DOI:10.15928/j.1674-3075.2017.02.010

鹤地水库叶绿素a时空分布特征及其与环境因子的关系

王晓辉[1],杨 扬[2]

(1.广东省水文局湛江水文分局,湛江 524037; 2.暨南大学水生生物研究所,广州 510632)

摘要:为全面了解鹤地水库水体富营养变化趋势及导致水体富营养化的环境因子,于2010-2015年2月、5月、8月和11月,对鹤地水库叶绿素a含量及主要环境因子进行测定,分析鹤地水库叶绿素a含量的时空分布特征,运用逐步回归分析方法探讨鹤地水库叶绿素a和环境因子之间的相关关系,建立逐步回归方程,并运用主成分分析法对影响鹤地水库水质的主要环境因子进行了分析。结果表明,鹤地水库叶绿素a含量在0.8~44.5 μg/L,该水库处于富营养化水平;在时空分布上,叶绿素a含量季节变化表现为枯水期最低、平水期其次、丰水期相对较高;空间变化表现为河流区浓度较高,过渡区和湖泊区较低。运用逐步回归分析法建立的全库区叶绿素a回归方程为:$Y_{\text{Chl-a}}=7.690X_{\text{COD}_{\text{Mn}}}-32.587\ X_{\text{TP}}-8.689$ ($P<0.001$),影响鹤地水库叶绿素a含量的显著影响因子为高锰酸盐指数和总磷,总磷可能为浮游植物生长的限制性因子。主成分分析结果表明,影响水库水质的主要环境因子有透明度、氨氮、总磷、总氮和硝态氮。

关键词: 鹤地水库; 叶绿素a;时空分布;逐步回归分析

中图分类号:Q176 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2017)02-0065-05

随着经济的发展,污废水排放量增加,水体富营养化已成为全球性水环境问题(韩博平等, 2000)。水体富营养化将导致浮游植物数量急剧增加、发生水华以及生态系统破坏等一系列生态问题(秦伯强等, 2004)。叶绿素a是浮游植物的重要组成成分,所有的藻类均含有叶绿素a,且其在藻类中所含比例相对稳定。因此,叶绿素a含量一方面作为衡量浮游植物的生物量得到广泛应用(Reynolds, 1984);另一方面,叶绿素a可以直观地描述水体的营养状态。

近年来,对叶绿素a及其与环境因子相关关系的研究主要集中于温带和北亚热带地区的许多湖泊(Romo et al, 2001; 吕唤春等, 2003; 杨柳等, 2011)。胡韧等(2002)、王伟等(2010)对地处南亚热带地区的广东省水库中叶绿素a含量与环境因子的关系进行了研究。目前,国内外学者对叶绿素a及其与环境因子相关关系的研究结果不尽相同,特别是氮、磷与叶绿素a的关系一直存在争议(James et al, 2009; Chen et al, 2011)。

鹤地水库地处广东省西南方向、热带北缘的雷州半岛,气温相对较高、日照强、蒸发量大,该地区水资源丰富,但时空分布极不均匀。进入21世纪后,随着当地经济的快速发展、人口不断增长以及部分工业企业污染,鹤地水库富营养化程度加剧,水质明显下降。为全面了解鹤地水库水体富营养变化趋势及导致水体富营养化的环境因子,采集2010-2015年水库河流区、过渡区和湖泊区的叶绿素a含量与环境因子数据,进行主成分和多元回归分析,筛选识别影响水质及叶绿素a含量的主要环境因子,以期为该水库水质预警与治理提供理论依据。

1 研究区域与方法

1.1 区域概况

鹤地水库为综合性大(一)型水库,建库已有50多年,地跨粤、桂2省,是广东省5个大型饮用水源地之一,长期担负着湛江、茂名逾200万人口的生活供水。水库集雨面积为1 495 km^2,最大库容为11.44亿 m^3;库区周边基本以桉树林为主,上游九洲江多年来水量约为2.0亿 m^3,多年取水量约0.69亿 m^3,多年平均降雨量约1 800 mm,约80%的降水量集中在丰水期,水位常年保持在39 m左右。鹤地水库上游的广西博白县文地、宁潭两镇有规模生猪场约50家(存栏猪500头以上猪场有10多家),库区周边大小养猪场20多家(存栏猪约6 000头),这些养猪场产生的大量废污水未经处理直排入库,是加速水体富营养化的重要原因;水库上

收稿日期:2016-07-14

基金项目:广东省湛江市科技计划项目(2014A01008);国家水体污染控制与治理重大专项(2012ZX07206-004)。

作者简介:王晓辉,1977年生,女,博士,高级工程师,主要从事水环境监测及水域生态修复研究。E-mail: wangxh1977@126.com

游广西陆川县及其所属的大桥镇、乌石镇和良田镇、博白县及下属的文地镇、水库周边的石角镇、新安镇、中垌镇及红湖农场、红阳农场是主要的生活污染源。

根据当地的气候及水库特征，分别于2010－2015年的2月（枯水期）、5月（丰水期初期）、8月（丰水期末期）和11月（平水期）在水库河流区、过渡区和湖泊区表层以下0.5 m采集水样（图1）。

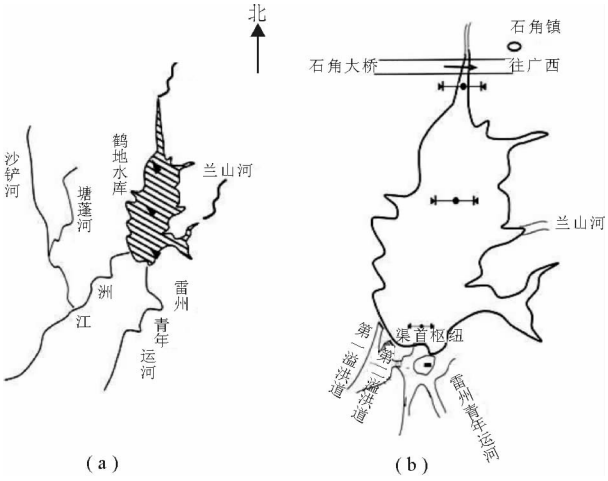

图1 鹤地水库的河流形势（a）与断面示意图（b）

Fig. 1 Sampling sites in Hedi Reservoir

1.2 样品分析

水温（T）、pH、溶解氧（DO）等指标采用YSI-5000便携式水质多参数测定仪现场测定；透明度采用塞氏透明度盘现场测定。5 L卡盖式采水器采集的水样用于叶绿素a、高锰酸盐指数（COD_{Mn}）、总氮（TN）、氨态氮（NH_4^+-N）、硝酸盐氮（NO_3^--N）、总磷（TP）的测定。高锰酸盐指数、总氮、氨氮、硝酸盐氮、总磷参照国家地表水质标准方法（GB 3838-2002）进行测定；叶绿素a参照SL88-2012丙酮反复冻融法进行测定。

1.3 数据分析

用Excel及Photoshop作图，SPSS 20.0进行数据处理。对环境因子进行主成分分析。根据Bartlett值判断相关矩阵是否为一个单位矩阵，可否进行主成分因子分析。采用Varimax正交旋转法对因子进行旋转，使每个主成分的系数向0和1两级分化，按照特征值大于1的原则提取出主成分，并获得各环境因子的主成分得分。多元逐步回归方程的建立既要满足统计学的要求，也要根据实际情况需要选择原因变量；方程方差分析F值的显著水平分别设定为$P<0.05$。

2 结果与分析

2.1 叶绿素a的时空分布

2010年2月－2015年11月鹤地水库河流区、过渡区和湖泊区叶绿素a含量为0.8～44.5 μg/L。总体呈现2014年前叶绿素a含量较低，2014年后叶绿素含量较高；叶绿素a含量年度变化基本表现为枯水期较低、平水期其次、丰水期相对较高；空间变化而言，河流区叶绿素a含量较高，过渡区和湖泊区较低（图2）。

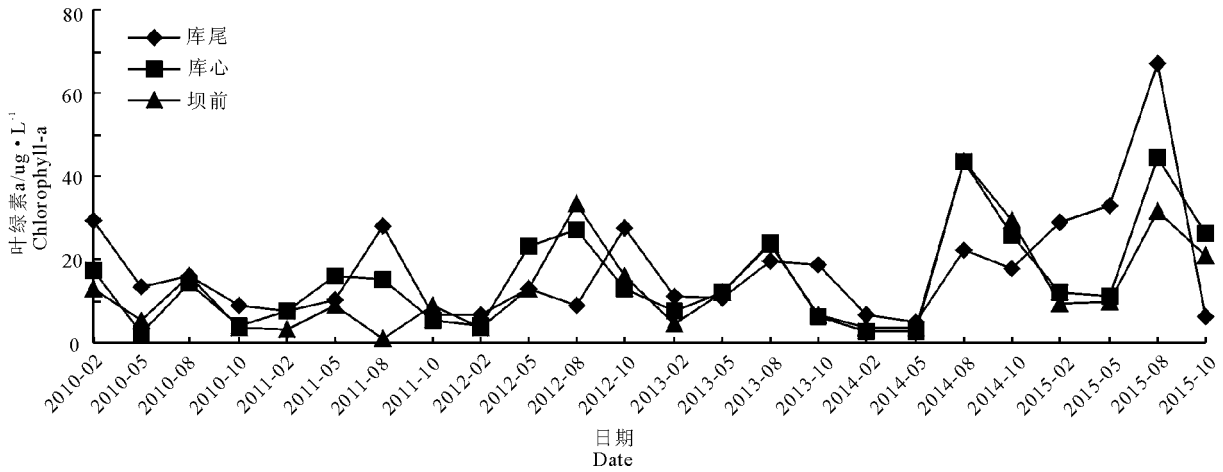

图2 鹤地水库叶绿素a含量变化

Fig. 2 Spatial-temporal variation of Chl-a content in Hedi Reservoir

2.2 环境因子主成分分析

分析结果表明，当指标与某一主成分联系系数的绝对值越大，则代表该水质指标与主成分的联系越紧密。Bartlett检验表明，Bartlett值＝371.154，$P<0.0001$，说明相关矩阵不是一个单位矩阵，可以进行主成分分析。按照特征值大于1的原则提取出

3 个主成分,旋转后3 个主成分的因子载荷量见表1。PCA1、PCA2 和 PCA3 特征值在 1.191 ~ 3.392,主成分累计贡献率达到 71.599%,涵盖了大部分信息,可以解释大部分数据,且 PCA1 的贡献率最大,达 37.684%。对 PCA1 影响较大的是透明度、氨氮、总磷、总氮和硝态氮,因子载荷值为 0.255 ~ 0.320,PCA1 反映的是鹤地水库营养水平。对 PCA2 影响较大的是水温、pH 和高锰酸盐指数,因子载荷值为 0.250 ~ 0.491,PCA2 反映的是酸碱度和有机质的污染情况。对 PCA3 影响较大的是溶解氧,因子载荷值为 0.636。矩阵中 PCA1 的贡献率最大,表明对 PCA1 影响较大的透明度、氨氮、总磷、总氮和硝态氮是影响水库水质的主要指标。

表 1　各水质指标主成分载荷矩阵

Tab. 1　Component matrix of each water quality parameter

水质指标	成份		
	PCA1	PCA2	PCA3
水温	0.005	0.794	-0.428
透明度	-0.750	-0.288	0.152
pH 值	-0.459	0.546	0.495
溶解氧	-0.610	-0.157	0.636
氨氮	0.756	-0.156	0.130
总磷	0.627	0.271	0.324
总氮	0.908	-0.147	0.197
高锰酸盐指数	0.140	0.827	0.267
硝态氮	0.663	-0.150	0.318
特征值	3.392	1.861	1.191
贡献率/%	37.684	20.681	13.234
累计贡献率/%	37.684	58.365	71.599

2.3　叶绿素 a 含量与环境因子逐步回归分析

依据选定的筛选条件,运用逐步回归分析方法建立鹤地水库不同空间的多元线性回归方程。结果表明,鹤地水库河流区、过渡区和湖泊区高锰酸盐指数对叶绿素 a 含量均有显著影响;整个库区对叶绿素 a 含量有显著影响的因子为高锰酸盐指数和总磷,回归方程及相关性分析见表 2。

表 2　叶绿素 a 与环境因子的回归方程相关性分析

Tab. 2　Relationship of Chl-a concentration with environmental factors at different sampling sites expressed as stepwise multiple regression equations

监测区域	回归方程	R	F	P
河流区	$Y_{\text{Chl-a}} = 4.395X_{\text{COD}_{\text{Mn}}} + 0.735$	0.406	4.351	0.049
过渡区	$Y_{\text{Chl-a}} = 9.985X_{\text{COD}_{\text{Mn}}} - 16.153$	0.774	32.976	<0.001
湖泊区	$Y_{\text{Chl-a}} = 8.945X_{\text{COD}_{\text{Mn}}} - 14.137$	0.702	21.362	<0.001
全库区	$Y_{\text{Chl-a}} = 7.690X_{\text{COD}_{\text{Mn}}} - 32.587\ X_{\text{TP}} - 8.689$	0.631	22.773	<0.001

3　讨论

3.1　叶绿素 a 含量的时空分布特征

本次研究得出鹤地水库河流区、过渡区和湖泊区叶绿素 a 含量为 0.8 ~ 44.5 μg/L。依据 OECD (1982) 对水体营养类型的划分标准,鹤地水库叶绿素 a 含量的年均值和最大值均达到富营养化程度,表明该水库已处于富营养状态。叶绿素 a 含量年度变化基本表现为枯水期较低、平水期其次、丰水期相对较高;与王伟等(2010)在华南地区小型水库的研究结果类似。

鹤地水库叶绿素 a 含量空间分布规律表现为:河流区 > 过渡区 > 湖泊区。不同库区叶绿素 a 含量的差异受地理位置、风速、水流等多种因素影响。鹤地河流区叶绿素 a 含量最高,一方面河流区所在区域为石角镇,该区域人口密集、排污口多,生活污水大多直排入库,导致该区域营养盐升高,有利于藻类生长繁殖;另一方面,与入库河口区、上游来水大部分污染物在河流区聚集有关。过渡区叶绿素 a 含量相对较低,主要是鹤地水库水体的自净与稀释使叶绿素 a 含量降低;另外水库频繁出水,加快水体的交换速度,不利于藻类的生长,也是导致过渡区与湖泊区叶绿素 a 含量低的原因。

3.2　叶绿素 a 含量的环境影响因子

水温是叶绿素 a 含量的关键因子,也是主动影响因子。水体温度通过调节浮游植物体内的酶活性来满足浮游植物生长与繁殖需要(Beyruth, 2000),进而影响叶绿素 a 含量。本研究结果显示,鹤地水库水温对叶绿素 a 含量的影响不显著。鹤地水库地处热带北缘,常年温度在 15℃。因而水温不是影响叶绿素 a 含量的制约性因子。

尽管分析结果表明 COD_{Mn}对叶绿素 a 含量影响较显著,但由于水体中浮游植物光合作用产生的大量有机物,可使水体中 COD_{Mn} 值升高(阮晓红等, 2008)。因此,水体中 COD_{Mn} 是叶绿素 a 的被动因子,不能说明其是影响浮游植物生长的制约因子。

鹤地水库一年中基本上以蓝藻为优势种(邹红菊等, 2010);蓝藻适合略偏碱性的水体,相对其它浮游植物而言,能形成特定的生长策略。因此,一旦在适合的环境中形成优势种,便能长期较为稳定存

在,难以被其它藻类演替(Moustaka-Gouni et al, 2007);而pH值主要影响浮游植物对水体化学营养盐的可利用性。鹤地水库pH值长年维持在6.10~8.96,故其也不是影响浮游植物生长的制约因子。

各类营养盐及氮、磷是浮游植物生长所必需的营养元素和主要控制因子,其浓度变化可显著影响水体浮游植物的生物量,从而影响叶绿素a的含量,但叶绿素a与氮、磷的关系众说纷纭,没有一致的结果(王丽卿等, 2008; 王震, 2014)。OECD(1982)为研究叶绿素a与各种理化因子之间的关系, 在北欧所做的264次实验发现,水体磷为唯一主导因子的占80%,氮为唯一主导因子的占11%,只有9%的水体为氮、磷共同作用。国内外以往的研究结果表明,氮或磷与浮游植物有正负相关或无相关的结论都存在(Vollenweider, 1985; Liu et al, 2011)。热带地区与中纬度地区,浮游植物的生长受氮和磷限制,特别是在以固氮蓝藻为优势种的水体中,磷限制起主导作用(Moyo,1991)。鹤地水库蓝藻为绝对优势种,逐步回归分析表明,该水库中总磷对叶绿素a含量影响显著,因此该水库中磷可能成为浮游植物生长的限制性因子;与王晓辉等(2013)对同处于雷州半岛大水桥水库的研究结果具有共性。磷是否成为雷州半岛地区浮游植物生长的限制性因子,有待进一步研究。

参考文献

韩博平, 李摇铁, 林旭钿,2003. 广东省大中型水库富营养化现状与防治对策研究[M]. 北京:科学出版社.

胡韧, 林秋奇, 段舜山,等,2002. 热带亚热带水库浮游植物叶绿素与磷分布的特征[J]. 生态科学,21(4): 310-315.

吕唤春, 王飞儿, 陈英旭,等,2003. 千岛湖水体叶绿素a与相关环境因子的多元分析[J]. 应用生态学报, 14(8): 1347-1350.

秦伯强, 罗潋葱,2004. 太湖生态环境演化及其原因分析[J]. 第四纪研究, 24(5): 561-567.

阮晓红, 石晓丹, 赵振华,等,2008. 苏州平原河网区浅水湖泊叶绿素a与环境因子的相关关系[J]. 湖泊科学, 20(5): 556-562.

王丽卿, 张军毅, 王旭晨,等,2008. 淀山湖水体叶绿素a与水质因子的多元分析[J]. 上海水产大学学报, 17(1): 58-64.

王伟,顾继光,韩博平,等,2009. 华南沿海地区小型水库叶绿素a浓度的影响因子分析[J]. 应用与环境生物学报,15(1): 64-71.

王晓辉,李秋华,2013. 大水桥水库浮游植物群落结构特征研究[J]. 水生态学杂志, 34(2): 40-45.

王震, 邹华, 杨桂军,等,2014. 太湖叶绿素a的时空分布特征及其与环境因子的相关关系[J]. 湖泊科学, 26(4): 567-575.

杨柳, 章铭,刘正文,2011. 太湖春季浮游植物群落对不同形态氮的吸收[J]. 湖泊科学, 23(4): 605-611.

邹红菊,胡韧,韩博平,2010. 鹤地水库浮游植物群落的结构与动态[J]. 热带亚热带植物学报, 18(2): 196-202.

Beyruth Z, 2000. Periodic disturbances, trophic gradient and phytoplankton characteristics related to cyanobacterial growth in Guarapiranga reservoir, Sao Paulo State, Brazil [J]. Hydrobiologia, 424: 51-60.

Chen M J, Li J, Dai X, et al, 2011. Effects of phosphorus and temperature on chlorophyll a contents and cell sizes of *Scenedesmus obliuus* and *Microcystis aeruginosa*[J]. Limnology, 12(2): 187-192.

James T, Havens K, Zhu G W, et al, 2009. Comparative analysis of nutrients, chlorophyll and transparency in two large shallow lakes (Lake Taihe, P. R. China and Lake Okeechobee, USA) [J]. Hydrobiologia, 627(1): 211-231.

Liu X, Lu X H, Chen Y W, 2011. The effects of temperature and nutrient ratios on *Microystis* blooms in Lake Taihu, China[J]: An 11-year investigation, Harmful Aogae, 10(3):337-343.

Moustaka-Gouni M, Vardaka E, Tryfon E, 2007. Phytoplankton species sucession in a shallow Medirerranean lake (L. Kastoria, Greece): steady-state dominance of Limnothrix redekei, *Microcystis aeruginosa* and *Cylindrosper mopsis raciborskii*[J]. Hydrobiologia, 575: 129-140.

Moyo S M, 1991. Cyanobacterial nitrogen fixation in Lake Kariba, Zimbabwe [J]. Verh Int Ver Limnol, 24: 1123-1127.

Organization for Economic Cooperation and Development. Eutrophication of Waters, 1982. Monitoring Assessment and Control. Final Report. OECD Cooperative Program on Monitoring of Inland Waters (Eutrophication Control), Environment Directorate [R]. OECD, Paris.

Reynolds C S, 1984. The ecology of fresh water photoplankton [M]. Cambridge Uni Press.

Romo S, Van Donk E, Gylstra R, et al, 1996. A multivariate analysis of phytoplankton and food web changes in a shallow biomanipulated lake[J]. Freshwater Biology, 36: 683-696.

Vollenweider R A, 1985. Elemental and biochemical composition of plankton biomass; some comments and explorations [J]. Achiv fur Hydrobiologie, 105(1): 11-29.

(责任编辑 万月华)

Spatial-temporal Distribution of Chlorophyll-a and Its Relationship with Environmental Factors in Hedi Reservoir

WANG Xiao-hui[1], YANG Yang[2]

(1. The Hydrographic Office of Hydrology Station in Zhanjiang, Guangdong Province, Zhanjiang 524037, P. R. China;
2. Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, P. R. China)

Abstract: Eutrophication of water bodies is a global problem and concern has been increasing at home and abroad. Chlorophyll-a (Chl-a) concentration is the primary means of evaluating the eutrophic status of lakes and reservoirs. Hedi Reservoir is one of the five largest drinking water sources in Guangdong Province and, to better understand the nutrient dynamics and factors influencing eutrophication, seasonal monitoring of chl-a and physicochemical parameters was carried out in the reservoir from 2010 to 2015. Based on the results, the temporal-spatial distribution of Chl-a in Hedi Reservoir was characterized. The relationships between the level of Chl-a and environmental parameters were evaluated by stepwise multiple regression analysis and the primary driving factors affecting water quality were determined by principal component analysis. Monitoring was carried out in February (dry season), May (early wet season), August (late wet season) and November (normal season) from 2011 to 2015. Water samples were collected at 0.5 m below the surface and in-situ measurements [water temperature, pH, dissolved oxygen (DO) and Secchi disk depth (SD)] were measured in the riverine zone, transitional zone and lacustrine zone of Hedi Reservoir. Parameters determined in the lab included Chl-a, permanganate index (COD_{Mn}), total nitrogen (TN), ammonia nitrogen (NH_4^+-N), nitrate nitrogen (NO_3^--N) and total phosphorus (TP). Chlorophyll-a concentration ranged from 0.8 – 44.5 μg/L, indicating that the water quality of Hedi Reservoir was eutrophic. The highest concentration of chl-a occurred in wet season and the lowest in dry season, and the concentration increased after 2014. Spatially, the concentration of Chl-a in the riverine zone was higher than in the transitional and lacustrine zones. The relationship of Chl-a concentration with environmental factors was expressed by stepwise multiple regression equation: $Y_{\text{Chl-a}} = 7.690X_{COD_{Mn}} - 32.587\ X_{TP} - 8.689$ ($P < 0.001$). The chlorophyll-a concentration was significantly related to COD_{Mn} and TP, and TP was the factor limiting phytoplankton growth. Principal component analysis showed that SD, NH_4^+-N, TP, TN and NO_3^--N were the major environmental factors affecting water quality of Hedi Reservoir.

Key words: Hedi Reservoir; chlorophyll-a; spatial-temporal distribution; stepwise multiple regression analysis