#### DOI: 10.5846/stxb201908291790

刘毛亚, 童春富, 吴逢润. 太浦河水体叶绿素 a 纵向演变特征及主要影响因子. 生态学报, 2020, 40(19): 7084-7092. Liu M Y, Tong C F, Wu F R.Longitudinal variation characteristics of Chlorophyll a and the influencing factors along the Taipu River. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(19):7084-7092.

## 太浦河水体叶绿素 a 纵向演变特征及主要影响因子

## 刘毛亚,童春富\*,吴逢润

华东师范大学河口海岸学国家重点实验室,崇明生态研究院,上海 200241

摘要:叶绿素 a 作为重要的水质指标,可直观的描述水体的营养状态。在随水流输送过程中,受沿程环境条件的影响,水体叶绿 素 a 浓度会发生相应改变。2017 年 11 月—2018 年 10 月,在东太湖及太浦河沿线设置了固定采样站点,开展了水体叶绿素 a 的 月际取样调研与分析。结果表明:从东太湖至太浦河沿线叶绿素 a 浓度发生了明显的纵向演变,在东太湖叶绿素 a 浓度年平均 为(15.341±2.329) μg/L,经过多个站点,到达金泽水文站时,浓度为(11.002±1.004) μg/L,整体上呈显著下降态势(P<0.05), 但不同站点两两之间的对比特征存在差异,而且在不同月份其纵向演变特征也有所不同。聚类及非度量多维尺度分析也表明 其在空间和时间上分布的差异性。非线性回归分析表明,在时间和空间上与叶绿素 a 浓度相关性最高的环境因子为水下 0.5 m 处的光照强度(P<0.01);在 2018年10月,水体叶绿素 a 浓度与溶解氧也呈显著相关(P<0.05)。综合现有研究,水体叶绿素 a 的纵向演变受水质等多种因素的影响。未来需采用系统分析手段,探讨水质、降水、水力停留时间、流速和流量等多种因子对叶 绿素 a 时空分布特征的综合作用,以期为水源地水质安全保障提供科学依据。

关键词:水源地;叶绿素 a;纵向演变;影响因子

## Longitudinal variation characteristics of Chlorophyll a and the influencing factors along the Taipu River

#### LIU Maoya, TONG Chunfu<sup>\*</sup>, WU Fengrun

State key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, Institute of Eco-Chongming, East China Normal University, Shanghai 200241, China

Abstract: Chlorophyll a, as an important water quality indicator, can intuitively describe the nutritional status of the water. During the transportation with water, the concentration of chlorophyll a in the water will change correspondingly under the influence of environmental factors along the way. From November 2017 to October 2018, we set up fixed sampling sites along the East Taihu Lake and Taipu River to carry out monthly investigation and analysis on the chlorophyll a of the water. The results showed that the concentration of chlorophyll a from the East Taihu Lake to the sites along the Taipu River had a significant longitudinal variation. The annual average concentration of chlorophyll a in East Taihu Lake was (15.341 ± 2.329)  $\mu$ g/L. After passing through several sites of the Taipu River, the concentration reached (11.002±1.004)  $\mu$ g/L at the site of Jinze Hydrological Station, which showed a significant decline trend overall (P < 0.05). There were differences in the contrast characteristics between every two different sites. The longitudinal variation characteristics also appeared differences in the different months. Clustering and nMDS analysis also presented the differences among the different sites and the different months. Nonlinear regression analysis revealed that the environmental factor which appeared the highest correlation with chlorophyll a concentration was the light intensity at 0.5 m below water surface (P < 0.01), and the chlorophyll a concentration was also significantly correlated with the dissolved oxygen in October 2018 (P < 0.05).

收稿日期:2019-08-29; 网络出版日期:2020-07-31

基金项目:水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07207003-01)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: cftong@ sklec.ecnu.edu.cn

According to the currently existing studies, the longitudinal variation of chlorophyll a in water is influenced by many factors such as water quality. In the future, more environmental factors should be considered, and the comprehensive effects of water quality, precipitation, hydraulic retention time, current velocity and runoff on the temporal and spatial distribution characteristics of chlorophyll a should be analyzed systematically, which can provide the scientific basis for the safeguard on the water quality of the water sources.

#### Key Words: water source; chlorophyll a; longitudinal variation; influencing factors

浮游植物是水生生态系统的初级生产者,是水生食物链和食物网的基础环节,具有增长速度快、繁殖周期 短以及对环境变化敏感等特点,直接影响着水生生态系统的结构与功能<sup>[1-3]</sup>。水体叶绿素 a 的含量水平能够 反映浮游植物生物量的高低;叶绿素 a 作为重要的水质指标,可直观的描述水体营养状况<sup>[4-5]</sup>。很多学者已经 对水体叶绿素 a 含量及其与环境因子的关系做了大量研究<sup>[4-8]</sup>。在欧美国家,水体叶绿素 a 含量已广泛应用 于环境监测<sup>[9-10]</sup>。

纵向演替一般指浮游植物等生物类群沿着水流方向沿程发生的演替过程。通常具有一定线状流程变化 的水体,浮游植物等生物类群都具有一定的纵向演替特征<sup>[1-2,9-12]</sup>。与之相对应,水体叶绿素 a 含量也势必会 随之发生变化。由于不同河段和流程距离的增加会导致水体叶绿素 a 浓度有所不同,其纵向演变特征也存在 差异<sup>[1,13-16]</sup>。如 Sabater 等<sup>[13]</sup>研究表明埃布罗河浮游植物叶绿素受多种因素的影响,从河的上游到中段有所 波动,但整体逐渐增加,且在下游浓度达到最大。王琼等<sup>[17]</sup>研究表明太子河流域水体叶绿素 a 上游浓度较 低,下游河段叶绿素 a 浓度较高。周贝贝等<sup>[18]</sup>对南京秦淮河研究表明从上游到下游,水体叶绿素 a 含量的分 布表现出一定的空间差异性,其纵向变化随着距离的增加具有一定的波动性,无明显规律。

太浦河连接东太湖和黄浦江,是江苏、浙江、上海等地区的重要取水水源。上海市重要水源地金泽水库也 从太浦河取水。目前对太浦河水体叶绿素 a 变化特征的相关研究尚未有报道。本文拟通过对东太湖及太浦 河沿程不同站点的月际取样调研,探讨以下科学问题:(1)太浦河水体叶绿素 a 浓度的纵向演变特征如何? (2)影响水体叶绿素 a 浓度纵向演变的主要因子及其作用特征是什么? 以期为进一步研究水体叶绿素 a 纵向 演变规律奠定基础,同时为水源地水质安全保障提供科学依据。

#### 1 研究区域概况

研究区域位于东太湖及太浦河,如图 1 所示。该区域属于亚热带季风性气候区,气候温和湿润,年均温 度为 15.8 ℃,年均降水量为 1093.5 mm<sup>[19]</sup>。太浦河是太湖流域的重要河流,长为 57.2 km,流经江、浙、沪 3 省 市 15 个乡镇,西起江苏省吴江市庙港镇太湖东岸,东至青浦区金泽镇池家港村入上海市境,在练塘镇南大港 处与西泖河相接。太浦河沿线地势平坦,中段河湖众多,承担着太湖泄洪通道的重要功能。同时,区域水质状 况受到了多方面的影响,如工业废水排放、航运业发展及农业生产中农药和化肥的使用等,可能影响区域饮用 水安全,已经引起广泛关注<sup>[20-23]</sup>。

#### 2 材料与方法

#### 2.1 取样调研与分析

在东太湖及太浦河沿线设置了6个固定采样站点,如图1所示。在东太湖靠近太浦河入口处,设置采样站点DT;在太浦河沿线自西至东设置了5个采样站点:T1(太浦闸)、T2(平望大桥)、T3(黎里东大桥)、T4(芦墟大桥)及T5(金泽水文站)。2017年11月—2018年10月,每月一次对相应站点表层水体叶绿素 a 含量进行了取样调查,具体采样方法参照《水域生态系统观测规范》进行。现场采用 IP67手持多参数水质测量仪测定水体温度、溶解氧、pH和电导率;用塞氏圆盘测定水体透明度(SD);用 ZDS-10W 系列照度计测定水上和水

下 0.5 m 光照强度。

参照《中华人民共和国国家环境保护标准 HJ 897-2017 水质叶绿素 a 的测定分光光度法》,在实验室采用 分光光度法进行水体叶绿素 a 的测定分析。

#### 2.2 数据处理

用 Excel 软件对数据进行简单的统计和整理分类; 用 SPSS 20.0 对数据进行方差齐性检验,不具备方差齐 性的数据需转化后再进行分析;采用单因素方差分析 (One-way ANOVA)对不同采样站点环境因子和叶绿素 a 浓度的差异进行显著性分析,再选用最小显著差法 (LSD)进行均数间多重比较<sup>[24]</sup>。以 P<0.05 表示显著 差异, P<0.01 表示极显著差异。采用统计软件 PRIMER 5.2.8 对水体叶绿素 a 浓度与环境因子进行非 线性回归分析:用 BVSTEP 程序筛选与水体叶绿素 a 匹 配最好的环境因子组合,并计算相关系数;再用 RELATE 程序检验两者之间的相关性是否显著;所有数 据在使用时需经过四次方根变换,以满足数据的正态性 要求;环境因子的相关数据需要进行标准化处理,以避





# Fig. 1 Map of sampling sites in the East Taihu Lake and Taipu River

DT:东太湖 East Taihu Lake;T1:太浦闸 Taipu Gate;T2:平望大桥 Pingwang Bridge;T3:黎里东大桥 Lilidong Bridge;T4;芦墟大桥 Luxu Bridge;T5:金泽水文站 Jinze Hydrological Station

免量纲差异造成的影响<sup>[25]</sup>。同时,采用 PRIMER 5.2.8 对不同月份叶绿素 a 浓度进行聚类及非度量多维尺度 分析(non-metric multi-dimensional scaling, nMDS):水体叶绿素 a 数据经过四次方根变换后,计算 Bray-Curtis 相似系数,构建相似矩阵;在此基础上进行等级聚类和非度量多维尺度变换分析<sup>[26-27]</sup>。用胁强系数(stress)来 判断一个二维非度量多维标度分析结果的可信度:0<stress<0.01,完全可信;0.01<stress<0.05,可信的;0.05< stress<0.1,基本可信;0.1<stress<0.2,有一定参考价值;0.2<stress<0.3,几乎是任意的,不可信<sup>[28]</sup>。

#### 3 研究结果

3.1 叶绿素 a 浓度变化特征

2017年11月—2018年10月东太湖及太浦河沿线表层水体叶绿素 a 浓度如图 2 所示。在图 2 中,从东 太湖至太浦河沿线叶绿素 a 浓度整体呈现逐渐降低的趋势,但 T1 站点全年平均叶绿素 a 浓度略高于 DT 站 点,前者为(15.650±1.910) µg/L,后者为(15.341±2.329) µg/L;在 T4 采样站点全年叶绿素 a 平均浓度最低, 为(9.941±0.932) µg/L。单因素方差分析结果表明,不同站点表层水体叶绿素 a 浓度整体存在显著差异(P< 0.05),但是不同站点两两之间的对比差异不同。DT 站点叶绿素 a 浓度与 T3、T4 有显著差异(P<0.05),与 T1、T2、T5 无显著差异(P>0.05);T1 站点叶绿素 a 浓度与 T3、T4、T5 有显著性差异(P<0.05),但与 DT 和 T2 站点之间均无显著差异(P>0.05);T2 站点与其他各采样站点两两之间均无显著性差异(P>0.05)。

在图 2 中,不同月份叶绿素 a 浓度有所不同,其中 9 月各站点平均叶绿素 a 含量最高,为(21.295±3.012) µg/L,12 月各站点平均叶绿素 a 含量最低,为(7.756±0.295) µg/L。单因素方差分析结果表明,不同月份表 层水体叶绿素 a 浓度整体存在显著差异(P<0.05),但是不同月份两两之间的对比差异不同。

同时,不同月份叶绿素 a 浓度在不同站点间的变化特征也有所不同,如图 2 所示。如在 3—5 月和 11 月 叶绿素 a 浓度自 DT 站点至 T5 站点,先降低再升高;而在 7 月和 9 月叶绿素 a 浓度沿程先升高再降低。

不同站点叶绿素 a 浓度的聚类及非度量多维尺度分析的结果如图 3 所示。聚类分析将 6 个站点分成了 3 组, T2 单独成为一组; DT 和 T1 组成一组; T3、T4 和 T5 组成一组, 且这六个站点的叶绿素 a 浓度相似性达到了 96%以上。nMDS 分析图的 Stress 值为 0.01, 说明解释站点之间相似关系的可信度较好, 可以把 6 个站点大



图 2 不同站点、不同月份水体叶绿素 a 浓度变化特征



致分成3组,这与聚类分析的结果一致。

不同月份叶绿素 a 浓度的聚类及非度量多维尺度分析的结果如图 3 所示。聚类分析将 12 个月份分成了 4 组,6 月单独成为一组;3 月、8 月和 10 月组成一组;1、2、4、5、11 和 12 月组成一组,7 月和 9 月组成一组;其 中 3 月、8 月和 10 月及 1、2、4、5、11 和 12 月这几个月份的叶绿素 a 相似性达到了 95%以上。nMDS 分析图的 Stress 值为 0.03,说明解释月份之间相似关系的可信度较好,可以把 12 个月份大致分成 4 组,这与聚类分析的 结果一致。

3.2 不同采样站点环境因子变化特征

不同采样站点环境因子的变化特征如表1所示。方差分析结果显示不同站点整体pH和电导率存在显 著差异(P<0.05),溶解氧、水温、透明度、水上和水下 0.5 m光强在各站点整体均无显著性差异(P>0.05)。不 同站点各因子两两比较的结果存在明显差异。DT 与 T2—T5 站点的 pH 和溶解氧有显著差异(P<0.05),但与 T1 站点无显著差异(P>0.05)。DT 和 T1 站点的电导率与 T4、T5 有显著差异(P<0.05),但与两站点间电导率 无显著差异(P>0.05);T2、T3 站点的电导率与其他各采样站点两两之间均无显著性差异(P>0.05)。T1、T4 水上光强与其他各采样站点与无显著差异(P>0.05);T5 水上光强与 DT、T2、T3 均有显著差异(P<0.05),但 与 T2、T4 无显著差异(P>0.05)。T1—T4 站点水下 0.5 m 光强与其他各采样站点及站点两两之间无显著性差 异(P>0.05);DT 站点水下 0.5 m 光强与 T5 有显著性差异(P<0.05),与其他各采样站点无显著性差异(P> 0.05)。



图 3 不同站点和不同月份叶绿素 a 浓度的聚类及非度量多维尺度分析

Fig.3 Cluster and NMDS analysis of the Chlorophyll a concentrations in the different sampling sites and the different months

表1 不同采样站点环境因子(均值±标)	隹误]
---------------------	-----

Table 1	Environmental	factors in	the different	sampling sites	(Mean±SE
---------	---------------	------------	---------------	----------------	----------

采样站点 Sampling sites	рН	溶解氧 Dissolved oxygen/(mg/L)	水温 Temperature/℃	电导率 Conductivity/ (µs/cm)	透明度 Transparency/cm	水上光强 Light intensity above water surface/Lux	水下 0.5 m 光强 Light intensity at 0.5 m below water surface/Lux
DT	8.29±0.17a	8.39±0.41a	20.15±2.76a	413.88±19.23a	31.67±1.84a	43527.92±8831.00a	2535.10±824.95a
T1	$8.03{\pm}0.10{\rm ab}$	$7.47 \pm 0.46$ ab	20.24±2.75a	$399.08{\pm}42.06{\rm ab}$	32.13±2.80a	$34506.67 {\pm} 8358.50 {\rm ab}$	977.52±331.96ab
T2	$7.78{\pm}0.06{\rm bc}$	$6.93 \pm 0.52 \mathrm{b}$	$20.57 \pm 2.54a$	429.58±16.53abc	$32.00 \pm 2.23 a$	47805.00±9680.86a	1815.42±778.77ab
Т3	$7.66{\pm}0.06{\rm c}$	$6.68 \pm 0.47 \mathrm{b}$	20.69±2.73a	$467.38 \pm 14.53 \mathrm{ac}$	32.21±2.27a	41890.08±8365.06a	1144.58±317.85ab
T4	$7.70{\pm}0.05{\rm c}$	$6.66 \pm 0.40 \mathrm{b}$	20.61±2.80a	$479.17 \pm 15.24 c$	30.54±1.71a	$33427.46 \pm 7077.08 \mathrm{ab}$	1930.71±657.46ab
T5	$7.71{\pm}0.05{\rm c}$	$6.85 \pm 0.46 \mathrm{b}$	20.29±2.91a	$484.67 \pm 12.72c$	30.42±1.80a	$18655.42{\pm}4186.17{\rm b}$	$564.14 \pm 129.45 \mathrm{b}$

DT:东太湖 East Taihu Lake;T1:太浦闸 Taipu Gate;T2:平望大桥 Pingwang Bridge;T3:黎里东大桥 Lilidong Bridge;T4;芦墟大桥 Luxu Bridge; T5:金泽水文站 Jinze Hydrological Station;表中同一列数据标注不同小写字母表示六个采样站点相互之间存在显著差异(P<0.05);

#### 3.3 叶绿素 a 浓度与环境因子变化特征对应分析

叶绿素 a 浓度与环境因子的最佳匹配组合如表 2 所示。从空间上来看,叶绿素 a 浓度整体与水下 0.5 m 光照强度存在极显著相关性(P<0.01);在各个站点,现有环境因子与叶绿素 a 浓度均未呈现出显著的相关性 (P>0.05)。从时间上来看,叶绿素 a 浓度整体同样与水下 0.5 m 光照强度呈极显著相关(P<0.01);在 10 月 份叶绿素 a 浓度与溶解氧呈显著相关(P<0.05)。

#### 4 讨论

#### 4.1 叶绿素 a 分布与纵向演变

已有研究表明,浮游植物的纵向演替是普遍存在的现象,但是在不同的研究区域,往往表现出不同的演替特征<sup>[13,15-16]</sup>。与浮游植物的纵向演替相对应,水体叶绿素 a 浓度也会随水流发生纵向演变,但不同河流或同一河流不同河段往往具有不同的变化特征。如从源头进入到急流水域时,叶绿素 a 浓度通常会显著下降<sup>[1]</sup>; 但也有研究表明,最低叶绿素 a 浓度出现在河流的上部,在中段及下游水体叶绿素 a 浓度显著增加<sup>[1,11,14]</sup>;还 有研究发现,叶绿素 a 浓度随着流程距离的增加而增加<sup>[29-30]</sup>。在本研究中,从东太湖至太浦河沿线叶绿素 a 浓度发生了明显的纵向演变,从东太湖经过多个站点,到达金泽水文站时整体上呈显著下降态势,但不同站点 两两之间的对比特征存在差异,这与之前有些研究也有一定的相似性。同时本文中,空间上的聚类及非度量 多维尺度分析结果表明河段的中游 T2 单独成为一组、源头 DT 和上游 T1 组成一组、下游河段 T3—T5 组成一组,且可信度较好,这也说明表层水体叶绿素 a 浓度随着流程距离的增加也存在着明显的差别,具有一定的纵 向演变特征。基于上述分析可知,不同区域由于条件差异,水体叶绿素 a 的空间分布特征也存在着一定差异。

Table 2      Nonlinear correlations between the Chlorophyll a and environmental factors					
		相关系数 Correlation	筛选因子组合 Selected combination	Р	
采样站点	DT	0.201	pH,水上光强	0.428	
Sampling sites	T1	-0.108	溶解氧,水温,电导率	0.15	
	T2	0.116	水温,水上光强,水下 0.5 m 光强	0.239	
	Т3	-0.196	水温,电导率	0.475	
	T4	0.188	水温,水下 0.5 m 光强	0.648	
	T5	0.06	水下 0.5 m 光强	0.553	
	总	0.029	水下 0.5 m 光强	0.003	
采样时间	2017-11	0.303	水上光强	0.572	
Months	2017-12	-0.24	电导率,透明度,水下 0.5 m 光强	0.631	
	2018-01	0.464	水下 0.5 m 光强	0.689	
	2018-02	-0.154	溶解氧,电导率	0.210	
	2018-03	0.532	水下 0.5 m 光强	0.146	
	2018-04	0.882	电导率	0.192	
	2018-05	0.842	水温,透明度,水下 0.5 m 光强	0.211	
	2018-06	0.625	水下 0.5 m 光强	0.052	
	2018-07	0.518	电导率,透明度	0.222	
	2018-08	0.582	溶解氧,水下 0.5 m 光强	0.166	
	2018-09	0.204	pH,电导率,透明度	0.295	
	2018-10	0.354	溶解氧	0.016	
	总	0.029	水下 0.5 m 光强	0.005	

表 2	叶绿素 a 浓度与环境因子的非线性相关性特征	

同时已有研究结果也表明,不同月份叶绿素 a 的变化特征也不同。如刘镇盛等<sup>[31]</sup>研究结果表明叶绿素 a 分布的月际变化特征明显,9月份叶绿素 a 浓度最高;王振方等<sup>[32]</sup>研究结果表明夏末初秋光照强度较强,水温 较高,浮游植物接受充足的光照,迅速繁殖生长形成水华,进而使水体叶绿素 a 含量较高。有学者等在研究三 峡水库时发现冬季水温及光强较低,浮游植物生长受到抑制<sup>[33]</sup>。这在本文研究结果中也有所体现,本文中不 同月份叶绿素 a 浓度整体存在显著差异,且不同月份两两之间的对比差异不同。其中 9 月叶绿素 a 含量最 高,12 月最低。9 月处于夏末初秋,太浦河水温较高、光照充足,导致叶绿素 a 含量明显增加。12 月处于冬 季,水温及光强均较低,不利于浮游植物生长。此外,聚类分析将 12 个月份分成了 4 组,6 月单独成为一组;7 月和 9 月组成一组;3 月、8 月和 10 月组成一组;1、2、4、5、11 和 12 月组成一组;其中 1—5 月、8 月及 10—12 月这几个月份的叶绿素 a 相似性达到了 95%以上,且可信度较好,这也说明水体叶绿素 a 浓度在不同月份有 明显差别。

因此,通过测定水体叶绿素 a 浓度反映水环境状况,特别是河流等线状水体的水环境状况,需要合理布设 采样站点,并制定科学、合理的监测计划,包括采样的时间间隔,才能有效的反应区域水环境特征。

4.2 影响叶绿素 a 纵向演变的主要因子

叶绿素 a 浓度在一定程度上反映了水体中浮游植物的生长繁殖情况,而浮游植物的生长又受到不同因素

40 卷

的影响。其中,光照强度是浮游植物生长的重要影响因素<sup>[34-36]</sup>。光照强度会影响浮游植物光合作用速率并 且显著影响浮游植物的生长率<sup>[30,37]</sup>,进而对水体叶绿素 a 纵向演变产生一定影响。如刘流等<sup>[38]</sup>研究发现在 水温、营养盐满足生长的条件下,浮游植物的生长主要受垂向可获得光照的影响。吴召仕等<sup>[39]</sup>认为水下光照 对鄱阳湖叶绿素 a 分布最为关键。这与本文中非线性回归分析筛选得到的与水体叶绿素 a 总体纵向演变特 征相关性最强的是水下 0.5 m 光照强度相一致。浮游植物的生长除了光合作用,同时还需要氧气来完成呼 吸<sup>[40]</sup>。溶解氧差异是导致河流浮游植物生长差异及水体叶绿素 a 浓度差异的重要原因,对叶绿素 a 纵向演 变有重要影响。如有研究表明,叶绿素 a 浓度与溶解氧之间存在明显正相关关系<sup>[31,41]</sup>,这与本文研究中部分 月份水体叶绿素 a 浓度与溶解氧呈显著正相关较为一致。

本文研究结果中,除水下光强和溶解氧对水体叶绿素 a 纵向演变有显著影响外,水质指标中水温、pH、电导率、透明度也是影响叶绿素 a 纵向演变的重要因子。方丽娟等<sup>[42]</sup>研究表明温度对浮游植物光合作用能力、 呼吸速率和生长速率都有重要作用。温度过高或过低都不利于浮游植物生长,从而影响浮游植物生物 量<sup>[43-44]</sup>;此外有研究表明,如 Mayora 等<sup>[45]</sup>对中古巴拉那河理化因子的研究得出水位、水深以及电导率对叶绿 素 a 浓度变化具有很好的解释性。有研究表明,浮游植物的光合作用能显著提高水体的 pH 水平,因而 pH 是 叶绿素 a 变化的被动因子,但不是浮游植物生长的限制因子<sup>[18,46]</sup>。此外,众多研究表明一些营养盐如总氮、 总磷、氨氮和硝态氮等都是对藻类生长和繁殖影响显著的环境因子,因而对水体叶绿素 a 浓度存在重要影响, 它们的不足或过量会影响浮游植物的生长和群落结构。比如 Chen 等<sup>[47]</sup>通过室内模拟以及太湖野外实验证 明水温与磷能够改变叶绿素 a 浓度;2016 年 de Oliveira Marcionilio等<sup>[48]</sup>探讨了巴西中部亚热带湖群叶绿素 a 的决定因子,最终认为总氮等理化因子对叶绿素 a 分布至关重要。

此外,水动力条件在部分水体也表现出直接或间接地影响叶绿素 a 分布的能力。已有研究表明,太浦河 水域中浮游植物组成及丰富度受到丰枯季及离东太湖出水口距离差异引起的水力停留时间的影响<sup>[49-50]</sup>。本 文中水体叶绿素 a 浓度在太浦河沿线呈现下降态势,也可能是由于离上游距离差异引起的水力停留时间的影 响。如 Sabater 等<sup>[13]</sup>学者研究表明埃布罗河上游部分由于水力停留时间较短,叶绿素 a 含量较低。叶绿素 a 的变化除了受到水力停留时间影响,还会受到降水量、流量和流速的影响。戴晶晶等<sup>[51]</sup>研究结果表明太浦河 流域内不同月份降水量差异明显,其中七月份降水量最高,3—5月降水量较低。在其他河流的相关研究中也 获得了类似的研究结果。李柱等<sup>[52]</sup>认为降水对浮游植物造成冲击,进而稀释了叶绿素 a 浓度;罗宜富和陈修 康等<sup>[53-54]</sup>的研究也表明强降水过程会导致浮游植物直接流失,进而会稀释水体叶绿素 a 的浓度。古夫河着 生藻类生物量时间变化主要受水动力(流速)的影响<sup>[55]</sup>。对于太浦河而言,不同月份降水量不同,且沿程不 同河段两岸支流汇入水量有所不同,造成其在不同月份、不同站点的流量和流速也有较大变化,这也可能是造 成太浦河沿线叶绿素 a 浓度出现明显时空差异的原因。

影响水体叶绿素 a 纵向演变的环境因子往往是相互联系、相互制约、共同作用的。未来的研究及监测需要综合更多的环境指标,如水动力条件、气候条件等,采用系统分析的研究手段,探讨不同因子在不同时空尺度对叶绿素 a 纵向演变特征的综合作用。

#### 参考文献(References):

7090

- [1] Wang L, Cai Q H, Zhang M, Tan L, Kong L H. Longitudinal patterns of phytoplankton distribution in a tributary bay under reservoir operation. Quaternary International, 2011, 244(2): 280-288.
- [2] Delgado C, Pardo I, García L. Diatom communities as indicators of ecological status in Mediterranean temporary streams (Balearic Islands, Spain).
  Ecological Indicators, 2012, 15(1): 131-139.
- [3] 范小晨,代存芳,陆欣鑫,范亚文.金河湾城市湿地浮游植物功能类群演替及驱动因子.生态学报,2018,38(16):5726-5738.
- [4] Basu B K, Pick F R. Longitudinal and seasonal development of planktonio chlorophyll a in the Rideau River, Ontario. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1995, 52(4): 804-815.
- [5] 王震, 邹华, 杨桂军, 张虎军, 庄严. 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. 湖泊科学, 2014, 26(4): 567-575.
- [6] 王晓辉,杨扬. 鹤地水库叶绿素 a 时空分布特征及其与环境因子的关系. 水生态学杂志, 2017, 38(2): 65-69.

- [7] Irvine K M, Miller S W, Al-Chokhachy R K, Archer E K, Roper B B, Kershner J L. Empirical evaluation of the conceptual model underpinning a regional aquatic long-term monitoring program using causal modelling. Ecological Indicators, 2015, 50: 8-23.
- [8] 吴阿娜,朱梦杰,汤琳,朱刚,汪琴,张锦平. 淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 a 动态及相关环境因子分析. 湖泊科学, 2011, 23(1): 67-72.
- [9] Le Coz M, Chambord S, Meire P, Maris T, Azémar F, Ovaert J, Buffan-Dubau E, Kromkamp J C, Sossou A C, Prygiel J, Spronk G, Lamothe S, Ouddane B, Rabodonirina S, Net S, Dumoulin D, Peene J, Souissi S, Tackx M. Test of some ecological concepts on the longitudinal distribution of zooplankton along a lowland water course. Hydrobiologia, 2017, 802(1): 175-198.
- [10] Çelik K. Predicting chlorophyll-a concentrations in two temperate reservoirs with different trophic states using Principal Component Regression (PCR). Oceanological and Hydrobiological Studies, 2018, 47(1): 1-9.
- [11] Wu N C, Tang T, Qu X D, Cai Q H. Spatial distribution of benthic algae in the Gangqu River, Shangrila, China. Aquatic Ecology, 2009, 43(1): 37-49.
- [12] Holst H, Zimmermann-Timm H, Kausch H. Longitudinal and transverse distribution of plankton rotifers in the potamal of the River Elbe (Germany) during late summer. International Review of Hydrobiology, 2002, 87(2/3): 267-280.
- [13] Sabater S, Artigas J, Durán C, Pardos M, Romaní A M, Tornés E, Ylla I. Longitudinal development of chlorophyll and phytoplankton assemblages in a regulated large river (the Ebro River). The Science of the Total Environment, 2008, 404(1): 196-206.
- [14] 黄国佳,李秋华,陈椽,商立海,张垒,欧滕,高廷进,李钥,邓龙.贵州高原红枫湖水库浮游植物功能分组及其时空分布特征.生态学报,2015,35(17):5573-5584.
- [15] Sabater S, Muñoz I. Successional dynamics of the phytoplankton in the lower part of the river Ebro. Journal of Plankton Research, 1990, 12(3): 573-592.
- [16] Rychtecký P, Znachor P. Spatial heterogeneity and seasonal succession of phytoplankton along the longitudinal gradient in a eutrophic reservoir.
  Hydrobiologia, 2011, 663(1): 175-186.
- [17] 王琼, 卢聪, 范志平, 李法云. 辽河流域太子河流域 N、P 和叶绿素 a 浓度空间分布及富营养化. 湖泊科学, 2017, 29(2): 297-307.
- [18] 周贝贝, 王国祥, 徐瑶, 杨飞, 宋康, 夏明芳. 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.
- [19] 林洁. 太湖地区典型农田气候变化特征分析与土壤水分的模拟预测[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [20] Yao H, Qian X, Yin H, Gao H L, Wang Y L. Regional risk assessment for point source pollution based on a water quality model of the Taipu River, China. Risk Analysis, 2015, 35(2): 265-277.
- [21] Li Y, Zhou S L, Zhu Q, Li B J, Wang J X, Wang C H, Chen L, Wu S H. One-century sedimentary record of heavy metal pollution in western Taihu Lake, China. Environmental Pollution, 2018, 240: 709-716.
- [22] Jin Z D, Cheng H X, Chen L, Li X D, Zhu G W, Zhuang G M, Qian N. Concentrations and contamination trends of heavy metals in the sediment cores of Taihu Lake, East China, and their relationship with historical eutrophication. Chinese Journal of Geochemistry, 2010, 29(1): 33-41.
- [23] 连慧姝, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影. 太湖蠡河小流域水质的空间变化特征及污染物源解析. 环境科学, 2017, 38(09): 3657-3665.
- [24] 王琰, 童春富. 长江口芦苇和互花米草盐沼湿地蟹类洞穴分布特征及主要影响因子. 生态学报, 2017, 37(16): 5504-5513.
- [25] Tong C F, Baustian J J, Graham S A, Mendelssohn I A. Salt marsh restoration with sediment-slurry application: effects on benthic macroinvertebrates and associated soil - plant variables. Ecological Engineering, 2013, 51: 151-160.
- [26] 张衡,朱国平.长江河口潮间带鱼类群落的时空变化.应用生态学报,2009,20(10):2519-2526.
- [27] 杨泽华, 童春富, 陆健健. 盐沼植物对大型底栖动物群落的影响. 生态学报, 2007, 27(11): 4387-4393.
- [28] 童春富. 长江河口潮间带盐沼植被分布区及邻近光滩鱼类组成特征. 生态学报, 2012, 32(20): 6501-6510.
- [29] Basu B K, Pick F R. Phytoplankton and zooplankton development in a lowland, temperate river. Journal of Plankton Research, 1997, 19(2): 237-253.
- [30] Soballe D M, Kimmel B L. A large-scale comparison of factors influencing phytoplankton abundance in rivers, lakes, and impoundments. Ecology, 1987, 68(6): 1943-1954.
- [31] 刘镇盛, 王春生, 倪建宇, 朱根海, 周怀阳. 抚仙湖叶绿素 a 的生态分布特征. 生态学报, 2003, 23(9): 1773-1780.
- [32] 王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵风斌,王丽卿.异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系.环境科学,2019,40(5): 2249-2257.
- [33] 张佳磊,郑丙辉,刘德富,王丽婧,谭纤茹.三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素.环境科学,2017,38(2):535-546.
- [34] 闫苏苏, 雷波, 刘朔孺, 杨春华, 谢更新. 长寿湖浮游植物功能群季节变化及影响因子. 水生态学杂志, 2018, 39(3): 52-60.
- [35] 严广寒,刘德富,张佳磊,刘璇,贡丹丹.不同光照条件对浮游植物生物量与多样性的影响.水生态学杂志,2018,39(1):37-43.
- [36] Köhler J, Wang L, Guislain A, Shatwell T. Influence of vertical mixing on light-dependency of phytoplankton growth. Limnology and

Oceanography, 2018, 63(3): 1156-1167.

- [37] 朱广伟,秦伯强,张运林,许海,朱梦圆,杨宏伟,李宽意,闵屾,沈睿杰,钟春妮. 2005-2017 年北部太湖水体叶绿素 a 和营养盐变化及 影响因素. 湖泊科学, 2018, 30(2): 279-295.
- [38] 刘流,刘德富,黄钰铃,王从锋.香溪河库湾春季水华纵向分布对水层结构的响应.三峡大学学报:自然科学版,2012,34(2):1-6.
- [39] 吴召仕,张路,刘宝贵,陈宇炜.鄱阳湖丰水期水体中叶绿素 a 含量空间分布及其与环境因子的关系.湿地科学,2014,12(3):286-292.
- [40] 汪星, 李利强, 郑丙辉, 刘琰, 田琪, 王丽婧. 洞庭湖浮游藻类功能群的组成特征及其影响因素研究. 中国环境科学, 2016, 36(12): 3766-3776.
- [41] 汪星, 刘录三, 李黎, 周娟, 王瑜, 夏甫, 夏阳. 镜泊湖浮游藻类组成及其与环境因子的相关分析. 中国环境科学, 2015, 35(11): 3403-3413.
- [42] 方丽娟, 刘德富, 杨正健, 田泽斌. 三峡水库 175 m 蓄水前后香溪河库湾浮游植物的群落结构. 水生态学杂志, 2014, 35(3): 1-9.
- [43] 钱昊钟,赵巧华,钱培东,钱小陶,李万里,陈宏波.太湖叶绿素 a 浓度分布的时空特征及其影响因素.环境化学,2013,32(5): 789-796.
- [44] 王琳杰,余辉,牛勇,牛远,张有林,刘倩,吉正元.抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征.环境科学,2017,38(4):1384-1392.
- [45] Mayora G, Devercelli M, Giri F. Spatial variability of chlorophyll-a and abiotic variables in a river-floodplain system during different hydrological phases. Hydrobiologia, 2013, 717(1): 51-63.
- [46] 阮晓红,石晓丹,赵振华,倪利晓,吴芸,焦涛.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.湖泊科学,2008,20(5): 556-562.
- [47] Chen M J, Li J, Dai X, Sun Y, Chen F Z. Effect of phosphorus and temperature on chlorophyll a contents and cell sizes of Scenedesmus obliquus and Microcystis aeruginosa. Limnology, 2011, 12(2): 187-192.
- [48] de Oliveira Marcionilio S M L, Machado K B, Carneiro F M, Ferreira M E, Carvalho P, Vieira L C G, de Moraes Huszar V L, Nabout J C. Environmental factors affecting chlorophyll-a concentration in tropical floodplain lakes, Central Brazil. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(11): 611.
- [49] 王磊之, 胡庆芳, 戴晶晶, 王银堂, 葛慧, 李伶杰. 面向金泽水库取水安全的太浦河多目标联合调度研究. 水资源保护, 2017, 33(5): 61-68.
- [50] 曹菊萍,彭焱梅,李昊洋,张亚洲.太浦闸控制运用对流域区域及金泽水源地的影响分析//加强城市水系综合治理共同维护河湖生态 健康——2016 第四届中国水生态大会论文集.上海:国际水生态安全中国委员会,河海大学环境学院,中国疏浚协会,浙江省生态经济 促进会,浙江省水利学会,2016.
- [51] 戴晶晶,陈红,彭焱梅,张亚洲,武剑,胡庆芳.太浦闸水量水质联合调度对金泽水库水质影响.水利水运工程学报,2017,(4):20-27.
- [52] 李柱, 郭伟杰, 成水平, 柴培宏, 梁威, 吴振斌. 南淝河叶绿素 a 时空分布特征及环境因子影响分析. 水生生物学报, 2014, 38(2): 342-350.
- [53] 罗宜富,李磊,李秋华,焦树林,李红梅,陈峰峰. 阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系. 环境科学, 2017, 38 (10): 4151-4159.
- [54] 陈修康,郭跃华,冯喻,张华俊,韩博平,肖利娟.特大洪水对浮游植物群落及其演替的影响——以广东高州水库为例.湖泊科学, 2014,26(1):137-146.
- [55] 吴述园,葛继稳,苗文杰,程腊梅,冉桂花,曹华芬.三峡库区古夫河着生藻类叶绿素 a 的时空分布特征及其影响因素.生态学报,2013, 33(21):7023-7034.