

· 解析评价 ·

江苏省高宝湖区湖泊群富营养化特征分析

夏霆^{1*}, 陈静², 龙健¹, 黄玉莹¹, 狄文亮¹

(1. 南京工业大学环境学院, 江苏 南京 211816; 2. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029)

摘要:对江苏省高宝湖区高邮湖、宝应湖、邵伯湖和白马湖湖泊富营养化共性与差异性特征进行了分析。结果表明, 2009—2014年, 4个湖泊总体处于中营养—轻度富营养之间, 综合富营养状态指数值在年内均呈波动变化, 丰水期明显大于枯水期; 主要营养因子水平在4个湖泊之间均存在较明显的差异, 尤其是TN和SD 2项指标阶梯状差异较为明显, Chl-a也呈现不同程度的年内分布水平差异, 并在春、夏季存在藻类暴发风险; 各湖泊Chl-a与环境因子相关性差异较大, 宝应湖、白马湖以及总体分析的高宝湖群Chl-a均与水温、TP相关性显著, TP应是高宝湖群藻类生长限制的主导营养因子; 各湖泊富营养化特征存在差异性, 总体上宝应湖与白马湖富营养化特征较为类似, 与高邮湖差异较大, 邵伯湖富营养化特征与高邮湖接近, 又兼有与宝应湖、白马湖相似性特征。

关键词:高宝湖群; 富营养化; 共性; 差异性

中图分类号: X524

文献标志码: B

文章编号: 1674-6732(2016)04-0040-06

Characteristic Analysis of Eutrophication on Lakes in Gaobao Water Resources Division in Jiangsu Province

XIA Ting¹, CHEN Jing², LONG Jian¹, HUANG Yu-ying¹, DI Wen-liang¹

(1. College of environment, Nanjing University of Technology, Nanjing, Jiangsu 211816, China; 2. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing, Jiangsu 210029, China.)

Abstract: The characteristics of similarity and heterogeneity on eutrophication effects were analyzed, which were found in the Gaoyou Lake, Baoying Lake, Shaobo Lake and Baima Lake in Gaobao Water Resources Division in Jiangsu Province. The results showed that 4 lakes were in status of mesotrophication or mild eutrophication from 2009 to 2014, and values of Comprehensive Nutrition State Index fluctuated within a year, with a better nutrition status in flood season than that in dry season. Values of main nutrition factors in 4 lakes were significantly different, especially TN and SD, and chlorophyll-a presented different levels in the temporal distribution, with a risk of algae outbreak in spring and summer. Correlations between chlorophyll-a concentration and environmental factors were different in these lakes, but significantly positive correlations between chlorophyll-a concentration and water temperature, total phosphorus, were found in the Baoying Lake, Baima Lake, and lakes in Gaobao Water Resources Division analyzed in general. The total phosphorus might be the limited nutrition factor for the growth of algae. As for the trophic characteristics, although there were some differences in 4 lakes, the Baoying Lake was more similar with the Baima Lake in general, and different from the Gaoyou Lake. The Shaobo Lake was more similar with the Gaoyou Lake, as well as some similarities with the Baoying Lake and Baima Lake.

Key words: Lakes in Gaobao; Eutrophication; Similarity; Heterogeneity

近年来, 湖泊富营养化及生态系统退化是我国湖泊面临的普遍问题。湖泊富营养化是一个复杂过程, 是多种环境因素协同作用的结果。不同区域的湖泊因自然条件以及人类干扰因素差异, 湖泊富营养化特征以及影响因素存在明显差异^[1]。在同一地区湖泊, 尽管自然影响因素接近, 但人类干扰因素以及强度的不同, 湖泊营养物水平、富营养

化效应及演变过程也会存在显著的差异^[2]。现以

收稿日期: 2015-10-07; 修订日期: 2016-02-22

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项基金资助项目(2012ZX07501-002-08); 江苏省环境监测科研基金资助项目(1117); 江苏省水利科技基金资助项目(2014034)

作者简介: 夏霆(1973—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为水体污染控制。

高宝湖区的湖泊作为研究对象,深入分析其富营养化状态与变化规律、富营养化的主导因子与影响原因,有利于针对不同湖泊富营养化的特点,对于因地制宜地开展湖泊富营养化防治具有重要的意义。

1 研究方法

1.1 研究区概况

高宝湖区位于淮河流域和长江流域的交界地区,属亚热带湿润季风气候带,四季分明,雨量充沛,水资源均较丰富,区域包括金湖全部和淮安、扬州市区及盱眙、洪泽、宝应、高邮、六合的一部分。高宝湖区位于京杭大运河以西江淮间侧面洼地的湖泊群,又称为运西湖泊群,由古泻湖经长期淤积和人类活动影响而成,均为浅水型湖泊,承担着区域防洪、供水、蓄水、养殖、旅游和生态维护等多种功能。区域内面积较大的湖有邵伯、高邮、宝应和白马,自南而北呈串珠形排列。湖泊群原经三河上承淮河、洪泽湖的来水,是淮河入江的行洪通道,后自开掘入江水道以来,白马湖、宝应湖与高邮湖的联系切断,白马湖和宝应湖成为内湖,高邮湖和邵伯湖仍为入江水道行洪通道。

1.2 分析方法

采用2009—2014年水质监测数据对高邮湖、宝应湖、邵伯湖和白马湖富营养特征进行分析。水质及湖泊水文数据主要为地方水文局水功能区各监测站监测成果,部分水质数据来源于开展江苏省湖泊健康评估的现场监测。

参照中国环境监测总站推荐的文献[3]中加权综合营养状态指数法,用TN、TP、 I_{Mn} 、叶绿素a(Chl-a)和透明度(SD)5项水质因子计算湖泊综合营养状态指数,计算公式为:

$$TLI(\sum) = \sum W_j \times TLI(j)。$$

式中:TLI(\sum)——综合营养状态指数;
 W_j ——第j种参数的营养状态指数的相关权重;
 TLI(j)——第j种参数的营养状态指数。

相关权重及富营养化程度分级标准均参照文献[3]的方法确定。水质分析方法参见文献[4]。数据统计分析均在SPSS19.0中进行。

2 结果与分析

2.1 湖泊综合营养状态及变化规律

2009—2014年4个湖泊综合营养指数

TLI(\sum)变化见图1(a),TLI(\sum)为43.70~56.73,总体处于中营养—轻度富营养之间。其中宝应湖TLI(\sum)平均值为48.09,总体处于中营养状态;高邮湖、邵伯湖和白马湖TLI(\sum)平均值分别为52.39、53.43和51.53,均处于轻度富营养状态。

TLI(\sum)值月均变化评估结果见图1(b),全年内4个湖泊TLI(\sum)值均呈明显的波动变化。高邮湖与邵伯湖全年内TLI(\sum)值波动起伏变化较大,2个湖泊TLI(\sum)值变化在1—6月有较大差异,但在7—12月份有明显同步性,并均在8月出现最大峰值;宝应湖和白马湖TLI(\sum)值变化曲线除了少数月份有差异外(5月和11月),总体具有较明显的趋同性,且均在7月出现最大峰值。宝应湖除4—5月和7—8月为轻度富营养外,其余月份均处于中营养状态;其余3个湖泊除少数月份(主要为枯水期)为中营养外,多数月份均处于轻度富营养状态。

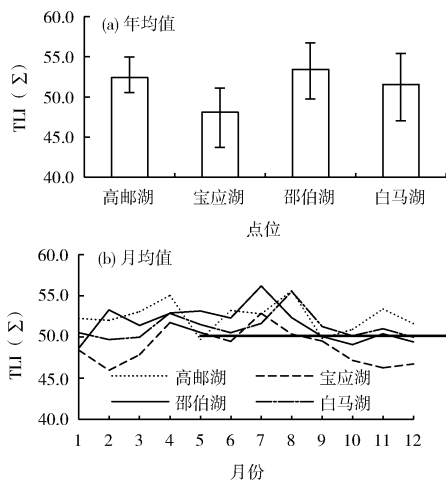


图1 2009—2014年湖泊综合营养状况变化

2.2 湖泊富营养化因子变化规律

采用箱须图法,2009—2014年各湖泊TN、TP、 I_{Mn} 、 NH_3-N 、Chl-a和SD 6项富营养因子的差异性分析结果见图2(a)(b)(c)(d)(e)(f)。其中TN差异较大,高邮湖和宝应湖总体能满足地表水IV类水质要求;邵伯湖和白马湖总体为V类,且数据离散程度较大。4个湖泊TP总体均为IV类,宝应湖和白马湖指标值相对较低。 I_{Mn} 和 NH_3-N 值

均较低,邵伯湖 I_{Mn} 总体在 II 类,其余 3 个湖泊也基本在 III 类; $NH_3 - N$ 除白马湖数值离散程度较大外,4 个湖泊总体均为 II 类。宝应湖和邵伯湖 $\rho(\text{Chl} - a)$ 总体均在 $10 \mu\text{g}/\text{L}$ 以内,高邮湖和白马湖略高,但总体也在 $10 \mu\text{g}/\text{L}$ 以内。SD 值,4 个湖泊间有较大差异,其中宝应湖透明度条件最好,均

值为 0.84 m ,白马湖次之为 0.60 m ,高邮湖和邵伯湖均 $<0.40 \text{ m}$ 。以上营养因子值分布结果表明, TN 、 TP 、 I_{Mn} 、 $\text{Chl} - a$ 和 SD 5 项指标 4 个湖泊之间存在较明显差异,尤其是 TN 和 SD 2 项指标,阶梯状差异较为明显;4 个湖泊 $NH_3 - N$ 和 I_{Mn} 2 项指标值均较低。

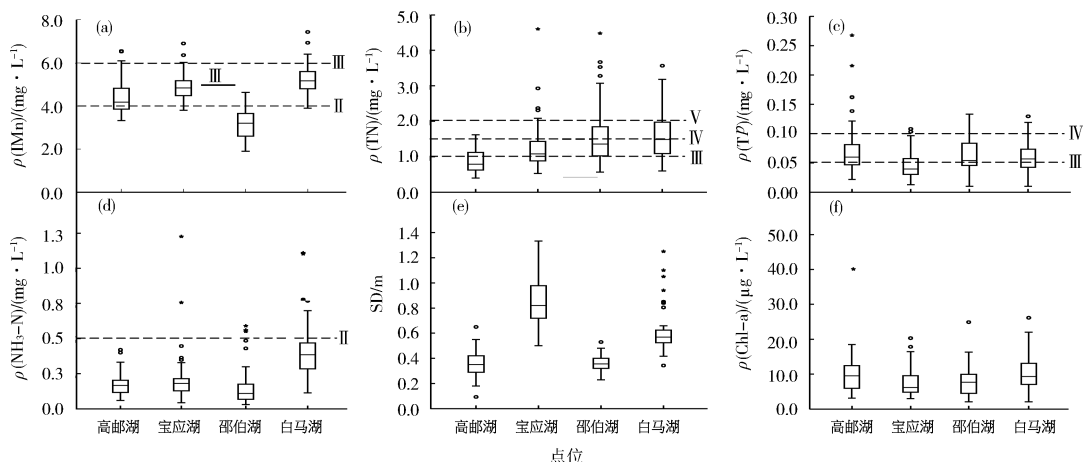


图 2 2009—2014 年湖泊富营养化评估指标分布

4 个湖泊 TN 、 TP 、 I_{Mn} 、 $\text{Chl} - a$ 和 SD 5 项水质因子的营养状态指数月均变化结果见图 3 (a) (b) (c) (d)。除邵伯湖 SD 指标外,各因子营养状态指数均在年内呈波动变化,并且总体上均在 4—8 月较大,与 $\text{TLI}(\sum)$ 变化趋势相近,但不同湖泊中各单因子的营养状况及变化幅度存在差异,表明了 4 个湖泊 $\text{TLI}(\sum)$ 值是受多个指标协同影响的结果。高邮湖和邵伯湖均主要为 $\text{TLI}(\text{SD})$ 值大,且在 4—8 月期间高邮湖 TN 、 TP 和 $\text{Chl} - a$ 营养状态指数较高,而邵伯湖 $\text{TLI}(\text{TN})$ 全年总体偏大, $\text{TLI}(\text{TP})$ 和 $\text{TLI}(\text{Chl} - a)$ 仅在 8 月份偏高;宝应湖和白马湖主要为 $\text{TLI}(\text{TN})$ 和 $\text{TLI}(\text{SD})$ 值偏大,在丰水期 $\text{TLI}(\text{TP})$ 和 $\text{TLI}(\text{Chl} - a)$ 也偏大。 $\text{TLI}(I_{Mn})$ 值在 4 个湖泊中均较小。以上结果表明,4 个湖泊富营养状况存在一定的共性特征,并且总体上高邮湖与邵伯湖较为相似,宝应湖和白马湖共性特征更多,但不同湖泊营养指标状况及变化也存在较明显差异。2009—2014 年湖泊 $\rho(\text{Chl} - a)$ 月际分布见图 4 (a) (b) (c) (d)。

由图 4 可见,总体上 4 个湖泊 $\rho(\text{Chl} - a)$ 在 3—9 月相对较高,并在 3—4 月与 7—8 月有两个较明显的波峰,并均在 7—8 月达到最大值;年内高

邮湖、宝应湖、邵伯湖和白马湖 $\rho(\text{Chl} - a)$ 最大月均值分别为 $19.33 \mu\text{g}/\text{L}$ (8 月), $12.48 \mu\text{g}/\text{L}$ (8 月), $13.59 \mu\text{g}/\text{L}$ (8 月) 和 $15.56 \mu\text{g}/\text{L}$ (7 月)。6 年间,高邮湖、宝应湖和邵伯湖 3 湖 $\rho(\text{Chl} - a)$ 均在 8 月份数据变化幅度最大,3 个湖泊 8 月份 $\rho(\text{Chl} - a)$ 最大值分别达到了 $40.10 \mu\text{g}/\text{L}$ (2013 年), $20.32 \mu\text{g}/\text{L}$ (2014 年) 和 $24.90 \mu\text{g}/\text{L}$ (2013 年);白马湖则在 4 月份数据变化幅度最大,4 月 $\rho(\text{Chl} - a)$ 最大值为 $26.16 \mu\text{g}/\text{L}$ (2011 年)。可见高宝湖区湖泊在春、夏季藻类易于大量繁殖季节,藻类暴发风险依然较大,文献[5]表明在高邮湖北部湖心区 2012—2013 年春季连续出现蓝藻水华,宝应湖与白马湖蓝藻密度也呈逐年增大趋势,均与本分析结果一致。

2.3 湖泊富营养化差异性及其主导因素

高宝湖区湖泊水资源环境条件基本相似,湖泊富营养化状况也呈现出一些相似的特征,如富营养化状况及营养因子的年内波动变化等。但分析结果也表明,各湖泊富营养状况与营养因子水平也表现出较大的差异。如宝应湖与白马湖富营养程度相对较轻,高邮湖与邵伯湖更趋严重; TN 与 SD 主要影响了宝应湖、邵伯湖和白马湖的富营养化状况,高邮湖则主要影响因子为 SD ; $\text{Chl} - a$ 也表现出

了不同程度的分布与水平差异。对各湖泊及湖泊群水体 Chl - a 与环境因子的 Pearson 相关分析表明(表 1),高邮湖 Chl - a 与各项环境因子的相关性均不显著,在邵伯湖仅与 pH 值、DO、 I_{Mn} 及 BOD_5 呈现出较显著的相关性,宝应湖和白马湖则与水温、 I_{Mn} 、 BOD_5 以及营养盐因子 TN、TP 及 $\rho(N)/\rho(P)$

(P) 均呈现显著性相关,综合分析的高宝湖群也与宝应湖和白马湖表现出的相关性特征相似,并与 SD 相关性显著。上述特征表明,各湖泊富营养化特征均具有差异性,但宝应湖与白马湖较为类似,高邮湖与此 2 湖差异较大,邵伯湖总体上更与高邮湖接近,又兼与宝应湖、白马湖有较多相似性。

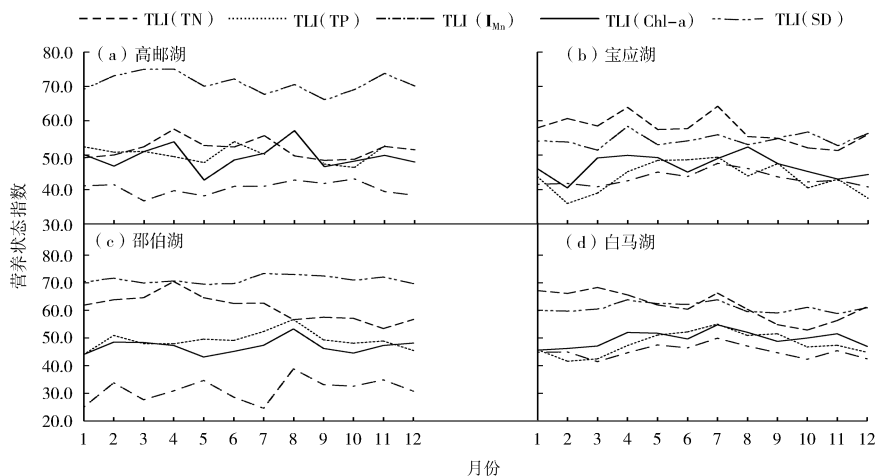


图 3 2009—2014 年湖泊营养状态指数月均变化

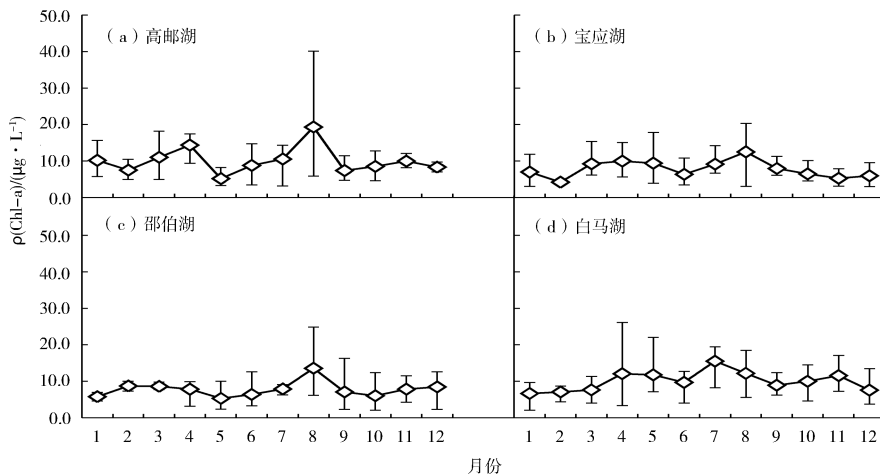


图 4 2009—2014 年湖泊 $\rho(\text{Chl} - a)$ 月际分布

表 1 湖泊(群) Chl - a 与环境因子的相关系数^①

项目	水温	pH 值	DO	$\text{NH}_3 - \text{N}$	I_{Mn}	BOD_5	TP	TN	SD	$\rho(N)/\rho(P)$	入湖水量
高邮湖	0.103	-0.065	0.019	-0.072	-0.023	0.155	0.11	0.067	-0.087	-0.007	-0.044
宝应湖	0.333**	0.333**	-0.136	0.136	0.438**	0.296**	0.356**	-0.016	-0.044	-0.265**	0.181
邵伯湖	0.065	0.207*	0.216*	0.002	0.178*	0.285**	0.046	0.109	-0.002	0.075	-0.313*
白马湖	0.139**	-0.026	-0.127*	0.118*	0.233**	0.229**	0.233**	0.057	-0.042	-0.119*	0.213
高宝湖群	0.124**	-0.039	-0.074*	0.101**	0.146**	0.217**	0.218**	0.061	-0.123*	-0.112**	-0.065

① ** : $P < 0.01$; * : $P < 0.05$ (双侧检验)。

水温是影响浅水湖泊藻类生长的重要环境因子^[6],在宝应湖、白马湖以及高宝湖群水温均对

Chl-a 呈显著性正相关,尤其是在春、夏季适宜藻类繁殖的高温季节。pH 值、DO 以及有机物 I_{Mn} 和 BOD_5 均是与湖泊藻类生长相关的重要因子,且一般被视为被动因子^[7],此4项因子也均与高宝湖区湖泊群 Chl-a 呈较强的相关性,SD 对高宝湖区湖泊富营养状况影响大,但4个湖泊 Chl-a 与 SD 相关性并不显著,主要因为这一区域湖泊水体交换量大,入湖污染物悬浮于水体使得透明度一直较低,这一特征在高、邵两湖表现尤为明显。

4个湖泊 Chl-a 与 TN 相关性均较小,表明 TN 并不是该地区影响藻类生长的主要因子,这与本地区湖泊 $\rho(TN)$ 较高有关; NH_3-N 作为藻类吸收利用的重要氮源,4个湖泊中也仅在高邮湖内 NH_3-N 与 Chl-a 呈现一定的负相关,表明湖泊 NH_3-N 并不随藻类生物量的增大而减小,4个湖泊 Chl-a 与 TP 的相关性呈现明显的差异性,高、

邵两湖与 TP 相关性不显著,表明此两湖 TP 并非是藻类生长的限制性营养物质,这应与高、邵两湖水体交换量大而入湖污染物中 TP 的汇入量大有关;宝、白两湖以及综合分析的高宝湖群 Chl-a 均与 TP 呈显著正相关,并与 $\rho(N)/\rho(P)$ 呈较显著负相关,表明宝、白两湖以及高宝湖群的水体分析,TP 均是藻类生长繁殖的限制性条件。研究期间,高、宝、邵、白4湖水体 $\rho(N)/\rho(P)$ 分别为 27.76, 34.89, 26.89, 35.55, 偏高,表明高宝湖群 TP 均相对不足而成为藻类生长限制的主导因子。进一步以对数线性方程反映本地区宝应湖、白马湖以及高宝湖群 Chl-a 与 TP 之间的关系见图 5(a)(b)(c),由线性方程斜率分别为 0.636, 0.312 和 0.316,表明了宝应湖藻类对 TP 的利用效率最高,白马湖和高宝湖群较低且利用效率接近。

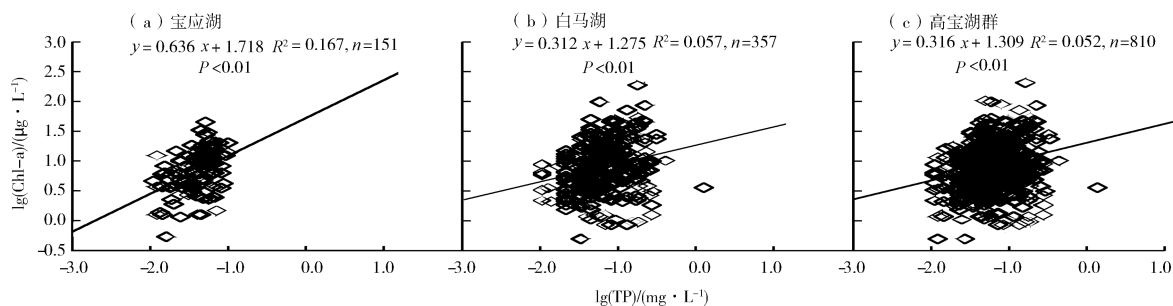


图5 湖泊(群) Chl-a 对 TP 的生态响应

高邮湖和邵伯湖是过水性湖泊,且相互之间水力连通紧密;宝应湖和白马湖水力条件则相对更为封闭。对于浅水型湖泊,水动力特征是影响湖泊富营养化的重要因素,一般而言,增加入湖流量能缓解湖泊富营养化尤其是藻类暴发态势^[8]。但研究期间本区域湖泊月均 Chl-a 与入湖水量相关分析表明(表1),在高、邵两湖均有负相关关系(在邵伯湖相关性显著),在宝、白两湖呈正相关(但相关性不显著),高邮湖、宝应湖、邵伯湖和白马湖年均湖水交换周期约为 42, 66, 6 和 33 d。邵伯湖换水周期小,尤其是汛期湖水交换迅速,对湖泊藻类生长有较大抑制作用。宝应湖和白马湖换水周期相对较长,更有利于藻类在适宜的水温条件下大量生长。高邮湖尽管换水周期较长,但因湖泊容积大,同时南北两个湖区水体交换条件差异明显,南部湖区因入江水道影响而水体交换率大,北部湖区水交

换程度较小。

近年来,高邮湖北部湖区连续出现蓝藻水华,而同期南部湖区藻类密度较小,这应与此类生境条件差别较大有关,此外,由于本区域内入湖污染河流众多,洪泽湖来水水质较差^[9],入湖污染物不同湖泊有较大差异,兼过水性湖泊水力停留时间短,污染物不易消纳,使得水质及水体透明度受到影响,也应是影响湖泊富营养化特征及其差异的重要因素。

3 结论

(1) 2009—2014年,高宝湖区宝应湖总体为中营养状态,高邮湖、邵伯湖和白马湖均处于轻度富营养状态;4个湖泊综合富营养状态指数在年内均呈明显的波动变化,在4—8月指数值较大,丰水期明显大于枯水期;

(2) 湖泊营养因子水平在4个湖泊之间均存在较明显的差异,尤其是TN和SD 2项指标阶梯状差异较为明显,主要影响了湖泊的富营养化程度;各湖泊富营养化特征存在差异性,宝应湖与白马湖富营养化特征较为类似,与高邮湖差异较大,邵伯湖富营养化特征与高邮湖接近,又兼有与宝应湖、白马湖相似性特征;

(3) 各湖泊Chl-a呈现不同程度的年内分布与水平差异,春、夏季存在藻类暴发的风险;各湖泊Chl-a与环境因子相关性差异较大,宝应湖、白马湖以及综合分析的高宝湖群Chl-a均与水温、TP相关性显著,TP总体上应是高宝湖群藻类生长限制的主导因子,水力交换、污染源汇入等外界因素也应综合影响了高宝湖群的富营养化状况。

[参考文献]

[1] 曹金玲,许其功,席北斗,等. 我国湖泊富营养化效应区域

(上接第16页)

动下降,排放强度总体上高于全省平均水平,体现了水泥行业是烟粉尘排放大户的特征。虽然其烟粉尘排放强度与全省平均水平的差距在缩小,全省水泥行业的结构调整和节能减排取得了一定效果,但是水泥行业作为烟粉尘排放之首的行业,对其烟粉尘的控制,提高其清洁生产力度仍为重中之重;2011—2014年全省水泥行业NO_x的排放强度呈现波动上升的趋势,并且总体上高于全省平均水平,与全省平均水平差距较大。江苏省水泥制造业NO_x的排放现状依然严峻,今后的工作中应加强对NO_x的控制。

(4) 经济发展与污染物排放的相关性分析结果表明:水泥制造业的SO₂与烟粉尘排放量与行业总产值均高度呈负相关。对行业总产值和烟粉尘以及SO₂排放量之间进行回归曲线模拟,烟粉尘和SO₂与行业总产值的拟合曲线有一定相似性,基本类似U型的左半段,随着行业总产值的增加,SO₂和烟粉尘的排放量呈现下降趋势。水泥制造业不断提升其自身行业的清洁生产水平,不断加大环保的投入,江苏省一系列地方性大气环境治理和保护文件出台,对大气环境的改善和治理起到了积极的作用,水泥行业烟粉尘和SO₂的排放量随着行业总产值的增加呈现下降的趋势。但是水泥制造业

差异性分析[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 1777-1783.

- [2] 陈小华,李小平,王菲菲,等. 苏南地区湖泊群的富营养化状态比较及指标阈值判定分析[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 390-399.
- [3] 金相旭,刘树坤,章宗涉,等. 中国湖泊环境(第1册)[M]. 北京:海洋出版社, 1995.
- [4] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [5] 江苏省水利厅. 江苏主要河湖健康状况公报[R], 2012—2013.
- [6] 申哲民,张涛,马晶,等. 富营养化与温度因素对太湖藻类生长的影响研究[J]. 环境监控与预警, 2011, 3(2): 1-4.
- [7] 阮晓红,石晓丹,赵振华,等. 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, 2008, 20(5): 556-562.
- [8] HU L M, HU W P, ZHAI S H, et al. Effects on water quality following water transfer in Lake Taihu, China[J]. Ecological Engineering, 2010(36): 471-481.
- [9] 王兆群,张宁红,张咏,等. 洪泽湖水质富营养化评价[J]. 环境监控与预警, 2010, 2(6): 31-35.

“高资源投入,低工业产出”的特征依然明显,因此在未来的发展过程中,针对水泥行业的大气环境治理政策应继续加强。

[参考文献]

- [1] GROSSMAN G M, KRUEGER A B. Environmental impact of a North American Free Trade Agreement[Z]. Cambridge: National Bureau of Economic Research, 1991.
- [2] JAEKYU L. Economic growth and environment: Some empirical evidences from South Korea[R]. School of Economics, University of New South Wales, 1997.
- [3] 陆虹. 中国环境问题与经济发展的关系分析——以大气污染为例[J]. 财经研究, 2000, 26(10): 121-125.
- [4] 朱智洛. 库兹涅茨曲线在中国水环境分析中的应用[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2004, 32(4): 387-390.
- [5] 胡明秀,胡辉,王立兵. 武汉市工业“三废”污染状况剂量模型研究[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(4): 52-55.
- [6] 严新峰,王淑娟. 宁夏水泥行业氮氧化物减排现状及对策[J]. 节能与环保, 2013(12): 64-66.
- [7] 莫华,朱法华,王圣. 火电行业大气污染物排放对PM_{2.5}的贡献及减排对策[J]. 中国电力, 2013, 46(8): 1-6.
- [8] 朱德明. 深化大气环境监测管理立法的对策[J]. 环境监控与预警, 2015, 7(4): 1-3.

栏目编辑 周立平