

引用格式:王金航,李京霖,江德霜,等. 我国典型湖泊磷浓度对水体指标及蓝藻水华爆发趋势的潜在影响——基于 Meta 分析[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2021, 48(2): 59–67.

WANG JinHang, LI JingLin, JIANG DeShuang, et al. The potential impact of phosphorus concentration in typical lakes in China on water body indicators and cyanobacteria bloom trends based on meta-analysis[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2021, 48(2): 59–67.

我国典型湖泊磷浓度对水体指标及蓝藻水华爆发趋势的潜在影响——基于 Meta 分析

王金航¹ 李京霖² 江德霜¹ 武会会¹ 王曙光¹ 林爱军^{1*}

(1. 北京化工大学 北京市环境污染控制与资源化工程研究中心, 北京 100029;

2. 北京市可持续发展科技促进中心, 北京 100035)

摘要: 水体富营养化可引发蓝藻水华, 对水生态环境和饮用水的安全产生严重危害, 揭示蓝藻水华的发生机理和变化规律是防治的基础。基于 1989—2019 年公开发表的相关研究, 提取 583 对有效数据, 利用 Meta 分析了我国典型湖泊中磷浓度对水体指标及蓝藻水华爆发趋势的影响。结果表明: 磷浓度对水体透明度(SD)产生负效应, 对溶解氧(DO)含量、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和叶绿素 a(Chla)含量产生正效应。随着磷浓度的增加, 上述 4 种指标呈现不同的变化趋势: 磷浓度对 DO 含量的正效应逐渐转变为负效应, 在磷的质量浓度为 0.2~0.3 mg/L 时负效应最大(亚热带季风气候); 对 SD 的负效应随磷浓度的增加先增大后略有减小, 在磷的质量浓度为 0.1~0.2 mg/L 时负效应最大; COD_{Mn} 和 Chla 含量对磷浓度的响应趋势基本相似, 在亚热带季风气候条件下, 磷的质量浓度分别为 0.2~0.3 mg/L 和 >0.3 mg/L 时二者的正效应最大。此外, 与温带季风气候地区相比, 在磷的质量浓度为 0~0.1 mg/L 时亚热带季风气候地区的湖泊水质更容易受磷浓度的影响, 蓝藻水华爆发的风险相对较高。

关键词: 湖泊富营养化; 总磷; 蓝藻水华; Meta 分析

中图分类号: X524 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2021.02.008

引言

湖泊水体富营养化是我国面临的主要水环境问题^[1]。我国第二次湖泊现状调查显示, 85.4% 的湖泊达到富营养化标准, 40.1% 的湖泊达到严重富营养化标准^[2]。随着水体富营养化日益严重, 湖泊水华现象频繁发生, 尤其在我国的滇池、太湖和巢湖最为严重。水华是由藻类、浮游动植物和细菌等爆发性繁殖或高度聚集而引起水体变色的现象^[2]。在各类水华中, 蓝藻水华在淡水中占据优势, 被公认为是全球最严重的湖泊水环境问题之一。蓝藻水华的爆

发会导致水体缺氧、水质变坏, 同时蓝藻还会产生蓝藻毒素, 直接威胁湖泊水环境和人类健康^[3]。

蓝藻水华爆发的主要原因是水体富营养化, 同时易受气象、水文、人类活动等因素的影响。Dokulil 等^[4]认为营养物质浓度、水温、光照等条件是影响蓝藻优势形成的关键。孔繁翔等^[5]提出了蓝藻水华成因的“四阶段理论”, 探索了符合我国湖泊特征的蓝藻水华爆发的规律和机制。徐潇等^[6]从水-土-气-生多角度研究了各环境因素对蓝藻水华爆发机制的影响。目前, 我国对蓝藻水华爆发的研究多集中在单一研究区域, 缺乏多维度的蓝藻水华爆发规律的研究。

近年来, Meta 分析作为一种统计方法, 可通过汇总初步研究中的数据, 得出比单一研究更可靠的综合分析结果, 避免单一研究的局限性^[7]。该方法已广泛应用于医学领域, 并逐步应用于土壤、水、大气等环境科学领域^[8-10]。徐晓晔等^[11]通过 Meta 分析函数构建了我国水资源价值移位模型, 揭示了我

收稿日期: 2020-08-17

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项 (2018ZX07111003)

第一作者: 男, 1997 年生, 硕士生

* 通信联系人

E-mail: linaj@mail.buct.edu.cn

国地理空间格局的水资源价值的差异性。Khan 等^[12]通过 Meta 分析研究了印度河流域的气候变化与流域水文的关系,为印度水供应不足制定策略。Erni-Cassola 等^[13]利用 Meta 分析揭示了海洋不同采样区域中常见塑料聚合物相对丰度的总体趋势,为海洋微塑料治理提供了依据。这些研究表明 Meta 分析可全面揭示水环境流域特征,为水环境保护和管理策略的制定提供支撑,但目前没有使用 Meta 分析对流域环境水华的爆发规律进行研究的报道。Conley 等^[14]提出氮磷双控是防治湖泊富营养化和蓝藻水华爆发的关键,但磷是最主要的限制性养分。因此,本文从 1989—2019 年公开发表的相关研究中提取 583 对有效数据,利用 Meta 分析,以我国典型湖泊(太湖、巢湖、滇池、白洋淀和松花湖)为对象,研究了磷浓度对水质指标以及蓝藻水华爆发的影响,为蓝藻水华爆发的防治提供参考,对水环境保护具有一定的现实意义。

1 研究方法

1.1 文献收集

利用中国知网(CNKI)、万方和维普等国内期刊数据库,以“蓝藻爆发”、“富营养化”、“磷”和“湖泊”为关键词,检索 1989—2019 年发表的有关“我国湖泊水体磷浓度与蓝藻水华爆发”的文献,对其进行 Meta 分析。涉及湖泊包括太湖、巢湖、滇池、白洋淀和松花湖。为达到本研究的目的和减少筛选文献带来的偏差,制定以下 6 条文献筛选标准:1)在我国湖泊进行的实验性或监测性研究须设有实验组和对照组,并以最低磷浓度作为对照组;2)在研究过程中,同一项研究须控制水体环境、气象条件、实验时长一致;3)所测点位至少观测一个月以上,并取其均值,避免短期及气候条件等导致实验误差;4)至少包含一项以下参数:总磷(TP)含量、溶解氧(DO)含量、水体透明度(SD)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和叶绿素 a(Chla)含量;5)对于报道同一个研究的重复文献,只选择其中一篇;6)相关指标参数须以均值表示,并包含标准差(标准误或置信区间)和样本容量,必要时可从图表中提取相关数据。基于上述筛选标准,由最初的 5 000 余篇文献,最终获得 15 篇有效文献(见表 1),并利用拉依达准则(3σ 准则)剔除异常值后获得 583 对有效数据。同时,数据的预处理结果显示,失安全数为 4.57×10^{11} ($P < 0.1$),大于 Hedges 等^[30]提出的参考限值

5×10^{10} ,即文献的发表偏倚很小,基于此数据的 Meta 分析结果稳定。

表 1 研究的 4 项指标及其筛选文献

Table 1 Four research indexes and their screened literatures

研究指标	筛选文献
DO 含量	[15–22]
SD	[15], [17], [20], [22–28]
COD _{Mn}	[15], [17–18], [20–23], [26–29]
Chla 含量	[15], [17–23], [26–28]

1.2 数据整理

对每篇文献中湖泊的地理位置、气候条件、TP 含量、DO 含量、SD、COD_{Mn}、Chla 含量的观测数据进行记录,同时也包括对照组和实验组的均值、标准差、样本容量。对表格形式的数据直接进行提取,对图片形式的数据使用 Origin 2018 软件(OriginLab, Northampton, MA, USA)将其数字化。

为研究不同磷浓度下湖泊水质指标的变化及蓝藻水华爆发的趋势,将磷的质量浓度分为 4 类:0 ~ 0.1、0.1 ~ 0.2、0.2 ~ 0.3 mg/L 及 > 0.3 mg/L。此外,有研究表明气候因素对蓝藻水华爆发有较大影响^[4–5]。因此,根据我国蓝藻水华爆发区域的主要气候特征,将亚热带季风气候地区(年均气温 13 ~ 20 ℃)和温带季风气候地区(年均气温 11.7 ℃)设为亚组进行 Meta 分析。

1.3 数据分析

采用 MetaWin 2.0 软件(Sinauer Associates Inc, Sunderland, MA, USA)中的随机效应模型计算合并效应值及其 95% 置信区间。Meta 分析的效应值可分析某一指标的实验组相对于对照组的变化幅度,以反应比(r)的自然对数($\ln r$)为效应值(E),其计算公式如下。

$$E = \ln r = \ln (X_E/X_C) = \ln X_E - \ln X_C \quad (1)$$

式中, X_E 和 X_C 分别表示实验组和对照组中研究指标的均值。若 $E = 0$,则说明磷浓度未引起实验组与对照组之间的差异;若 $E > 0$,则说明磷浓度对所研究的指标参数产生正效应;若 $E < 0$,则说明磷浓度对所研究的指标参数产生负效应。

效应值方差(v)的计算公式如下。

$$v = \frac{S_E^2}{N_E X_E^2} + \frac{S_C^2}{N_C X_C^2} \quad (2)$$

式中, S_E 和 S_C 分别表示实验组和对照组中研究指标的标准差; N_E 和 N_C 分别表示实验组和对照组的样本

容量。为了得出实验组相对于对照组的效应,对效应值均值进行加权处理,分析效应值及其 95% 置信区间(95% CI)。若效应值的 95% CI 与效应值的“0”点相交,则认为磷浓度对该指标的影响不显著($P>0.05$);反之,影响效果显著($P<0.05$)。

湖泊水体中磷浓度变化后,水体各项指标的变化率通过以下公式^[31]获得。

$$D = (e^E - 1) \times 100\% = (e^{\ln r} - 1) \times 100\% \quad (3)$$

式中, D 为实验组相对于对照组的指标变化率。

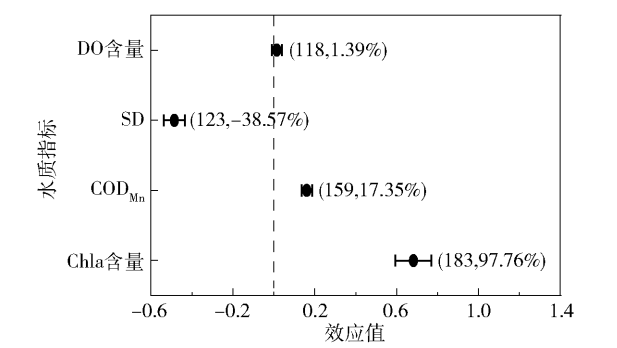
采用 Origin 2018 软件进行相关图件的制作,使用 SPSS 25.0 软件(IBM, Armonk, NY, USA)进行 Pearson 相关性分析, $P<0.05$ 为相关性显著, $P<0.01$ 为相关性极显著。

2 结果与讨论

2.1 湖泊中水质指标对磷浓度的总体响应

湖泊中 DO 含量、SD、COD_{Mn} 和 Chla 含量对磷浓度的总体响应如图 1 所示。Meta 分析结果表明,湖泊中磷浓度对 SD 产生负效应,其变化率为 -38.57%;对 COD_{Mn} 和 Chla 含量产生正效应,其变化率分别为 17.35% 和 97.76%。DO 含量效应值的 95% 置信区间与效应值的“0”点相交,说明水体中磷浓度对其影响不显著($P>0.05$)。但是,水体中磷浓度对 SD、COD_{Mn} 和 Chla 含量的影响显著($P<0.05$)。

太湖、巢湖、滇池、白洋淀和松花湖 5 个不同地区的湖泊中,水体中 DO 含量、SD、COD_{Mn} 和 Chla 含



括号内的第一个数字表示样本容量,第二个数字表示指标变化率。

图 1 湖泊中 DO 含量、SD、COD_{Mn} 和 Chla 含量对磷浓度的总体响应

Fig. 1 The overall response of DO content, SD, COD_{Mn} and Chla content to phosphorus concentration in lakes

量对磷浓度的响应如表 2 所示,从表 2 中可以看出 5 个湖泊中 DO 含量对磷浓度的响应均不显著($P>0.05$)。在上述湖泊(不包含滇池)中磷浓度对 SD 均产生负效应,且效果显著($P<0.05$),说明磷浓度升高会显著降低水体透明度。5 个湖泊中仅太湖中磷浓度对 COD_{Mn} 的效应显著,产生正效应,而对其他湖泊的效果均不显著。这可能是由于对太湖的相关研究主要集中在 2007—2011 年,正值 2007 年太湖蓝藻污染事件,湖泊整体水质较差,因此 COD_{Mn} 效应显著高于其他湖泊^[32]。在 Chla 含量对磷浓度的响应方面,磷浓度对湖泊中 Chla 含量产生显著的正效应,说明磷浓度升高是导致蓝藻水华爆发的关键因素^[2]。

表 2 我国典型湖泊中 DO 含量、SD、COD_{Mn} 和 Chla 含量对磷浓度的响应

湖泊	DO 含量			SD			COD _{Mn}			Chla 含量		
	<i>n</i> ^{a)}	<i>E</i>	95% CI	<i>n</i> ^{a)}	<i>E</i>	95% CI	<i>n</i> ^{a)}	<i>E</i>	95% CI	<i>n</i> ^{a)}	<i>E</i>	95% CI
太湖	32	-0.020	(-0.150,0.110)	46	-0.389	(-0.497,-0.282)	46	0.307	(0.200,0.415)	46	0.752	(0.644,0.859)
巢湖	5	-0.060	(-0.365,0.245)	16	-0.499	(-0.984,-0.014)	23	0.176	(-0.125,0.476)	47	0.554	(0.367,0.742)
滇池	29	0.057	(-0.211,0.326)	-	-	-	29	0.093	(-0.848,0.270)	29	1.091	(0.822,1.359)
白洋淀	30	-0.072	(-0.229,0.086)	35	-0.579	(-0.724,-0.434)	35	0.068	(-0.077,0.213)	35	0.385	(0.240,0.531)
松花湖	22	0.087	(-0.112,0.286)	26	-0.575	(-0.756,-0.393)	26	0.103	(-0.078,0.284)	26	0.787	(0.606,0.968)

a—湖泊所对应指标的样本容量;-表示没有对应数据。

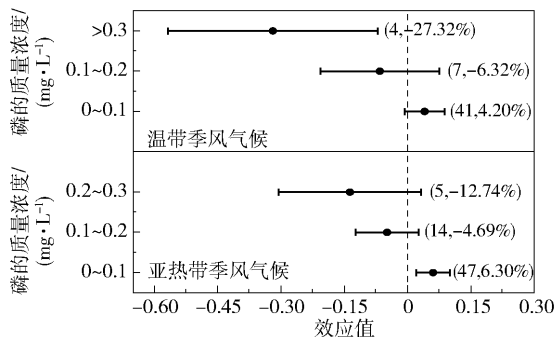
2.2 湖泊中磷浓度对水体指标的影响

湖泊中磷浓度是影响水体富营养化程度及蓝藻水华爆发的主要因素,此外,温度、光照时间、水利条件、风速和风向等自然因素也是影响湖泊蓝藻水华爆发的关键因素^[2]。太湖、巢湖和滇池属

于亚热带季风气候地区,白洋淀和松花湖属于温带季风气候地区,故在分析湖泊中磷浓度变化的同时,也根据湖泊的气候特点对各指标进行对比分析,以明确不同气候地区的湖泊中蓝藻水华爆发的规律。

2.2.1 DO 含量

DO 含量反映水体的污染程度,是影响水环境健康的重要因素^[33]。湖泊中磷浓度对 DO 含量的影响如图 2 所示。可以看出,在 2 种气候条件下当磷的质量浓度为 0~0.1 mg/L 时磷浓度对 DO 含量产生正效应,这可能是由于适量的磷可为水生植物提供养分,促进光合作用,从而使 DO 含量增加。随着磷浓度的升高,磷浓度对 DO 含量产生负效应。在磷的质量浓度为 0.2~0.3 mg/L(亚热带季风气候)和 >0.3 mg/L(温带季风气候)时负效应最大,DO 含量变化率分别为 -12.74% 和 -27.32%。浮游植物会通过光合作用产生氧气,从而增加水体中 DO 含量,但其呼吸作用又会消耗氧气^[33]。随着磷含量逐渐升高,浮游动物和藻类迅速繁殖,占据大量湖泊表层面积,下层浮游动物和藻类进行光合作用的强度减弱。此外藻类死亡分解也会消耗氧气,当光合作用的产氧量小于呼吸作用和藻类分解的耗氧量时,水体 DO 含量下降,进而危害水生生物健康和水生态系统安全^[2]。



括号内的第一个数字表示样本容量,第二个数字表示 DO 含量变化率。

图 2 磷浓度对 DO 含量的影响

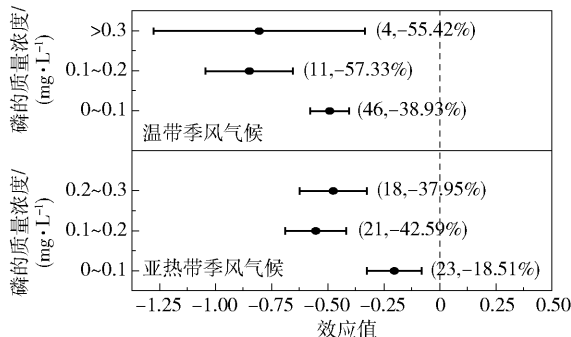
Fig. 2 Effect of phosphorus concentration on DO content

在自然条件下,湖泊水体中的 DO 含量会处于一个相对稳定的范围,水温是影响其变化的主要因素^[34]。温度的改变可以在很大程度上影响有机物的产生和积累,同时也会影响水体的氧动态和氮磷循环过程^[35]。从图 2 可以看出亚热带和温带季风气候地区的湖泊中 DO 含量随磷浓度变化的趋势相似。在磷的质量浓度为 0~0.1 mg/L 时,磷浓度对亚热带季风气候地区 DO 含量的正效应显著($P < 0.05$),而对温带季风气候地区的正效应不显著($P > 0.05$)。这可能是由于亚热带季风气候地区的光照强度和水温较高,有利于水生植物的光合作用,

从而导致水体 DO 含量升高^[33]。

2.2.2 SD

SD 是反映水体浑浊程度的重要参数,在研究水环境变化和水质富营养化等方面都具有重要意义^[36]。磷浓度对 SD 的影响如图 3 所示,磷在不同浓度下均会对 SD 产生显著负效应($P < 0.05$),且随磷浓度的升高负效应先增大后减小。在 2 种气候条件下,当磷的质量浓度为 0.1~0.2 mg/L 时磷浓度对 SD 的负效应最明显,SD 变化率分别为 -42.59% (亚热带季风气候)和 -57.33% (温带季风气候)。Chang 等^[36]构建了水体透明度评价体系,指出 SD 受悬浮颗粒物和 Chla 的影响最大。磷浓度的增加会导致藻类加速生长,产生大量 Chla,降低水体透明度。但藻类植物的生长在一定程度上可以起到净化水体的作用,Brune 等^[37]提出菌藻共生体系可通过藻类光合作用和好氧菌代谢,对水体进行净化,同时藻类和菌株还会吸附水中的悬浮颗粒物,改善水体透明度。因此,在磷浓度增加时,负效应不会持续降低,而是呈现轻微的反弹趋势。



括号内的第一个数字表示样本容量,第二个数字表示 SD 变化率。

图 3 磷浓度对 SD 的影响

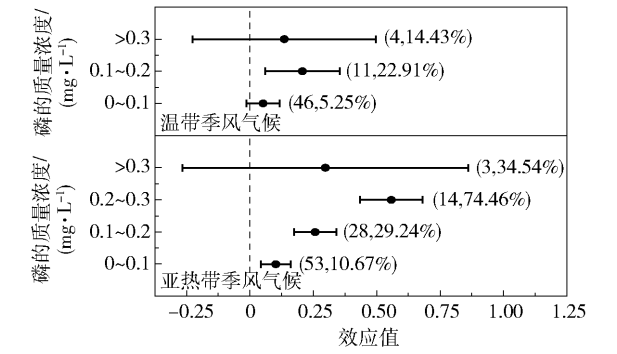
Fig. 3 Effect of phosphorus concentration on SD

亚热带和温带季风气候地区的湖泊所呈现的规律相似。在磷的质量浓度为 0~0.1 mg/L 和 0.1~0.2 mg/L 时,温带季风气候地区的 SD 负效应明显高于亚热带季风气候地区。这样的差异主要是由温度、光照、降水量不同导致的,亚热带季风气候地区的年均温度较高,更利于浮游动物和藻类的繁殖,对水体的净化效果更好,所以负效应较低。

2.2.3 COD_{Mn}

COD_{Mn}是我国评价地表水质的一项重要指标,能在一定程度上反映地表水质^[38]。磷浓度对 COD_{Mn}的影响如图 4 所示,磷在不同浓度下对

COD_{Mn}均产生正效应,在磷的质量浓度为0.2~0.3 mg/L(亚热带季风气候)时 COD_{Mn}变化率最大,为74.46%。COD_{Mn}增加是水体中有机物含量增加导致的,藻类和浮游动物的大量繁殖会使 COD_{Mn}升高^[39]。韩志萍等^[40]发现湖泊中蓝藻生物量与 COD_{Mn}呈正相关,且高峰期一致。其他相关研究^[40-41]均发现 COD_{Mn}对蓝藻水华爆发有显著影响,因此 COD_{Mn}的管控是控制蓝藻水华爆发的重要措施之一。



括号内的第一个数字表示样本容量,第二个数字表示 COD_{Mn}变化率。

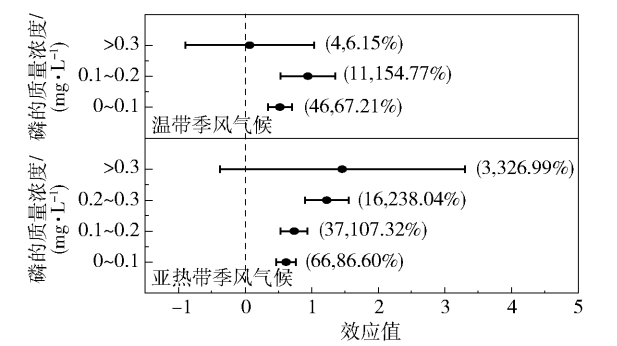
图4 磷浓度对 COD_{Mn}的影响

Fig. 4 Effect of phosphorus concentration on COD_{Mn}

2.2.4 Chla 含量

Chla 含量作为浮游植物存量的表征指标^[42],可有效反映水体富营养化情况和蓝藻水华爆发趋势。例如,Aubriot 等^[43]利用遥感技术监测 Chla 浓度,建立了蓝藻水华爆发预警系统,为普拉塔河的蓝藻水华爆发提供了阻控依据。磷浓度对 Chla 含量的影响如图 5 所示,Chla 含量对磷浓度的响应趋势与 COD_{Mn}基本相似。在亚热带季风气候条件下,随磷浓度的增加正效应逐渐增大,在磷的质量浓度 > 0.3 mg/L 时效应值最大,Chla 含量变化率为 326.99%。在温带季风气候条件下,在磷的质量浓度为 0.1~0.2 mg/L 时正效应最大,Chla 含量变化率为 154.77%。

在不同气候地区,磷浓度对 Chla 含量均产生正效应,在磷的质量浓度为 0~0.1 mg/L 时,亚热带季风气候地区的 Chla 含量变化率(86.60%)高于温带季风气候地区(67.21%),说明此时其发生水体富营养化的风险相对较高。不同气候地区的水温差异较大,水温可直接影响浮游植物体内酶的活性,调控浮游植物的光合作用和呼吸代谢速率,进而影响湖泊中 Chla 的浓度^[43]。



括号内的第一个数字表示样本容量,第二个数字表示 Chla 含量变化率。

图5 磷浓度对 Chla 含量的影响

Fig. 5 Effect of phosphorus concentration on Chla content

2.3 相关性分析

为了论证 Meta 分析的结果以及磷浓度与水体各指标之间的关系,对各指标间的相关性进行了分析,结果如表 3 所示。DO 含量、SD、COD_{Mn}与 TP 含量呈现显著或极显著相关性,其中 DO 含量和 SD 与 TP 含量呈负相关,COD_{Mn}与 TP 含量呈正相关。水体中的营养物质是蓝藻生长繁殖的物质基础,营养物质含量决定着蓝藻的繁殖速度,对水华的发生有至关重要的影响^[2]。结果表明 TP 含量是影响湖泊水质指标的重要因素,限制湖泊中磷浓度是防治水体富营养化和维护湖泊水质的重要手段。

表 3 我国典型湖泊的水质指标相关系数

Table 3 Correlation coefficients of water quality indexes of typical lakes in China

水质指标	相关关系				
	TP 含量	DO 含量	SD	COD _{Mn}	Chla 含量
TP 含量	1	-0.242 *	-0.237 **	0.243 **	0.092
DO 含量	-0.242 *	1	-0.300 **	-0.460 **	-0.087
SD	-0.237 **	-0.300 **	1	-0.332 **	0.352 **
COD _{Mn}	0.243 **	-0.460 **	-0.332 **	1	0.011
Chla 含量	0.092	-0.087	0.352 **	0.011	1

* —相关性显著 ($P < 0.05$); ** —相关性极显著 ($P < 0.01$)。

但是相关性分析结果显示 TP 含量与 Chla 含量的相关性不显著,这与前文 Meta 分析中 TP 含量会显著影响 Chla 含量的结论存在出入,其原因分析如下:1) 本文选择 5 个不同地区的湖泊进行相关性分析,不同湖泊间 TP 含量和 Chla 含量的关系可能受自然因素(水利条件、气象条件等)和人为因素(实验差异等)的影响,其间的相关性被破坏;在 Meta 分析中由于选用同一篇文献的实验组与对照组进行分

析,可以排除一定的人为因素和自然因素的影响。
2)研究变量的差异。Meta 分析为实验组与对照组的对比分析,而相关性分析属于 TP 含量和 Chla 含量间关系的分析,故会产生一定的差异。

3 结论

(1)湖泊中磷浓度对 SD 产生负效应,使 SD 降低 38.57%;对 DO 含量、COD_{Mn} 和 Chla 含量产生正效应,使其分别增加了 1.39%、17.35% 和 97.76%,其中对 DO 含量的影响不显著($P > 0.05$)。

(2)随着湖泊中磷浓度的增加,各指标呈现不同的变化趋势。磷浓度对 DO 含量的正效应逐渐转变为负效应,在磷的质量浓度为 0.2 ~ 0.3 mg/L(亚热带季风气候)和 >0.3 mg/L(温带季风气候)时对 DO 含量的负效应最大;对 SD 的负效应随磷浓度的升高先增大后略微减小,在磷的质量浓度为 0.1 ~ 0.2 mg/L 时负效应最大;COD_{Mn} 和 Chla 含量对磷浓度的响应趋势基本相似,在亚热带季风气候条件下,磷的质量浓度分别在 0.2 ~ 0.3 mg/L 和 >0.3 mg/L 时正效应最大。

(3)在不同气候条件下,在磷浓度变化时湖泊的水质和蓝藻爆发情况不尽相同。在磷的质量浓度为 0 ~ 0.1 mg/L 时亚热带季风气候地区湖泊的 DO 含量、COD_{Mn} 和 Chla 含量对磷浓度的响应程度高于温带季风气候地区,更易受磷浓度的影响,蓝藻水华爆发的风险相对较高。

在不同湖泊中,蓝藻水华的影响因素间交叉和组合的作用是不同的,因此,不同水体蓝藻水华爆发的原因和机制可能有所不同。在下一步的研究中建议采用网状 Meta 分析,进行多因素的混合效应研究。同时,在讨论特定水体的蓝藻水华状况时,有必要结合当地实际情况对其进行详细分析。

参考文献:

- [1] 夏曼莉,于谨磊,何虎,等.太湖蓝藻碎屑对水质及附着藻和水丝蚓生物量的影响[J].湖泊科学,2020,32(4):1050-1059.
XIA M L, YU J L, HE H, et al. Effects of cyanobacterial detritus on water quality and the biomass of periphyton and *Limnodrilus* spp. in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(4): 1050-1059. (in Chinese)
- [2] ZHOU B, CAI X L, WANG S, et al. Analysis of the causes of cyanobacteria bloom: a review[J]. Journal of Resources and Ecology, 2020, 11(4): 405-413.
- [3] CHEN J, XIE P, LI L, et al. First identification of the hepatotoxic microcystins in the serum of a chronically exposed human population together with indication of hepatocellular damage[J]. Toxicological Sciences, 2009, 108(1): 81-89.
- [4] DOKULIL M T, TEUBNER K. Cyanobacterial dominance in lakes[J]. Hydrobiologia, 2000, 438: 1-12.
- [5] 孔繁翔,高光.大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J].生态学报,2005,25(3):589-595.
KONG F X, GAO G. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 589-595. (in Chinese)
- [6] 徐潇,张一新.我国湖泊营养特性与蓝藻水华爆发机制[J].环境工程,2019,37(增刊):49-53.
XU X, ZHANG Y X. Study on the nutrient characteristics of lakes and mechanism of cyanobacteria bloom in China[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(Suppl): 49-53. (in Chinese)
- [7] HITCHCOCK D J, ANDERSEN T, VARPE Ø, et al. Effects of maternal reproductive investment on sex-specific pollutant accumulation in seabirds: a meta-analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(13): 7821-7829.
- [8] HUANG Y, WANG L Y, WANG W J, et al. Current status of agricultural soil pollution by heavy metals in China: a meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 3034-3042.
- [9] SHAO D W, ZHAN Y, ZHOU W J, et al. Current status and temporal trend of heavy metals in farmland soil of the Yangtze River Delta Region: field survey and meta-analysis[J]. Environmental Pollution, 2016, 219: 329-336.
- [10] NUNES M R, KARLEN D L, VEUM K S, et al. Biological soil health indicators respond to tillage intensity: a US meta-analysis[J]. Geoderma, 2020, 369: 114335.
- [11] 徐晓晔,黄贤金,赵涵.基于 Meta 分析的中国水资源价值移位研究[J].中国环境管理,2019,11(4):46-51.
XU X Y, HUANG X J, ZHAO H. Meta-regression on the benefit transfer of water resources in China[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2019, 11(4): 46-51. (in Chinese)
- [12] KHAN F, PILZ J, ALI S. Improved hydrological projections and reservoir management in the Upper Indus Basin under the changing climate[J]. Water and Environment Journal, 2017, 31(2): 235-244.

- [13] ERNI-CASSOLA G, ZADJELOVIC V, GIBSON M I, et al. Distribution of plastic polymer types in the marine environment; a meta-analysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 369: 691 – 698.
- [14] CONLEY D J, PAERL H W, HOWARTH R W, et al. Ecology—controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus [J]. *Science*, 2009, 323(5917): 1014 – 1015.
- [15] 顾蓓瑜, 庄严, 邹华, 等. Arc-GIS 软件在太湖水质及富营养化分析中的应用 [J]. *环境与健康杂志*, 2013, 30(9): 802 – 804.
- GU B Y, ZHUANG Y, ZOU H, et al. Application of Arc-GIS to analysis of water quality and eutrophication of Tai Lake [J]. *Journal of Environment and Health*, 2013, 30(9): 802 – 804. (in Chinese)
- [16] 成芳, 凌去非, 徐海军, 等. 太湖水质现状与主要污染物分析 [J]. *上海海洋大学学报*, 2010, 19(1): 105 – 110.
- CHENG F, LING Q F, XU H J, et al. Assessment of water quality and the main pollutions of Taihu Lake [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2010, 19(1): 105 – 110. (in Chinese)
- [17] 朱超, 杨晓冉, 赵彬, 等. 2017 年夏季巢湖水华期间浮游植物与蓝藻毒素的时空变化特征 [J]. *中国环境监测*, 2018, 34(6): 103 – 112.
- ZHU C, YANG X R, ZHAO B, et al. Spatiotemporal dynamics of phytoplankton and cyanotoxins in Chaohu Lake during summer cyanobacterial blooms of 2017 [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, 34(6): 103 – 112. (in Chinese)
- [18] 祝艳, 韩林沛, 刘丽君, 等. 2018 年滇池水环境质量评价研究 [J]. *环境科学导刊*, 2020, 39(2): 75 – 85.
- ZHU Y, HAN L P, LIU L J, et al. Water quality assessment of Dianchi Lake in 2018 [J]. *Environmental Science Survey*, 2020, 39(2): 75 – 85. (in Chinese)
- [19] 缪灿, 李塍, 余冠军. 巢湖夏、秋季浮游植物叶绿素 a 及蓝藻水华影响因素分析 [J]. *生物学杂志*, 2011, 28(2): 54 – 57.
- MIAO C, LI K, YU G J. Analysis of phytoplankton chlorophyll a concentration in summer and autumn in Chaohu Lake and the impact factors of cyanobacterial blooms [J]. *Journal of Biology*, 2011, 28(2): 54 – 57. (in Chinese)
- [20] 佟霁坤. 近十年白洋淀水质特征及营养状态分析 [D]. 保定: 河北大学, 2020.
- TONG J K. Analysis of water quality characteristics and nutrient status in Baiyang Lake in recent ten years [D]. Baoding: Hebei University, 2020. (in Chinese)
- [21] 于力, 南条吉之, 石飞裕, 等. 松花湖水体富营养化状况的监测与评价 [J]. *北方环境*, 2004, 29(4): 73 – 76, 80.
- YU L, NANTIAO J Z, SHI F Y, et al. Monitoring and evaluation of the eutrophication status of Songhua Lake [J]. *North Environment*, 2004, 29(4): 73 – 76, 80. (in Chinese)
- [22] 王霞, 吕宪国, 张学林, 等. 松花湖富营养化现状及其影响因素分析 [J]. *湿地科学*, 2004, 2(4): 273 – 278.
- WANG X, LV X G, ZHANG X L, et al. Eutrophication aspects and effective factors analysis in Songhua Lake [J]. *Wetland Science*, 2004, 2(4): 273 – 278. (in Chinese)
- [23] 朱广伟. 太湖水质的时空分异特征及其与水华的关系 [J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(5): 439 – 445.
- ZHU G W. Spatio-temporal distribution pattern of water quality in Lake Taihu and its relation with cyanobacterial blooms [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(5): 439 – 445. (in Chinese)
- [24] 张志芬, 汪蓄, 谢恩诚, 等. 巢湖水体浮游藻类数量与主要水质指标关系的研究 [J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(17): 76 – 79, 91.
- ZHANG Z F, WANG Q, XIE E C, et al. The relationship between number of phytoplankton and main water quality indexes in Chaohu Lake [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(17): 76 – 79, 91. (in Chinese)
- [25] 邹清, 周连凤, 吴生桂. 巢湖周年水质的综合评价 [J]. *水利渔业*, 2007, 27(4): 57 – 59.
- ZOU Q, ZHOU L F, WU S G. Comprehensive evaluation of the annual water quality of Chaohu Lake [J]. *Reservoir Fisheries*, 2007, 27(4): 57 – 59. (in Chinese)
- [26] 杨丽伟, 陈诗越. 白洋淀水环境质量评价 [J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(3): 457 – 462.
- YANG L W, CHEN S Y. Assessment of water environment quality of Baiyang Lake [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(3): 457 – 462. (in Chinese)
- [27] 施云芬, 刘月华, 李英赞. 松花湖富营养化现状调查与评价 [J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(11): 4669 – 4671.
- SHI Y F, LIU Y H, LI Y Z. Investigation and assessment of eutrophication of Songhua Lake [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(11): 4669 – 4671. (in Chinese)
- [28] 梁淑轩, 王云晓, 秦哲. 白洋淀叶绿素 a 及其水质因子分析 [J]. *海洋湖沼通报*, 2012(3): 66 – 73.

- LIANG S X, WANG Y X, QIN Z. Chlorophyll-a and analysis of water quality of Lake Baiyangdian[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2012(3): 66 – 73. (in Chinese)
- [29] 卜松, 周戎星, 陈倩倩. 集对分析法在巢湖水质富营养化时空变化中的应用[J]. *黑龙江工业学院学报*, 2018, 18(8): 153 – 156.
- BU S, ZHOU R X, CHEN Q Q. Application of set pair analysis in the time and space change of water eutrophication in the Chaohu Lake[J]. *Journal of Heilongjiang University of Technology*, 2018, 18(8): 153 – 156. (in Chinese)
- [30] HEDGES L V, GUREVITCH J, CURTIS P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. *Ecology*, 1999, 80(4): 1150 – 1156.
- [31] 张彦军, 党水纳, 任媛媛, 等. 基于 Meta 分析的土壤呼吸对凋落物输入的响应[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(3): 447 – 456.
- ZHANG Y J, DANG S N, REN Y Y, et al. Response of soil respiration to surface litter input based on a meta-analysis [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(3): 447 – 456. (in Chinese)
- [32] 张宁红, 黎刚, 郁建桥, 等. 太湖蓝藻水华暴发主要特征初析[J]. *中国环境监测*, 2009, 25(1): 71 – 74.
- ZHANG N H, LI G, YU J Q, et al. Character of blue-green algal blooms outbreak in Taihu Lake[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2009, 25(1): 71 – 74. (in Chinese)
- [33] 俞焰, 刘德富, 杨正健, 等. 千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2017, 38(4): 1393 – 1402.
- YU Y, LIU D F, ZHANG Z J, et al. Vertical stratification characteristics of dissolved oxygen and phytoplankton in Thousand-island Lake and their influencing factors [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(4): 1393 – 1402. (in Chinese)
- [34] 王锦旗, 宋玉芝, 黄进. 水温升高对水体性质及水生生物的影响研究进展[J]. *水生态学杂志*, 2020, 41(1): 100 – 109.
- WANG J Q, SONG Y Z, HUANG J. Effects of increasing water temperature on water properties and aquatic organisms: a critical review [J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, 41(1): 100 – 109. (in Chinese)
- [35] 苏洁琼, 王烜, 杨志峰. 考虑气候因子变化的湖泊富营养化模型研究进展[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(11): 3197 – 3206.
- SU J Q, WANG X, YANG Z F. Lake eutrophication modeling in considering climatic factors change: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(11): 3197 – 3206. (in Chinese)
- [36] CHANG N N, LUO L, WANG X C C, et al. A novel index for assessing the water quality of urban landscape lakes based on water transparency[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 735: 139351.
- [37] BRUNE D E, SCHWARTZ G, EVERSOLE A G, et al. Intensification of pond aquaculture and high rate photosynthetic systems[J]. *Aquacultural Engineering*, 2003, 28(1–2): 65 – 86.
- [38] LI B, YANG G S, WAN R R. Multidecadal water quality deterioration in the largest freshwater lake in China (Poyang Lake): implications on eutrophication management [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 260: 114033.
- [39] LI Y, CHEN F Z. Are zooplankton useful indicators of water quality in subtropical lakes with high human impacts? [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 113: 106167.
- [40] 韩志萍, 邵朝纲, 杨志红, 等. 南太湖入湖口蓝藻生物量与 COD_{mn} 和 DO 的相关性研究[J]. *海洋与湖沼*, 2013, 44(2): 277 – 282.
- HAN Z P, SHAO C G, YANG Z H, et al. Correlations between blue algae biomass and COD_{mn}/DO levels in different inlet areas of south Taihu Lake[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2013, 44(2): 277 – 282. (in Chinese)
- [41] 王之明, 王堃, 刘绥华, 等. 草海丰水期 chl-a 空间分布与环境因子相关关系[J]. *人民长江*, 2018, 49(14): 34 – 39.
- WANG Z M, WANG K, LIU S H, et al. Correlation between chlorophyll a and environmental factors during wet season of Caohai Lake in Guizhou Province[J]. *Yangtze River*, 2018, 49(14): 34 – 39. (in Chinese)
- [42] 洪金淑. 云南省九大高原湖泊水体叶绿素 a 与环境因子的相关分析[J]. *人民珠江*, 2018, 39(6): 47 – 49.
- HONG J S. Correlation analysis on the chlorophyll a content with environment in nine plateau lakes of Yunnan Province[J]. *Pearl River*, 2018, 39(6): 47 – 49. (in Chinese)
- [43] AUBRIOT L, ZABALETA B, BORDET F, et al. Assessing the origin of a massive cyanobacterial bloom in the Río de la Plata (2019): towards an early warning system [J]. *Water Research*, 2020, 181: 115944.

The potential impact of phosphorus concentration in typical lakes in China on water body indicators and cyanobacteria bloom trends based on meta-analysis

WANG JinHang¹ LI JingLin² JIANG DeShuang¹ WU HuiHui¹ WANG ShuGuang¹
LIN AiJun^{1*}

(1. Beijing Center for Pollution Control and Resource Recovery, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. Beijing Sustainable Development Center, Beijing 100035, China)

Abstract: Eutrophication of water bodies can cause cyanobacteria bloom, which does serious harm to the aquatic ecological environment and the safety of drinking water. Understanding the underlying occurrence mechanism and the factors affecting the variation in cyanobacteria bloom is the basis of prevention and control. Based on relevant studies published from 1989 to 2019, 583 pairs of effective data were extracted and meta-analysis was used to study the effects of phosphorus concentration on water indexes and the outbreak trend of cyanobacteria blooms in typical lakes in China. The results showed that phosphorus concentrations had a negative effect on water transparency (SD) and a positive effect on dissolved oxygen (DO) content, permanganate index (COD_{Mn}) and chlorophyll a (Chla) content. With a further increase in phosphorus concentration, the above four indexes showed different trends. The positive effect of phosphorus concentration on DO content gradually changed into negative effect, and the negative effect was the greatest when the phosphorus concentration was 0.2–0.3 mg/L (subtropical monsoon climate). The negative effect on SD increased at first and then decreased slightly with increasing phosphorus concentration, and the negative effect reached a maximum when the phosphorus concentration was 0.1–0.2 mg/L. The response trends of COD_{Mn} and Chla content to increasing phosphorus concentration were similar, and under subtropical monsoon climate, the positive effects of phosphorus concentration reached their maximum when the phosphorus concentration were 0.2–0.3 mg/L and >0.3 mg/L respectively. In addition, compared with the temperate monsoon climate, the lake water quality in a subtropical monsoon climate is more seriously affected by phosphorus concentration when phosphorus concentration was 0–0.1 mg/L, and the risk of cyanobacteria bloom outbreak is higher.

Key words: lake eutrophication; total phosphorus; cyanobacteria bloom; meta-analysis

(责任编辑: 于少云)