

珠江流域东江干流浮游植物叶绿素 a 时空分布及与环境因子的关系*

田时弥¹, 杨 扬^{1,2**}, 乔永民^{1,2}, 何文祥¹, 林剑华¹, 王栋宇¹

(1: 暨南大学水生生物研究中心, 广州 510632)

(2: 暨南大学热带亚热带水生生态工程教育部工程研究中心, 广州 510632)

摘 要: 为了解珠江流域东江干流水体叶绿素 a 的时空分布及与环境因子的关系, 于 2012 年 6 月(丰水期)和 12 月(枯水期)对东江干流进行采样调查分析. 结果表明, 东江水体叶绿素 a 含量具有明显的时空分布特征, 其全年变化范围为 0.84 ~ 14.93 $\mu\text{g/L}$, 整体均值为 $3.60 \pm 2.45 \mu\text{g/L}$, 丰水期叶绿素 a 含量显著高于枯水期; 而丰、枯水期叶绿素 a 含量空间分布特征相似, 上游河段显著低于下游河段. 相关性分析与主成分分析结果显示, 水体中总氮浓度、总磷浓度、有机物含量、水温和水流流速等都是影响东江浮游植物生长的重要因素, 其中以总磷的影响最为显著, 表明磷可能是东江浮游植物生长的限制因子.

关键词: 东江干流; 叶绿素 a; 环境因子; 相关性分析; 主成分分析; 珠江流域

Temporal and spatial distribution of phytoplankton chlorophyll-a and its relationships with environmental factors in Dongjiang River, Pearl River basin

TIAN Shimi¹, YANG Yang^{1,2}, QIAO Yongmin^{1,2}, HE Wenxiang¹, LIN Jianhua¹ & WANG Dongyu¹

(1: *Research Center of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, P. R. China*)

(2: *Ministry of Education Engineering Research Center of Tropical and Subtropical Aquatic Ecological Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, P. R. China*)

Abstract: Sampling was carried out in wet season and dry season of 2012 in order to analyze the distribution of chlorophyll-a and the effects of water environment factors on chlorophyll-a in Dongjiang River, Pearl River basin. Results showed chlorophyll-a concentration appeared strong temporal and spatial variations in Dongjiang River, ranging from 0.84 to 14.93 $\mu\text{g/L}$, and with the annual mean value of $3.60 \pm 2.45 \mu\text{g/L}$. The chlorophyll-a concentration in wet season was obviously higher than that in dry season. For wet and dry season, the temporal distribution of chlorophyll-a had a similar pattern, increasing from upstream to downstream. The correlation analysis and principal components analysis indicated TN, TP, COD_{Mn} , water temperature and flow velocity were the most important factors for the growth of phytoplankton in Dongjiang River, and phosphorous might be the limiting factor because of its remarkable influence on phytoplankton.

Keywords: Dongjiang River; chlorophyll-a; environmental factors; correlation analysis; Principal Components Analysis; Pearl River basin

浮游植物是河流生态系统中的重要组成部分, 其时空分布特征不仅影响了生态系统的生态过程、功能和稳定性, 而且反映了生态环境的变化^[1]. 河流中浮游植物的生物量和种类组成受河流形态、水文、光照、营养盐浓度以及水流搬运和泥沙数量等作用的综合影响, 具有明显的空间异质性^[2-7]. 近年来, 由于大型河流受水利水电设施、水产、灌溉、航运、防洪、排放等人类活动的干扰, 以及上下游、干支流、淡咸水之间等多种河流自身作用相互交织, 导致大型河流中浮游藻类快速繁殖, 使河流水质环境恶化, 如长江的一级支流汉江汉口段、松花江哈尔滨段、南京秦淮河、三峡水库第一大支流香溪河等开始陆续暴发藻类水华^[8-12]. 然而相对

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2012ZX07206-004)资助. 2014-02-27 收稿; 2014-04-03 收修改稿. 田时弥(1988~), 女, 硕士研究生; E-mail: tianlinglanrui@gmail.com.

** 通信作者; E-mail: yangyang@scies.org.

于湖泊、水库的藻类与水环境的关系研究来说,对河流生境变化与浮游植物之间的响应关系关注较少.因此,建立浮游藻类对河流环境因子的响应关系,并依据浮游藻类分布特征评估河流生态健康状况,一直是许多研究者长期关注的理论问题和应用目标.

东江作为南亚热带的大型河流、粤港澳地区重要的饮用水源地,对于维系该地区的稳定和发展有着十分重要的作用.然而随着区域经济的高速发展,其水文水质与生态环境受到不同程度的影响.如采砂、水利工程、农业开发和其它土地资源不合理利用及排放等问题致使东江河床、岸坡结构和水文条件等发生明显变化^[13-15].同时,水质也呈下降趋势,上游河段受农业面源污染,中下游河段主要受生活污水和工业废水的点源污染,且部分河段已趋于富营养化状态^[16-17].尽管目前针对东江水环境问题开展了一些研究^[18-21],但主要以局域河段为对象,且存在研究采样点偏少、系统性不强和时间不足等问题.鉴于水体研究中,叶绿素 a (Chl. a)可表征浮游植物的生物量,是描述水体营养状态和研究河流生境的重要指标.本文以东江干流为研究对象,分别在丰、枯水期对其水质进行调查,通过东江浮游藻类 Chl. a 的时空变化特征分析,探讨东江浮游藻类与水环境因子之间的关系,认识东江浮游藻类分布及其时空变化规律,揭示浮游植物对水环境因子的响应机制,不仅具有生态学理论意义,而且在东江水生态系统管理和评价中具有广泛的实践应用价值.

1 材料和方法

1.1 研究区域

东江是珠江三大水系之一,上游由浈江和定南河汇入,流经龙川县、河源、惠州、东莞等县市,下游主要分南、中、北三条支流汇入珠江,全长 562 km,流域面积 35340 km².本研究区域为东江干流枫树坝至下游中支流段,长 446 km,从上游至下游,根据不同生境将东江分为 5 个研究区域:枫树坝段(FSB)为上游水库,河源段(HY)为上游河段,惠州段(HZ)为中游河段,石龙段(SL)为下游河段,另外还有下游中支流(ZZ)河段,共设 45 个采样点,详见表 1.

表 1 东江各河段基本情况
Tab. 1 The basic data of study regions in Dongjiang River

河段	样点数	分布区域	水深/m	水利工程	周边环境
FSB	7	枫树坝两条入库湾,属东江上游	29.8 ± 9.9	枫树坝	河岸为山林,有农业活动和少量渔业养殖,属农业区
HY	9	河源市,属东江上游	4.2 ± 2.5	新丰江、龙潭、罗营口等电站	河岸多为竹林,周边多居民和农业活动,属农业区
HZ	12	惠州市区,属东江中游	8.8 ± 4.6	剑潭大坝	河岸多为城区,有少量硬质岸坡,属城镇区
SL	7	东莞石龙镇,属东江下游	12.3 ± 3.9	水泥堤岸	有少量航运、渔业、采砂场和货运码头,属工业区
ZZ	10	东莞中堂镇,属东江下游三条支流之一	6.5 ± 2.6	防洪大堤、水闸	大量工厂和货运码头,航运频繁,属工业区

1.2 研究方法

根据东江干流上中下游各个河段的周边情况和地理特征,在每个河段布设样点,各河段样点个数与布设位置见表 1 和图 1. 由于研究区域河段较宽,水样用 5 L 有机玻璃柱状采水器采集河道左中右 3 点处离表层 0.5 m 的混合样,从每个混合样中取 2 个平行样带回实验室测定. 本研究于 2012 年 6 月(丰水期)和 12 月(枯水期)各进行 1 次采样,2 次调查均用 GPS 定位以确保采样位置一致,整个河段每次采样连续 15 d 进行. 水温(WT)、溶解氧(DO)用 YSI 水质监测仪(Professional-Plus)检测,pH 值用 pH 仪(PHB-3)测定,流速(V)用流速仪(LS25-3C)测定. 高锰酸盐指数(COD_{Mn})用酸性高锰酸钾法测定,总氮(TN)、总磷(TP)用碱性过硫酸钾法测定. Chl. a 采用丙酮萃取分光光度法测定. 采样方法参见《河流生态调查技术方法》^[22]. 样品保存方法和检测方法详细步骤参照《水和废水监测分析方法》^[23].

1.3 统计分析

采用相关性分析研究叶绿素 a 与环境因子的响应关系,并建立相应的回归方程,然后对水环境因子做主成分分析(PCA),筛选出对浮游植物影响较大的因子.上述数据分析采用 SPSS 18.0 软件.

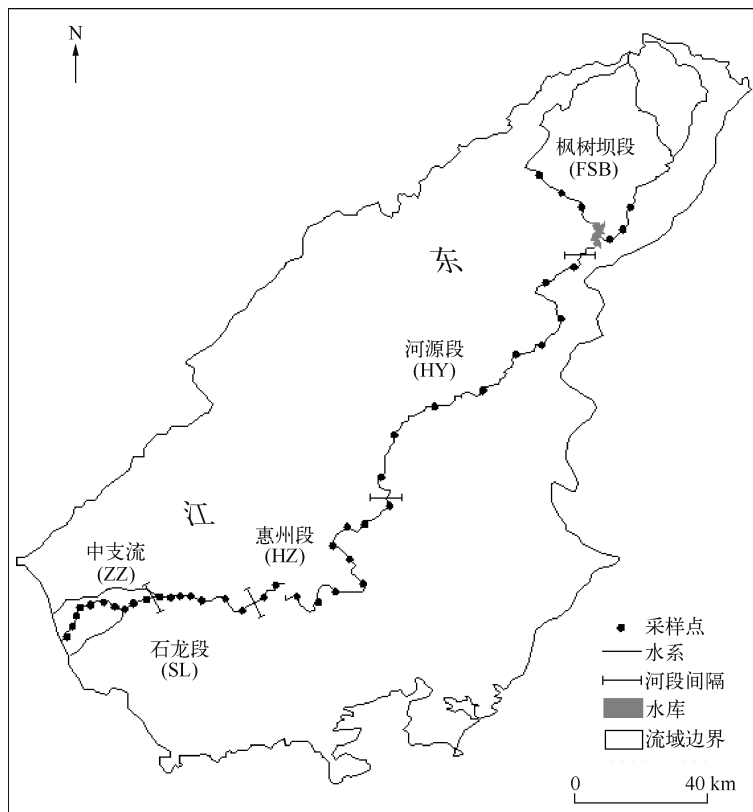


图 1 东江采样点布设

Fig. 1 Sampling sites in Dongjiang River

2 结果与讨论

2.1 东江水环境因子变化

调查期间东江 5 个河段主要物理、化学参数变动情况如图 2. 参照《地表水环境质量标准基本项目标准限值(GB/T 3838—2002)》,除 TN 外,其它水质指标均能达到地表水 II ~ III 类水质标准. 其中水温在丰水期(25.5℃)明显高于枯水期(18.6℃),全年变动范围为 16.3 ~ 29.0℃,较适宜浮游植物生长(图 2a). 东江水体流速在丰、枯水期差异显著($P < 0.01$),其均值分别为 0.32、0.10 m/s,在空间上从上游至下游呈逐渐递减趋势(图 2b). 而 DO 在丰、枯水期则差异不显著,从上游至下游表现为逐渐降低趋势,变动范围在 0.09 ~ 9.08 mg/L 之间(图 2c). 水体 COD_{Mn} 全年均值为 3.43 mg/L,变动范围为 0.84 ~ 16.35 mg/L,但其空间变化趋势与 DO 相反(图 2d),表明东江 DO 分布特征可能与有机物含量有关. 东江 TN 含量较高,均值为 1.99 mg/L,在受点源污染影响显著的下游河段(HZ、SL、ZZ)均表现为枯水期高于丰水期(图 2e),而以面源污染为主的上游河段(FSB、HZ)则表现为丰水期高于枯水期. 东江 TP 变化范围较大,为 0.01 ~ 0.28 mg/L(图 2f),丰水期 TP(0.13 mg/L)显著高于枯水期(0.06 mg/L). 从空间分布看,东江 TN、TP 含量越靠近下游,浓度越高,这可能与东江下游过度开发、人口增长有关.

2.2 东江叶绿素 a 时空变化

东江流域属亚热带季风气候,四季变化不明显,河道环境主要受丰、枯水期影响. 丰、枯水期各河段 Chl. a

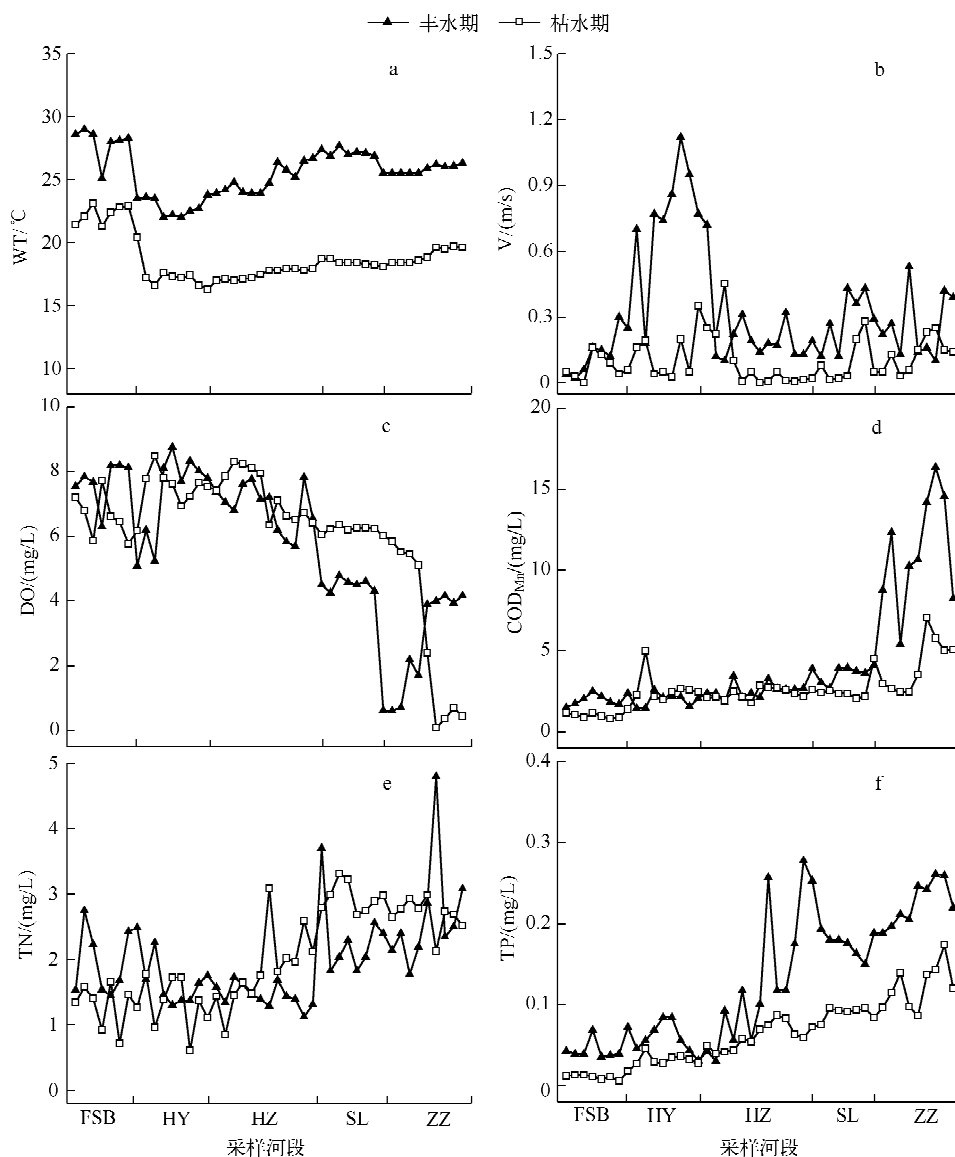


图2 东江水环境因子时空变化

Fig. 2 Temporal and spatial variation of aquatic environmental factors in Dongjiang River

含量统计结果(图3)显示,东江Chl. a整体均值为 $3.60 \pm 2.45 \mu\text{g/L}$, 全年变化范围为 $0.84 \sim 14.93 \mu\text{g/L}$, 最大值出现在丰水期, 最小值出现在枯水期. Chl. a 含量随时间变化明显, 丰水期 Chl. a 含量 ($4.85 \pm 2.56 \mu\text{g/L}$) 要显著高于枯水期 ($2.36 \pm 1.55 \mu\text{g/L}$) ($P < 0.01$), 原因在于丰水期降雨径流带来的营养盐以及水温的升高在一定程度上刺激了浮游植物的生长. 在空间上, 丰、枯水期 Chl. a 含量分布特征具有相似性, 主要表现为, 除上游水库(FSB)和河源段(HY) Chl. a 含量低于 $5 \mu\text{g/L}$ 外, 其余河段均较高, 且 Chl. a 峰值区主要分布在中下游惠州段(HZ)和东莞段(SL、ZZ), 整个河段呈现明显的上游低下游高的分布特征. 这可以说明, 东江 Chl. a 含量不仅表现出较明显的季节差异, 而且呈现出一定的空间差异性. 此外, 东江 Chl. a 含量水平与泰晤士河比较相近^[24], 且该研究认为 Chl. a 含量在 $2.5 \sim 8.0 \mu\text{g/L}$ 之间的水体为中度营养型, 低于 $2.5 \mu\text{g/L}$ 则为寡营养型^[25], 东江 55% 的点位 Chl. a 含量处于 $2.54 \sim 7.59 \mu\text{g/L}$ 之间, 另有 40% 的

点位 Chl. a 含量低于 $2.5 \mu\text{g/L}$, 表明东江大部分河段水体基本处于中度营养或中度营养以下水平。

2.3 叶绿素 a 含量与水环境因子的相关性分析

对东江 Chl. a 和水环境因子做相关性分析, 并建立回归方程如图 4。相关性分析发现, 东江 Chl. a 与 TN 呈显著正相关 ($r = 0.42, P < 0.05$) (图 4a), 与 TP 呈极显著正相关 ($r = 0.64, P < 0.01$) (图 4b), 表明氮、磷营养盐对东江浮游植物生长有重要影响, 而磷对浮游植物的影响更为显著。水体中氮、磷等无机营养盐是影响浮游植物光合作用的重要因子^[26], 其中磷是影响河流浮游植物生物量变化的主要因子^[27-28]。此外, 当水体中 TN/TP 大于 17~21 时, 磷可能成为水体营养水平的限制因子^[29]。东江 TN/TP 在丰水期为 25.17, 枯水期为 45.80, 说明磷是东江浮游植物生长的限制因子, 该结果与王博等^[17]对东江的调查结论相一致。

东江 Chl. a 与水温呈极显著正相关 ($r = 0.58, P < 0.01$) (图 4c), 说明随着水温的上升, 浮游植物的生长速度也随之加快。水温是影响藻类光合作用和呼吸代谢的重要因素, 适宜的温度可以加快藻细胞内新陈代谢作用, 促进浮游植物生长繁殖^[30]。另外, 东江 Chl. a 与 COD_{Mn} 也呈显著正相关 ($r = 0.40, P < 0.05$) (图 4d), 这与江源等^[31]对东江浮游植物的研究结果相似。水中有机物的存在会促进藻类生长, 东江有机物质主要来自沿途生活污水的排放、农业水产养殖以及地表径流等, 这些有机物质经氧化分解后可变成藻类直接

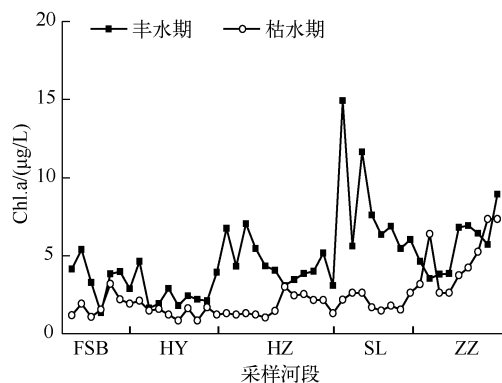


图 3 东江叶绿素 a 浓度时空分布

Fig. 3 Temporal and spatial variation of Chl. a concentration in Dongjiang River

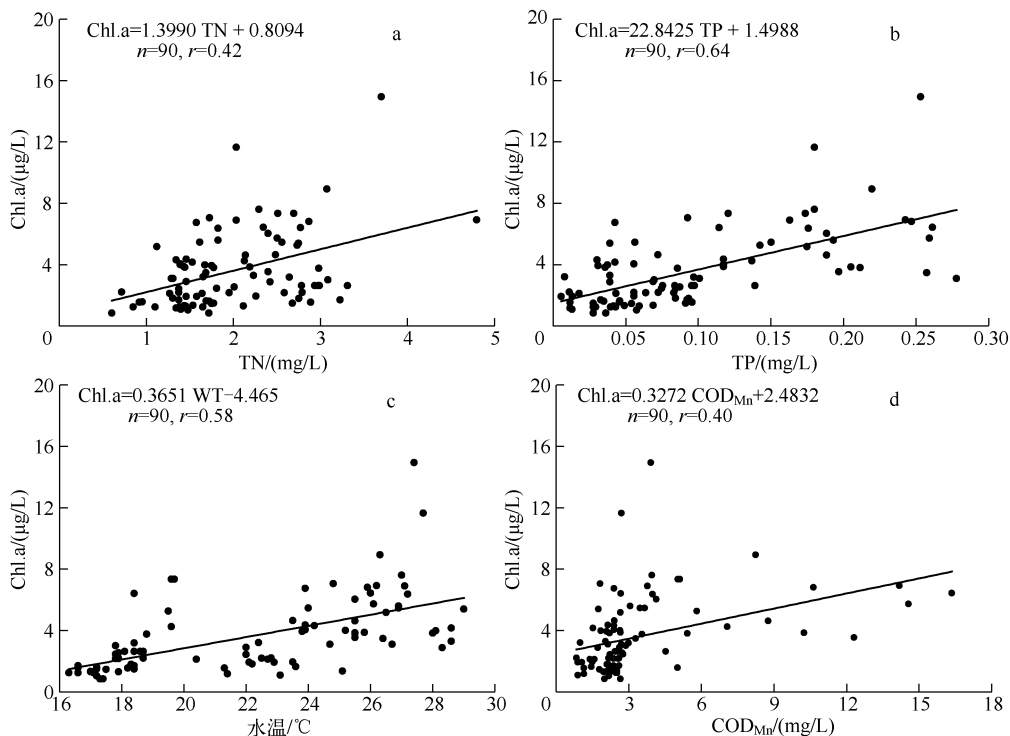


图 4 Chl. a 与水温、 COD_{Mn} 、TN、TP 的相关关系

Fig. 4 Correlations between Chl. a and WT, COD_{Mn} , TN, TP

利用的营养盐.

东江流速与 Chl. a 的相关关系存在时空异质性. 上游河段(FSB、HY)在丰水期流速较快,均值达到 0.44 m/s, Chl. a 与流速存在极显著的负相关关系($r = -0.498, P < 0.01$);但该河段在枯水期流速变小(0.10 m/s), Chl. a 与流速无显著关系($r = -0.93, P > 0.05$). 而在下游河段(HZ、SL、ZZ), Chl. a 与流速在丰、枯水期都无显著关系($P > 0.05$). 有研究证明,流速要在较大范围内才对浮游植物生长产生抑制作用^[32],并且水体营养盐偏高会减轻水动力对浮游植物生长的抑制作用^[33]. 相比上游河段,下游河段氮、磷营养盐含量较高,丰、枯水期流速变化幅度小,浮游植物的生物量主要受营养盐浓度的影响.

在本研究中 DO 与 Chl. a、COD_{Mn}、TN 和 TP 均呈显著负相关($P < 0.05$),于是以 COD_{Mn}、TN 和 TP 作控制条件,对 Chl. a 与 DO 做偏相关分析,结果表明两者相关性不显著($P > 0.05$),说明东江 DO 只是 Chl. a 变化的被动因子,而 DO 含量主要受水体有机物质或无机盐类的影响.

2.4 叶绿素 a 含量与水环境因子的主成分分析

应用 PCA 分析东江水环境因子的特征,结果见表 2. 东江丰、枯水期特征值大于 1 的主成分分别有 2 个和 3 个,其解释的方差累积分别为 63.433% 和 80.101%.

无论在丰水期还是枯水期,第一个主成分对方差的解释率均高于 40%,且 TP、COD_{Mn}、DO、TN 和 Chl. a 都具有绝对值较大的相关系数. 以上指标反映了东江有机物质、氮磷营养盐和浮游植物生物量特征,其中有机物质含量、氮磷营养盐浓度都表征东江的污染程度,说明这几种因素对浮游植物的生长起重要作用. 各因子中 TP 在丰、枯水期相关系数的绝对值最大,分别为 0.830 和 0.920,表明磷对浮游植物生物量的影响更加显著.

丰水期第二个主成分以及枯水期第二、三个主成分对方差的解释率分别为 20.378%、20.396% 和 15.159%,这几个主成分中水温 and 流速相关系数的绝对值相对较大,主要反映的是东江水温、水动力特征,表征东江水文气象状况,说明水温、水动力条件对浮游植物生长也有重要影响. 枯水期水温和流速对方差的解释率较丰水期高,分别是后两个主成分的主要决定因子,原因可能是东江有机物质和营养盐浓度在枯水期明显降低,使得水温和水动力条件对浮游植物的影响相对增强.

PCA 分析结果表明,东江氮磷营养盐、有机物质含量、水温和水动力条件都是影响东江浮游植物生长的重要因素,其中磷的影响作用最为突出,这对分析东江水环境控制因子以及浮游植物的生长影响因素有重要作用.

表 2 东江水环境因子 PCA 分析
Tab. 2 Principal Components Analysis of aquatic environmental factors in Dongjiang River

		丰水期		枯水期		
		PC1	PC2	PC1	PC2	PC3
特征值		3.444	1.630	3.564	1.632	1.213
方差解释率/%		43.055	20.378	44.545	20.396	15.159
累积贡献率/%		43.055	63.433	44.545	64.942	80.101
水环境因子	WT	0.536	0.692	-0.016	-0.631	0.734
	V	-0.490	-0.618	0.099	0.765	0.409
	pH	-0.163	0.596	-0.074	0.676	0.257
	DO	-0.771	0.262	-0.889	0.148	-0.345
	COD _{Mn}	0.757	-0.450	0.814	0.322	-0.055
	TP	0.830	-0.193	0.920	0.082	-0.235
	TN	0.769	-0.083	0.706	-0.219	-0.428
	Chl. a	0.664	0.290	0.866	-0.101	0.284

3 结论

1) 东江叶绿素 a 含量时空分布特征具有明显差异,丰水期叶绿素 a 含量显著高于枯水期,但丰、枯水期叶绿素 a 分布特征相似,叶绿素 a 高值区主要分布在中下游惠州段和东莞河段,整个河段呈现上游低下游高的分布趋势.

2) 东江叶绿素 a 含量与水温、COD_{Mn}、TN 呈显著正相关,与 TP 呈极显著正相关,且东江丰枯水期 TN/

TP 分别为 25.17 和 45.80,说明磷可能是东江浮游植物生长的限制因子.东江叶绿素 a 含量与流速的相关性存在时空异质性,主要受流速大小以及营养盐浓度的影响.

3) 氮磷营养盐、有机物质含量、水温和水动力条件都是影响东江浮游植物生长的重要因素,其中磷的影响最为显著.

4 参考文献

- [1] 杨 浩,曾 波,孙晓燕等.蓄水对三峡库区重庆段长江干流浮游植物群落结构的影响.水生生物学报,2012,**36**(4):715-723.
- [2] Wade AJ. Monitoring and modelling the impacts of global change on European freshwater ecosystems. *Science of the Total Environment*, 2006,**365**(1):3-14.
- [3] Hilton J, O'Hare M, Bowes MJ *et al.* How green is my river? A new paradigm of eutrophication in rivers. *Science of the Total Environment*, 2006,**365**(1):66-83.
- [4] Hutchins MG, Johnson AC, Deflandre A *et al.* Which offers more scope to suppress river phytoplankton blooms: Reducing nutrient pollution or riparian shading? *Science of the Total Environment*, 2010,**408**(21):5065-5077.
- [5] Welch EB. *Limnology*. New York: McGraw-Hill, 1952:538.
- [6] Garnier J, Billen G, Coste M. Seasonal succession of diatoms and chlorophyceae in the drainage network of the Seine River: Observations and Modeling. *Limnology and Oceanography*, 1995,**40**(4):750-765.
- [7] 江 源,彭秋志,廖剑宇等.浮游藻类与河流生境关系研究进展与展望.资源科学,2013,**35**(3):461-472.
- [8] 王红萍,夏 军,谢 平.汉江水华水文因素作用机理—基于藻类生长动力学研究.长江流域资源与环境,2004,**13**(3):282-285.
- [9] 栾 卓,范亚文,门晓宇.松花江哈尔滨段水域硅藻植物群落及其水质的初步评价.湖泊科学,2010,**22**(1):86-92.
- [10] 边归国,陈 宁,胡征宇等.福建某河流甲藻水华与污染指标的关系.湖泊科学,2010,**22**(3):405-410.
- [11] 周贝贝,王国防,徐 瑶等.南京秦淮河叶绿素 a 空间分布及其与环境因子的关系.湖泊科学,2012,**24**(2):267-272.
- [12] 王 岚,蔡庆华,张 敏等.三峡水库香溪河库湾夏季藻类水华的时空动态及其影响因素.应用生态学报,2009,**20**(8):1940-1946.
- [13] 贾良文,罗章仁,杨清书等.大量采沙对东江下游及东江三角洲河床地形和潮汐动力的影响.地理学报,2006,**61**(9):985-994.
- [14] 杨 涛,陈永勤,陈 喜等.复杂环境下华南东江中上游流域筑坝导致的水文变异.湖泊科学,2009,**21**(1):135-142.
- [15] 陈晓宏,王兆礼.东江流域土地利用变化对水资源的影响.北京师范大学学报:自然科学版,2010,**46**(3):311-316.
- [16] 廖剑宇,彭秋志,郑楚涛等.东江干流水体氮素的时空变化特征.资源科学,2013,**35**(3):505-513.
- [17] 王 博,梁志诚,任斐鹏等.东江干流富营养化评价及区域差异性研究.环境污染与防治,2011,**33**(6):15-18.
- [18] 杨 慧,唐 霖,梁海荣等.东江东莞段水质卫生学调查.环境与健康杂志,2013,**30**(3):244-245.
- [19] 金 辉,王 瀚.东江上游(河源段)水环境研究.环境与开发,2000,**15**(4):26-28.
- [20] 江 涛,张晓磊,陈晓宏等.东江中上游主要控制断面水质变化特征.湖泊科学,2009,**21**(6):873-878.
- [21] 张桂华.剑潭大坝对东江惠州河段浮游植物的影响研究.四川环境,2011,**30**(2):37-43.
- [22] 孟 伟,张 远,渠晓东等.河流生态调查技术方法.北京:科学出版社,2011:77-82.
- [23] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法:第4版.北京:中国环境科学出版社,2002:243-280.
- [24] Neal C, Hilton J, Wade AJ *et al.* Chlorophyll-a in the rivers of eastern England. *Science of the Total Environment*, 2006,**365**(1):84-104.
- [25] OECD. Eutrophication of waters: monitoring, assessment and control. OECD Paris, 1982:153-155.
- [26] 胡 韧,林秋奇,段舜山等.热带亚热带水库浮游植物叶绿素 a 与磷分布的特征.生态科学,2002,**21**(4):310-315.
- [27] Van Nieuwenhuysse EE, Jones JR. Phosphorus chlorophyll-a relationship in temperate streams and its variation with stream catchment area. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1996,**53**(1):99-105.
- [28] Chételat J, Pick F, Hamilton PB. Potamoplankton size structure and taxonomic composition: Influence of river size and nutrient concentrations. *Limnology and Oceanography*, 2006,**51**(1):681-689.
- [29] Koerselman W, Meuleman AFM. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, 1996,**33**(6):1441-1450.
- [30] 高月香,张永春.水文气象因子对藻华爆发的影响.水科学与工程,2006,**2**:10-12.
- [31] 江 源,王 博,杨浩春等.东江干流浮游植物群落结构特征及与水质的关系.生态环境学报,2011,**20**(11):1700-1705.
- [32] 王利利.水动力条件下藻类生长相关影响因素研究[学位论文].重庆:重庆大学,2006:64-72.
- [33] Petts GE. Water allocation to protect river ecosystems. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1996,**12**(4/5):353-365.