

# 沙湖叶绿素 a 的时空分布特征及其与环境因子的关系

杨子超<sup>1</sup>, 李廷林<sup>1</sup>, 邱小琮<sup>2</sup>, 李世龙<sup>1</sup>, 郑 灿<sup>1</sup>

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021;

2. 宁夏大学生命科学学院, 宁夏 银川 750021)

**摘要:**为探究沙湖水体叶绿素 a 的时空分布特征及其与水环境因子关系, 2015—2017 年冬季(1 月)、春季(4 月)、夏季(7 月)、秋季(10 月)对沙湖水体叶绿素 a 含量和常规水环境因子进行采样与检测, 分析沙湖叶绿素 a 含量与环境因子之间的相关性, 通过逐步回归法和通径分析探讨了时空性变化对叶绿素 a 含量的影响。结果表明, 沙湖叶绿素 a 季节变化明显, 夏季最高, 冬春两季相对较低, 最大值出现在 2017 年 7 月(夏季), 最小值出现在 2015 年 4 月(春季), 2017 年叶绿素 a 含量最高, 年均值为 18.94  $\mu\text{g/L}$ , 空间分布也存在明显差异。相关分析表明, 总磷(TP)、化学需氧量(COD<sub>Cr</sub>)、五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)和透明度(SD)是影响沙湖叶绿素 a 含量的主要环境因子; 逐步回归分析表明, 不同季节、不同采样点影响沙湖叶绿素 a 含量的环境因子存在差异, 有机污染物与氮磷营养盐是主要的影响因子; 通径分析表明, 化学需氧量和总磷的总决定系数( $d_{ij}$ )分别为 0.379 和 0.373, 是影响沙湖叶绿素 a 含量最主要的两个环境因子; 其中总磷对沙湖叶绿素 a 含量的直接作用较大, 是对叶绿素 a 起决定性作用的限定性营养盐。

**关键词:**沙湖; 叶绿素 a; 环境因子; 逐步回归法; 通径分析

**中图分类号:**X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2020)02-0077-06

沙湖位于宁夏回族自治区石嘴山市平罗县西南部 (106°19'6" ~ 106°24'10"E, 38°45'17" ~ 38°49'42"N), 是宁夏最大的天然半咸水湖, 沙湖补水量少, 年降水量仅 173 mm, 年蒸发量为 1 800 mm, 是降水量的 10 倍。作为我国西北地区著名的旅游景区, 近年来沙湖旅游产业蓬勃发展, 再加上周边工农业的快速发展, 生态系统遭到破坏, 水体功能下降, 导致水质受到污染。

叶绿素 a 是浮游植物进行光合作用的重要成分, 其含量的多少能反映出湖泊浮游植物生物量或者初级生产力的高低, 同时也是评价湖泊富营养化的一个重要指标。目前, 针对叶绿素 a 与环境因子的相关性分析已经进行了大量研究, 但这些研究多以鄱阳湖(刘霞等, 2016)、巢湖(张坤等, 2015)、太湖(朱广伟等, 2018)、洪泽湖(齐凌艳等, 2016)等淡水湖为主; 针对西北地区典型半咸水的沙湖叶绿素 a

相关性研究较少。邱小琮等(2012)探讨了沙湖浮游动植物密度、生物量、叶绿素 a 含量与水环境因子的相关性, 其研究侧重点为浮游动植物密度与水环境因子的关系, 未对叶绿素 a 含量与环境因子分季节、分时空进行相关性分析。

本文根据 2015—2017 年 12 次采样所测得的水质数据, 描述沙湖叶绿素 a 含量的时空分布特征, 采用 Pearson 判断叶绿素 a 含量与环境因子的相关性, 通过逐步回归分析, 筛选出时空变化和季节变化影响叶绿素 a 的显著因子, 将筛选出的环境因子进行通径分析, 确定对沙湖叶绿素 a 有直接和间接影响的环境因子, 旨在为今后改善沙湖水质提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 样点布置及采样

综合考虑沙湖的自然形态、功能区特点以及布点方案可行性, 在 5 个典型区域共计设置 5 个采样点(图 1)。I 号为鱼类养殖区, II 号为进水口, III 号为码头, IV 号为湖中心, V 号为鸟类聚居区。采样时间为 2015—2017 年冬季(1 月)、春季(4 月)、夏季(7 月)、秋季(10 月)。通过带有阀门的有机玻璃集水器收集来自表层和水底的混合水样, 并在 48 h 内测定相关指标。

收稿日期: 2018-10-08

基金项目: 宁夏高等学校一流学科建设(水利工程)项目(NXY-LXK2017A03); 宁夏重点研发计划(东西部科技合作)项目“沙湖水质改善与生态功能提升技术与示范”(2017BY087)。

作者简介: 杨子超, 1993 年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为水资源与水环境调控。E-mail: 1163180210@qq.com

通信作者: 邱小琮, 1971 年生, 男, 教授, 主要从事水域生态学及水环境调控教研工作。E-mail: qxc7175@126.com

## 1.2 样品测定

水体理化监测项目为 pH、溶解氧(DO)、透明度(SD)、叶绿素 a(Chl-a)、总磷(TP)、总氮(TN)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、化学需氧量(COD<sub>Cr</sub>)、五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)共 10 项水质指标。

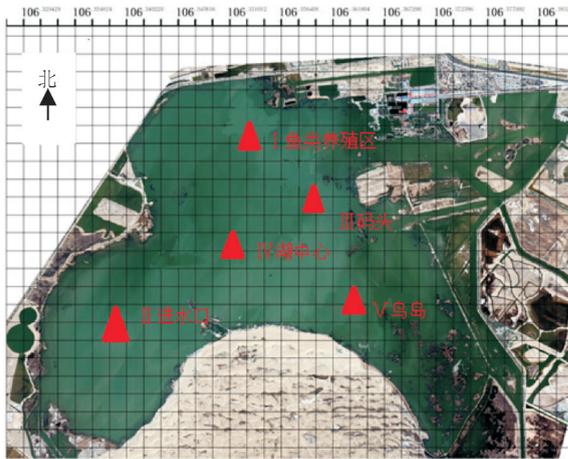


图 1 沙湖采样点分布

Fig.1 Location of sampling sites in Shahu Lake

pH、DO 采用多参数水质检测仪 YSI 现场测定;SD 采用赛氏圆盘法现场测定;Chl-a 采用丙酮萃取分光光度法测定(陈宇炜,2000);TP 指标采用钼酸铵分光光度法测定(GB 11893-89);TN 指标采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定(GB 11894-89);COD<sub>Mn</sub> 采用酸性高锰酸钾法测定(GB 11892-92);COD<sub>Cr</sub> 采用重铬酸盐法测定(GB 11914-89);BOD<sub>5</sub> 采用稀释接种法测定(GB/T7488-1987);NH<sub>3</sub>-N 指标采用纳氏试剂分光光度法(GB 7479-87)。具体操作流程参照《水和废水监测分析方法》(国家环境保护总局,2002)。

## 1.3 统计方法

1.3.1 逐步回归分析 采用相关性分析沙湖叶绿素 a 含量与环境因子之间的相关性,以叶绿素 a 含量为因变量,环境因子为自变量,进行逐步回归分析并建立不同采样点和不同季节下叶绿素 a 含量与环境因子回归方程,上述数据采用 DPS14.5 软件。

1.3.2 通径分析 为了进一步弄清楚环境因子对叶绿素 a 含量作用的大小,需要进行通径分析,计算通径系数和决定系数,比较各环境因子对叶绿素 a 的主次顺序。

## 2 结果与分析

### 2.1 沙湖叶绿素 a 含量的时空分布特征

沙湖各年度不同采样点的叶绿素 a 含量分布如

图 2。可见沙湖各年度的叶绿素 a 含量大致呈显著的“V”型且季节性变化,整体呈夏季最高、秋季次之、春冬两季相对较低的规律。在空间分布上,沙湖 5 个采样点及全湖叶绿素 a 含量年均值如表 1 所示;不同采样点叶绿素 a 的含量受气象条件(气温、降雨、光照)、水动力条件(流速、风向)、湖泊形状和湖底形态等多因素共同影响。各采样点叶绿素 a 含量总体规律为 III 号含量最高,IV、V 号其次,I、II 号相对较小。沙湖叶绿素 a 含量年度变化为 2015 年与 2016 年相差不大,至 2017 年有所增长。

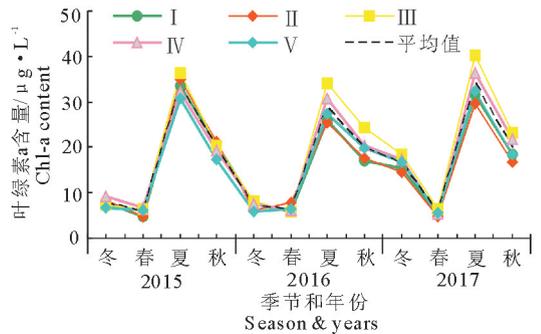


图 2 沙湖各湖区叶绿素 a 含量的时空变化

Fig.2 Temporal and spatial variation of Chl-a content in Shahu Lake

表 1 沙湖各采样点及全湖叶绿素 a 含量的年均值

Tab.1 Annual average Chl-a content for each sampling site and for the entire lake

分区	不同年份叶绿素年均值/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$		
	2015 年	2016 年	2017 年
I	16.67±13.21	14.07±9.34	17.70±10.85
II	17.28±13.64	14.24±9.05	16.40±10.16
III	17.67±14.00	18.10±13.46	22.10±14.09
IV	16.83±11.51	16.26±11.67	20.20±12.77
V	15.20±11.54	14.83±10.44	18.30±10.95
全湖	16.73±11.43	15.50±9.82	18.94±10.73

### 2.2 叶绿素 a 含量与环境因子的相关性

相关性分析是判断因果关系的前提,沙湖 5 个采样点叶绿素 a 含量与环境因子的 Pearson 相关系数及其双尾显著性检验结果如表 2 所示。可以看出,各采样点的 Chl-a 含量与环境因子间的相关性存在差异,I 号采样点的 Chl-a 含量与 COD<sub>Cr</sub>、TP、BOD<sub>5</sub> 呈显著正相关;II 号采样点的 Chl-a 含量与 TP、BOD<sub>5</sub> 呈显著正相关,与 SD 呈显著负相关;III 号采样点的 Chl-a 含量与 COD<sub>Cr</sub>、TP 呈显著正相关;IV 号采样点的 Chl-a 含量与 COD<sub>Cr</sub> 呈显著正相关,与 BOD<sub>5</sub> 呈极显著正相关;V 号采样点的 Chl-a 含量与 COD<sub>Mn</sub>、COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub> 呈显著正相关。沙湖 Chl-a 含量受多个环境因子共同影响,各样点的 Chl-a 含量与 pH、SD、DO、NH<sub>3</sub>-N、TN 均无显著相

关性。综合分析各采样点 Chl-a 含量与环境因子的 Pearson 相关系数, 得出 TP、COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub>、SD 对沙湖 Chl-a 含量的影响较为显著。

表 2 叶绿素 a 含量与环境因子间的相关关系

Tab.2 Relationship of Chl-a content with environmental factors

指标	采样点				
	I	II	III	IV	V
pH	0.176	0.070	0.014	-0.248	-0.069
SD	-0.571	-0.656*	-0.462	-0.519	-0.498
DO	0.440	0.540	0.173	0.263	0.097
COD <sub>Mn</sub>	0.455	0.469	0.419	0.468	0.601*
COD <sub>Cr</sub>	0.621*	0.540	0.664*	0.699*	0.686*
NH <sub>3</sub> -N	0.316	0.457	0.386	0.378	0.269
TN	0.421	0.375	0.368	0.386	0.381
TP	0.599*	0.700*	0.683*	0.562	0.487
BOD <sub>5</sub>	0.708*	0.704*	0.563	0.723**	0.602*

注: \* 表示显著相关 ( $P < 0.05$ ), \*\* 表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )。

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

### 2.3 环境因子对叶绿素 a 的逐步回归

2.3.1 时空变化 相关性分析只能表达变量之间的密切程度, 并没有确切的数学模型来表示叶绿素 a 与环境因子间的因果关系, 所以采用逐步回归分析, 建立沙湖各采样点、各年份之间 Chl-a 与环境因子间的多元回归分析, 结果见表 3 和表 4。可见 BOD<sub>5</sub> 是沙湖 5 个采样点均筛选出影响叶绿素 a 变化的显著因子, 不同采样点影响沙湖 Chl-a 含量的环境因子不尽相同。III 号采样点为码头, 由于旅游产业的发展导致 III 号采样点水质受人为干扰程度较大, 影响 Chl-a 的环境因子也比较复杂, 分别是 TP、COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub> 和 DO; 其中 TP、COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub> 为正

相关, DO 为负相关, 复相关系数在 5 个采样点中最高, 达 0.977。Chl-a 含量与 DO 呈负相关的主要原因是因为 III 号采样点有机物含量多, 当有机物分解时, 消耗水中的 DO (葛优等, 2017); IV、V 采样点筛选出影响 Chl-a 含量变化的环境因子相同。从年度看 (表 4), 在极显著水平下有 TN、NH<sub>3</sub>-N、TP、BOD<sub>5</sub>、DO 共 5 个因子入选。根据沙湖各采样点、各年份的逐步回归方程分析可知, 影响沙湖 Chl-a 含量的主要因子有 BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Cr</sub> 和 TP。

2.3.2 季节变化 由于各采样点的分区功能不同, 对叶绿素 a 的影响存在差异, 不同季节影响沙湖 Chl-a 含量的环境因子也不尽相同, 对不同季节的 Chl-a 含量与环境因子进行逐步回归分析 (表 5)。春季沙湖 Chl-a 与 COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N、SD 存在相关性, 其中 NH<sub>3</sub>-N 为正相关, COD<sub>Cr</sub> 和 SD 为负相关; 夏秋两季都各有一个因子入选, 分别为 COD<sub>Cr</sub> 和 BOD<sub>5</sub>, 且均呈正相关; 冬季有 3 个影响因子入选, 分别为 BOD<sub>5</sub>、TP、TN, 其中 BOD<sub>5</sub> 和 TN 为正相关, TP 为负相关。

2015-2017 年, 沙湖整体样本筛选出对 Chl-a 存在影响的主要因子有 TP、DO、COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub> 和 COD<sub>Mn</sub>, 其中 Chl-a 含量与 COD<sub>Cr</sub>、TP、BOD<sub>5</sub> 呈正相关, 与 DO 和 COD<sub>Mn</sub> 呈负相关。TP 为浮游植物提供营养盐, 是对沙湖 Chl-a 起决定性作用的限制性营养盐 (邱小琮, 2012); DO 能为浮游植物代谢提供重要的能源 (李飞鹏等, 2013); COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Mn</sub> 为有机物污染物, 人类活动将有有机物污染物带入沙湖, 同时浮游植物通过光合作用也会产生大量有机物, 有机物污染物不易降解导致沙湖水质污染程度较严重。

表 3 各采样点叶绿素 a 和环境因子的回归方程

Tab.3 Stepwise multiple regression equation between Chl-a and environmental factors for each sampling site

采样点	逐步回归方程	R	F	P
I	Chl-a = 4.817 + 6.824 BOD <sub>5</sub> - 0.356SD	0.824	9.511	0.006
II	Chl-a = -17.487 + 5.987 BOD <sub>5</sub> + 131.959TP	0.877	15.036	0.001
III	Chl-a = -39.658 + 150.923TP + 1.848COD <sub>Cr</sub> + 5.861BOD <sub>5</sub> - 4.902DO	0.977	36.217	0.000
IV	Chl-a = -43.591 + 4.175 BOD <sub>5</sub> + 1.323COD <sub>Cr</sub> + 97.711TP	0.936	18.791	0.001
V	Chl-a = -40.098 + 1.298 COD <sub>Cr</sub> + 116.186TP + 3.706 BOD <sub>5</sub>	0.907	12.385	0.002

表 4 各年度叶绿素 a 和环境因子的回归方程

Tab.4 Stepwise multiple regression equation between Chl-a and environmental factors for each year

年份	逐步回归方程	R	F	P
2015	Chl-a = 21.245 + 16.628TN - 0.656SD	0.975	166.954	0.000
2016	Chl-a = -0.367 + 54.415NH <sub>3</sub> -N - 0.362SD + 1.967BOD <sub>5</sub>	0.956	56.863	0.000
2017	Chl-a = 19.553 + 330.567TP - 78.704NH <sub>3</sub> -N	0.912	42.033	0.000

表5 各季节及全湖叶绿素 a 和环境因子的回归方程

Tab.5 Stepwise multiple regression of Chl-a with environmental factors in each season for the entire lake

季节	逐步回归方程	R	F	P
春	$\text{Chl-a} = 11.747 + 7.567 \text{NH}_3\text{-N} - 0.149\text{COD}_{\text{Cr}} - 0.069\text{SD}$	0.780	5.681	0.013
夏	$\text{Chl-a} = -27.384 + 1.845\text{COD}_{\text{Cr}}$	0.864	38.412	0.000
秋	$\text{Chl-a} = 6.195 + 2.663 \text{BOD}_5$	0.530	5.088	0.042
冬	$\text{Chl-a} = -8.339 + 4.915 \text{BOD}_5 - 100.125\text{TP} + 10.397\text{TN}$	0.766	12.014	0.001
全湖	$\text{Chl-a} = -23.844 + 1.244\text{COD}_{\text{Cr}} + 136.971\text{TP} + 4.757\text{BOD}_5 - 1.965\text{DO} - 1.122\text{COD}_{\text{Mn}}$	0.766	12.014	0.000

## 2.4 环境因子对叶绿素 a 含量影响的通径分析

沙湖叶绿素 a 含量与环境因子的逐步回归分析结果见表 5。剔除了 pH、SD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 这 4 个对 Chl-a 含量影响不显著的环境因子,对其余环境因子进行通径分析,计算各因子对 Chl-a 含量的直接通径系数( $P_i$ )和间接通径系数( $r_{ij}P_j$ )。由表 6 可知,TP 对沙湖 Chl-a 含量的直接作用较大, $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 与  $\text{BOD}_5$ 次之,DO 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 对 Chl-a 产生的直接作用相对较小,且均为负向影响。对 Chl-a 间接作用最大是  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ (0.640),其次是 DO(0.452),且通过  $\text{COD}_{\text{Mn}}$

和 DO 产生的间接作用均为负向。刘金金等(2018)在研究淡水鱼塘 Chl-a 与环境因子的通径分析时也认为, $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 是影响 Chl-a 含量的环境因子之一。

单因子与两两因子对叶绿素 a 影响的决定系数矩阵见表 7。矩阵中的决定系数越大,影响程度越大, $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 和 TP 的总决定系数( $d_{ij}$ )分别为 0.379 和 0.373。 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 和 TP 单因子与两两因子共同决定系数之和为 0.651,占总决定系数和的 81.58%,可见  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 和 TP 是影响沙湖叶绿素 a 含量最主要的两个环境因子。

表 6 沙湖环境因子变化对叶绿素 a 影响的通径系数

Tab.6 Path coefficient of changes in environment factors affecting Chl-a in Shahu Lake

因变量	自变量	$P_i$	$r_{ij}P_j$					
			$\sum r_{ij}P_j$	$\text{COD}_{\text{Cr}}$	TP	$\text{BOD}_5$	DO	$\text{COD}_{\text{Mn}}$
Chl-a	$\text{COD}_{\text{Cr}}$	0.486	0.147	-	0.131	0.131	-0.046	-0.069
	TP	0.536	0.080	0.119	-	0.105	-0.052	-0.092
	$\text{BOD}_5$	0.463	0.148	0.137	0.121	-	-0.050	-0.059
	DO	-0.146	0.452	0.154	0.191	0.162	-	-0.050
	$\text{COD}_{\text{Mn}}$	-0.159	0.640	0.209	0.309	0.173	-0.050	-

表 7 沙湖环境因子变化对叶绿素 a 影响的决定系数( $d_{ij}$ )

Tab.7 Determination coefficient of the change in environment factors affecting Chl-a in Shahu Lake

指标	$\text{COD}_{\text{Cr}}$	TP	$\text{BOD}_5$	DO	$\text{COD}_{\text{Mn}}$
$\text{COD}_{\text{Cr}}$	0.236	0.128	0.127	-0.045	-0.067
TP	0.128	0.287	0.112	-0.056	-0.098
$\text{BOD}_5$	0.127	0.112	0.214	-0.047	-0.055
DO	-0.045	-0.056	-0.047	0.021	0.016
$\text{COD}_{\text{Mn}}$	-0.067	-0.098	-0.055	0.016	0.025
$d_{ij}$	0.379	0.373	0.351	-0.111	-0.179

## 3 讨论

### 3.1 叶绿素 a 含量的时空变化特征

沙湖叶绿素 a 含量具有明显的时空分布特征。从季节方面看,夏季最高,秋季次之,春冬两季相对较低,主要与西北地区四季分明气候变化有关(张晓晶等,2010)。从空间分布上看,Ⅲ号点含量最高,Ⅳ、Ⅴ号点含量其次,Ⅰ、Ⅱ号点相对较小。Ⅱ号采样点为进水口,黄河作为沙湖的补给水源,其水质状况好,水流交换较快,叶绿素 a 含量较低。Ⅲ号点为码头,叶绿素 a 含量受人干扰程度较高,农田、鱼

池的退水导致此处叶绿素 a 含量最高。

### 3.2 环境因子对叶绿素 a 的影响

从相关性分析,影响沙湖叶绿素 a 含量的主要环境因子为总磷、透明度、化学需氧量和五日生化需氧量。叶绿素 a 含量的变化受多方面因素共同影响,其中浮游植物的生长状况是最关键的影响因素,而营养盐含量的多少能直接反映浮游植物的生长状况。目前,利用氮磷比来确定水体中限制性营养盐成分存在较大争议(Chen et al,2011)。邱小琮等(2012)研究时也得出相似的结论,认为总磷是限制沙湖藻类生长的主要因子。本文利用通径分析得出总磷对沙湖叶绿素 a 含量的直接作用较大,表明总磷是起决定作用的限定性营养盐。

透明度是藻类数量的直观表现,沙湖水体透明度低,表明藻类数量较多,即叶绿素 a 含量也相应增加。沙湖叶绿素 a 含量与化学需氧量呈正相关,是由于水体的有机物含量促进藻类生长,同时藻类的光合作用也会产生有机物,表明化学需氧量是叶绿素 a 的被动因子(毕京博等,2012)。湖泊中五日生

化需氧量随着化学需氧量的增大而增大, 即叶绿素 a 含量与五日生化需氧量呈正相关(高明等, 2013)。

### 3.3 环境因子变化对叶绿素 a 的影响

环境因子的时空变化对叶绿素 a 的逐步回归结果表明, 不同采样点对叶绿素 a 含量的影响均存在差异, 产生差异的具体原因是由于 I 号采样点为鱼类养殖区, 此处种植了大量的芦苇, 水体中藻类含量相对较高, 叶绿素 a 含量与透明度呈负相关。II 号采样点为沙湖进水口, 周围的农田退水等其他农业面源污染流入沙湖, 导致五日生化需氧量含量增加; III 号采样点是码头, 同时也是沙湖景点的开放点, 大量的游艇和观光客在此聚集, 其污染高于沙湖其它湖区(璩向宁, 2007)。IV 号采样点为湖中心, V 号为鸟类聚集区, 这两个采样点筛选出影响叶绿素 a 含量变化的环境因子相同, 且 IV、V 采样点受人类活动的影响较小, 能够客观反映影响沙湖叶绿素 a 的环境因子。五日生化需氧量是对叶绿素 a 含量有显著影响的环境因子, 化学需氧量和总磷显著性次之。

### 3.4 季节性变化对叶绿素 a 的影响

季节变化对叶绿素 a 的逐步回归结果表明, 氨氮、总磷、总氮、透明度、化学需氧量和五日生化需氧量与叶绿素 a 含量密切相关, 但各季节的影响因子各有差异。春季气温回升, 藻类迅速增长, 进行光合作用时需要大量营养盐, 氨氮是浮游植物生长所需的营养盐之一; 夏秋季是沙湖旅游旺季, 人类活动导致水体中融入大量有机物, 这些有机物部分经过氧化分解后最终成为营养盐, 部分有机物可以被沙湖的底泥吸附, 夏秋季影响叶绿素 a 含量的环境因子均为有机污染物(田时弥等, 2015); 夏秋季沙湖水质较春季污染严重, 应提高沙湖的自净能力, 促进微生物对有机污染物的分解, 降低水体污染(李秀花等, 2015)。冬季沙湖进入冰封期, 氮磷营养元素对叶绿素 a 含量呈显性相关, 表明耐低温的浮游植物在冬季大量生长。

综上, 逐步回归分析表明, 沙湖不同季节、不同湖区叶绿素 a 含量与环境因子的相关性存在差异, 结合沙湖叶绿素 a 浓度与环境因子的 Pearson 相关系数可以看出, 主导沙湖叶绿素 a 的环境因子为总磷、化学需氧量、五日生化需氧量; 由通径分析可知, 化学需氧量和总磷是影响沙湖叶绿素 a 含量最主要的两个环境因子, 其中总磷对沙湖叶绿素 a 含量的直接作用较大, 表明总磷是对叶绿素 a 起决定性作用的限定性营养盐。因此, 控制磷和有机物含量对防控沙湖富营养化有至关重要的作用。

### 参考文献

- 毕京博, 郑俊, 沈玉凤, 等, 2012. 南太湖入湖口叶绿素 a 时空变化及其与环境因子的关系[J]. 水生生态学杂志, 33(6):7-13.
- 陈宇炜, 高锡云, 2000. 浮游植物叶绿素 a 含量测定方法的比较测定[J]. 湖泊科学, 12(2):185-188.
- 高明, 黄绍祥, 彭小明, 2013. 湖泊水体中 COD<sub>Cr</sub>、COD<sub>Mn</sub>、BOD<sub>5</sub>、DO 之间相互关系的研究[J]. 环境科学导刊, 32(3):121-123.
- 葛优, 周彦锋, 吕大伟, 等, 2017. 阳澄西湖叶绿素 a 的时空分布及其与环境因子的关系[J]. 长江流域资源与环境, (7):116-123.
- 国家环境保护总局, 2002. 水和废水监测分析方法(第 4 版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 李飞鹏, 张海平, 陈玲, 2013. 小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究[J]. 环境科学, 34(10):3854-3861.
- 李秀花, 王金山, 孔伟斌, 等, 2015. 博斯腾湖大湖区环境因子动态分析研究[J]. 环境科学与管理, 40(12):58-361.
- 刘金金, 张玉平, 张丹, 等, 2018. 淡水鱼塘叶绿素 a 与环境因子间影响关系的通径分析[J]. 淡水渔业, (1):26-33.
- 刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 等, 2016. 鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应[J]. 环境科学, 37(6):2141-2148.
- 齐凌艳, 黄佳聪, 高俊峰, 等, 2016. 洪泽湖叶绿素 a 浓度的时空变化特征[J]. 湖泊科学, 28(3):583-591.
- 邱小琼, 赵红雪, 孙晓雪, 2012. 宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究[J]. 环境科学, 33(7):2265-2271.
- 邱小琼, 赵红雪, 孙晓雪, 2012. 沙湖浮游动物与水环境因子关系的多元分析[J]. 生态学杂志, 31(4):896-901.
- 璩向宁, 2007. 宁夏沙湖旅游开发对水体环境的影响[J]. 干旱区资源与环境, 21(3):105-107.
- 田时弥, 杨扬, 乔永民, 等, 2015. 珠江流域东江干流浮游植物叶绿素 a 时空分布及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 27(1):31-37.
- 张坤, 邓道贵, 王文平, 等, 2015. 巢湖夏季叶绿素 a 浓度变化及其与环境因子之间关系的围隔实验[J]. 淮北师范大学学报(自然科学版), 36(1):61-65.
- 张晓晶, 李畅游, 张生, 等, 2010. 乌梁素海叶绿素 a 与理化因子的统计分析[J]. 环境化学, 29(2):315-319.
- 朱广伟, 秦伯强, 张运林, 等, 2018. 2005-2017 年北部太湖水体叶绿素 a 和营养盐变化及影响因素[J]. 湖泊科学, 30(2):279-295.
- Chen M, Jing L, Xi D, et al, 2011. Effect of phosphorus and temperature on chlorophyll contents and cell sizes of *Scenedesmus obliquus* and *Microcystis aeruginosa* [J]. Limnology, 12(2):187-192.

## Spatial-temporal Distribution of Chlorophyll-a and Its Relationship with Environmental Factors in Shahu Lake

YANG Zi-chao<sup>1</sup>, LI Yan-lin<sup>1</sup>, QIU Xiao-cong<sup>2</sup>, LI Shi-long<sup>1</sup>, ZHENG Can<sup>1</sup>

(1.School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, P.R.China;

2.School of Life Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, 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. Shahu Lake is the largest natural brackish lake in Ningxia Hui Autonomous Region. In this study, the spatial and temporal distribution of chlorophyll-a (Chl-a) and its relationship with the primary environmental parameters in Shahu Lake were analyzed. The objectives were to explore the eutrophication mechanism of Shahu Lake and provide a theoretical basis for improving lake water quality. Data on Chl-a and water quality parameters was obtained from samples collected at five sampling sites of Shahu Lake in January, April, July and October of 2015 – 2017. Correlation analysis was used to study the relationship between Chl-a concentration and water quality parameters. Stepwise multiple regression and path analysis were used to study the spatiotemporal changes in Chl-a concentration. Seasonal differences in Chl-a concentration were significant, with the highest levels in summer and lower levels during winter and spring. The maximum value occurred in July, 2017 and the minimum value occurred in April, 2015. The highest average annual Chl-a concentration (18.94  $\mu\text{g/L}$ ) was in 2017. The spatial distribution of Chl-a also varied significantly. Correlation analysis shows that total phosphorus (TP), chemical oxygen demand ( $\text{COD}_{\text{Cr}}$ ), 5-day biochemical oxygen demand ( $\text{BOD}_5$ ) and Secchi depth transparency (SD) were the environmental factors most associated with Chl-a concentration in Shahu Lake. Stepwise multiple regression shows that the effect of environmental factors on Chl-a concentration varied with season and sampling site. Organic pollutants ( $\text{COD}_{\text{Cr}}$ ) and nutrients (TN, TP) were the main influencing factors. Path analysis shows that  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  and TP were the two most important environmental factors affecting the spatial-temporal distribution of Chl-a concentration, with correlation coefficients of 0.379 and 0.373, respectively. Among all of the environmental factors, TP had the largest effect on the spatiotemporal distribution of Chl-a.

**Key words:** Shahu Lake; chlorophyll-a; environmental factors; stepwise multiple regression; path analysis