

五大连池水质现状及近 30 年前后变化*

王念民¹, 汤施展¹, 李 喆¹, 孙大江¹, 纪 锋², 华振河³

(1: 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 哈尔滨 150076)

(2: 中国水产科学研究院长江水产研究所, 武汉 430223)

(3: 黑龙江省五大连池市日河渔业有限公司, 黑河 164155)

摘要: 2012—2013 年春、夏、秋季, 对五大连池 11 个采样点的水质变化进行研究, 分析湖水水质现状, 比较 30 年前后湖泊的水质变化并评估五大连池富营养化程度。结果表明, 五大连池不同部分、季节、年份的水质参数指标波动剧烈, 可能是受水产养殖及氮、磷浓度变化影响, 2 池和 3 池浮游生物量及叶绿素 a 浓度明显较低; 同 1980s 相比, 水质变化较大, 一些指标显示水质已趋向好转, 但 5 池却接近重度富营养化, 说明近几年的还湿、迁居等保护措施初见效果, 但整个湖泊水质恢复需要漫长过程。

关键词: 水质; 富营养化; 五大连池

Status of water quality and succession changes in Lake Wudalianchi in the last 30 years

WANG Nianmin¹, TANG Shizhan¹, LI Zhe¹, SUN Dajiang¹, JI Feng² & HUA Zhenhe³

(1: *Heilongjiang River Fishery Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150076, P.R.China*)

(2: *Yangtze River Fishery Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, P.R.China*)

(3: *Rihe Fishery Co. Ltd. of Wudalianchi, Heihe 164155, P.R.China*)

Abstract: As the second largest volcanic avalanche lake in China, Lake Wudalianchi is a representatively natural water body in high latitude region of China, which is a famous and multifunctional natural landscape. For studying the current situation of water quality (WQ) of lake, changes of WQ during the past 30 years and evaluating the eutrophic grade of the lake, we collected and studied 15 WQ indices on 11 sampling sites of Lake Wudalianchi in the spring, summer, autumn during 2012 and 2013. The results showed that, the WQ parameters of Lake Wudalianchi as shallow lake in the temperate continental monsoon climate zone change intensively in different areas and different seasons and years. The plankton biomass and chlorophyll-a concentration from the Second and Third Ponds are lower than those of the Fifth Pond, probably as the results of reduction of phosphorus, nitrogen and incremental fishery production in the formers. Comparison with the lake WQ indices during 1980s, mass of phytoplankton, total phosphorus and total nitrogen concentrations decrease significantly now, noting that WQ may be tending to better status. However trophic level index of Fifth Pond is exceeding 70 with the 3 times of the 1980s, which is adjacent to severe eutrophication status. The environmental safeguards of Lake Wudalianchi such as relocation of residents, returning farmland to wetland are effective at beginning phase, but individual part of lake remains a bad WQ suggesting a long-term treatment required.

Keywords: Water quality; eutrophication; Lake Wudalianchi

湖泊是主要的陆地生态景观之一, 是水资源的重要组成部分, 参与物质和能量收支, 对区域物质及能量循环意义重大。自然因素及人类活动对湖泊发育有重要影响, 特别是后者, 常常导致水质变化, 使湖泊功能退化, 加速其消亡^[1]。作为物质存储库, 湖泊水质变化是复杂而且漫长的过程, 掌握其变化规律是湖泊保护及开发的前提基础。五大连池是具有代表性的高寒地区自然水体, 兼具旅游、观赏、水产养殖、饮用水源等功

* 黑龙江水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (HSY201201)、国家科技支撑计划项目 (2012BAD25B10-05) 和黑龙江省冷水性鱼类种质资源及增殖重点开放实验室项目 (201201) 联合资助。2015-06-30 收稿; 2015-12-25 收修改稿。王念民 (1972~), 男, 硕士, 助理研究员; E-mail: wnm0529@163.com.

能,由于人为活动的影响,五大连池水质受到一定程度的影响. 1980s 初,曾对五大连池水环境进行系统调查^[2],其后 30 年,除对其矿泉水及个别池子水质有少量研究^[3-11],未再对该湖泊水质进行系统报道. 2012—2013 年,我们再次对五大连池水质进行调查,研究其水质波动及其变化规律,并结合之前学者的研究成果,分析五大连池湖泊水质 30 年来演变趋势,为保护五大连池水环境,预防和控制湖泊富营养化,以及湖泊环境保护及资源开发利用协同推进提供基础数据.

1 研究区概况

五大连池(48°34′~48°38′N,126°00′~126°21′E)是我国第二大火山堰塞湖,位于黑龙江省黑河市西南部,地处大、小兴安岭与松嫩平原过渡带. 湖泊由 5 个呈串珠状小湖组成,面积 18.47 km²,蓄水量 1.57×10⁸ m³,水流流长 5.25 km,由北至南由 5 池经 4、3、2 池,从 1 池流出,汇入石龙河后注入讷谿尔河.

五大连池是著名的火山地质公园,形成距今近 300 年,早期人为活动较少,自 1950s 国营农场建立以后,工农业生产、生活导致湿地萎缩,湖泊环境变化较大. 至 2000 年,整个流域面积 106000 hm²,其中耕地 54943 hm²,占总面积的 51.8%;林地 26787 hm²,占 25.3%;牧草地 11433 hm²,占 10.8%;居民地及工矿用地 1162 hm²,占 1.1%;交通用地 317 hm²,占 0.3%;水域 4864 hm²,占 4.6%;未利用土地 6494 hm²,占 6.1%.

五大连池处于温带大陆性季风气候区,年平均气温-0.1℃,年平均降水量 493.9 mm,主要集中在 6—9 月,占年降水量的 80%,年蒸发量约为降水量 3 倍. 湖泊靠地下水及降水积聚补充.

2 研究方法

2.1 采样点布设

根据湖泊自然概况、形态、利用程度,共设 13 个采样点. 其中,1 池(P1)1 个、2 池(P2)3 个、3 池(P3)5 个、4 池(P4)1 个、5 池(P5)3 个. 采样点集中在各池的进出水口和中心区域(图 1). 水样采样时间分别为 2012、2013 年度春季(每年 5 月末至 6 月初)、夏季(每年 8 月中、上旬)和秋季(每年 9 月底至 10 月初).

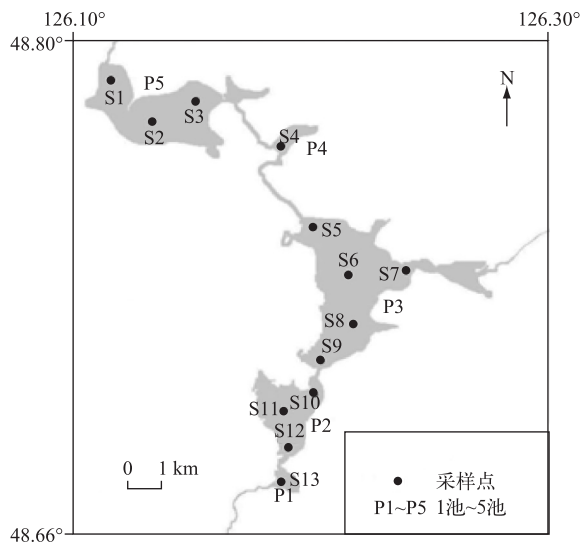


图 1 五大连池采样点设置

Fig.1 Sampling sites in Lake Wudalianchi

2.2 样品采集及理化因子测定

用采水器采集各采样点表层(水下 50 cm 左右)及底层(距底部 50 cm)水样各 5 L,放置预先洗净的塑料桶中混匀,用清洗干净的采样瓶灌满后冷藏保存,运至实验室进行水质理化指标测定;每个采样点各采集 3 份,共 39 份,其中总磷(TP)、总氮(TN)、总碱度(TA)、总硬度(TH)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、亚

硝态氮 (NO_2^- -N)、高锰酸盐指数 (COD_{Mn})、叶绿素 a (Chl.a) 浓度的分析参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 进行. 采样点水体的透明度 (SD) 用塞氏盘现场测定, 水温 (WT)、pH 值、电导率 (Cd) 及溶解氧 (DO) 浓度使用多参数水质测定仪 (YSI 6600V2) 现场测量. 浮游植物生物量 (mass of phytoplankton, MP) 利用 5 L 采水器, 分层 (<2 m) 采集 2 次, 混匀后装入 1 L 干净的塑料桶, 加入 15 ml 的鲁哥试剂固定, 浮游植物生物量按照细胞体积来换算: 先用形态相似的几何体积公式计算细胞体积, 再按 1 g/ml 的比重换算成生物量^[12].

2.3 数据处理及分析

采用单因素方差分析法 (One-way ANOVA) 对各采样点环境参数均值差异进行显著性检验. 选取 Chl.a、TP、TN、SD、 COD_{Mn} 五项指标, 利用综合营养状态指数法 (TLI)^[13] 确定各样点水体的营养状态及五大连池水体营养状态的总体评价. TLI 以 0~100 的一系列连续数字对营养状态进行分级: $\text{TLI}<30$ 为贫营养; $30<\text{TLI}<50$ 为中营养; $\text{TLI}>50$ 为富营养; $50<\text{TLI}<60$ 为轻度富营养; $60<\text{TLI}<70$ 为中度富营养; $\text{TLI}>70$ 为重度富营养. 在同一营养状态下, 指数值越高, 其营养化程度也越高. 本文中引用的五大连池历史水质数据均来自公开发表的文献, 显著性检验采用独立样本 *t* 检验及单因素方差分析法.

3 结果与分析

3.1 水质现状

五大连池的水温、溶解氧、pH 值、透明度、总碱度及总硬度等指标明显受季节影响, 比较各池水质发现: 5 池 TN、TP、 NH_4^+ -N、 COD_{Mn} 、Chl.a 浓度及浮游植物生物量明显高于 2、3 池 (表 1).

表 1 2012—2013 年五大连池各池水质指标变化

Tab.1 Variations of water quality of each pond in Lake Wudalianchi in 2012 and 2013

采样点	年份	TP/ (mg/L)	TN/ (mg/L)	NH_4^+ -N/ (mg/L)	NO_3^- -N/ (mg/L)	NO_2^- -N/ (mg/L)	COD_{Mn} / (mg/L)	Chl.a/ ($\mu\text{g/L}$)	MP/ (mg/L)
1 池	2012	0.298	1.089	0.675	0.0048	0.0940	6.367	2.497	2.687
	2013	0.041	1.587	0.723	0.0587	0.0070	5.833	3.748	2.625
2 池	2012	0.322	0.933	0.783	0.0029	0.1433	6.563	6.444	4.832
	2013	0.046	1.570	0.693	0.0800	0.0090	8.050	6.188	3.046
3 池	2012	0.267	1.147	0.940	0.0923	0.0747	6.903	12.690	3.572
	2013	0.063	1.567	0.640	0.1550	0.0274	5.115	8.873	4.364
4 池*	2012	0.197	1.270	0.890	0.0927	0.1270	9.707	6.632	5.733
	2013	0.062	3.320	0.820	0.0890	0.0260	8.393	6.348	6.092
5 池	2012	0.603	1.570	0.922	0.0363	0.2877	11.943	30.732	13.282
	2013	0.248	2.603	1.043	0.1550	0.0480	29.360	28.996	17.806

* 由于洪涝灾害影响, 4 池夏季水样无法采集, 表中数据仅为春、秋季均值.

3.2 五大连池水质 30 年前后的变化

比较 1981—1982 年^[2] 与 2012—2013 年五大连池水质指标发现: 上升的指标包括 NH_4^+ -N 浓度、 NO_2^- -N 浓度及 COD_{Mn} , 后者差异虽不明显, 但现测量值差异系数较大, 表明其波动比较剧烈; TH、TA、TP 浓度、MP 和 SD 等指标明显下降; 而 NO_3^- -N 浓度及 pH 值变化不大 (表 2).

3.3 湖水水质评价

比较五大连池各季节综合营养指数: 夏季湖水的综合营养指数最高, 春季次之, 而秋季最低; 2012 年夏季及 2013 年春、夏季, 5 池综合营养状态指数均超过 70. 比较两年间各池综合营养指数, 5 池最高, 3 池次之, 其后为 4 池、2 池, 1 池最低 (图 2).

4 讨论

4.1 五大连池水质现状

五大连池平均深度 5~6 m,属浅水型,各池温差较小.湖水偏碱性,金属离子含量较高,为碳酸碱度型^[8-11],硬度介于软水及中硬水之间;总碱度偏高,有盐碱化趋势^[14].随着温度、天气以及降水作用,湖泊水质会发生剧烈变化,同其他北方湖泊相似^[15],不同采样点季节变化趋势不同.

五大连池各池之间虽然存在水量交换,但由于独特串珠结构,各池有相对的独立性.由于水流较缓,中下游没有污染源,湖泊污染程度大体是按照水流方向逆向升高,这与一般湖沼、河流不同^[16-17].夏季 5 池 TP 浓度、TN 浓度、COD_{Mn} 及无机氮浓度有明显升高,可能是因为该池北侧、东侧有耕地,而夏季大量的降水将土壤中氮、磷及其他化学物质带入水中;而春、秋季则无显著差别,各池其他指标差别不大.

表 2 1981—1982 和 2012—2013 年五大连池湖水水质指标比较*

Tab.2 Contrast on water quality indexes of Lake Wudalianchi between 1981—1982 and 2012—2013

指标	1981—1982 年	2012—2013 年
pH 值	8.034±0.661	8.075±0.467
TA/mmol	1.849±1.850 ^a	1.136±0.683 ^b
TH/mmol	2.752±0.555 ^a	1.176±0.341 ^c
COD _{Mn} /(mg/L)	7.786±3.693	9.653±12.213
TN/(mg/L)	1.654±1.079	1.555±0.802
NO ₃ ⁻ -N/(mg/L)	0.055±0.055	0.074±0.059
NO ₂ ⁻ -N/(mg/L)	0.002±0.002 ^a	0.083±0.182 ^b
NH ₄ ⁺ -N/(mg/L)	0.448±0.612 ^a	0.786±0.348 ^c
TP/(mg/L)	0.493±0.579 ^a	0.206±0.252 ^b
SD/m	0.732±0.278	0.613±0.258
MP/(mg/L)	5.982±2.579 ^a	3.781±3.666 ^b

* 表中上标字母相邻有统计学意义(P<0.05),字母相间有统计学意义(P<0.01).

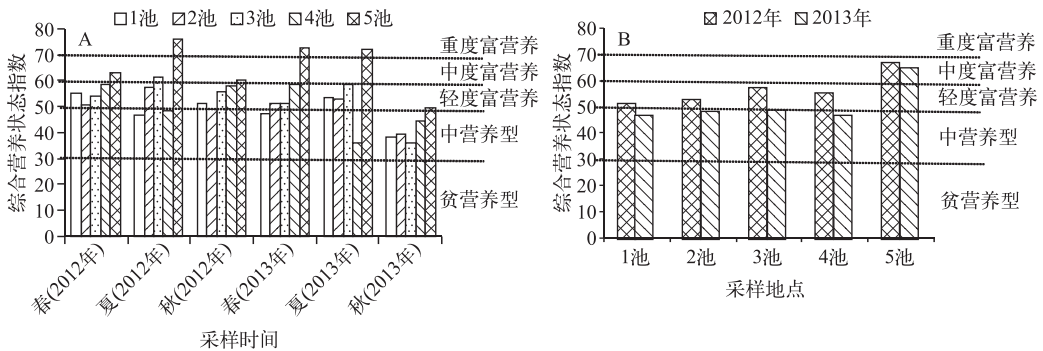


图 2 五大连池各季节(A)和各池(B)综合营养状态指数变化

Fig.2 Trophic status index evaluation results of each season (A) and each pond (B) of Lake Wudalianchi

浮游植物是湖泊主要的初级生产者,其生物量在一定程度上反映了湖泊水质的现状^[18-19],Chl.a 是浮游植物细胞中重要组分,是衡量浮游生物现存量及环境检测的重要指标^[20-21],2、3 池浮游植物生物量、Chl.a 浓度明显低于 5 池,而 SD 高于 5 池.导致上述情况可能存在两个原因:一方面是磷、氮浓度差异所致,因为二者与水体生产力密切相关^[22],5 池氮、磷量远高于 2、3 池;另一方面与 2、3 池存在大量的捕食者有关,自 1950s 引入鲢、鳙后,其年产量一直在 100~150 t 左右,而最近几年,年产量已达到 250 t 左右.

4.2 30 年前后湖水水质变化

湖泊的形成和发展充分反映了区域环境的特点和湖泊环境演变的历史^[23],五大连池形成时间不长,人类大规模活动时间也很短,但是对湖泊产生非常大的影响^[24].随着五大连池周边规模化农业和工业生产的发展,特别自 1970s 以后,化肥及农药大量使用,湖泊水质变化明显.直到 2010s,环保措施逐步落实,这种情况才渐好转.比较 1981—1982 年和 2012—2013 年湖泊水质指标,除 pH 值基本未变外,其他指标都发生了很大变化,其中 TA、TH、TN 浓度、TP 浓度、MP 等指标降低,COD_{Mn}、NH₄⁺-N 浓度、NO₃⁻-N 及 NO₂⁻-N 等指标升高,但后者出现并不意味着湖水水质变差,可能是由于生物或风力等自然因素扰动底质导致长期沉积营养源释放以及其他环境因素造成的,同时,5 池对这些指标拉起主要作用.尽管一些指标升高,但与 30 年前

相比,湖水 P:N 由 3:10 降至 1.3:10,而磷是我国水体营养的主要限制因子^[25]。

4.3 五大连池湖水水质评价

观察年度综合营养状态指数,除 5 池外,其他各池 2013 年指数低于 2012 年。湖泊的营养化程度与季节密切相关,春、夏季富营养化程度加强,秋季降低,这与春、夏季温度升高,藻类加速生长,降水增多,陆地氮、磷等营养源大量补充等因素有关^[26-27]。6 次调查中,5 池综合营养指数半数超过 70,已接近重度富营养化临界范围。

综上所述,近几年的居民搬迁、退耕还湿等保护措施初见效果,随着外源营养物质的减少,五大连池水质已有好转趋势。但 5 池水质状况堪忧,因此,整个湖泊水质恢复需要长期过程。

5 参考文献

- [1] Li Xiaoping ed. Limnology. Beijing: Science Press, 2012: 9 (in Chinese). [李小平. 湖泊学. 北京:科学出版社, 2012: 9.]
- [2] Zhang Juemin. The fishery resources in Heilongjiang province. Mudanjiang: Heilongjiang Korean National Press, 1985: 161-182 (in Chinese). [张觉民. 黑龙江省渔业资源. 牡丹江:黑龙江朝鲜民族出版社, 1985: 161-182.]
- [3] Yu Hongxue, Hao Linian. The physicochemical characteristics of natural mineral water and observation on annual changes in Wudalianchi Lake. *The Research of Land and Natural Resources*, 1982, (1): 61-64 (in Chinese). [于洪学, 郝立年. 五大连池天然矿泉水主要理化特点及其常年变化规律的观测. 国土与自然资源研究, 1982, (1): 61-64.]
- [4] Wang Hongxing. Study on water environment in Wudalianchi Lake scenic area. *Heilongjiang Geology*, 1996, 7(4): 34-42 (in Chinese). [王红星. 五大连池风景名胜区分水环境研究. 黑龙江地质, 1996, 7(4): 34-42.]
- [5] Kong Lingjun. Species distribution of phosphorus in water of Wudalianchi in winter. *Environmental Science and Management*, 2011, 36(3): 123-126 (in Chinese with English abstract). [孔令军. 五大连池冬季水体中磷的分布特征. 环境科学与管理, 2011, 36(3): 123-126.]
- [6] Kong Lingjun. Research on distributing trend of nitrogen in water body of Wudalianchi. *Heilongjiang Environmental Journal*, 2011, (1): 95-97 (in Chinese with English abstract). [孔令军. 五大连池水体中氮素分布及规律的初步研究. 黑龙江环境通报, 2011, (1): 95-97.]
- [7] Dong Tielin, Zhang Shumin, Jin Kaizhong. The water sources and its use of Wudalianchi scenic spot. *Chinese Journal of Convalescent Medicine*, 1995, 4(3): 1-4 (in Chinese with English abstract). [董铁林, 张树民, 金凯忠. 五大连池风景名胜区分的水资源及利用. 中国疗养医学, 1995, 4(3): 1-4.]
- [8] Yang Chen, Wei Xiaoxue, Pan Hong et al. Ecological environment evaluation of natural springs in Wudalianchi. *Environmental Science and Management*, 2012, 37(10): 162-164 (in Chinese with English abstract). [杨臣, 魏晓雪, 潘虹等. 五大连池地区天然矿泉水生态环境评价. 环境科学与管理, 2012, 37(10): 162-164.]
- [9] Bai Xue, Xu Qigong, Zhao Yue. Distribution of microorganisms correlated with N and P metabolism in the Wudalianchi water body. *Research of Environmental Science*, 2012, 25(1): 51-57 (in Chinese with English abstract). [白雪, 许其功, 赵越等. 五大连池水体氮和磷代谢相关的微生物类群分异特性. 环境科学研究, 2012, 25(1): 51-57.]
- [10] Han Jianchao, Zhang Haiyan, Yang Yuesuo et al. Hydrogeochemistry evidence of groundwater circulation features in Yaowangshan, Wudalianchi. *Water Saving Irrigation*, 2012, (8): 23-26, 30 (in Chinese with English abstract). [韩建超, 张海燕, 杨悦锁等. 五大连池药泉山地下水循环特征的水化学证据. 节水灌溉, 2012, (8): 23-26, 30.]
- [11] Wang Jinghua, Xie Zhenhua, Yang Chen et al. Health risk assessment of Mn and Fe in the natural carbonated cold mineral water of Wudalianchi. *Journal of Green Science and Technology*, 2012, (8): 127-129 (in Chinese with English abstract). [王菁华, 谢振华, 杨臣等. 五大连池重碳酸矿泉水中 Mn、Ni 离子的健康风险评估. 绿色科技, 2012, (8): 127-129.]
- [12] Pang Ke, Yao Jinxian, Wang Hao et al. Community structure characteristics of phytoplankton in Argun River drainage area in autumn. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(12): 3391-3398 (in Chinese with English abstract). [庞科, 姚锦仙, 王昊等. 额尔古纳河流域秋季浮游植物群落结构特征. 生态学报, 2011, 31(12): 3391-3398.]
- [13] Wang Mingcui, Liu Xueqin, Zhang Jianhui. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication. *Environmental Monitoring in China*, 2002, 18(5): 47-49 (in Chinese with English abstract). [王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. 中国环境监测, 2002, 18(5): 47-49.]

- [14] Zhang Yu, Wang Hongbin, He Jiang *et al.* Investigation of water quality in the Dalinor Lake in inner Mongolia. *Fisheries Science*, 2008, **28**(12): 671-673(in Chinese with English abstract). [张玉, 王洪滨, 何江等. 内蒙古达里诺尔湖水水质现状调查. 水产科学, 2008, **28**(12): 671-673.]
- [15] Xie Guijuan, Zhang Jianping, Tang Xiangming *et al.* Spatio-temporal heterogeneity of water quality(2010–2011) and succession patterns in Lake Bosten during the past 50 years. *J Lake Sci*, 2011, **23**(6): 837-846(in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2011.0603.[谢贵娟, 张建平, 汤祥明等. 博斯腾湖水水质现状(2010–2011 年)及近 50 年来演变趋势. 湖泊科学, 2011, **23**(6): 837-846.]
- [16] Chen Jingsheng ed. Principle of river water quality and river water quality in China. Beijing: Science Press, 2006; 69(in Chinese).[陈静生. 河流水质原理及中国河流水质. 北京: 科学出版社, 2006; 69.]
- [17] Ji Dongqing, Wen Ya, Wei Jianbing *et al.* Relationships between landscape spatial characteristics and surface water quality in the Liuxi River watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(2): 246-253(in Chinese with English abstract).[吉冬青, 文雅, 魏建兵等. 溪流河流域景观空间特征与河流水质的关联分析. 生态学报, 2015, **35**(2): 246-253.]
- [18] Whitton BA. Use of algae for monitoring rivers. *Journal of Applied Phycology*, 1991, **3**(3): 287-287.
- [19] Beisner BE, Longhi ML. Spatial overlap in lake phytoplankton: Relations with environmental factors and consequences for diversity. *Limnology and Oceanography*, 2013, **58**(4): 1419-1430.
- [20] Yu Haiyan, Zhou Bin, Hu Zunying *et al.* Study on correlation between chlorophyll a and algal density of biological monitoring. *Environmental Monitoring in China*, 2009, **25**(6): 40-43(in Chinese with English abstract). [于海燕, 周斌, 胡尊英等. 生物监测中叶绿素 a 浓度与藻类密度的关联性研究. 中国环境监测, 2009, **25**(6): 40-43.]
- [21] Du Shenglan, Huang Suiliang, Zang Changjuan *et al.* Correlation research between the indicators of phytoplankton standing stock I: chlorophyll a and biomass. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2011, **22**(1): 40-44(in Chinese with English abstract). 杜胜蓝, 黄岁樑, 臧常娟等. 浮游植物现存量表征指标间相关性研究: 叶绿素 a 与生物量. 水资源与水工程学报, 2011, **22**(1): 40-44.
- [22] Brönmark C, Hansson LA eds. The biology of lakes and ponds(Second Edition). Beijing: Higher Education Press, 2013; 26-32(in Chinese).[Brönmark C, Hansson LA. 湖泊与池塘生物学: 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2013; 26-32.]
- [23] Jin Xiangcan ed. Environment of lake in China (Vol. 1). Beijing: Ocean Press, 1996; 5(in Chinese).[金相灿. 中国湖泊环境(第 1 册). 北京: 海洋出版社, 1996; 5.]
- [24] Gui Zhifan, Xue Bin, Yao Shuchun *et al.* Environmental changes of Wudalianchi lake inferred from lake sediments in the past century. *Quaternary Sciences*, 2011, **31**(3): 544-553(in Chinese with English abstract).[桂智凡, 薛滨, 姚书春等. 黑龙江省五大连池近百年环境变化研究. 第四纪研究, 2011, **31**(3): 544-553.]
- [25] He Zhihui. Primary productivity of lake and reservoir and energy conversion efficiency in China. *Fisheries Science*, 1987, **6**(1): 24-30(in Chinese with English abstract).[何志辉. 中国湖泊水库的初级生产力及其能量转化效率. 水产科学, 1987, **6**(1): 24-30.]
- [26] Shen Xiaofei, Ma Wei, Luo Jiabei *et al.* Evaluation method of nutritional status and its applicability analysis in lakes and reservoirs. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2013, **11**(1): 74-80(in Chinese with English abstract).[沈晓飞, 马巍, 罗佳翠等. 湖库营养状态评价方法及适用性分析. 中国水利水电科学研究院学报, 2013, **11**(1): 74-80.]
- [27] Lu Bilin, Yan Pingchuan, Tian Xiaohai *et al.* Eutrophication and water characteristics of large and medium-sized reservoirs in Hubei Province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, **21**(5): 634-640(in Chinese with English abstract). [卢碧林, 严平川, 田小海等. 湖北省主要大中型水库富营养状况及特征分析. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(5): 634-640.]