

青海湖总磷、水温及矿化度与叶绿素 a 相关性分析

陈学民, 韩冰, 王莉莉, 伏小勇

(兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070)

摘要:以青海湖水体 11 个样点为研究对象,测定水中叶绿素 a 含量,并对其分布特征及相关性进行分析。用叶绿素 a 来表征藻类,采用回归分析方法,对青海湖水中总磷、水温及矿化度与叶绿素 a 的关系进行探讨。结果表明:5 月叶绿素 a 含量为 0.396~4.031 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值 1.387 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;7 月叶绿素 a 含量为 0.129~0.865 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值 0.432 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;9 月叶绿素 a 含量为 0.164~1.360 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值 0.665 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。5 月至 9 月湖水总磷平均含量从 0.124 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 持续下降到 0.061 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,藻类生长对总磷的需求大于外源输入和内源转化的总量,磷是青海湖藻类生长繁殖限制性营养元素之一,水温是春季限制藻类生长的主要因素。目前青海湖湖水矿化度在藻类生长的适宜范围内。

关键词:青海湖;叶绿素 a;总磷;水温;矿化度

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)02-0333-05 doi:10.11654/jaes.2013.02.018

Analysis on the Correlation Between Total Phosphorus, Water Temperature, Mineralization and Chlorophyll-a in Qinghai Lake, China

CHEN Xue-min, HAN Bing, WANG Li-li, FU Xiao-yong

(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The aim of present study was to explore the approaches for assessing the effects of total phosphorus, water temperature and mineralization on alga growth in Qinghai Lake on basis of data analysis by 11 vertical sampling lines. In meanwhile, the chlorophyll-a contents and related distributions were detected, and relevant correlations were determined. The results showed that the chlorophyll-a contents were ranged from 0.396 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to 4.031 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ with the mean value of 1.387 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in May, from 0.129 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to 0.865 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ with the mean value of 0.432 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in July, and ranged from 0.164 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to 1.360 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ with the mean value of 0.665 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in September. The average contents of total phosphorus continuously declined from 0.124 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in May to 0.061 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in September, as a result, the demand of total phosphorus for alga growth was greater than exogenous input and endogenous transformation. Therefore phosphorus, as one of crucial limiting nutrients for alga growth and reproduction in Qinghai Lake, but the water temperature was the main factor to limit alga growth in the period of spring time. At present, degree of mineralization in Qinghai Lake is right at a appropriate range for alga growth.

Keywords: Qinghai Lake; chlorophyll-a; total phosphorus; water temperature; mineralization

水体富营养化是湖泊的主要环境问题之一^[1],湖泊富营养化现象通常表现为藻类以及其他生物的异常繁殖,这也是富营养化的危害之一^[2]。藻类的生长取决于周围的环境因子,水温对水体中藻类的生长和藻华的暴发有影响^[3],朱伟等^[4]研究了不同温度条件下微囊藻和栅藻的生长,表明藻类生长有最适温度。许宁

等^[5]研究发现盐度是影响藻类生物繁殖的重要环境因子之一,盐度对藻类光合作用、呼吸作用及叶绿素合成与生长的影响具有一致性^[6]。通常营养物质氮磷是影响水体富营养化的关键营养元素^[7],商立海等^[8]研究认为氮、磷为红枫湖湖泊藻类生长的限制因子。

青海湖作为青藏高原的重要组成部分,属全球变化敏感地区和生态系统典型脆弱地区^[9]。青海湖属高原咸水湖,主要特点表现在湖水年平均水温低、矿化度高、营养物质相对贫乏^[10]。有研究表明,青海湖湖水中氮素促进藻类的生长^[11],表明氮不是青海湖藻类生长限制性因素。因此,研究青海湖水中总磷、水温及矿化度对青海湖藻类生长的影响具有重要意义。

收稿日期:2012-07-14

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07106-001-001)

作者简介:陈学民(1960—),女,教授,博导,主要从事水污染控制工程、废水处理与资源化理论与技术研究。

E-mail: xueminch@sina.com

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青海湖位于青海湖盆地内 ($36^{\circ}15'N \sim 38^{\circ}20'N$, $97^{\circ}50'E \sim 101^{\circ}20'E$), 东西最长 106 km, 南北最宽 63 km, 西宽东窄, 最窄处约 20 km, 湖周长约 325 km, 湖水面积 4200 km², 湖面高程 3194 m, 湖水容量 7.39×10^{10} m³, 最大水深 29.7 m, 平均水深 17.7 m, 形状似梨形, 是我国面积最大的内陆咸水湖泊^[12]。

青海湖地处东亚季风区、西北部干旱区和青藏高原高寒区的交汇地带, 其气候类型为半干旱的温带大陆性气候。气温偏低, 寒冷期长, 年平均气温在 $-1.0 \sim 1.0$ °C 之间。四季多风, 风力强劲, 日照充足, 太阳辐射强, 降水稀少, 年降水量平均值在 326.8~500 mm 之间, 常年蒸发量大, 达 1300~2000 mm。青海湖主要河流有布哈河、沙柳河、泉吉河、哈尔盖河、甘子河、黑马河, 多为季节性河流, 其中以布哈河最大, 约占入湖径流总量的 60%^[7]。

1.2 采样布点和采样时间

结合青海湖富营养化区域差异性调查及其演化规律研究布设的点位^[13], 并依据地表水湖泊监测布设原则^[14-15], 在布哈河(5#)、沙柳河(9#)、泉吉河(10#)、黑马河(11#)入湖口 500~1000 m 各设一个采样点, 在湖心区设 2 个采样点, 湖心 1(3#)和湖心 2(7#), 在 151 码头(1#)、江西沟码头(4#)、鸟岛(6#)、青海湖农场(8#)、沙岛(2#)各设一个采样点, 在 11 个采样点于 2009 年 9 月、2010 年 5 月和 2010 年 7 月分别采集水样, 水样的取样深度为距表层 50 cm 处。青海湖采样点位分布如图 1 所示。

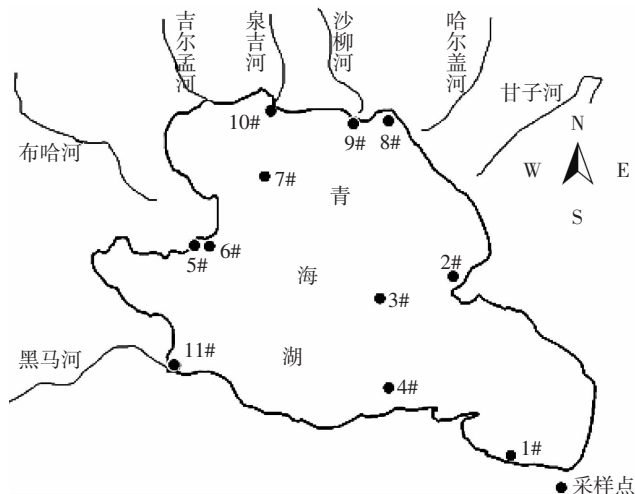


图 1 青海湖采样点示意

Figure 1 Location of sampling sites in Qinghai Lake

1.3 样品的采集与测定

各采样点分别取若干个水样制成混合水样, 带回实验室进行测定。总磷采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法测定; 矿化度采用重量法(电子天平)测定^[15]; 叶绿素 a 采用荆红卫等提供的方法测定^[16]; 采样同时用水温计法测定水温(精密水银温度计)。试验所用药剂均为分析纯试剂。

1.4 数据分析方法

各水质指标间的相关性用 Statistica 7.0 统计软件计算, 用 SPSS14.0 对水中总磷、水温、矿化度与叶绿素 a 进行回归分析与线性拟合。用单因素方差分析(ANOVA)对不同采样点的差异性进行显著性分析, 利用最小显著差异(LSD)多重比较方法, 在 95% 的置信区间进行分析。

2 结果与讨论

2.1 水中叶绿素 a 分布特征

由表 1 可知, 5 月叶绿素 a 含量为 0.396~4.031 mg·L⁻¹, 均值 1.387 mg·L⁻¹, 各采样点水中叶绿素 a 含量在 0.05 水平上存在显著差异性。其中湖心 1、青海湖农场、布哈河采样点叶绿素 a 含量相对较高, 分别为平均含量的 2.91、1.39 倍和 1.17 倍。沙岛采样点叶绿素 a 含量最低, 为平均含量的 29%。7 月叶绿素 a 平均含量为 0.432 mg·L⁻¹, 各采样点水中叶绿素 a 含量在 0.05 水平上存在显著差异性。其中青海湖农场采样点叶绿素 a 含量最高, 是 0.865 mg·L⁻¹, 为平均含量的 2 倍, 沙柳河采样点叶绿素 a 含量最低, 是 0.129 mg·L⁻¹, 为平均含量的 30%。9 月叶绿素 a 含量为 0.164~1.360 mg·L⁻¹, 均值 0.665 mg·L⁻¹, 各采样点水中叶绿素 a 含量在 0.05 水平上存在显著差异性。其中江西沟码头采样点叶绿素 a 含量最高, 为平均含量的 2.05 倍, 湖心 2 采样点叶绿素 a 含量最低, 为平均含量的 25%。

各采样点 3 个月(5、7 月和 9 月)叶绿素 a 的差异性分为 I 类(151 码头)和 II 类(沙岛、湖心 1、江西沟码头、布哈河、鸟岛、湖心 2、青海湖农场、沙柳河、泉吉河、黑马河)。I 类采样点 7 月叶绿素 a 与 5 月和 9 月在 0.05 水平上存在显著差异, 5 月和 9 月间无显著差异; II 类采样点 3 个月间叶绿素 a 在 0.05 水平上均存在显著差异。

2.2 相关性分析

由表 2 可知, 青海湖水中叶绿素 a 与总磷、水温、矿化度有较显著的正相关性, 显著性水平为 $P < 0.001$ 。

表 1 青海湖水中叶绿素 a 含量(mg·L⁻¹)
Table 1 The content of chlorophyll-a in Qinghai Lake(mg·L⁻¹)

分类	采样垂线	叶绿素 a		
		5 月	7 月	9 月
I	151 码头	0.905±0.005gA	0.365±0.002fB	0.889±0.001cA
II	泉吉河	0.703±0.004iA	0.474±0.004dB	0.43±0.002gC
II	湖心 2	1.405±0.007dA	0.312±0.002gB	0.164±0.001iC
II	青海湖农场	1.929±0.008bA	0.865±0.005aB	0.67±0.004eC
II	鸟岛	0.779±0.003hA	0.295±0.001gC	0.38±0.001gB
II	沙柳河	1.111±0.006fA	0.129±0.001hC	0.216±0.001hB
II	黑马河	1.189±0.006eA	0.353±0.003fC	0.72±0.005dB
II	布哈河	1.621±0.007cA	0.584±0.004cC	0.968±0.005bB
II	湖心 1	4.031±0.012aA	0.394±0.004eC	0.926±0.005bcB
II	沙岛	0.396±0.001jB	0.3±0.002gC	0.587±0.004fA
II	江西沟码头	1.191±0.006eB	0.68±0.004bC	1.36±0.007aA
叶绿素 a 含量范围		0.396~4.031	0.129~0.865	0.164~1.360
均值		1.387	0.432	0.665

注:小写字母表示同一采样月各样点间的差异;大写字母表示同一样点各采样月间的差异。

表 2 青海湖水体指标 Pearson 相关系数
Table 2 Pearson index of water indicators in Qinghai Lake

项目	总磷	矿化度	水温	叶绿素 a
总磷	1			
矿化度	0.340	1		
水温	-0.416*	-0.283	1	
叶绿素 a	0.632**	0.711***	0.641**	1

注:表中每一组数据依次为对应水质指标的相关性系数;*表示 $P<0.05$,**表示 $0.001<P<0.01$,***表示 $P<0.001$ 。

2.2.1 总磷含量变化对藻类生长的影响

从图 2 可以看出,5 月和 7 月总磷与叶绿素 a 呈现正相关性,9 月份则呈现负相关性。5 月和 7 月湖水总磷平均含量分别为 0.124、0.084 mg·L⁻¹,总磷含量较高,促进了藻类(以叶绿素 a 表示)的生长^[17],此时湖水中磷尚能满足藻类生长需要。藻类生长,不断消耗湖水中的磷,造成 7 月湖水总磷含量低于 5 月。9 月总磷平均含量为 0.061 mg·L⁻¹,低于 5 月和 7 月,表明从 7 月至 9 月湖水中消耗的磷得不到足量补充,叶绿素 a 的增加加剧了总磷含量降低,叶绿素 a 与总磷呈现负相关性。

5 月至 9 月湖水总磷含量持续下降表明,藻类生长对总磷的需求大于外源输入和内源转化的总量,磷是青海湖藻类生长繁殖限制性营养元素之一。

2.2.2 水温变化对藻类生长的影响

青海湖年平均水温约为 5.2℃^[18],5、7 月和 9 月平均表层水温分别为 12.3、16.1℃和 14.9℃。从图 3

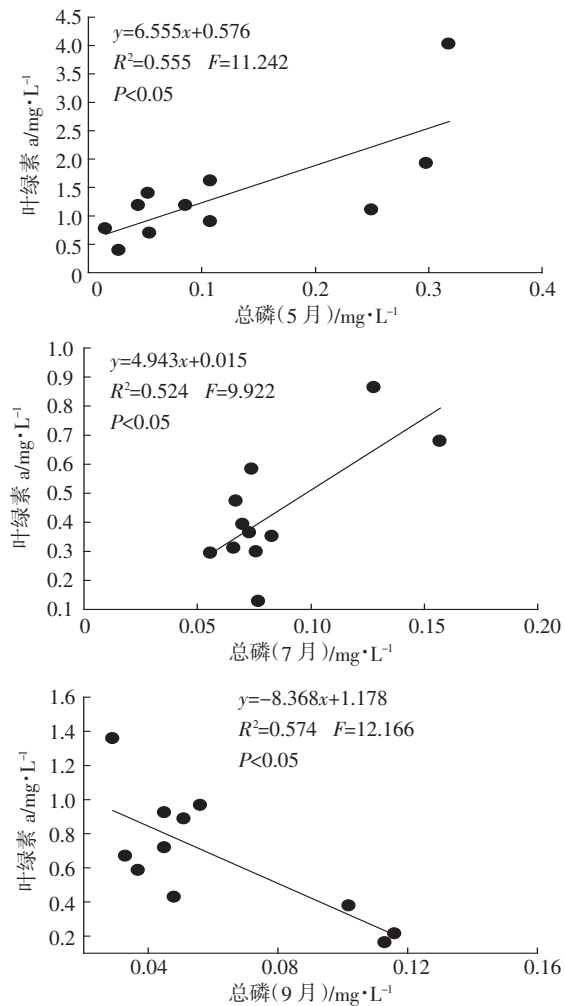


图 2 青海湖水中叶绿素 a 与总磷的相关分析
Figure 2 Correlative analysis between the chlorophyll-a and total phosphorus in Qinghai Lake

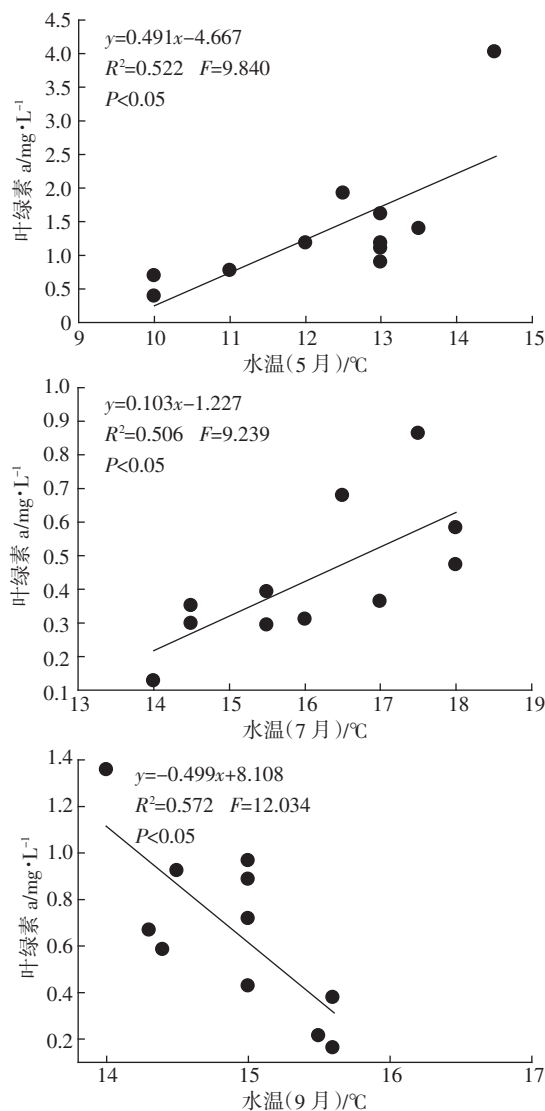


图3 青海湖水中叶绿素a与水温的相关分析

Figure 3 Correlative analysis between the chlorophyll-a and water temperature in Qinghai Lake

可以看出,5月叶绿素a与湖水温度呈现正相关性。水温升高,藻类细胞活性增强,代谢速率加快,有利于提高藻类对营养物质的利用率,促进藻细胞对营养物质的吸收^[19-23]。7月叶绿素a与水温亦呈现正相关,但叶绿素a含量较5月低,可能是以藻类为食的水生生物对藻类生长的限制作用。9月湖水温度对于藻类的生长较为适宜,但9月与7月相比,藻类数量变化不大。这可能有两方面的原因:一是由于秋季候鸟陆续离开青海湖^[24],而此时浮游动物生物量最高^[12],以藻类为食的浮游动物限制了藻类生长;二是湖水中总磷持续降低,对藻类增长产生的抑制作用。

2.2.3 水中矿化度变化对藻类生长的影响

通常湖水的矿化度可以直接反映湖水的盐度^[25],

在适宜的盐度范围内,藻细胞对氮磷营养盐的消耗率相对较高,代谢速率快,可促进藻类的生长^[9]。当盐度高于或低于藻类耐盐的适宜范围时,藻类的生长就会受到抑制^[5]。由图4可以看出,青海湖湖水矿化度与叶绿素a基本呈线性关系,随着矿化度升高,叶绿素a也呈现升高趋势。可见目前青海湖湖水矿化度未超过湖中藻类生长的适宜范围。

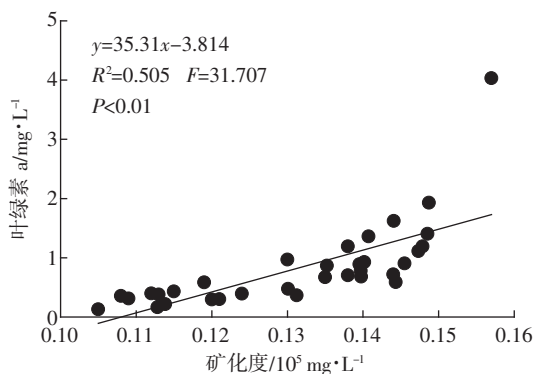


图4 青海湖水中叶绿素a与矿化度的相关分析

Figure 4 Correlative analysis between the chlorophyll-a and mineralization in Qinghai Lake

3 结论

(1)5、7月和9月青海湖水中叶绿素a含量分别为1.387、0.432 mg·L⁻¹和0.665 mg·L⁻¹,同一月份不同采样点及同一采样点不同月份间在0.05水平上均存在显著差异性。

(2)5月至9月湖水总磷含量持续下降,藻类生长消耗的磷得不到足量补偿,藻类对总磷的需求大于外源输入和内源转化的总量,表明磷是青海湖藻类生长繁殖限制性营养元素之一。

(3)水温升高有利于藻类生长,5月与7月随水温升高叶绿素a显著增加,7月叶绿素a总量低于5月则可能是浮游动物摄食与候鸟回迁共同作用的结果。9月叶绿素a总量减少源于候鸟迁离、浮游动物数量增加及湖水中总磷含量低的综合因素。

(4)就本次调查的情况而言,目前青海湖湖水矿化度在藻类生长的适宜范围内。

参考文献:

- [1] 何德进, 邢友华, 姜瑞雪, 等. 东平湖水体中氮磷的分布特征及其富营养化评价[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(8):45-48.
HE De-jin, XING You-hua, JIANG Rui-xue, et al. Distribution of nitrogen and phosphorus in water and eutrophication assessment of Dongping Lake[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(8):45-48.

- [2] 贺丽君, 龚洁, 赖承程, 等. 湖泊富营养化的成因及防治对策[J]. 工业安全与环保, 2008, 34(9):23-24.
HE Li-jun, GONG Jie, LAI Cheng-cheng, et al. Discussion on the formation and prevention of lake Eutrophication[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2008, 34(9):23-24.
- [3] 吴晓东, 孔繁翔, 张晓峰, 等. 太湖与巢湖水华蓝藻越冬和春季复苏的比较研究[J]. 环境科学, 2008, 29(5):1313-1318.
WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, ZHANG Xiao-feng, et al. Comparison of overwintering and recruitment of cyanobacteria in Taihu Lake and Chaohu Lake[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(5):1313-1318.
- [4] 朱伟, 万蕾, 赵联芳. 不同温度和营养盐质量浓度条件下藻类的种间竞争规律[J]. 生态环境, 2008, 17(1):6-11.
ZHU Wei, WAN Lei, ZHAO Lian-fang. Interspecies competition rule of algae under different temperature and nutrient concentration condition [J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(1):6-11.
- [5] 徐宁, 吕颂辉, 陈菊芳, 等. 温度和盐度对锥状斯氏藻生长的影响[J]. 海洋环境科学, 2004, 23(3):36-38.
XU Ning, LÜ Song-hui, CHEN Ju-fang, et al. The influence of water temperature and salinity on the growth of *Scrippsiella trochoidea* [J]. *Marine Environmental Science*, 2004, 23(3):36-38.
- [6] 张亚丽, 席北斗, 许秋瑾. 盐度作为咸水湖富营养化基准指标的可能性初探[J]. 环境工程技术学报, 2011, 1(3):260-263.
ZHANG Ya-li, XI Bei-dou, XU Qiu-jin. Research on the possibility of using salinity as entrophication criteria indicator of saline lakes[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2011, 1(3):260-263.
- [7] Ciblin A E, Hopkinson C S, Tucker J. Benthic metabolism and nutrient cycling in Boston Harbor[J]. *Massachusetts Estuaries*, 1997, 20(2):346-364.
- [8] 商立海, 李秋华, 邱华北, 等. 贵州红枫湖水体叶绿素a的分布与磷循环[J]. 生态学杂志, 2011, 30(5):1023-1030.
SHANG Li-hai, LI Qiu-hua, QIU Hua-bei, et al. Chlorophyll-a distribution and phosphorus cycle in water body of Hongfeng Reservoir, Guizhou[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(5):1023-1030.
- [9] 卞敬玲. 青海湖地区生态环境保护和治理研究[J]. 水利水电快报, 2002, 23(24):27-28.
BIAN Jing-ling. Protection and governance of environment in Qinghai Lake[J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2002, 23(24):27-28.
- [10] 《青海湖流域生态环境保护与修复》编辑委员会. 青海湖流域生态环境保护与修复[M]. 西宁:青海人民出版社, 2008:38-62, 97.
Editorial board of "Protection and restoration of environment in Qinghai Lake valley". Protection and restoration of environment in Qinghai Lake valley [M]. Xining:Qinghai People's Publishing House, 2008:38-62, 97.
- [11] 陈学民, 朱阳春, 罗永清, 等. 青海湖氮素分布特征及其对藻类生长的影响[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(2):119-123.
CHEN Xue-min, ZHU Yang-chun, LUO Yong-qing, et al. Particular specific features of nitrogen distribution and their effect on alga growth in Qinghai Lake[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2012, 12(2):119-123.
- [12] 张忠孝. 青海地理[M]. 西宁:青海人民出版社, 2004:106.
ZHANG Zhong-xiao. Qinghai geographical feature[M]. Xining:Qinghai People's Publishing House, 2004:106.
- [13] 陈学民, 朱阳春, 伏小勇, 等. 青海湖表层沉积物营养元素分布特征及相关性分析[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2):395-401.
CHEN Xue-min, ZHU Yang-chun, FU Xiao-yong, et al. Investigation of eutrophic elements distribution and their correlation in Qinhai Lake surface sediments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(2):395-401.
- [14] 国家环境保护总局. HJ/T 91—2002 地表水和污水检测技术规范[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. HJ/T 91—2002 Technical specifications requirements for monitoring of surface water and waste water[S]. Beijing:China Environmental Science Press, 2002.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京:中国环境科学出版社, 2002:35, 88-111, 205-248, 649-653.
State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring analysis method[M]. 4rd ed. Beijing:China Environmental Science Press, 2002:35, 88-111, 205-248, 649-653.
- [16] 荆红卫, 华蕾, 孙成华, 等. 北京城市湖泊富营养化评价与分析[J]. 湖泊科学, 2008, 20(3):357-363.
JING Hong-wei, HUA Lei, SUN Cheng-hua, et al. Analysis on urban lakes' eutrophication status in Beijing[J]. *Journal of Lake Science*, 2008, 20(3):357-363.
- [17] Taft L J, Tayloy W R, Mccarthy J J. Phosphorus uptake by phytoplankton in the Chesapeake Bay estuary, USA[J]. *Marine Biology*, 1975, 33(1):21-32.
- [18] 金相灿, 刘树坤, 章宗涉. 中国湖泊环境. 第二册[M]. 北京:海洋出版社, 1995:12.
JIN Xiang-can, LIU Shu-kun, ZHANG Zong-she. China lake environment. Sec ed.[M]. Beijing:Maritime Press, 1995:12.
- [19] LI Rong-hui, CAI De-suo, YAO Wen-ling. Effects of temperature to the growth of algae in Chengjiang River[J]. *Ecological Science*, 2008, 27(5):406-409.
- [20] Longhi M L, Schloss I R, Wiencke C. Effect of irradiance and temperature on photosynthesis and growth of two antarctic benthic diatoms, *Gyrosigma subsalinum* and *Odontella litigiosa*[J]. *Botanica Marina*, 2003, 46(3):276-284.
- [21] Araujo S C, Garcia V M T. Growth and biochemical composition of the diatom *Chaetoceros wighamii* brightwell under different temperature, salinity and carbon dioxide levels I[J]. *Protein, Carbohydrates and Lipids*, 2005, 246(1/4):405-412.
- [22] Goldman J C, Mann R. Temperature influenced variations in speciation and the chemical composition of marine phytoplankton in outdoor mass cultures[J]. *J Exp Mar Biol Ecol*, 1980, 46(1):29-40.
- [23] Thompson P A, GUO M X, Harrison P J. Effects of variation in temperature I on the biochemical composition of eight species of marine phytoplankton[J]. *Journal of Phycology*, 1992, 28(4):481-488.
- [24] 张国钢, 刘冬平, 江红星, 等. 青海湖非越冬水鸟多样性分析[J]. 林业科学, 2007, 43(12):101-105.
ZHANG Guo-gang, LIU Dong-ping, JIANG Hong-xing, et al. Diversity and dynamics of waterbirds in non-wintering season at Qinghai Lake [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(12):101-105.
- [25] 潘红玺, 王苏民. 中国湖泊矿化度的空间分布[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(2):185-191.
PAN Hong-xi, WANG Su-min. Spatial distribution of mineralized degree of lakes in China[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2001, 32(2):185-191.