

太湖、巢湖、滇池水华与相关气象、水质因子及其响应的比较(1981—2015年)*

王菁晗^{1,2}, 何吕奇姝^{2,3}, 杨成^{2,3}, 刀国华², 杜劲松⁴, 韩亚平⁴, 吴光学³, 吴乾元³, 胡洪营^{2,5**}

(1: 大连理工大学生命科学与技术学院, 大连 116023)

(2: 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 国家环境保护环境微生物利用与安全控制重点实验室, 北京 100084)

(3: 清华大学深圳研究生院, 深圳市环境微生物利用与安全控制重点实验室, 深圳 518055)

(4: 昆明市滇池生态研究所, 昆明 650228)

(5: 清华-伯克利深圳学院, 环境与新能源技术工程实验室, 深圳 518055)

摘要: 比较了太湖、巢湖、滇池(“三湖”) 1981—2010年间的气象要素, 1987—2015年间的水质要素, 2000—2013年间的年内水华起始日期与持续时间, 以及与水华相关的已有研究情况。其中, 气象要素包括气温、日温差、风速、风向、气压、降水、相对湿度等; 水质要素包括水温、总氮浓度、总磷浓度、水体综合营养指数等。对比结果表明, 云贵高原湖泊滇池因其冬、春季节气温较高且日温差较大等气象特征, 以及总磷浓度较高等水质特征, 相比于东部平原湖泊太湖、巢湖而言更易发生水华, 且在“三湖”中水华年内起始日期最早, 持续时间最长。然而, 目前有关滇池水华的研究相对于“三湖”中的太湖却远远不足。鉴于滇池所处湖区的独特气象、水质特征, 平原水华湖泊的研究结果难以有针对性地指导其水华控制, 亟需提高滇池水华研究的系统性与深度。只有因地制宜, 方有希望逐步有效控制、减轻、乃至消除滇池水华。

关键词: 水华; 蓝藻; 气象; 水质; 滇池; 太湖; 巢湖

Comparison of algal bloom related meteorological and water quality factors and algal bloom conditions among Lakes Taihu, Chaohu, and Dianchi (1981–2015)

WANG Jinghan^{1,2}, HE Lvqishu^{2,3}, YANG Cheng^{2,3}, DAO Guohua², DU Jingsong⁴, HAN Yaping⁴, WU Guangxue³, WU Qianyu³ & HU Hongying^{2,5**}

(1: *School of Life Science and Biotechnology, Dalian University of Technology, Dalian 116023, P.R.China*)

(2: *Environmental Simulation and Pollution Control State Key Joint Laboratory, State Environmental Protection Key Laboratory of Microorganism Application and Risk Control (SMARC), School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, P.R.China*)

(3: *Shenzhen Laboratory of Microorganism Application and Risk Control, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, P.R.China*)

(4: *Kunming Dianchi Ecological Research Institute, Kunming 650228, P.R.China*)

(5: *Shenzhen Environmental Science and New Energy Technology Engineering Laboratory, Tsinghua-Berkeley Shenzhen Institute, Shenzhen 518055, P.R.China*)

Abstract: Meteorological factors (from 1981 to 2010), water quality parameters (from 1987 to 2015), yearly initial date and duration of algal bloom (from 2000 to 2013), and research situation on algal bloom among the most eutrophic large lakes in China, including Lakes Dianchi, Taihu, and Chaohu, were compared in this paper. For meteorological factors, we included air temperature, diurnal air temperature difference, wind velocity, wind direction, atmospheric pressure, precipitation, and relative humidity.

* 国家自然科学基金创新研究群体项目(21521064)和中国博士后科学基金项目(2016M591188)联合资助。2017-07-28 收稿; 2017-11-17 收修改稿。王菁晗(1987~), 女, 博士; E-mail: wjhbsz@126.com.

** 通信作者; E-mail: hyhu@tsinghua.edu.cn.

For water quality parameters, we focused on water temperature, total nitrogen concentration, total phosphorus concentration, and trophic status index. Results indicated that, Lake Dianchi in Yunnan-Guizhou Plateau has higher liability of algal bloom than that in Lakes Taihu and Chaohu, because of its meteorological characteristics including but not limited to warmer winter and spring, and larger diurnal air temperature differences during these seasons, and its water quality characteristics involving higher total phosphorous concentration. Earlier initial date of algal bloom and longer duration than the other two lakes from 2000 to 2013 proved the higher severity of algal bloom in Lake Dianchi and implied its requirement for more research attention. Investigation results on existing research situations concerning algal bloom issues among Lakes Dianchi, Taihu, and Chaohu, on the other hand, are quite disappointing. Publications on algal bloom in Lake Dianchi are much fewer than those targeted at Lake Taihu. Taking into consideration the unique meteorological and water quality characteristics of the plateau-located lake, research experience gained from flatland-located lakes cannot be applied for effective algal bloom control in Lake Dianchi, therefore, more comprehensive and in-depth research on algal bloom regarding this specific lake is required from now on, in order to truly stepwise realize the control, alleviation, and hopefully final elimination of algal bloom in Lake Dianchi.

Keywords: Algal bloom; cyanobacteria; meteorological factors; water quality; Lake Dianchi; Lake Taihu; Lake Chaohu

由于水体富营养化加剧、水华频发,流域社会经济发展和人民生活质量面临严峻考验.自“九五”(1996—2000年)起,太湖、巢湖和滇池作为“三湖”即被列为我国重点治理范围,始终受到中央、省、市等各级政府的高度重视^[1-2].经过30余年的努力,先后开展了工业点源控制、城镇点源控制、农村面源控制、陆地生态修复、湖滨区生态修复、湖内生态修复、加强管理机构与机制建设等系列措施^[1]，“三湖”水质皆有所改善,富营养化程度较历史峰值均有一定降低,然而以蓝藻为优势类群的水华现象却依然时有发生^[3-5].

“三湖”均系浅水湖泊,对气象变化响应较为强烈,除水质条件外,气象要素对水华的影响也不容忽视^[6-9].“三湖”中,滇池位于云贵高原,与位于东部平原的太湖、巢湖在气象特征上有诸多明显差异,这些差异与滇池的水质特征共同造成了其水华难易及严重程度与太湖、巢湖的显著区别.已有研究表明,滇池蓝藻生物量常年高于太湖、巢湖,且复苏期、衰退期更短,而暴发期更长;影响并导致“三湖”蓝藻水华生消差异的因子主要为温度和氮磷营养盐等^[10].在现有研究基础上,本文拟选择气温、降水、风速、风向、气压和相对湿度等为气象要素,水温、总氮、总磷和综合营养指数为水质要素,年内水华起始日期与持续时长为水华程度参数,综合比较1981—2015年间“三湖”气象要素、水质要素和水华程度的差异,以及水华问题受学界关注的情况,以期为今后“三湖”水华研究与治理决策提供更有指向性和针对性的思路.

1 “三湖”基本概况及气象、水质、水华数据来源

1.1 “三湖”基本概况

太湖、巢湖和滇池的基本概况对比见表1.

1.2 “三湖”气象、水质、水华数据来源

“三湖”气象、水质要素及水华程度比较所涉及的具体指标、数据形式和数据来源等见表2.其中,太湖、巢湖和滇池的气象数据分别来自中国气象数据网上编号58358、58326和56778的东山、巢湖、昆明气象站.本文利用Microsoft Excel 2016、OriginPro 9.1 for Windows进行数据整理、统计分析和制图.

2 “三湖”的气象要素对比

本文选取了“三湖”的平均气温、平均最大气温差、平均降水量、平均最大降水量差、平均风速、最多风向及其频率、气压、相对湿度作为气象要素进行对比(图1).

由于所处地理位置接近(东山气象站位于31°2′24″N, 120°15′36″E, 海拔21.0 m;巢湖气象站位于31°21′N, 117°30′E, 海拔31.9 m),太湖、巢湖各月平均气温十分相近,而位于低纬度高海拔的滇池(昆明气象站位于25°N, 102°23′24″E, 海拔1889.1 m)则体现出“冬无严寒,夏无酷暑”的特点,冬季平均气温较2个东部平原湖泊高5℃左右,全年平均气温在9~20℃之间.夏、秋季节“三湖”平均最大气温差相近,冬、春季节滇池的平均最大气温差显著高于太湖和巢湖.

表 1 “三湖”基本概况*
Tab.1 Basic profiles of Lakes Dianchi, Taihu and Chaohu

	太湖	巢湖	滇池
地理位置	东部平原区	东部平原区	云贵高原区
湖泊范围	江苏省、浙江省	合肥市	昆明市
湖泊面积/km ²	2340	765	11（草海），299（外海）
蓄水量/m ³	4.75×10 ⁹	1.8×10 ⁹	1.56×10 ⁹
平均水深/m	1.9	2.4	2.5（草海），5.0（外海）
平均水位高程/m	3.11	8.00	1887.40
平均换水周期	约 300 天	约 170 天	约 4 年
水源地情况	饮用水水源地	备用饮用水水源地	备用饮用水水源地
流域范围	上海市、江苏省、浙江省和安徽省	安徽省	云南省
流域面积/km ²	3.69×10 ⁴	1.35×10 ⁴	0.29×10 ⁴
流域人口/万人	6028	1030	430
流域人口密度/（人/km ² ）	1633	763	1482
流域人均 GDP/（万元/人）	12.1	3.9	4.7

* 滇池以海埂大坝为分界，北侧为草海，南侧为外海；湖区信息，来源于文献[11]；滇池草海、外海面积与水深信息，来源于文献[2]；湖泊换水周期信息，来源于文献[2,12-13]；太湖水位高程为吴淞基面高程，巢湖、滇池水位高程为黄海高程；太湖流域社会经济信息来源于“2016 年度太湖流域及东南诸河水资源公报”；其余信息来源于文献[14]，巢湖流域、滇池流域人口及人均 GDP 统计年份为 2011 年。

表 2 “三湖”的气象、水质、水华数据来源
Tab.2 Data sources of meteorological and water quality factors, and algal bloom conditions
in Lakes Dianchi, Taihu and Chaohu

类别	指标	数据形式	适用湖泊	时间跨度	数据来源
气象数据	平均气温	累年月值	“三湖”	1981—2010 年	中国气象数据网
	平均最高气温	累年月值	“三湖”	1981—2010 年	中国气象数据网
	平均最低气温	累年月值	“三湖”	1981—2010 年	中国气象数据网
	20—20 时平均降水量	累年月值	“三湖”	1981—2010 年	中国气象数据网
	最多降水量	累年月值	“三湖”	1981—2010 年	中国气象数据网
	最少降水量	累年月值	“三湖”	1981—2010 年	中国气象数据网
	平均风速	累年月值	“三湖”	1981—2010 年	中国气象数据网
	最多风向（含静风）	累年月值	“三湖”	1981—2010 年	中国气象数据网
	最多风向频率（含静风）	累年月值	“三湖”	1981—2010 年	中国气象数据网
	平均站点气压	累年月值	“三湖”	1981—2010 年	中国气象数据网
水质数据	平均相对湿度	累年月值	“三湖”	1981—2010 年	中国气象数据网
	水温	月均值	滇池	2005—2006 年	昆明市滇池生态研究所
	水温	月均值	太湖	2005—2006 年	文献[15]
	总氮浓度	年均值	滇池	1990—2015 年	昆明市滇池生态研究所
	总氮浓度	年均值	太湖	1987—2015 年	文献[16]
	总氮浓度	年均值	巢湖	1987—2014 年	中国、安徽省环境状况公报,文献[12]
	总磷浓度	年均值	滇池	1990—2015 年	昆明市滇池生态研究所
	总磷浓度	年均值	太湖	1987—2015 年	文献[16]
	总磷浓度	年均值	巢湖	1987—2014 年	中国、安徽省环境状况公报,文献[12]
	综合营养指数	年均值	“三湖”	2001—2015 年	中国及对应各省环境状况公报
水华数据	水华起始日期	年值	滇池	2000—2013 年	文献[5]
	水华起始日期	年值	太湖	2001—2013 年	文献[4]
	水华起始日期	年值	巢湖	2000—2013 年	文献[3]
	水华持续时间	年值	滇池	2000—2013 年	文献[5]
	水华持续时间	年值	太湖	2001—2013 年	文献[4]
	水华持续时间	年值	巢湖	2000—2013 年	文献[3]

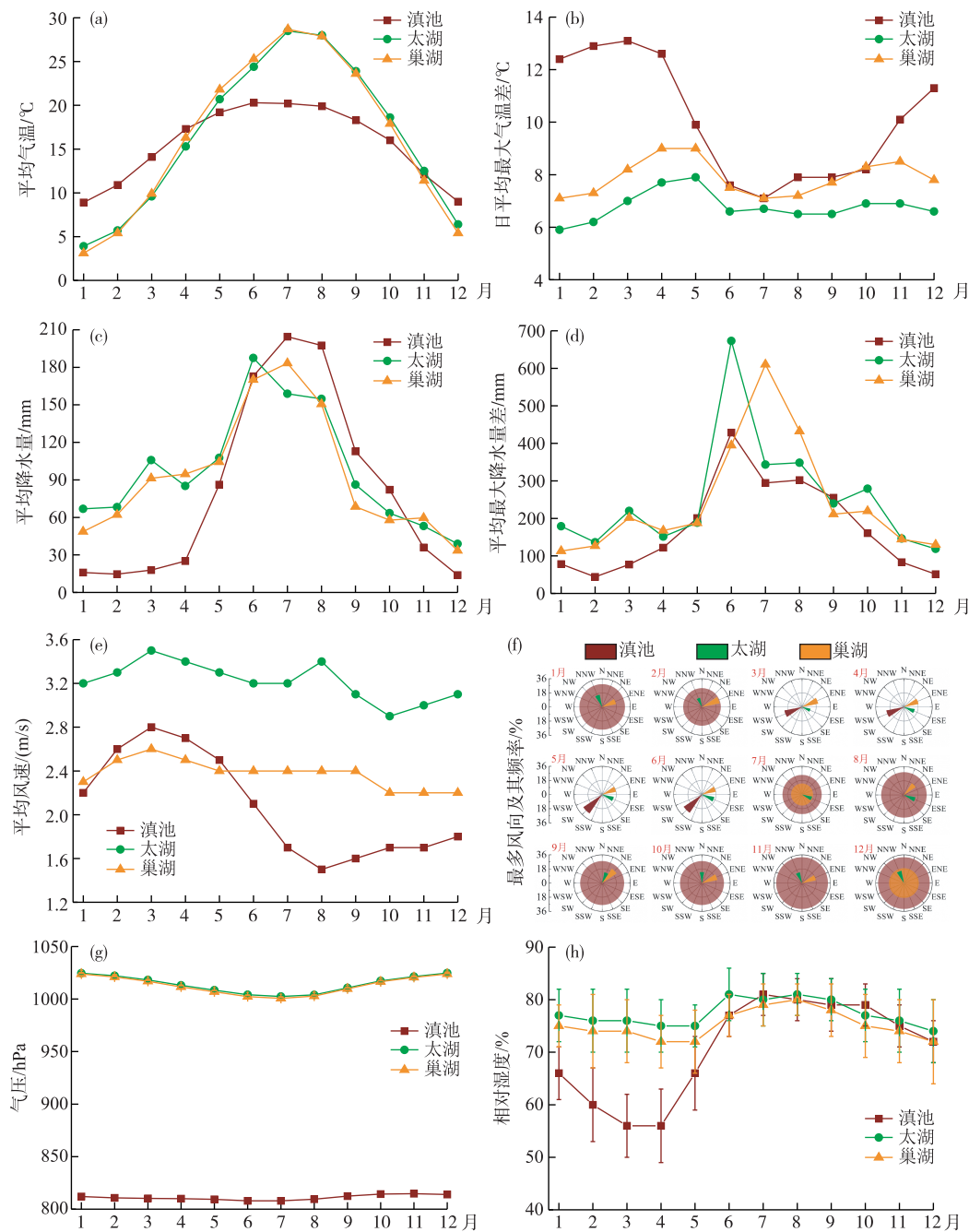


图 1 1981—2010 年间“三湖”的气象要素对比

Fig.1 Comparison of meteorological factors among Lakes Dianchi, Taihu and Chaohu from 1981 to 2010

已有研究表明,气温对于表层水华暴发动力学有重要影响^[3]. 通常情况下,浅水湖泊平均水温与平均气温吻合度好,温度升高有利于越冬藻类复苏与大量生长,气囊增多并改变浮力,使藻类上浮聚集至表层水体形成水华^[7],且较高温度有利于加快水柱、沉积物中有机物向无机营养元素的转化,为水华藻类的持续快速生长提供物质基础^[17]. “三湖”中,滇池所在地区较高的冬季平均气温与冬、春季季节平均最大温差,为水体中

日间藻类生长提供了更适宜的条件,相对两个平原湖泊而言更易于发生水华。

“三湖”中,滇池的全年平均降水量在夏、秋季节分布较太湖、巢湖更为集中,且由暴雨或干旱造成的平均最大降水量差全年低于2个平原湖泊。降水可通过改变流域径流量而影响湖泊水位及入湖物质负荷,进而影响湖内的化学和生物过程^[8]。滇池流域夏、秋季节的集中降水将流域内大量非点源污染物尤其是氮、磷等营养元素带入湖泊,而相对太湖、巢湖,滇池较弱的暴雨强度又使得入湖污染物稀释度较低,从而有助于维持湖内营养元素浓度在相对较高水平,更利于水华微藻生长。

“三湖”的平均风速全年均低于4 m/s,其中太湖平均风速最高(3.2 m/s);滇池平均风速最低(2.1 m/s),夏、秋季节各月平均风速低于2 m/s。风速可通过改变湖泊内部垂向扰动和物质通量而影响湖内化学和生物过程^[8]。已有研究表明,风速超过4 m/s时,浅水湖泊可获得充分湍流混合,蓝藻的竖向上浮迁移受到有效抑制^[18];风速低于3 m/s时,受上浮特性影响,蓝藻主要在湖面至0.3 m深的湖水中聚集^[6]。滇池流域夏、秋季节更低的风速更有利于蓝藻在表层水体中聚集,而此期间主导的西南风向促使水华主要集中在外海北部离岸100~1000 m的浮藻堆积区^[17]。

由于地处云贵高原,滇池流域的大气压力显著低于太湖和巢湖。有关大气压力对湖泊水华的直接影响目前尚无报道,这方面有待日后开展深入研究。滇池流域冬春季节的相对湿度显著低于太湖和巢湖。相对湿度与湖泊水华的关系目前在学术界尚未形成统一观点,即使针对同一湖泊(太湖),也存在相对湿度与湖泊水华分别呈正相关、负相关和不相关的报道^[19-21],且上述结论均为通过统计数据分析直接得出,并无深入的原因讨论。有关相对湿度与水华的相关性,也有待开展后续研究予以证实。

综合图1中的各气象要素可知,冬春季节较高的平均气温及日平均最大气温差、夏秋季节的集中降水及相对较弱的暴雨强度、夏秋季节较低的风速,皆使得滇池相对于太湖、巢湖2个平原湖泊更易发生水华。

3 “三湖”的水质要素对比

本文选取了水温、总氮、总磷和综合营养指数作为水质要素在“三湖”间开展比较(图2)。累年各月平均水温的变化趋势与图1中气温的变化趋势一致,滇池冬季平均水温在10℃以上,有利于水华微藻的越冬生长^[4,22-23],相对于两个平原湖泊而言更易形成水华。

1987—2015年间,“三湖”的营养盐浓度皆经历了先升高后降低的变化趋势,其中,除近5年的总磷浓度外,滇池草海的营养盐浓度始终为太湖、巢湖和滇池外海的数倍。对于总氮浓度而言,2000年前“三湖”中仅滇池外海尚能大体满足我国《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅴ类水的要求,2000年后则所有水体水质均不能稳定满足Ⅴ类水水质要求。近10年来,太湖总氮浓度稳步降低,滇池外海总氮浓度波动下降,巢湖总氮浓度则在Ⅴ类水标准限值上下波动,但总体而言巢湖水质优于滇池外海,滇池外海水质优于太湖。

对于总磷浓度而言,2001年后,太湖、巢湖和滇池外海总磷浓度均波动下降,其中太湖总体可满足Ⅳ类水水质要求,巢湖、滇池外海则总体可满足Ⅴ类水水质要求。有研究认为,营养盐充足时($TN \geq 0.80 \text{ mg/L}$, $TP \geq 0.20 \text{ mg/L}$),优势水华微藻的生长并不受限于水体中营养盐浓度^[24]。结合图2b、c可知,“三湖”均氮营养充足,滇池草海近二十余年来磷营养盐总体始终高于0.20 mg/L,不构成微藻生长的营养盐限制;2009年起,“三湖”总磷浓度的高低顺序为滇池草海>滇池外海>巢湖>太湖,滇池中更充足的总磷为水华微藻生长提供了更优越的条件,而滇池周围存在的磷矿区,又使得土壤中的磷能够通过冲刷和淋溶等作用不断进入水体,湖内总磷浓度难以降至周边无磷矿区的太湖中的总磷水平(巢湖周边也存在磷矿区)^[25-26];入湖总磷部分在湖底沉积,并可作为内源磷在较长时间内不断释放,保持湖水中能被水华微藻利用的生物有效磷浓度始终处于较高水平,更易于发生水华^[27]。此外,李根保等^[17]的研究表明,滇池叶绿素a浓度对总磷浓度的响应,约为巢湖的2倍、太湖的4倍,即滇池中水华微藻利用单位浓度总磷增长的生物量显著更高。“高浓度+高响应”的叠加效应,使得滇池在“三湖”中更易形成水华。

综合营养状态指数(TLI)是我国评价水体富营养化程度的主要指标,是综合考虑水体中叶绿素a、总氮、总磷、 COD_{Mn} 和水体透明度等获得的水体营养状态。滇池草海、太湖和巢湖的TLI 2001—2015年间呈波动降低趋势,滇池外海的TLI则于2001—2006年间波动升高,2006—2015年间呈波动降低趋势(图2d)。自2009年起,太湖、巢湖的营养水平相近,始终处于轻度富营养状态;自2007年起,滇池外海稳定处于中度富营养

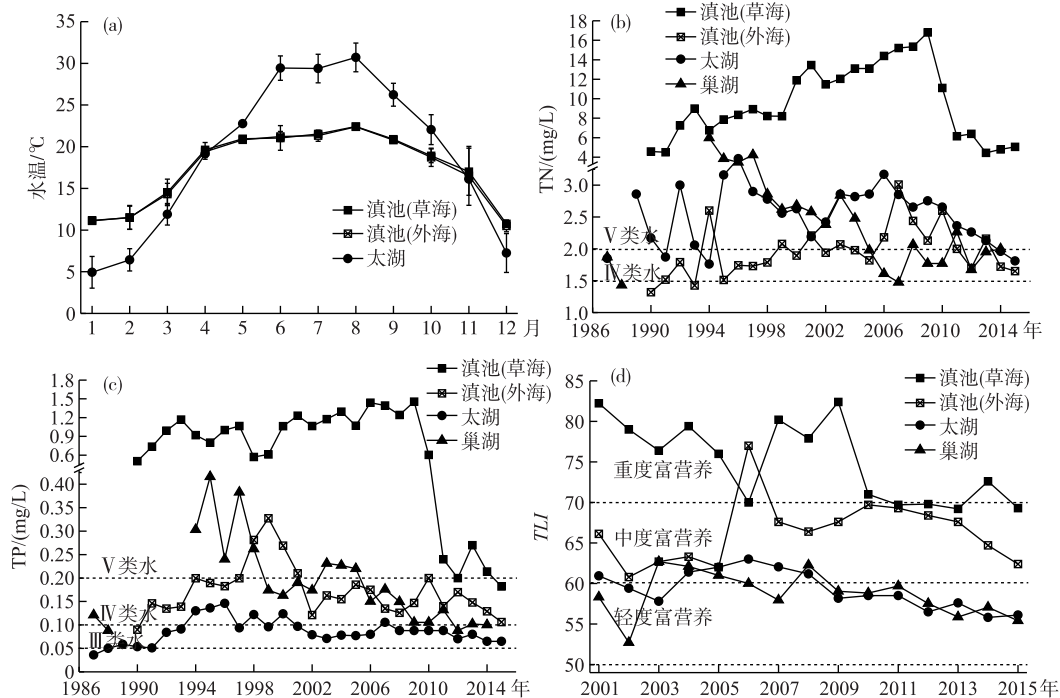


图2 “三湖”的水质要素对比: (a) 水温(2005—2006年); (b) 总氮浓度(1987—2015年);
(c) 总磷浓度(1987—2015年); (d) 综合营养指数(2001—2015年)

Fig.2 Comparison of water quality factors among Lakes Dianchi, Taihu and Chaohu;

(a) water temperature (2005–2006); (b) total nitrogen concentration (1987–2015);

(c) total phosphorus concentration (1987–2015); (d) trophic level index value (2001–2015)

状态;滇池草海则依然高居重度富营养状态。通常情况下,种植水生植物,尤其是沉水植物,有助于降低水体富营养化程度从而减轻水华^[1];然而,当水体透明度低于沉水植物的光补偿深度时,通过种植水生植物来削弱水华的措施便难以开展。已有研究表明^[28],在实际水深约2 m的水域(太湖、巢湖和滇池草海符合此情形)形成稀疏沉水植物种群,水体透明度需 ≥ 67 cm;形成具有一定生物量的沉水植物群落,水体透明度需 ≥ 79 cm;在平均水深约5 m的水域(滇池外海符合此情形)恢复稀疏沉水植物种群,水体透明度需 ≥ 158 cm;恢复至有一定生物量的沉水植物群落,水体透明度需 ≥ 187 cm。鉴于目前“三湖”的年均水体透明度约为40~50 cm^[29-30](昆明市滇池生态研究所监测数据),且滇池外海北部为水华集中区域,可知“三湖”中的滇池通过恢复沉水植被群落减轻水体富营养化程度、控制水华的难度更大,任务更为艰巨。

4 “三湖”的水华程度对比

“三湖”的水华起始日期与持续时间是水华严重程度的直观体现(图3),二者通常由MODIS遥感影像分析确定^[3-4],并定义水华起始日期为出现水华的影像面积首次超过25%总影像面积的日期,以儒略日表示;定义水华持续时间为首次与末次出现水华的影像面积超过25%总影像面积的日期间隔。如统计年份水华持续至次年年初,则该年的水华持续时间为年内水华的儒略日数加上次年年初水华消失时的儒略日数,而次年的水华起始日期为与前一年连续的水华结束之后,首次发生水华的日期,并用儒略日表示(例如:2000年3月21日滇池水华起始,持续至2001年1月9日水华消失,之后再次出现水华的起始日期为2001年3月29日,则2000年的水华持续时间为 $366-80+9=295$ d;2001年水华的起始日期为2001年3月29日,用儒略日表示为88)。

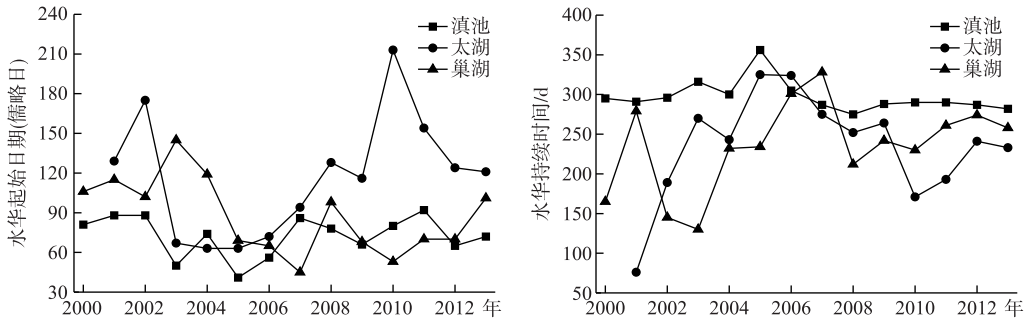


图3 2000—2013年间“三湖”的水华起始日期与持续时间对比
Fig.3 Comparison of the initial date and duration of algal bloom among
Lakes Dianchi, Taihu and Chaohu from 2000 to 2013

由图知,太湖的水华起始日期自2003年起较往年有大幅提前(约2~3个月),2008年后又推迟至历史平均水平;巢湖的水华起始日期自2005年较往年出现大幅提前(约1~2个月)后,近年来保持小幅波动;滇池的水华起始日期于2000—2013年间保持小幅波动。2006年前,“三湖”中滇池水华起始日期最早;2006年后,“三湖”中滇池与巢湖水华起始日期相近,且显著早于太湖。有关“三湖”水华起始日期的研究一致认为,平均气温对水华起始日期有显著影响,平均气温越高,则水华起始日期越早^[3-5];这与图1a通过“三湖”平均气温对比,推测滇池因冬春季节气温较高而更易发生水华的情形相符。

“三湖”中,太湖的水华持续时间波动最大,自2005年达到峰值后呈逐年缩短趋势,2010年后平均水华持续时间约每年210 d;巢湖的水华持续时间变化范围相对于太湖较小,自2007年达到峰值后,近年来在每年245 d上下波动;滇池的水华持续时间除2005年长达356 d外,其余年份均在290 d上下波动,“三湖”中滇池每年的水华持续时间显著长于2个平原湖泊。已有研究表明,气温对水华持续时间的的影响最显著,最低气温距平越大、最高气温距平越小,水华持续时间越长^[3];这与图1b通过平均最高气温差对比,推测滇池因冬春季节(一年中最低气温出现的时段)最大平均气温差显著高于太湖、巢湖而更易发生水华的情形相符。另有研究认为,营养盐浓度与水华持续时间呈正相关^[4];鉴于“三湖”的总氮浓度均远高于使水华微藻生长受限的浓度(0.8 mg/L)^[24],总磷为影响水华的主要营养盐,而滇池中总磷浓度高于太湖、巢湖的情形,也与“三湖”中滇池的水华持续时间最长相一致。

5 有关“三湖”水华的已有研究情况对比

由上述分析知,滇池在“三湖”中水华严重程度最高,且其所在区域的气象、水质特征较太湖、巢湖而言,均对水华发生更有利。藉此,笔者认为,滇池这一高原水华湖泊,理应受到至少与平原水华湖泊等同的关注。然而,有关“三湖”水华文章数量的调查却表明,实际情况远非如此(图4)。有关滇池水华的文章,不仅在总数上远少于研究平原湖泊水华的文章,且在2005年后,有关太湖、巢湖水华的文章数量均有大幅增加的情况下,与滇池水华相关的文章数量却依然增长缓慢。尽管文章数量并不能与研究工作的多少直接等同,但相比于项目报告和工作报告等内部资料,研究论文的确是从事湖泊水华研究人员最便于获取的公开科学素材,且在很大程度上能够反映湖泊被研究及关注的情况。“三湖”中,太湖、巢湖同处东部平原湖区,气象条件如气温、降水、气压和相对湿度等,均十分接近,蓝藻水华生活史及演替特征也有较高的可比性^[30],因此有关太湖水华的研究结果对巢湖可以有较好的相互借鉴性;而滇池由于云贵高原湖区的独特气象、水质要素特征,以及相对于太湖、巢湖差异较大的蓝藻群落结构及水华消长规律^[31],使其应对水华的措施无法套用平原湖泊的研究成果,唯有因地制宜开展深入研究,才能真正意义上逐步、有效减弱水华的发生程度,乃至最终消除水华。

6 结论

通过比较“三湖”近30 a的气象要素、水质要素,以及近15 a的水华程度,可知滇池在“三湖”中水华最

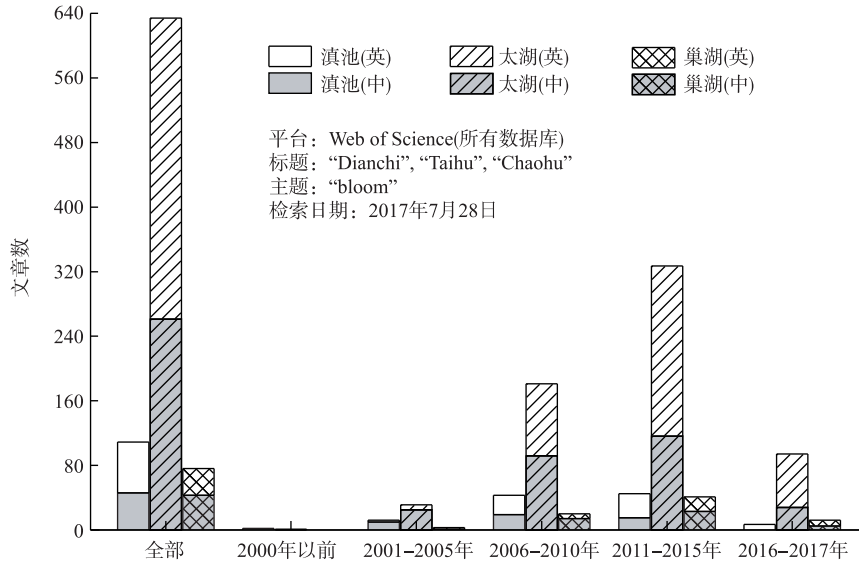


图4 有关“三湖”水华的文章数量对比

Fig.4 Comparison of publications on algal bloom among Lakes Dianchi, Taihu and Chaohu

为严重;而其独有的气象条件,又使滇池在“三湖”中最易发生水华;考虑到湖泊本底营养物质浓度高、富营养化严重,滇池在“三湖”中水华治理的高难度不言而喻。然而,这一高原水华湖泊所受到的关注和研究程度却远不及位于东部平原湖区的水华湖泊(太湖)。今后的研究中,需要增强对滇池水华研究的力度和深度,以期控制、治理和消除滇池水华提供切实有效的措施和依据。

致谢:衷心感谢昆明市滇池生态研究所在滇池水质数据资料收集方面给予的大力帮助!

7 参考文献

- [1] Jin XC ed. Theories, methods, and practises of lake eutrophication control. Beijing: Science Press, 2013. [金相灿. 湖泊富营养化控制理论、方法与实践. 北京: 科学出版社, 2013.]
- [2] He J, Xu XM, Yang Y *et al.* Problems and effects of comprehensive management of water environment in Lake Dianchi. *J Lake Sci*, 2015, **27**(2): 195-199. DOI:10.18307/2015.0201. [何佳, 徐晓梅, 杨艳等. 滇池水环境综合治理成效与存在问题. 湖泊科学, 2015, **27**(2): 195-199.]
- [3] Zhang YC, Ma RH, Zhang M *et al.* Fourteen-year record (2000-2013) of the spatial and temporal dynamics of floating algae blooms in Lake Chaohu, observed from time series of MODIS images. *Remote Sens*, 2015, **7**(8): 10523-10542.
- [4] Zhang YC, Ma RH, Duan HT *et al.* Satellite analysis to identify changes and drivers of CyanoHABs dynamics in Lake Taihu. *Water Sci Technol-Water Supply*, 2016, **16**(5): 1451-1466.
- [5] Jiang DL. Research on temporal and spatial variation of algae blooms and its driving factors in Lake Dianchi based on GIS/RS [Dissertation]. Chongqing: Southwest University, 2015. [蒋大林. 基于 GIS/RS 的滇池藻类水华时空变化及驱动因子分析[学位论文]. 重庆: 西南大学, 2015.]
- [6] Zhang M, Kong FX, Wu XD *et al.* Different photochemical responses of phytoplankters from the large shallow Taihu Lake of subtropical China in relation to light and mixing. *Hydrobiologia*, 2008, **603**(1): 267-278.
- [7] Kong FX, Gao G. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **2**(3): 589-595. [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. 生态学报, 2005, **2**(3): 589-595.]
- [8] Zhang C, Lai SY, Gao XP *et al.* A review of the potential impacts of climate change on water environment in lakes and reservoirs. *J Lake Sci*, 2016, **28**(4): 691-700. DOI:10.18307/2016.0401. [张晨, 来世玉, 高学平等. 气候变化对湖库水环境的潜在影响研究进展. 湖泊科学, 2016, **28**(4): 691-700.]

- [9] Qin BQ. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangze River. *J Lake Sci*, 2002, **14**(3): 192-202. DOI:10.18307/2002.0301. [秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探. 湖泊科学, 2002, **14**(3): 192-202.]
- [10] Kong FX, Song LR. Study on the formation and environmental characteristics of cyanobacterial bloom. Beijing: Science Press, 2011. [孔繁翔, 宋立荣. 蓝藻水华形成过程及其环境特征研究. 北京: 科学出版社, 2011.]
- [11] Rao EM, Xiao Y, Ouyang ZY *et al.* Status and dynamics of China's lake water regulation. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(21): 6225-6231. [饶恩明, 肖焱, 欧阳志云等. 中国湖泊水量调节能力及其动态变化. 生态学报, 2014, **34**(21): 6225-6231.]
- [12] Zhang M, Kong FX. The process, spatial and temporal distributions and mitigation strategies of the eutrophication of Lake Chaohu (1984-2013). *J Lake Sci*, 2015, **27**(5): 791-798. DOI:10.18307/2015.0505. [张民, 孔繁翔. 巢湖富营养化的历程、空间分布与治理策略(1984—2013年). 湖泊科学, 2015, **27**(5): 791-798.]
- [13] Qin BQ, Luo LC. Changes in eco-environment and causes for lake Taihu, China. *Quat Sci*, 2004, **24**(5): 561-568. [秦伯强, 罗激葱. 太湖生态环境演化及其原因分析. 第四纪研究, 2004, **24**(5): 561-568.]
- [14] Zhu X, Hu MM eds. Treatment and prevention of cyanobacterial bloom outbreaks in freshwater lakes of China. Beijing: China Water Power Press, 2014. [朱喜, 胡明明. 中国淡水湖泊蓝藻暴发治理与预防. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.]
- [15] Chen Q, Han HJ, Qu SJ *et al.* Influence of solar radiation and water temperature on chlorophyll-a levels in Lake Taihu, China. *Acta Sci Circum*, 2009, **29**(1): 199-206. [陈桥, 韩红娟, 翟水晶等. 太湖地区太阳辐射与水温的变化特征及其对叶绿素 a 的影响. 环境科学学报, 2009, **29**(1): 199-206.]
- [16] Dai XL, Qian PQ, Ye L *et al.* Changes in nitrogen and phosphorus concentrations in Lake Taihu, 1985-2015. *J Lake Sci*, 2016, **28**(5): 935-943. DOI:10.18307/2016.0502. [戴秀丽, 钱佩琪, 叶凉等. 太湖水体氮、磷浓度演变趋势(1985—2015年). 湖泊科学, 2016, **28**(5): 935-943.]
- [17] Li GB, Li L, Pan M *et al.* The degradation cause and pattern characteristics of Lake Dianchi ecosystem and new restoration strategy of ecoregion and step-by-step implementation. *J Lake Sci*, 2014, **26**(4): 485-496. DOI:10.18307/2014.0401. [李根保, 李林, 潘珉等. 滇池生态系统退化成因、格局特征与分区分步恢复策略. 湖泊科学, 2014, **26**(4): 485-496.]
- [18] Cao HS, Kong FX, Luo LC *et al.* Effects of wind and wind-induced waves on vertical phytoplankton distribution and surface blooms of *Microcystis aeruginosa* in Lake Taihu. *J Freshw Ecol*, 2006, **21**(2): 231-238.
- [19] Zhang XY, Jing YS, Chen F *et al.* Effect and forecast of weather conditions on cyanobacterial bloom outbreaks based on RDALR model in Taihu Lake, China. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(10): 5721-5729. [张晓忆, 景元书, 陈飞等. 基于 RDALR 模型分析气象条件对太湖蓝藻水华发生的影响及预报. 环境工程学报, 2016, **10**(10): 5721-5729.]
- [20] Zheng QF, Sun GW, Li J *et al.* Research on meteorological condition influencing blue algae bloom in Tai Lake. *Plat Meteorol*, 2008, **27**: 218-223. [郑庆锋, 孙国武, 李军等. 影响太湖蓝藻爆发的气象条件分析. 高原气象, 2008, **27**: 218-223.]
- [21] Huang W, Zhao LJ. Identification model of significant impact factors for cyanobacterial bloom. *J University of Shanghai for Science and Technology*, 2012, **34**(5): 435-440. [黄炜, 赵来军. 蓝藻水华显著影响因子识别模型. 上海理工大学学报, 2012, **34**(5): 435-440.]
- [22] Qin BQ, Zhu GW, Gao G *et al.* A drinking water crisis in Lake Taihu, China: Linkage to climatic variability and lake management. *Environ Manage*, 2010, **45**(1): 105-112.
- [23] Cao HS, Tao Y, Kong FX *et al.* Relationship between temperature and cyanobacterial recruitment from sediments in laboratory and field studies. *J Freshw Ecol*, 2008, **23**(3): 405-412.
- [24] Xu H, Paerl HW, Qin BQ *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China. *Limnol and Oceanogr*, 2010, **55**(1): 420-432.
- [25] He F. Characteristics of phosphorus loss and the controlling strategy for vegetation restoration in phosphorus enriched area in Lake Dianchi watershed, China [Dissertation]. Kunming: Yunnan University, 2015. [何锋. 滇池流域富磷区磷流失特征及控磷植物群落恢复研究[学位论文]. 昆明: 云南大学, 2015.]
- [26] Wang XW, Wang XY, Feng Y *et al.* Distribution of total phosphorus in the sediments in Chaohu Lake and its geological or-

- igin. *Journal of Anhui Normal University: Natural Science*, 2007, **30**(4): 496-499. [王绪伟, 王心源, 封毅等. 巢湖沉积物总磷分布及其地质成因. 安徽师范大学学报: 自科科学版, 2007, **30**(4): 496-499.]
- [27] Huang QH. Release and bioavailability of internal phosphorus in shallow lakes: A case study of Lakes Taihu, Chaohu, and Longganhu, East China [Dissertation]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2005. [黄清辉. 浅水湖泊内源磷释放及其生物有效性——以太湖、巢湖和龙感湖为例 [学位论文]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2005.]
- [28] Ren JC, Zhou H, Sun YT. Vertical distribution of light intensity and light compensation depth of submerged macrophyte in Lake Dianchi. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis*, 1997, **33**(2): 211-214. [任久长, 周红, 孙亦彤. 滇池光照强度的垂直分布与沉水植物的光补偿深度. 北京大学学报: 自然科学版, 1997, **33**(2): 211-214.]
- [29] Li YP, Tang CY, Yu ZB *et al.* Correlations between algae and water quality: factors driving eutrophication in Lake Taihu, China. *Int J Environ Sci Technol*, 2013, **11**(1): 169-182.
- [30] Jing LD, Ao HY, Huang XL *et al.* Water environment characteristics at Taige Canal-Taihu Lake: a comparative study on interaction between chlorophyll a and environmental variables. *Pol J Environ Stud*, 2015, **24**(3): 1031-1039.
- [31] Anonymity. Study of cyanobacterial bloom mechanism in large-medium shallow lakes. *China Science and Technology Achievements*, 2015, **14**: 10-13. [佚名. 大中型浅水湖泊蓝藻水华暴发机理研究. 中国科技成果, 2015, **14**: 10-13.]