

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2018.06.17

滨江游乐场人工湖水体富营养化整治措施研究

邵咏絮^{1,2}, 逢勇^{1,2}, 宋为威^{1,2}

(1. 河海大学 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对我国城市河流水体污染严重、富营养化频发等突出问题,以镇江市典型游乐场景观河流魔幻海洋世界为例,构建粒子追踪、水动力和水质及富营养化数值模型,模拟了无引水、泵引、自引对水动力、水质的改善情况,结果表明:粒子在3种风向下的停留时间为东风>东南风>南风,其中粒子在东风下最大停留时间为125 h,在东南风下最大停留时间为115 h,在南风下最大停留时间为95 h;无引水时,3个风向条件下中心景观湖区流速均较小,沿岸水深较浅处受风速影响较大,在不同风向下呈现出稍大流速;泵引时,连续泵引30 h的水质好于20 h;自引时,引江河道与人工湖水位差 Δh 越大,人工湖水质越好。

关键词: 水动力;数值模拟;富营养化;景观用水

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)06-0113-09

Research on eutrophication treatment methods of artificial lake in riverside playground

SHAO Yongxu^{1,2}, PANG Yong^{1,2}, SONG Weiwei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Aiming at solving the outstanding problems such as the serious pollution of urban rivers in China and the frequent occurrence of eutrophication, a numerical model of particle tracking, hydrodynamics, water quality and eutrophication was constructed. Taking the Magical Ocean World, a typical playground landscape river in Zhenjiang City as an example, the improvement of hydrodynamics and water quality without water diversion, pumping, and self-diversion was simulated. The results showed that the residence time of particles in the three winds was east wind > southeast wind > south wind. The maximum residence time of particles in the east wind was 125 h, the maximum residence time in the southeast wind was 115 h, and the maximum residence time in the south wind was 95 h. When there is no water diversion, the velocity of the central landscape lake area was smaller under the three wind field conditions, and the water depth at the coast was more affected by the wind speed than at the shallow depth, and slightly higher velocity was shown downward in different winds. With pumping, the water pumped continuously for 30 h was better than that of 20 h. For self-diversion, the greater the difference Δh between the water level of the river and the artificial lake, the better the water quality of the artificial lake.

Key words: hydrodynamics; numerical simulation; eutrophication; landscape used water

1 研究背景

湖泊、水库等封闭式水体的富营养化问题已逐

渐成为一个全球性的水环境问题^[1]。湖体富营养化将带来藻类的爆发,影响藻类生长不仅包括物理、化学和生物等外部因素,比如营养盐类、水温、阳光、

收稿日期:2018-04-08; 修回日期:2018-08-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51179053)、江苏高校优势学科建设工程项目、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX17_0417)

作者简介:邵咏絮(1993-),女,湖南娄底人,硕士研究生,主要从事水环境数学模拟研究。

通讯作者:逢勇(1958-),男,山东胶南人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为水资源规划与评价。

透明度和 pH 值等,同时水体中的水动力条件也对富营养化有影响,比如流速^[2]、流量^[3]和 水体扰动^[4]等。湖泊富营养化防治经历了从营养盐的控制、直接进行除藻,再到对生物进行调控、实施生态工程及进行生态恢复等过程^[5]。从 20 世纪 60 年代起,富营养化模型经历了单层、单室、单成分、零维模型到多层、多室、多成分、三维模型的技术发展^[6]。同时,随着监测、计算等技术的发展,湖泊富营养化水质预测模型也得到较大发展,目前模拟河湖水动力过程的模型有很多,比如 MIKE、EFDC、QUAL2K 及 WASP 等^[7]。

本文以镇江市典型游乐场景观河流魔幻海洋世界为例,主要通过二维水动力/水生态模型,开展对镇江市魔幻海洋世界水动力、水质改善措施的研究。

2 研究区域与方法

2.1 研究区域

镇江位于东经 119°28',北纬 32°15',属暖温带向北亚热带过渡的季风气候,属半湿润区,湿润温和,四季分明,雨量适中,多年平均降雨量为 1 043.8 mm,年平均年蒸发量为 925.4 mm,年内最大日蒸发量一般发生在 7、8 月,最小蒸发量一般发生在每年的 1 月份。历年来平均气温 15.4℃,历史最高气温 40.9℃,最低气温 -12℃。日照比较充实,多年平均日照时数为 2 073.8 h,年日照百分率为 47~49%。根据统计资料,全年主导风向 E、ENE、ESE(各 9%),多年夏季主导风向 ESE(13%),多年冬季主导风向 ENE(9%)。镇江市盛行为东北到东偏南向风,其平均风速偏大,常年平均风速 3.4 m/s。引江航道的 COD、氨氮、TP、TN 和叶绿素 a(Chl-a)的浓度分别为 3.03、0.15、0.039、1.182 及 0.016 mg/L。

镇江魔幻海洋世界项目所在地块,北为引航道西岸,南为原试办引河,东南侧为金山湖,地块三面环水,项目面积 $10 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。目前项目尚未建成,本文研究内容从规划角度出发,从建设合理性进行论证,对运营后的水质进行预测,以防止出现游乐场水质富营养化及水质满足娱乐用水要求,从而为镇江魔幻海洋世界项目的后期管理提供科学依据。研究区域周边水系和水利工程见图 1,项目涉水区 内水系、水利工程及土地利用情况见图 2。

2.2 计算模型

(1)二维水动力、水质及富营养化模型。计算模型主要包括水动力二维模型、水质及富营养化模型计算。笛卡尔坐标系下的二维水动力控制方程是

不可压流体三维雷诺 Navier-Stokes 平均方程沿水深方向积分的连续方程和动量方程^[8]。水质模型是以质量平衡方程为基础的。由于三维水质输移方程包涵很多不可确定的参数,在现有条件下,模型的验证存在困难,考虑到资料及模型计算工作量等因素,采用垂向平均的二维水质模型^[9-10]。在富营养化模型计算中,Chl-a 的含量是水体富营养化评价的重要指标,主要会受到温度、光照、降水量、酸碱度和营养盐的影响,因而本文以 Chl-a 浓度作为评价指标,考察营养盐浓度对藻类生长的影响。

(2)模型水质及富营养化参数。光照强度与太阳辐射能量、日照时数、云量有关。日照时数选用邻近城市逐日实测值,结合相关经验公式,求得光照强度,作为模型计算值。水质参数见表 1。

表 1 水质主要模型参数取值表

序号	参数	取值
1	叶绿素 a 生长速率/ d^{-1}	1.8
2	叶绿素 a 沉降速率/ d^{-1}	0.11
3	沉积物耗氧量/ d^{-1}	0.5
4	氨氮硝化需氧量/ $(\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	3.42
5	亚硝氮硝化需氧量/ $(\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	1.14
6	脱氮反应速率/ d^{-1}	0.1
7	磷酸盐降解速率/ $[\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}]$	0.06

根据规划,项目完成后只有游客在各旅游环节会产生一些面源污染。根据《旅游者排污行为与旅游区水环境干扰模式研究》,旅游季主要集中在 5 月到 10 月,大量旅游生活污水和种种废弃物不断通过各种途径进入研究区域水体中,该期间游人行为主要集中在为观鱼喂鱼和水上娱乐项目(游船)等。计算得游乐场主要环节污染物浓度见表 2。

表 2 游乐场主要环节污染物浓度(mg/L)

活动场所	总氮(TN)	总磷(TP)	化学需氧量(COD)
景点摊贩	0.63	0.16	2.84
水上巴士	1.96	0.25	3.09
海洋世界	1.14	0.19	2.84
极地旱雪	1.54	0.26	2.41
水街商业区	1.89	0.23	2.94
厕所	0.53	0.08	0.68

2.3 地形概化

本文采用三、四边形混合网格将镇江市魔幻海洋世界划分了 3 812 个网格,网格间距为 8~10 m 左右^[11-13]。假定初始时刻湖面是静止的,没有扰动,时

间步长 $\Delta t = 60$ s。模型网格以及地形高程示意图 3。

2.4 方案设置

为保障涉水区水质及富营养化满足景观娱乐用水要求,提出两种引水方案控制涉水区水体富营养化,分别如下:

(1)自引方案:当长江水位高于金山湖开闸(机)水位 0.3 m 时,利用入口 1、入口 2 与出口(位置及自引路线见图 4)间的水位差,通过自流方式引水进入涉水区,改善涉水区水质及富营养化。

模型边界条件:初始水位为 2.67 m,初始温度为 28℃,初始流速为 0。

(2)泵引方案:通过 1[#]泵站引江航道水进入涉水区,改善涉水区水体水质及富营养化状况,“三闸一涵”的位置见图 2,规格参数见表 3。

涉水区库容约 $35 \times 10^4 \text{ m}^3$,1[#]水泵单台泵引水设计流量为 $1.85 \text{ m}^3/\text{s}$,初步计算开双泵引水 27 h 即可换水一次,因泵引流量小,不会对水上船只运行等娱乐活动造成影响,所以可以持续泵引。为了保证水体被完全置换,拟定泵引持续时长为 30 h。如果关闭 1[#]

闸,开启 1[#]泵、2[#]闸、3[#]闸 4[#]涵对整个涉水区泵引换水,则大部分水都将从 2[#]闸流出,不能对摩崖区进行有效的换水,因此要对三闸一涵合理调配才能使水体得到彻底的更换;又因为水街区 + 中心景观湖区库容:摩崖区库容 $\approx 3: 1$,所以设计泵引方式为第 1 天 0 点至 22 点(持续 22 h)冲洗水街区和中心景观湖区,第 1 天 22 点至第 2 天 6 点(持续 8 h)冲洗摩崖区。泵引期间“三闸一涵”及泵开关情况见表 4。

镇江魔幻海洋世界受风场影响,但由于风速风向的变化范围较大,难以形成稳定流场,致使得到的湖流规律性不是很好。为了较好地反映风场对涉水区流场的影响,在模型模拟中采用 3 种频率较高的风速风向,风向分别为 E、SE、S,风速均为 3.4 m/s ,模拟这 3 种风向无引水条件下涉水区流场、水质及富营养化,由于涉水区面积小,引水流量较大,涉水区流场主要受到引水影响,风向对流场影响几乎可以忽略不计,所以仅模拟风频最大的东南风条件下泵引与自引涉水区流场、水质及富营养化。模型计算方案见表 5。

表 3 “三闸一涵”规格参数

序号	规格尺寸	备注
1#闸站	1 [#] 闸 净宽 9 m,闸底板顶高程 1.2 m	水闸无行洪排涝功能
	1 [#] 泵 单台泵流量 $1.55 \text{ m}^3/\text{s}$ (排)/ $1.85 \text{ m}^3/\text{s}$ (引),共两台	1 [#] 闸、泵联合构建
	2 [#] 闸 净宽 10 m,底板顶高程 1.0 m	水闸无行洪排涝功能
	3 [#] 闸 净宽 9 m,底板顶高程 1.5 m	水闸无行洪排涝功能
	4 [#] 涵洞 净尺寸为 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$	涵洞本身含闸

表 4 泵引期各时段“三闸一涵”及泵开关情况

时段	泵	1 [#] 闸	2 [#] 闸	3 [#] 闸	4 [#] 涵	备注
泵引前	关	开	开	开	开	
00:00 - 22:00	开	关	开	关	关	冲洗水街和中心景观湖区
22:00 - 次日 06:00	开	关	关	开	开	冲洗全涉水区
次日 06:00 - 次日 07:00	关	关	开	开	开	保持 1 [#] 闸关闭 1 h 防止水倒流
泵引后	关	开	开	开	开	开推流泵

表 5 模型计算方案

方案	风向	风速	温度	引水方式
1	东风、东南风、南风	3.4 m/s	28℃	无引水
2	东南风			泵引
3	东南风			自引

3 结果与讨论

3.1 粒子追踪

结合粒子追踪,在河道入口 2[#]处放置了 4 个粒

子,每个粒子在流场中的运动轨迹及每隔 5 h 在流场的位置见图 5。

分析 3 种风向下粒子追踪与停留时间图可知:

(1)粒子在 3 种风向下粒子的停留时间为东风 > 东南风 > 南风。其中粒子在东风下最大停留时间为 125 h,在东南风下最大停留时间为 115 h,在南风下最大停留时间为 95 h。

(2)粒子在 3 种风向下均不通过摩崖区,几乎所有粒子都是通过中心景观湖区进入水街一区、二区再

进入引江航道,仅在东风作用下有一粒子附着在涉水区东侧岸边。

(3)粒子在景观中心湖区均出现了往复的情况,但最终还是通过水街区流出。

3.2 水动力变化

3.2.1 无引水条件下涉水区流场计算分析 利用构建的镇江魔幻海洋世界水量数学模型,根据上述镇江魔幻海洋世界流场计算方案,计算得到无引水方案下不同风向条件下镇江魔幻海洋世界湖区流场见图6,不同风向条件下模型模拟10d均能形成稳定流场。

由图6分析稳定后不引水镇江魔幻海洋世界的流场可知:

(1)3个风向条件下中心景观湖区流速均较小,沿岸水深较浅处受风速影响较大,在不同风向下呈现出稍大流速。

(2)3个风向条件下摩崖景区段流场流速很小,仅表面流随风向有轻微移动。

(3)在东风作用下,由于该风向与水街一、二、三期河道垂直,导致流速几乎为0,而在东南风及南风作用下水街一、二期流速变大。

3.2.2 泵引水条件下涉水区流场计算分析 结合历年风场资料,取最常见的东南风模拟出泵引22、30h后涉水区流场图,见图7~8。由图7~8可知:

(1)引水22h,在中心景观湖西侧由于交界口涉水区骤然变宽,使得水流从运动波变为扩散波,沿着扩散波的方向,相应流量发生变化,流速减小。中心景观湖中区和东区由于水流逐渐稳定,流速也有所恢复。

(2)引水30h,关闭2#闸,开3#闸和4#涵洞,冲洗摩崖区,摩崖区及出口区流速变大,河道水体很快得到交换,在涉水区东南部位河流转弯处及摩崖区中部,由于宽度比平均河道宽,速度相对减慢。2#闸由于关闭附近形成滞流区。

3.2.3 自引水条件下涉水区流场计算分析 结合历年风场资料,取最常见的东南风模拟出涉水区入口1、入口2与出口水位差(用 Δh 表示,下同)为0.3m时流场图见图9。分析稳定后自引条件下的镇江魔幻海洋世界流场可知:

(1)摩崖区的流场在整个涉水区最大,其次是水街区,中心景观湖区流速较小,且部分地区流速小于0.01m/s,存在滞流区。

(2)对于水街区,水流从河道入口1进入流场,大部分水流通过水街二区、一区进入景观中心湖区,少部分流经水街三区,可知水街二区、一区的流速大于三区。

3.3 水质及富营养化变化

3.3.1 无引水条件下涉水区水质及富营养化计算分析 不同风向条件下模型达到完全稳定状态后得到的涉水区Chl-a分布见图10,TN分布见图11,TP分布见图12,富营养评价综合得分见图13。

(1)3种风向下Chl-a、TN、TP浓度和富营养化综合得分分别为0.014、1.49、0.11mg/L和58.0分。与流场相契合,3种常风风向无引水条件下,水街区、摩崖区以及与涵洞连接的出口区域的水体水质得不到有效地交换,水流滞留导致水体Chl-a、TN、TP含量均较高。

(2)东风无引水条件下,由于该风向与水街一、二、三期河道垂直,该区域水体Chl-a、TN、TP含量均比其他两个方向的大;东风、东南风条件下,中心湖区Chl-a、TN、TP含量较南风条件下好,前两个风向下中心湖区水体受2#闸门入流的影响较大,中心湖区水体水质一定程度上得到改善;而受出口入流的影响,南风作用下出口区水质较好的范围最大,其次为东南风,最后为东风。

3.3.2 泵引水条件下涉水区水质及富营养化计算分析 泵引水22h后得到的涉水区Chl-a、TN、TP浓度及富营养化综合评分见图14,泵引水30h后得到的涉水区Chl-a、TN、TP浓度及富营养化综合评分见图15。

由图14可知:除局部岸边滞留区,东部湖区水体整体得到明显改善,水街区和中心景观湖区的Chl-a、TN、TP均显著降低,分别为0.01、1.42、0.06mg/L,富营养化综合评分为51.4分。富营养化得分明显降低,为轻度富营养化。

由图15可知:泵引水30h,摩崖区水体水质得到明显改善,水街区和中心景观湖区的Chl-a、TN、TP均显著降低,分别为0.009、1.36、0.02mg/L,富营养化综合评分为47.7分。说明引水对湖区水体水质改善效果明显。

3.3.3 自引水条件下涉水区水质及富营养化计算分析 自引条件下涉水区Chl-a、TN、TP浓度及富营养化综合评分图见图16,由图16可知:

(1)自引水对流场水质的改善十分迅速和明显,整个流场的水质与流场规律契合。 Δh 越大流速越大水质越好富营养化评价得分越低。

(2)对于整个涉水区,在自引期间,Chl-a、TN、TP浓度和富营养化综合得分分别为0.01、1.57、0.03mg/L和49.8分。中心景观湖区和水街三区的水质相对较差,易发生富营养化。



图 1 研究区域周边水系和水利工程图



图 2 项目涉水区水系、水利工程及土地利用情况图

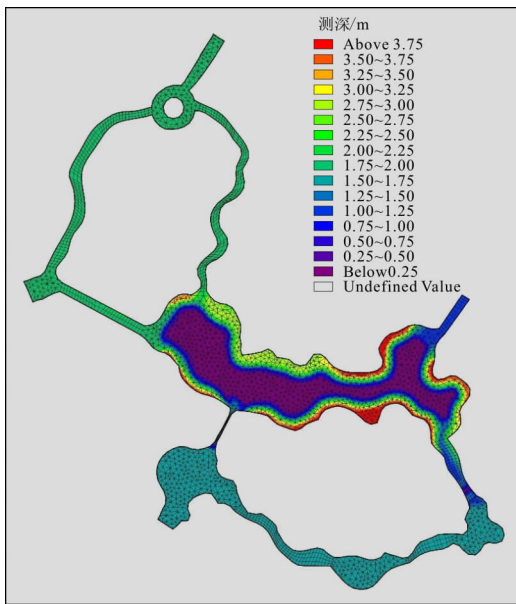


图 3 模型区域网格及地形高程示意图

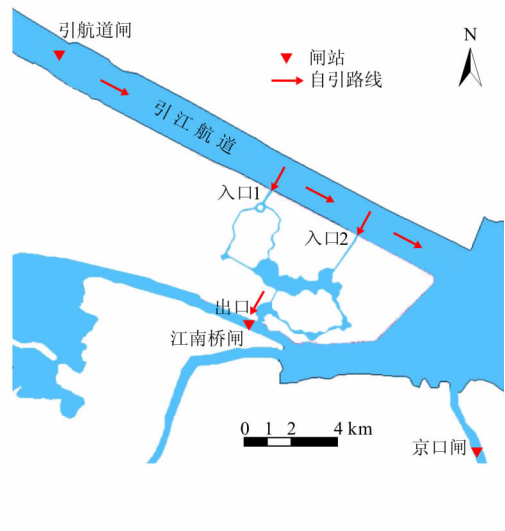


图 4 自引线路图

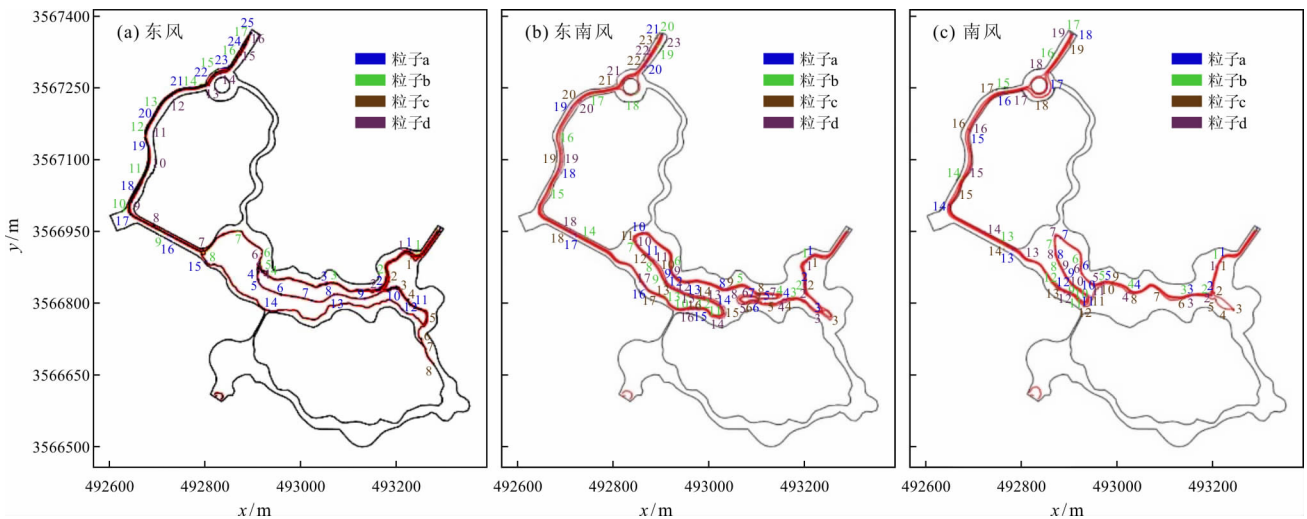


图 5 不同风向下粒子追踪与停留时间图

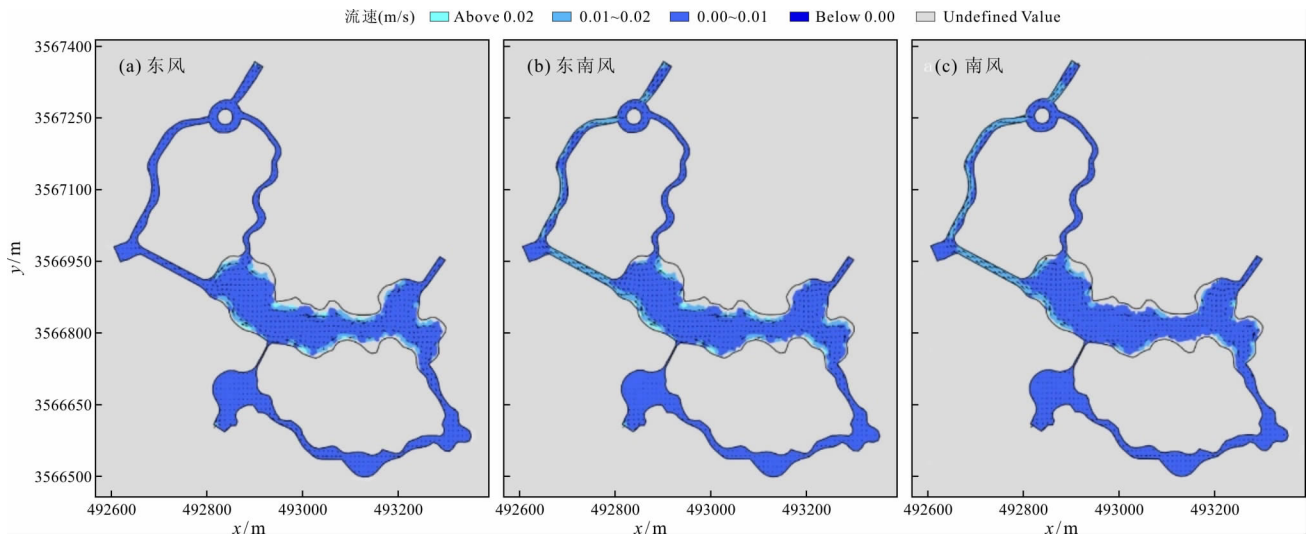


图6 不同风向条件下无引水流速分布

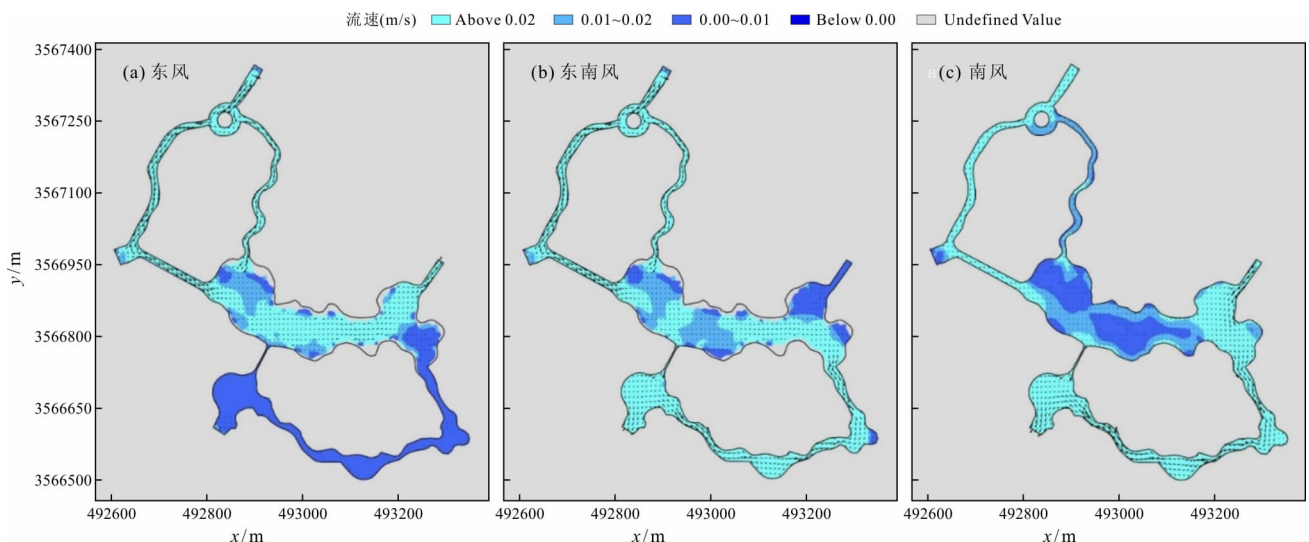


图7 泵引水 22 h 流场图

图8 泵引水 30 h 流场图

图9 自引条件下流场图

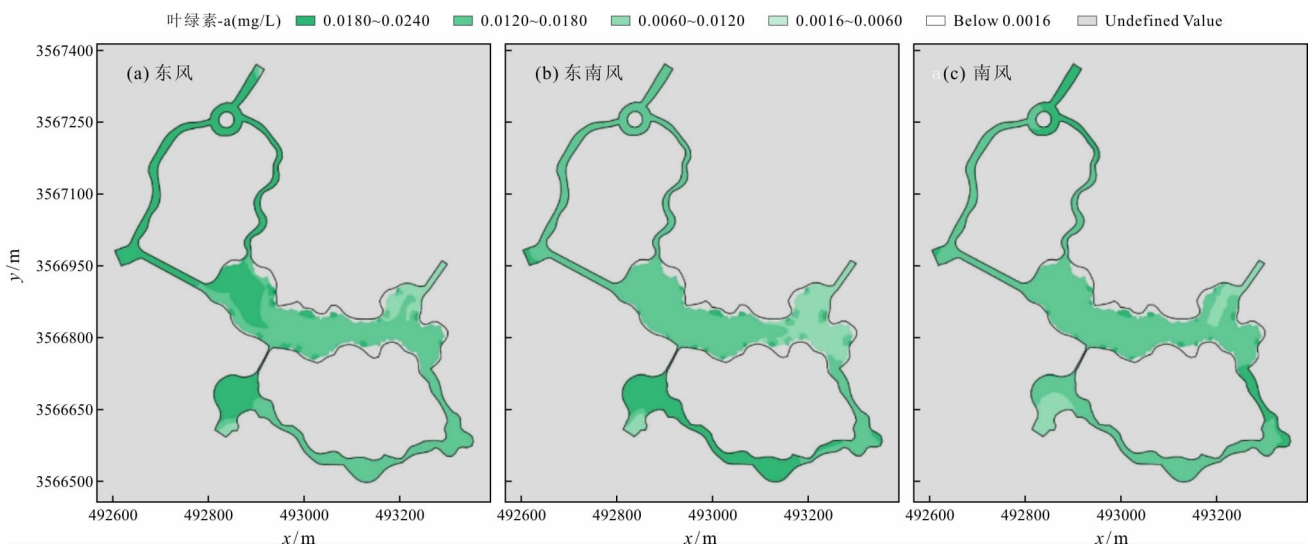


图10 不同风向条件下无引水 Chl - a 分布图

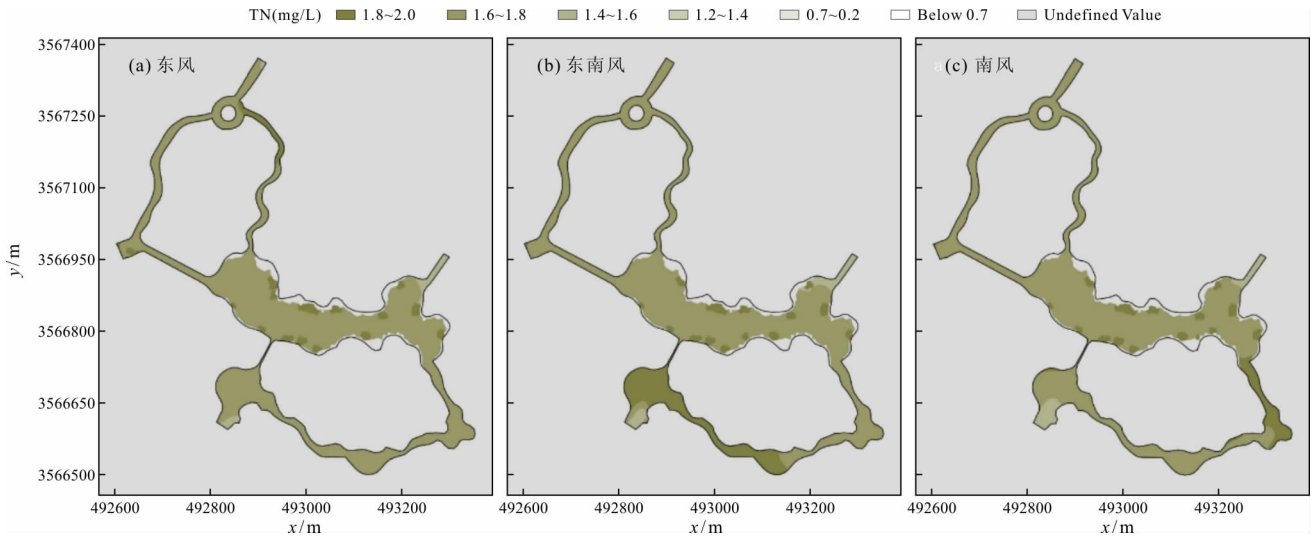


图 11 不同风向条件下无引水 TN 分布图

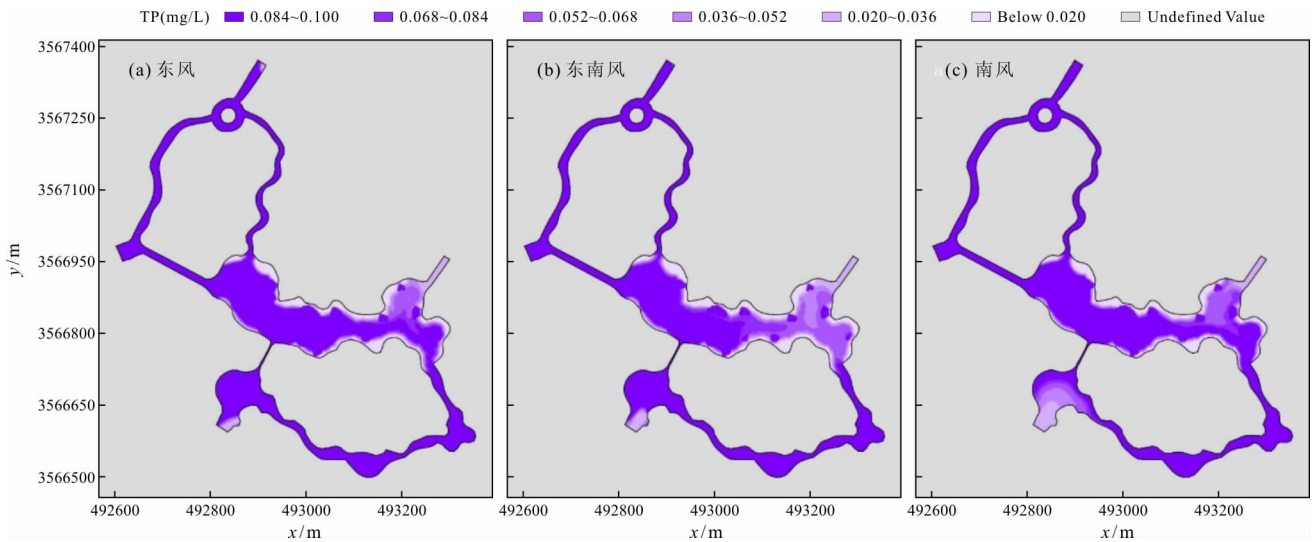


图 12 不同风向条件下无引水 TP 分布图

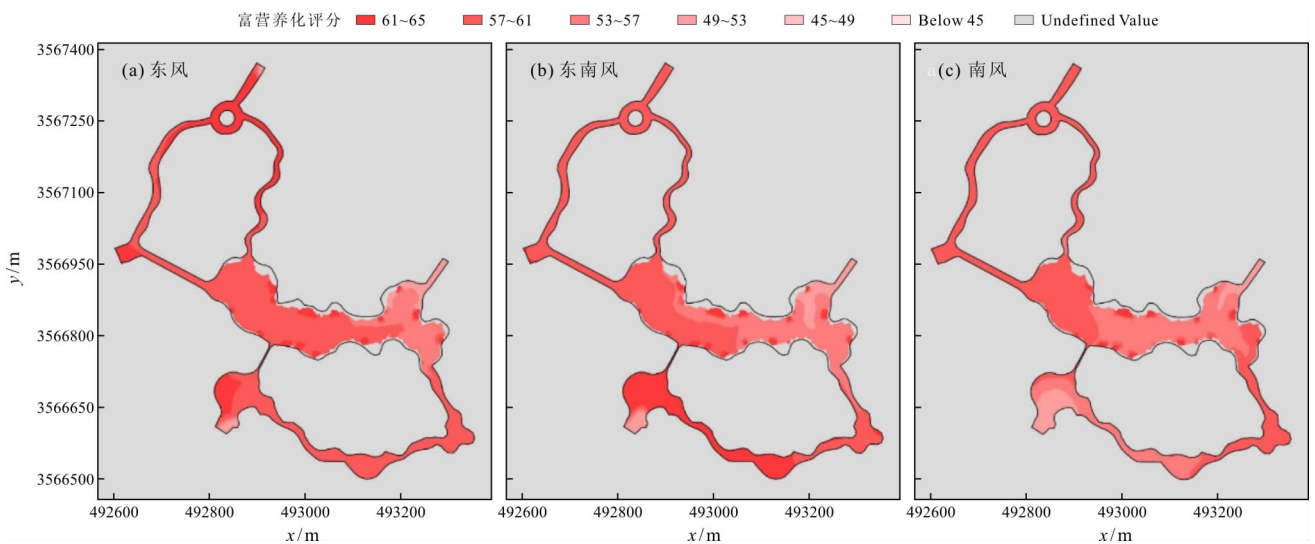


图 13 不同风向条件下无引水富营养化综合得分图

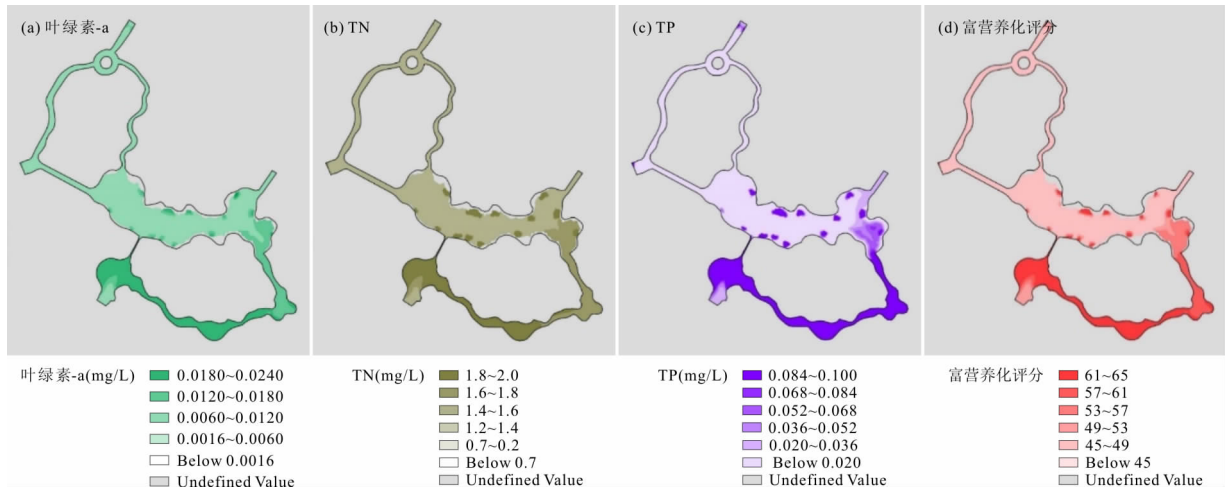


图 14 泵引水 22 h 后 Chl - a、TN、TP 和富营养化综合得分

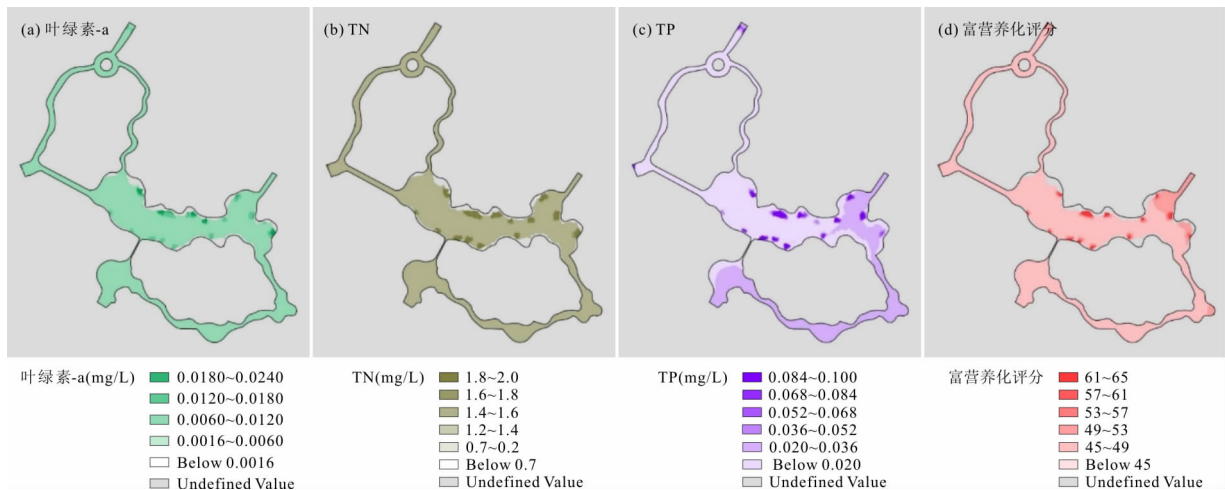


图 15 泵引水 30 h 后 Chl - a、TN、TP 和富营养化综合得分

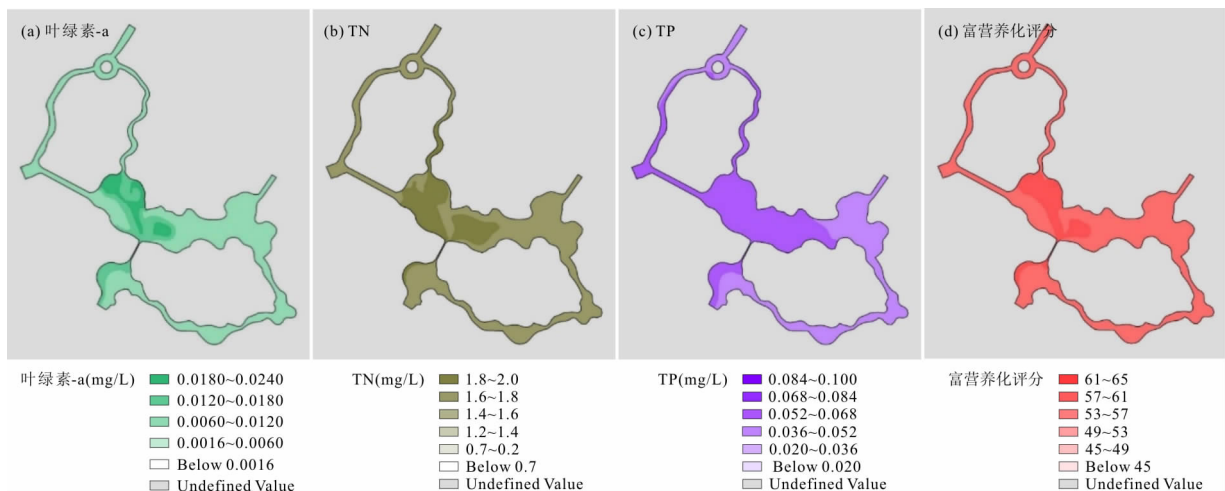


图 16 自引水条件下 Chl - a、TN、TP 和富营养化综合得分

4 结论

(1) 粒子在 3 种风向下的停留时间为东风 > 东南

风 > 南风。其中粒子在东风下最大停留时间为 125 h, 在东南风下最大停留时间为 115 h, 在南风下最大停留时间为 95 h。粒子在 3 种风向下均不通过摩崖

区,几乎所有粒子都是通过中心景观湖区进入水街一区、二区再进入引江航道,仅在东风作用下有1粒子附着在涉水区东侧岸边。粒子在景观中心湖区均出现了往复的情况,但最终还是通过水街区流出。

(2)分析水动力、水质及富营养化表明:无引水时,3个风向条件下中心景观湖区流速均较小,沿岸水深较浅处受风速影响较大,在不同风向下呈现出稍大流速。泵引水时,连续泵引30h的水质好于20h。自引水时,引江河道与人工湖水位差 Δh 越大,人工湖水质越好。

参考文献:

- [1] 吕文,孙瑞瑞,王诚,等. 阳澄湖西湖水源地富营养化时空变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3):87-90.
- [2] SONG Weiwei, XU Qing, FU Xingqian, et al. Research on the relationship between water diversion and water quality of Xuanwu Lake, China. [J]. International Journal of Environmental Research & Public Health, 2018, 15(6): 1262-1288.
- [3] WANG Xue, PANG Yong, WANG Xiao, et al. Study of water environmental cumulative risk assessment based on control unit and management platform application in plain river network[J]. Sustainability, 2017, 9(6):975-991.
- [4] NIU Yong, NIU Yuan, YU Hui, et al. Concentration distribution and toxicity of heavy metals in surface sediment of poyang lake, China[J]. Wetlands, 2017(2):1-8.
- [5] 张鹏飞,岳焱,侯嫔,等. 人工湖水体富营养化的活性炭处理技术及生态修复建议[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(2):92-98.
- [6] 姜龙杰,陈琳,邱云鹏,等. 溧水水库型饮用水水源地水环境现状及污染源分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5):93-99.
- [7] 李一平,邱利,唐春燕,等. 湖泊水动力模型外部输入条件不确定性和敏感性分析[J]. 中国环境科学, 2014, 34(2):410-416.
- [8] 王瑶瑶,逢勇,黄亚文,等. 围隔导流对太湖蓬坑湾藻类富集效能的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(6):42-47.
- [9] 毕良芹,逢勇,罗缙. 落蓬湾断面水质达标及胥河水环境容量研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5):124-128.
- [10] 刘一童,逢勇,肖洵. 南京市鼓楼区入江断面水质达标方案的研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3):99-104.
- [11] 宋为威,逢勇. 秦淮河流域控源截污与生态补水联合效应研究[J]. 水力发电学报, 2018, 37(1):31-39.
- [12] 张鹏,逢勇,石成春,等. 闽江下游水质变化趋势分析[J]. 水资源保护, 2018, 34(1):64-69.
- [13] 宋为威,逢勇. 基于国考七桥瓮断面水质达标秦淮河流域水环境容量计算[J]. 中国农村水利水电, 2017(10):80-84.
- [16] HELMS J R, STUBBINS A, RITCHIE J D, et al. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter[J]. Limnology & Oceanography, 2008, 53(3):955-969.
- [17] MARKAGER S, VINCENT W F. Spectral light attenuation and the absorption of UV and blue light in natural waters [J]. Limnology & Oceanography, 2000, 45(3):642-650.
- [18] STEDMON C A, MARKAGER S, KASS H. Optical properties and signatures of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in danish coastal waters[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2000, 51(2):267-278.
- [19] YANG L, GUO W, CHEN N, et al. Influence of a summer storm event on the flux and composition of dissolved organic matter in a subtropical river, China[J]. Applied Geochemistry, 2013, 28(3):164-171.
- [20] 周雯,吴琮瑜,高少凌,等. 2005年夏季台湾海峡南部有色溶解有机物质吸收特征及其来源初探[J]. 厦门大学学报(自然版), 2007, 46(4):86-86.
- [21] HAYASE K, SHINOZUKA N. Vertical distribution of fluorescent organic matter along with AOU and nutrients in the equatorial Central Pacific [J]. Marine Chemistry, 1995, 48(3-4):283-290.
- [22] 周红. 三峡水库小江回水区水体光学特征与溶解性有机物的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010.
- [23] 余果,廖珊,付东洋,等. 湛江港湾及邻近海域有色溶解有机物光谱吸收特性分析[J]. 广东海洋大学学报, 2017, 37(4):123-127.
- [24] 白莹. 黄东海春秋季节有色溶解有机物(CDOM)的分布特征及季节变化的研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2014.
- [25] BOSS E, PEGAU W S, ZANEVELD J R V, et al. Spatial and temporal variability of absorption by dissolved material at a continental shelf[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2001, 106(C5):9499-9507.
- [26] 朱伟健. 长江口及邻近海域有色溶解有机物(CDOM)的光学特性和遥感反演的初步研究[D]. 上海:华东师范大学, 2010.

(上接第105页)