

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.06.013

高原再生水湖泊的水体透明度及其影响因素

赵 轩¹, 许申来¹, 薛祥山¹, 郭玉梅², 吴毅晖², 郭 2

(1.北京清控人居环境研究院有限公司,北京 100083;2.滇池水务股份有限公司,昆明 650228)

摘要: 昆明市的翠湖是一个以再生水为主要水源的高原城市景观湖泊。利用2013年5月-10月四期(每期连续一周)的翠湖水质监测数据,对其水体透明度(SD)的时空分布,及其与水温(T)、pH、DO、Chla(叶绿素a)、TP、SS、COD_{Cr}、N/P、TN、NH₄-N、DTP、DTN的相关性进行了分析,并以SD为因变量,以各水环境因子为自变量进行了多元线性回归分析。结果显示,水生植物少、水质较差的湖泊西区水域透明度(平均值33.6 cm)相对低于水生植物较多、水质状态较好的东区(平均值61.5 cm);翠湖水体透明度与 T 、pH、DO、Chla、TP、SS、COD_{Cr}显著负相关($p < 0.01$),而与N/P、TN呈极显著正相关($p < 0.01$),Chla是影响翠湖水体透明度的主要直接影响因素,COD_{Cr}、TP是影响藻类生长的主要水质因子。研究结果为以高原城市再生水湖泊翠湖水体透明度的改善及景观价值的提升提供了科学依据。

关键词: 昆明翠湖;高原湖泊;再生水;透明度;相关性分析

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)06-1084-05

Water transparency and its impact factors in plateau lake recharged by reclaimed water

ZHAO Xuan¹, XU Shenlai¹, XUE Xiangshan¹, GUO Yumei², WU Yihui², GUO Fang²

(1. Tsinghua Holding Human Settlements Environment Institute, Beijing 100083, China;

2. Kunming Dianchi Water Treatment Co. Ltd., Kunming 650228, China)

Abstract: Cuihu Lake in Kunming City is a plateau lake recharged by reclaimed water. Based on four periods of week-long diurnal monitoring water quality data in Cuihu Lake from May to October in 2013, the spatial and temporal distributions of water transparency and the relationship between transparency and T (water temperature), pH, DO, Chla (Chlorophyll a), TP, SS, COD_{Cr}, N/P, TN, NH₄-N, DTP, and DTN were analyzed. Additionally, SD was considered as the dependent variable, multiple regression analysis was conducted for each water environment factor. The results indicated that the water transparency in Cuihu Lake is lower in the western area (averaged 33.6 cm, with deeper water and fewer aquatic plants) and higher in the eastern area (averaged 61.5 cm, with more aquatic plants and better water quality). The correlation analysis and multiple regression analysis showed that water transparency is negatively correlated with T , pH, DO, Chla, TP, SS, and COD_{Cr} ($p < 0.01$), and positively correlated with N/P and TN ($p < 0.01$). Chla is the primary and important factor affecting water transparency in Cuihu Lake, and COD_{Cr}, TP are two significant water quality factors to impact the algae growth in Cuihu Lake. The research results can provide scientific reference for the improvement of water transparency and landscape value in plateau lake recharged by reclaimed water.

Key words: Cuihu Lake; plateau lake; reclaimed water; transparency; correlation analysis

水体透明度反映水体清澈/混浊程度^[1],直接影响公众视觉、决定水体景观功能,也是影响浮游植物群落结构的主要水质因子^[2],因此是湖泊水质、富营养化重要表征指标^[3,4]。研究表明,悬浮物(SS)、可溶性有机碳(DOC)、温度、pH、氮磷比(N/P)等均会对水体透明度产生直接/间接影响^[1],且通常通过多因子共同对其产生影响。张晓晶等^[5]对

乌梁素海水体透明度研究表明,浊度、SS、叶绿素a是水体透明度的直接影响因素,而pH、N/P是间接影响因素。随着水资源紧缺形势日益加剧,再生水已逐渐成为很多城市景观水体的主要补给水源,但是关于高原城市再生水湖泊的重要环境与景观指标水体透明度影响因素的研究仍相对缺乏。

翠湖坐落于云贵高原滇池盆地北部,位于昆明市中心,

收稿日期: 2015-03-18 修回日期: 2015-10-16 网络出版时间: 2015-11-30
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20151130.2013.018.html>
基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07302002)
作者简介: 赵 轩(1986-),女,河北秦皇岛人,工程师,主要从事水污染防治与数值模拟研究工作。E-mail: zhaox@bjenv.com

有“镶嵌在昆明城里的一颗绿宝石”之称。昆明市属水质-水资源复合缺水型城市^[6], 翠湖目前采用再生水为补给水源, 是典型的高原城市再生水景观湖泊, 对城市生态环境与景观功能起着重要作用^[7], 同时对于下游七亩沟、老运粮河乃至滇池的水环境保护均有重要作用。近年来翠湖水体不断恶化^[8], 尤其夏季水体透明度下降, 景观功能也受到严重影响, 因此本文利用水华频发、水质恶化的5月-10月的观测资料, 采用相关性分析和多元回归分析, 探讨昆明翠湖水体透明度的时空分析及其主要影响因素, 为翠湖水环境及景观改善提供科学依据。

1 采样与分析

翠湖湖底平均海拔1 887 m, 年均日照2 445.6 h, 年均总辐射量129.7 kcal/cm², 年均气温14.5℃, 多年平均年降雨量约800 mm, 多年平均年蒸发量约1 200 mm。湖泊水域面积15 hm², 平均水深1.5 m, 以昆明市某污水厂再生水(优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级A排放标准, 见表1)为主要补给水源。由于翠湖所在区域雨水收集管网体系完善且不排入翠湖(图1), 园区雨水径流入湖量较小, 因此翠湖水体主要受该污水厂出水水质和水量影响。

表1 翠湖补给水源水质

Tab. 1 Recharge water quality in Cuihu Lake					
水质指标	COD _{Cr}	TP	TN	NH ₄ -N	SS
浓度/(mg·L ⁻¹)	11.9	0.28	10.1	0.97	4.9
一级A标准限值/(mg·L ⁻¹)	50	0.5	15	5	10

为全面反映以再生水为主要补给水源(进出水口见图2)的翠湖水体透明度及相关环境因子特征, 本文以均匀布点为原则, 根据不同水域特点, 在翠湖水域设置21个采样点(图2), 采样水深设为0.5 m。考虑到污水厂出水变化周期为一周, 因此于2013年5月-10月对翠湖水体进行了四期(每期连续一周)的采样监测分析, 采样频率为每天一次。最终共获得428个样品的有效监测数据。水样采集后立即参考《水和废水监测分析方法(第四版)》对水体透明度(SD)及其相关因子pH、化学需氧量(COD_{Cr})、总磷(TP)、总氮(TN)、叶绿素a(Chla)、悬浮物(SS)、氨氮(NH₄-N)、溶解氧(DO)、总溶解磷(DTP)、总溶解氮(DTN)、水温(T)等进行分析。



图1 翠湖公园雨污分流管网系统

Fig. 1 Separate rain water and sewage systems

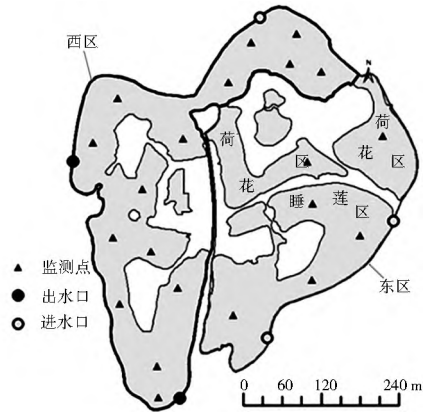


图2 采样点分布

Fig. 2 Distribution of sampling sites in Cuihu Lake

2 结果与讨论

2.1 水体透明度时空分布

从四期监测结果可以看出, 翠湖东区、西区水体透明度平均值时空分布差异较大(图3、图4), 这与不同季节各水域功能、人类活动影响程度、且水生植被分布差异大有关, 相关研究也发现旅游活动对景观水体水质的影响较大^[9]。2013年5月-10月四期监测时段翠湖东区水体透明度平均值分别为42 cm、58 cm、77 cm和69 cm, 西区水体透明度平均值分别为28 cm、25 cm、41 cm和40 cm。整体上东区水域水体透明度优于西区水域, 与西区水域以游人娱乐为主、水生植物较少, 而东区水域以荷花等植物观赏为主有关。

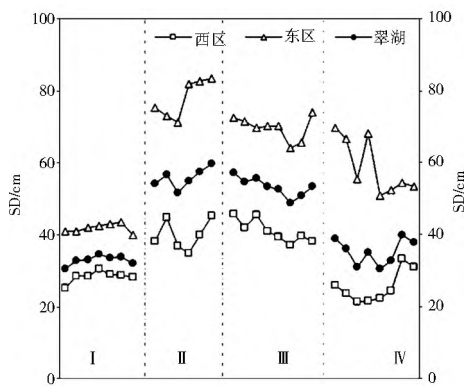


图3 翠湖水体透明度时间分布

Fig. 3 Temporal variation of water transparency in Cuihu Lake

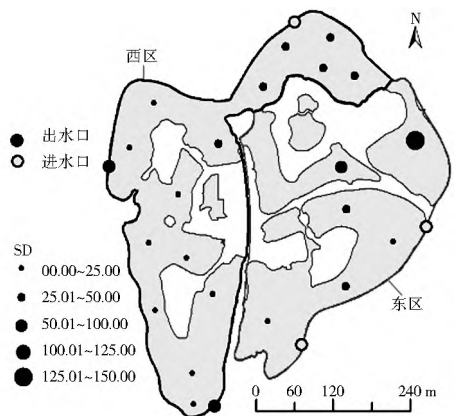


图4 翠湖水体透明度空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of water transparency in Cuihu Lake

2.2 透明度与各水质因子相关性分析

对四期监测中翠湖各采样点的水体透明度与水环境因子进行了两两相关性分析, Pearson 相关系数见表 2。可以看出, 翠湖水体透明度与 T 、 pH 、 DO 、 Chla 、 TP 、 SS 、 COD_{Cr} 呈显著负相关, 与 N/P 、 TN 呈显著正相关(表 2)。

(1) SS 对透明度的影响。悬浮物通过增加水体对光辐射程度的衰减而降低水体透明度^[10]。从图 5 可以看出, $\text{SS} < 55 \text{ mg/L}$ 时, 水体透明度的变化范围相对较大, 说明翠湖水体 SS 对透明度的影响存在较大不确定性, 但整体上翠湖水体透明度与水体中 SS 呈显著负相关($r = -0.320, p < 0.01$), 与张晓晶等^[6]关于乌梁素海的研究结果较为一致, 余丽凡等^[11]关于上海公园景观水体的相关研究也证实了 SS 对水体透明度的重要影响。

(2) 叶绿素 a 对 SS 、透明度的影响。叶绿素 a 反映了水

体藻类的数量, 蒋瑶等^[12]研究发现 Chla 是贵州百花湖水体透明度的直接影响因素。监测期间翠湖各采样点 Chla 质量浓度范围为 $0.2 \sim 530 \mu\text{g/L}$, 平均值为 $171 \mu\text{g/L}$ 。翠湖水体透明度与 Chla 呈极显著负相关($r = -0.469, p < 0.01$), 从图 5 可以看出 SD 与 Chla 呈显著对数关系($R^2 = 0.64$)。与 SS 相比, Chla 与翠湖水体透明度的相关关系更为显著, 且 SS 随 Chla 浓度的增加而增加(图 6), 说明 Chla 是翠湖水体 SS 、水体透明度的主要影响因素。根据藻类的生长特征, 采样时间为光合作用较强的白天, 藻类光合作用产生 O_2 , 进而增加水体 DO ; 随着藻类数量的增加, 部分藻类开始呼吸作用, 故 DO 呈先升高再下降的趋势(图 6), 而 SD 呈现出随 DO 先下降后缓慢上升的趋势(图 5), 进一步说明了 Chla 对 SD 的影响。

表 2 透明度与各水质及环境指标相关性分析

Tab. 2 Correlation coefficients between water transparency and its impact factors in Cuihu Lake

指标	T	pH	DO	Chla	TP	SS	COD	N/P	TN
r	-0.672*	-0.657*	-0.578*	-0.469*	-0.331*	-0.320*	-0.296*	0.262*	0.232**
n	428	427	336	428	427	423	428	425	428

注: ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

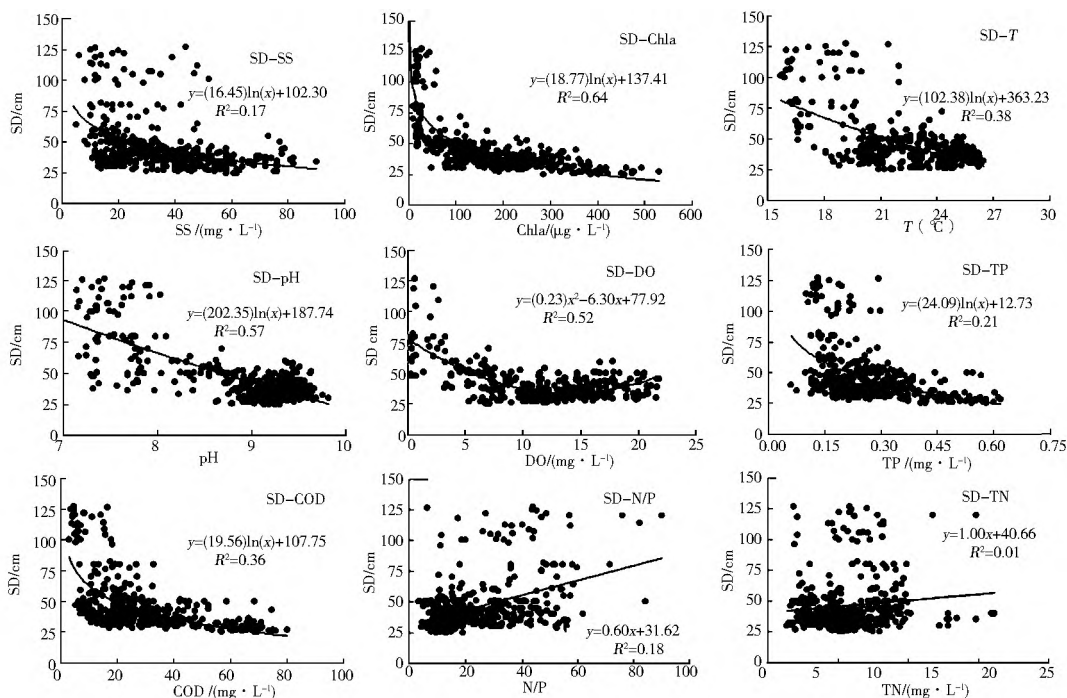


图 5 透明度与环境因子相关关系

Fig. 5 Relationship between water transparency and its impact factors

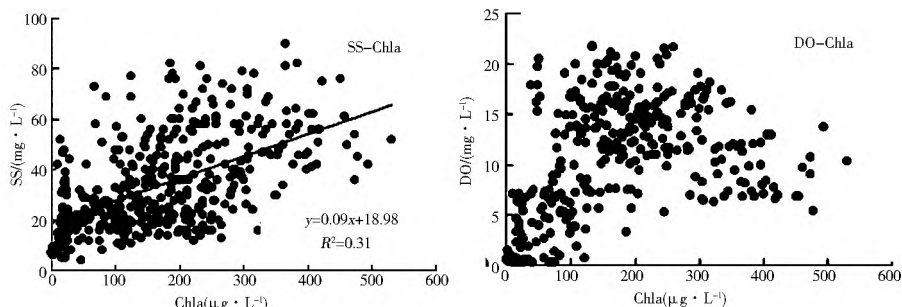


图 6 SS、DO 与 Chla 相关关系

Fig. 6 Relationship between SS, DO and Chla

(3) 水温、pH 对透明度的影响。水温 (T)、水体酸碱程度对水体无机碳源的存在状态和水生植物生长繁殖有着重要影响。研究表明水温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, pH $8.0\sim 9.5$ 是藻类生长的最适条件^[13-14]。监测期间翠湖水域水温范围为 $15.7\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 26.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (平均值为 $22.3\text{ }^{\circ}\text{C}$), pH 范围为 $7.01\sim 9.81$ (平均值为 8.85)。相关分析表明翠湖水体透明度与 T 、pH 呈显著负相

关($r = -0.672, -0.657, p < 0.01$)。从图 5 可以看出,当 $T < 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、pH < 8.5 时,水体透明度基本保持不低于 50 cm ; 而当 $T > 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、pH > 8.5 时,水体透明度大多保持在 50 cm 以下,这可能与 $T < 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、pH < 8.5 时水体中 Chla 质量浓度较低(图 7)有关,但图 5 中 T 、pH 与水体透明度的相互关系相对比较杂乱,说明 T 、pH 对水体透明度的影响存在较大不确定性。

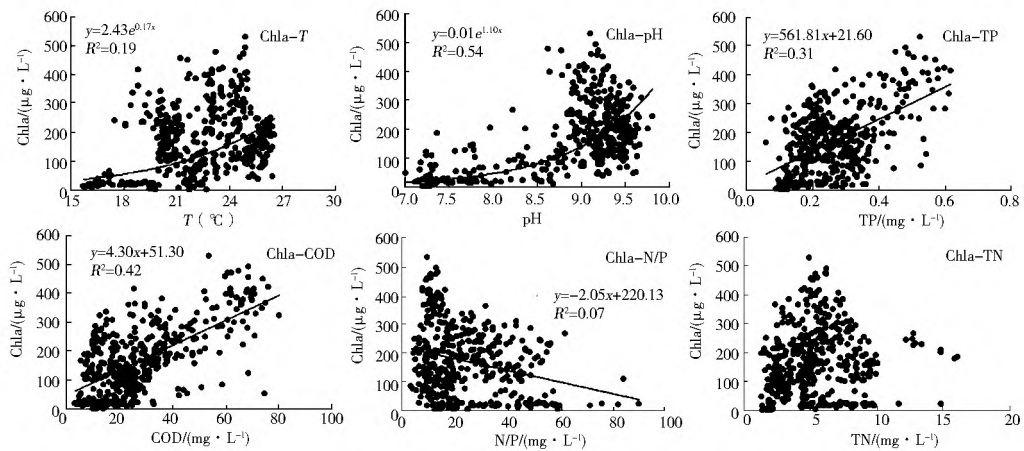


图 7 Chla 与相关因子相关关系

Fig. 7 Relationship between Chla and its impact factors

(4) COD_{Cr} 对透明度的影响。 COD 反映水体中有机物的相对含量,水体溶解性有机物、有色可溶性有机物通过吸收水体光线而降低水体透明度^[11],已有相关研究表明水体有机碳源对藻类异养生长及混养生长也起着重要作用^[15]。翠湖各采样点水体 COD_{Cr} 范围为 $3.0\sim 80.1\text{ mg/L}$,平均值为 22.3 mg/L 。翠湖水体透明度与 COD_{Cr} 呈显著正相关($r = -0.296, p < 0.01$)。从图 5 可以看出 SD 与 COD_{Cr} 呈较为显著的对数关系($R^2 = 0.36$),同时 Chla 与 COD_{Cr} 呈显著正相关(图 7),说明翠湖有机物的含量及成分(COD_{Cr})既可直接吸收水体光线降低水体透明度,也可以通过影响藻类生长间接影响水体透明度。

(5) N、P 对透明度的影响。N、P 作为藻类生长的重要营养元素,其在水中的存在形式及含量直接影响着藻类的生长状况,进而影响水体透明度^[16-20]。一般研究认为藻类体内 N/P 为 16,水体中 N/P 越接近 16 越有利于藻类生长,高于 16 时磷为藻类生长的限制因子,低于 16 时则氮为限制因子^[14]。监测期间翠湖各采样点水体 TN 质量浓度平均值为 5.49 mg/L , TP 质量浓度平均值为 0.26 mg/L , N/P 范围为 $3.41\sim 89.3$ (平均值为 24.2)。相关分析发现翠湖水体透明度与水体中 TP 呈显著负相关($r = -0.331, p < 0.01$),与 N/P、TN 呈正相关($r = 0.262, 0.232, p < 0.01$),且监测值中超过 60% 的 N/P 大于 16。从图 7 可以看出 Chla 质量浓度随 TP 质量浓度升高而升高,随 N/P 增加而呈现降低趋势,而与 TN 相关性相对较低,表明 TP 是藻类生长的限制因子,是翠湖水体透明度的重要水质影响因素。

以水体透明度(SD)为因变量,以 T 、pH、DO、Chla、TP、SS、 COD_{Cr} 、N/P、TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、DTP、DTN 为自变量,采用 Matlab 软件进行多元逐步回归分析;为消除量纲影响^[17],对所有数据(X)取自然对数 $\ln(X+1)$ 进行回归分析,回归分析模型的修正 $R^2 = 0.719$,相关性较好。根据回归分析模型参数建立多元线性回归方程如下:

$$\ln(\text{SD}+1) = 8.9250 - 1.0737\ln(\text{pH}+1) - 0.5123\ln(T+1) - 0.1600\ln(\text{Chla}+1) - 0.0962\ln(\text{COD}_{\text{Cr}}+1) \quad (1)$$

以式(1)为预测模型,计算监测期间翠湖各监测点水体透明度拟合值,可以看出,翠湖水体透明度的拟合值与实测值较为相近(图 8),分析平均相对误差值 12.5%,平均绝对误差为 5.61 cm ,除个别点外,模型可以较好的拟合翠湖水体透明度的变化。进一步说明 pH、 T 、Chla 与 COD_{Cr} 是影响再生水湖泊翠湖水体透明度的重要影响因素。

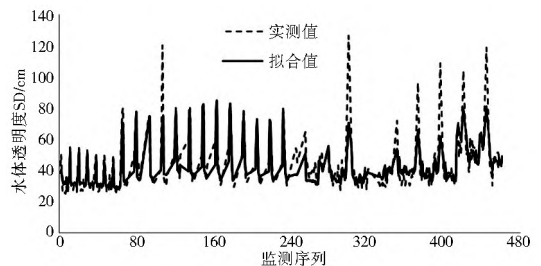


图 8 水体透明度实测值与拟合值比较

Fig. 8 Actual and calculated values of water transparency in Cuihu Lake

3 结论

基于昆明市翠湖在 2013 年 5 月-10 月的水质监测数据,对其水体透明度的时空分布、影响因子进行了多元线性回归分析,得到了以下结论。

(1) 作为城市景观水体,翠湖水域水体功能对水体透明度影响显著,以游人娱乐为主的西区水域水体透明度明显低于以植物观赏为主的东区水域,水体功能布局优化将有助于水体透明度及其景观功能的改善。

(2) 翠湖水体透明度受多个环境因子共同影响,整体上与 T 、pH、DO、Chla、TP、SS、 COD_{Cr} 呈显著负相关($p < 0.01$),而与 N/P、TN 呈显著正相关($p < 0.01$)。

(3) SS、Chla、COD_{Cr} 均可通过影响光在水中的衰减直接影响翠湖水体透明度,且 Chla 是主要影响因素, T、pH、COD_{Cr}、TP 通过影响藻类生长间接影响水体透明度,其中 COD_{Cr}、TP 是主要水质影响因子,TP 是限制藻类生长的水质因子,水体 COD_{Cr}、TP 及藻类的去除与控制是翠湖水体透明度改善的有效途径。

参考文献(References):

- [1] 杨顶田,陈伟民,曹文熙.太湖梅梁湾水体透明度的影响因素分析[J].上海环境科学,2003(22):34-40.(YANG Ding tian, CHEN Wei min, CAO Wen xi. Analysis on transparency factors of Lake Taihu [J]. Shanghai Environmental Sciences, 2003 (22): 34-40. (in Chinese))
- [2] 田志强,田秉晖,辛丽花,等.于桥水库秋季浮游植物群落结构与水质因子的关系[J].环境污染与防治,2011,33(5):64-68.(TIAN Zhi qiang, TIAN Bing hui, XIN Li hua, et al. Relationship between structure of phytoplankton community and water quality factors in Yuqiao Reservoir in autumn [J]. Environmental Pollution & Control, 2011, (5): 64-68. (in Chinese))
- [3] 陈大友.渔洞水库水体透明度与富营养化关系探讨[J].水资源研究,2013,34(1):39-41.(CHEN Da you. Relationship between water transparency and eutrophication in Yudong Reservoir [J]. Water Resource Research, 2013, 34(1): 39-41. (in Chinese))
- [4] 纪伟涛,郭国锋,吴建东,等.大湖水体透明度、水位及两者之间关系分析[J].水资源保护,2010,26(1):36-39.(JI Wei tao, WU Guo feng, WU Jian dong, et al. Analyses of water clarity, water level and their relation in Lake Dahuchi [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(1): 36-39. (in Chinese))
- [5] 张晓晶,李畅游,贾克力,等.乌梁素海水体透明度分布及影响因素相关分析[J].湖泊科学,2009,21(6):879-884.(ZHANG Xiao dong, LI Chang you, JIA Ke li, et al. Spatial temporal changes in water transparency and its impact factors in Lake Wuliangsu hai [J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(6): 879-884. (in Chinese))
- [6] 梁媛,许新宜,王红瑞,等.基于循环修正模式的云南省水资源短缺程度分析[J].自然资源学报,2013,28(7):1146-1158.(LIANG Yuan, XU Xinyi, WANG Hong rui, et al. Research on the degree of water shortage in Yunnan Province based on circulating correction mode [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(7): 1146-1158. (in Chinese))
- [7] 崔盛站,常传杰.昆明翠湖湿地在城市生态环境中的重要作用[J].中国水土保持,2007(4):51-52.(CUI Sheng zhan, CHANG Chuan jie. Important functions of Cuihu Wetland of Kunming in urban ecological environment [J]. Soil and Water Conservation In China, 2007(4): 51-52. (in Chinese))
- [8] 于秀芳,张乃明.昆明翠湖水水质变化特征及影响因素研究[J].云南地理环境研究,2008,20(3):38-42.(YU Xiufang, ZHANG Nai ming. Study on the varying characteristics and influencing factors of water quality of Cuihu Lake in Kunming [J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2008, 20(3): 38-42. (in Chinese))
- [9] 王颖,洪思扬,谢琼,等.云台山风景区地表水水环境质量研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2014,50(6):644-650.(WANG Ying, HONG Si yang, XIE Qiong, et al. Quality of surface water in Yuntai Mountain scenic area [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2014, 50(6): 644-650. (in Chinese))
- [10] 李一平.太湖水体透明度影响因子实验及模型研究[D].南京:河海大学,2006:183-184.(LI Yi ping. Study on the influence factors of transparency by experiment and numerical model in Lake Taihu [D]. Nanjing: Hohai University, 2006: 183-184. (in Chinese))
- [11] 余丽凡,施渺筱,达良俊,等.上海公园绿地景观水体透明度影响因子研究[J].华东师范大学学报:自然科学版,2012(4):112-119.(YU Li fan, SHI Miao xiao, DA Liang jun, et al. Influencing factors of water transparency in landscape water bodies of parks and public green space, Shanghai [J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2012(4): 112-119. (in Chinese))
- [12] 蒋瑶,夏品华,薛飞,等.贵州百花湖水体透明度的时空变化及影响因素[J].贵州农业科学,2013,41(1):199-202.(JIANG Yao, XIA Pin hua, XUE Fei, et al. Spatial temporal changes of the water transparency and their influencing factors in Baihua Reservoir in Guizhou [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2013, 41(1): 199-202. (in Chinese))
- [13] 张运林,秦伯强,陈伟民.太湖梅梁湾浮游植物叶绿素 a 和初级生产力[J].应用生态学报,2004,15(11):2127-2131.(ZHANG Yun lin, QIN Bo qiang, CHEN Wei min. Chlorophyll a content and primary productivity of phytoplankton in Meiliang Bay of Taihu Lake [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(11): 2127-2131. (in Chinese))
- [14] 刘春光,金相灿,孙凌,等.pH 值对淡水藻类生长和种类变化的影响[J].农业环境科学学报,2005,24(2):294-298.(LIU Chun guang, JIN Xiang can, SUN Ling, et al. Effects of pH on growth and species changes of algae in freshwater [J]. Journal of Agricultural Environment Science, 2005, 24(2): 294-298. (in Chinese))
- [15] 杨峰峰.不同营养盐条件下有机碳源对铜绿微囊藻的生长影响研究[D].上海:上海交通大学,2012:9-17.(YANG Feng feng. Study on the Effects of Organic Carbon Sources on the Growth of Microcystis Aeruginosa under Different Nutrient Conditions [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012: 9-17. (in Chinese))
- [16] 潘继征,熊飞,李文朝,等.云南抚仙湖透明度的时空变化及影响因素分析[J].湖泊科学,2008,20(5):681-686.(PAN Ji zheng, XIONG Fei, LI Wen chao, et al. Spatial temporal dynamic changes of the water transparency and their influencing factors in Lake Fuxian, Yunnan Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(5): 681-686. (in Chinese))
- [17] 苗长春,顾华,楼春华,等.北京动物园水体富营养化影响因子多元回归分析[J].北京水务,2012(6):27-31.(MIAO Chang chun, GU Hua, LOU Chun hua, et al. Analysis of impact factors of eutrophication in the water body of Beijing Zoo using multiple linear regression model [J]. Beijing Water, 2012(6): 27-31. (in Chinese))