮游植物多样性指数的应用及评价[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 32(4): 502-505.
- 阮嘉玲, 2014. 三峡库区泥沙过程变异对浮游植物的影响及营养化评价方法研究[D]. 武汉: 武汉轻工业大学.
- 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩, 1990. 微型生物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 王少沛, 李卓佳, 曹煜成, 等, 2009. 微滤球藻、隐藻、颤藻的种间竞争关系[J]. 中国水产科学, 16(5):765-772.
- 王文君, 方艳红, 胡晓东, 2019. 大渡河河口浮游植物群落时空分布及其与环境因子的关系[J]. 水生态学杂志, 40(6): 16-23.
- 王心芳, 魏复盛, 齐文启, 2002. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 吴可方, 欧伏平, 王丑明, 2018. 东洞庭湖秋季氮磷营养盐结构及水华风险分析[J]. 人民长江, 49(23): 21-36, 73.
- 吴湘香, 李云峰, 沈子伟, 等, 2014. 赤水河浮游植物群落结构特征及其与水环境因子的关系[J]. 中国水产科学, 21(2): 361-368.
- 徐平, 李其江, 黄茁, 等, 2019. 长江和澜沧江源区生态环境综合科学考察[M]. 北京: 科学出版社.
- 杨文, 朱津永, 陆开宏, 等, 2014. 淡水浮游植物功能类群分类法的提出、发展及应用[J]. 应用生态学报, 25(6): 1833-1840.
- 殷大聪, 许继军, 金燕, 等, 2017. 长江源与澜沧江源区浮游植物组成与分布特性研究[J]. 长江科学院院报, 34(1): 61-66.
- 朱永锋, 琚珊珊, 蔡庆华, 等, 2019. 三峡水库春季浮游植物群落特征及影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 28(12):101-108.
- Azhikodan G, Yokoyama K, 2016. Spatio-temporal variability of phytoplankton Chlorophyll-a in relation to salinity, suspended sediment concentration, and light intensity in a macro tidal estuary[J]. Continental Shelf Research, 126: 15-26.
- Chen Y, Qin B, Teubner K, et al, 2003. Long-term dynamics of phytoplankton assemblages: Microcystis-dominance in Lake Taihu, a large shallow lake in China[J]. Journal of Plankton Research, 25(4):445-453.
- Crossetti L O, 2008. Phytoplankton as a monitoring tool in a tropical urban shallow reservoir (Garças Pond): the assemblage index application[J]. Hydrobiologia, 610(1):161-173.
- Matveeva V, Matveeva L, 1997. Grazer control and nutrient limitation of phytoplankton biomass in two Australian reservoirs[J]. Freshwater Biology, 38(1):49-65.
- Reynold C S, 1984. The ecology of freshwater phytoplankton [M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Roberts R, Tamar Z, 1987. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria[J]. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 21(3):391-399.
- Sanna S, Maria L, Maija H, 2006. Long-term changes in summer phytoplankton communities of the open northern Baltic Sea[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 71(3/4): 580-592.
- Steinberg C E W, Hartmann H M, 2006. Planktonic bloom-forming Cyanobacteria and the eutrophication of lakes and rivers[J]. Freshwater Biology, 20(2):279-287.
- Wang H, Shen Z, Guo X, et al, 2010. Ammonia adsorption and nitrification in sediments derived from the Three Gorges Reservoir, China[J]. Environmental Earth Sciences, 60(8): 1653-1660.

(责任编辑 万月华)

Distribution of the Summer Phytoplankton Community in Source Regions of the Yangtze River and Lancang River

LI Huan^{1,2}, ZHAO Wei-hua^{1,2}, ZHAO Liang-yuan^{1,2}, LI Wei^{1,2}, CAO Xiao-huan^{1,2}

- (1. Basin Water Environmental Research Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, P.R. China;
2. Key Lab of Basin Water Resource and Eco-Environmental Science in Hubei Province, Wuhan 430010, P.R. China)

Abstract: The source regions of the Yangtze River and Lancang River are in the hinterland of the Qinghai-Tibet Plateau and are an important ecological corridor of China. However, they are also sensitive and fragile areas with respect to changes in climate and ecology and there are increasingly serious problems in the water ecological environment in those source regions. The phytoplankton community plays an important role in nutrient cycling and energy flow in aquatic ecosystems. In this study, we investigated the phytoplankton and water environment in the source regions of the two rivers from 2012 to 2016. The spatial and temporal distribution and diversity of the phytoplankton community were analyzed and compared, and the relationship between phytoplankton community structure and nine environmental factors were analyzed using Redundancy Analysis (RDA). The study aimed to understand the status and accumulate baseline data on the phytoplankton resource in this important ecological corridor, and provide scientific evidence for the evaluation, protection and management of the source region ecology. A total 44 phytoplankton species from 4 phyla were identified in the source region of the Yangtze River, including 29 Diatoms species, 9 Chlorophyte species, 5 Cyanophyta species and 1 Cryptophyta species. The highest species richness occurred at the Dangqu and Zhimenda sampling sites in 2014, with 18 species, and the lowest occurred at the Wudaoliang sampling site in 2012, with 6 species. Phytoplankton density in the source area of the Yangtze River was in the range of 2.53×10^4 – 94.00×10^4 ind/L, with the minimum value at Dangqu sampling site in 2015, and the maximum value at Tanggula Mountain sampling site in 2016. The Shannon diversity, Margalef richness and Pielou evenness indices in the source area of the Yangtze River ranged from 0.86 to 3.34, 0.34 to 0.96, 0.33 to 0.82, respectively, with the minimum value at the Wudaoliang sampling site in 2012. A total of 32 phytoplankton species from 4 phyla were identified in the source area of the Lancang River, including 20 Diatoms species, 6 Chlorophyta species, 5 Cyanophyta species and 1 Cryptophyta species, with the highest species richness (14 species) observed at Zhaqu sampling site in 2014. The range of phytoplankton density in the source area of the Lancang River was 2.23×10^4 – 38.64×10^4 ind/L, with the minimum value at Zanaqu sampling site in 2015 and the maximum value at Nangqian sampling site in 2012. The Shannon, Margalef and Pielou diversity indices in the source area of the Lancang River were, respectively, 0.86–3.21, 0.36–0.78, and 0.25–0.91. Temperature, turbidity, flow velocity and sand content were the primary environmental factors affecting phytoplankton community structure in the source regions of the Yangtze and Lancang Rivers. In general, phytoplankton densities in the source regions of the Yangtze River and Lancang River were low, indicating an oligotrophic water body. The Pielou evenness index of the phytoplankton community was high, species distribution was relatively uniform, and phytoplankton community structure was stable.

Key words: Yangtze River; Lancang River; phytoplankton; community structure; biodiversity