

基于海绵城市理念的上海长兴岛封闭人工湖生态设计研究

Ecological Design of Closed Artificial Lake Based on Sponge City in Changxing Island, Shanghai

边翡斐
BIAN Feifei

(上海园林(集团)有限公司, 上海200335)
(Shanghai Garden (Group) Co., Ltd, Shanghai, China, 200335)

文章编号: 1000-0283(2022)07-0108-07
DOI: 10.12193/j.laing.2022.07.0108.013
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2022-03-16
修回日期: 2022-06-02

摘要

为维持封闭人工湖的景观水体水量平衡和水质稳定, 采用海绵城市建设的技术手段, 探讨封闭人工湖的生态设计思路, 以指导城市封闭水体的生态修复。以上海长兴岛工业园区封闭人工湖为对象, 根据崇明当地气象资料和项目设计现状, 分析项目区域的水量平衡、水动力模拟和水生态构建。结果表明, 人工湖汇流区域内全年有8个月需要外界补水, 最大补充水量为80.6 m³/d, 可由667 m²潜流人工湿地处理外源补充水。受进水量大小影响, 水流速度为0~0.02 m/s, 岸线曲折凹陷处有多处缓流区; 挺水植物以鸂尾、梭鱼草、灯心草等低矮型挺水植物为主, 点缀千屈菜、水烛、水生美人蕉等株高1 m以上的种类; 浮叶和沉水植物以睡莲、苦草、金鱼藻、黑藻等为主, 形成层次丰富、错落有致的水生植被带。通过水动力优化、人工湿地处理和水生植被构建的方案设计, 维护封闭人工湖的水资源稳定, 净化水体水质。

关键词

景观水体; 补充水; 水生植被带; 人工湿地

Abstract

In order to maintain the water balance and water quality stability of the landscape water body in the closed artificial lake, the technical means of sponge city construction is adopted to explore the ecological design so that it could guide the ecological restoration of the urban closed water body. The water balance, hydrodynamic simulation, and ecological water construction of a closed artificial lake on Changxing Island according to the local meteorological data of Chongming and the current situation of the project design were analyzed in this study. The results showed that the artificial lake catchment area was supplemented by external water for eight months of the year. The maximum water demand was 80.6 m³ per day. There were 667 m² subsurface flow constructed wetlands designed to treat external supplement water. The flow velocity was 0~0.02 m/s, and the overall flow velocity was very slow. Emergent plants such as *Iris wilsonii*, *Pontederia cordata*, and *Juncus effuses* could be mainly planted in the slow flow area to create an ecological revetment and dotted planted with a plant height of more than 1 m, such as *Lythrum salicaria*, *Typha angustifolia*, and *Canna glauca*. Floating leaves and submerged plants were mainly *Nymphaea tetragona*, *Valisneria spiralis*, *Ceratophyllum demersum*, and *Hydrilla verticillata*. Therefore, the water resources stability and water quality health of the closed artificial lake can be maintained through the scheme design of hydrodynamic optimization, artificial wetland treatment, and aquatic vegetation construction.

Keywords

landscape water; supplement water; aquatic vegetation zone; constructed wetland

海绵城市是以“自然积存、自然渗透、自然净化”为特征的, 系统解决水环境和水生生态问题的自然方案^[1], 通过构建下凹式绿地、雨水湿地、人工水体等海绵基础设施,

实施收集、渗透、调蓄、滞留、净化、利用等措施。人工湖作为其中重要的调蓄储水设施, 长期以来侧重防洪、排涝、灌溉等水利功能, 硬化驳岸、雨水简单直排、水生态

边翡斐

1986年生/女/上海人/工程师/主要研究方向为园林景观设计

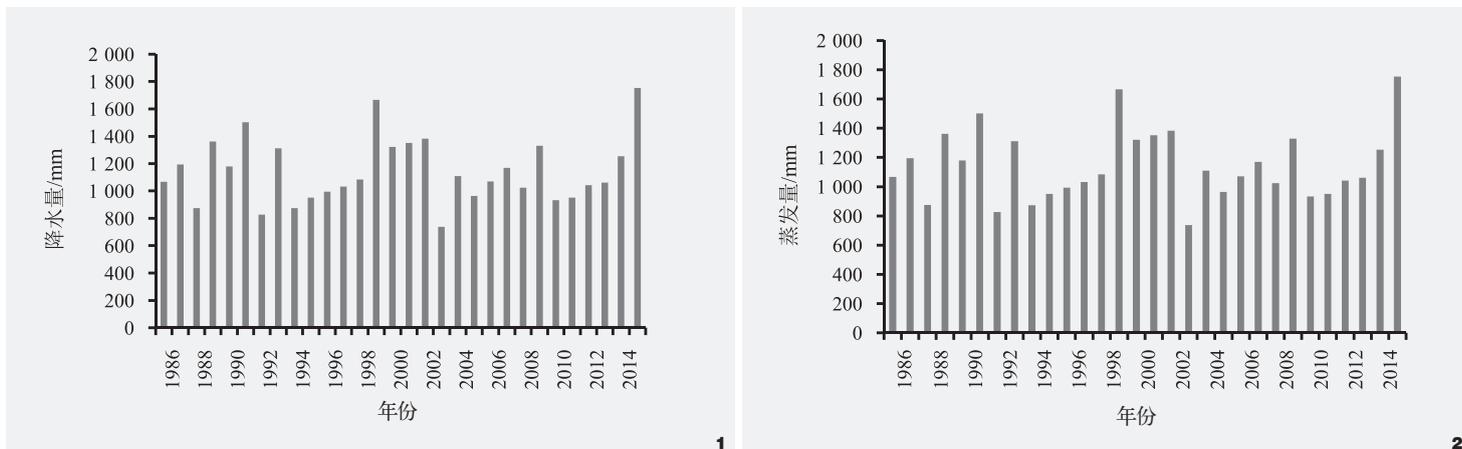


图1 崇明区1986-2015年年降水量

Fig. 1 Annual precipitation in Chongming District from 1986 to 2015

图2 崇明区1986-2015年年蒸发量

Fig. 2 Annual evaporation in Chongming District from 1986 to 2015

脆弱等现象比较普遍^[2]；还有大量的人工湖设计过于追求景观质量和管理便利，常形成封闭式水池结构，阻碍了水体与外界的交流，亟需进行生态化改造与设计^[3-4]。

当前的封闭人工湖生态设计综合利用多水源补给和多技术水质维护，如用外河补水、湖面降水、雨水径流等措施来补充水量，用人工湿地、植草沟、生物滞留设施等设施来净化水质^[5-7]。现状的周边河道大部分水质指标为劣V类，污染较为严重，不能满足人工湖的景观要求^[8]，水质处理需要依靠物理化学方法为主体的水处理工艺，且水生生物应用时以满足景观需求外来植物为主^[9]。同时，人工湖一般面积不大，流动性也较差，对水生植物分布和生长影响较大^[10]，很难通过自身的生态系统实现自我维持和净化水质^[11-13]。因此，海绵城市理念下人工湖生态设计，需要进行水量平衡和水动力分析，以确定补充水量、水体流速和水生植物分布，构建结构合理和功能高效的人工湖生态系统。

研究通过对上海长兴岛工业园区内封闭人工湖的现状分析和计算，提出人工湖水

量补充量、水动力优化和水生态处理措施，为封闭人工湖生态设计提供设计思路和参考借鉴。

1 研究对象

研究对象位于上海市崇明区长兴岛，其属于河口沙洲岛屿，东邻横沙岛，北眺崇明岛，西与“宝钢”、南与浦东外高桥隔江相望。地表土层深厚，全岛区域主要分布水稻土，中间部分属旱作灰潮土。长兴岛属海洋性气候，由于四周水体的调温作用，夏季湿润凉爽，冬季温和，雨水调匀，空气新鲜，光照充足，四季分明。年平均气温为15.4℃，年平均日照2104h，全年无霜期229d。最热月平均最高气温35.6℃，最冷月平均最低气温-5.6℃。多东南风，夏秋季受台风影响较大。根据崇明区气象局1986-2015年期间气象数据可知，该区域年降水量在826.0~1753.1mm，且呈现不规则的波动，30年的平均值为1145.8mm（图1）；蒸发量基本在977.7~1570.2mm波动，30年平均值为1290.4mm（图2）。

项目区为工业园区，用地总面积为

224206.90m²，其中景观设计总面积80432m²（图3）。绿化浇灌面积为28728m²，硬地浇灌面积为25382m²；人工湖有15000m²封闭水面，设计平均水深为2.0m，离岸边2.0m处水深0.5m，往水体中部方渐深，最深处3.0m，其他零散景观水面面积2570m²。人工湖主要用于景观水体的游憩休闲需求，并满足绿化和硬地浇灌。项目建成后补水来自周边水质基本为地表V类水的河道，甚至更差，水体透明度和各项水质指标难以满足要求，故需要通过生物强化处理来净化补充水。

2 研究方法

2.1 水量平衡计算

对人工生态系统中封闭水体采取合适的维护措施之前，需要分析系统的水量平衡。水体天然补充水有水面降水和地表径流，另外可能有湖底地下水的渗入；消耗水量包括景观浇灌用水和水面的蒸发水量。拟建场区为冲击成陆形成，海拔2.4~3.1m，地下水高，因此渗漏系数取0，即不考虑湖底渗透

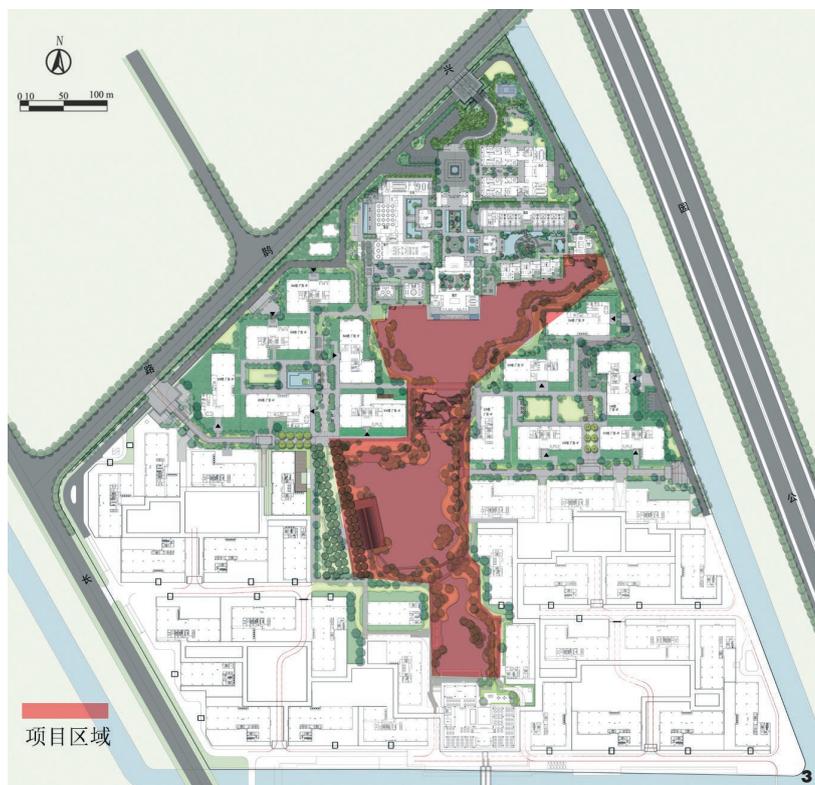


图3 项目区平面图
Fig. 3 Plan of the project area

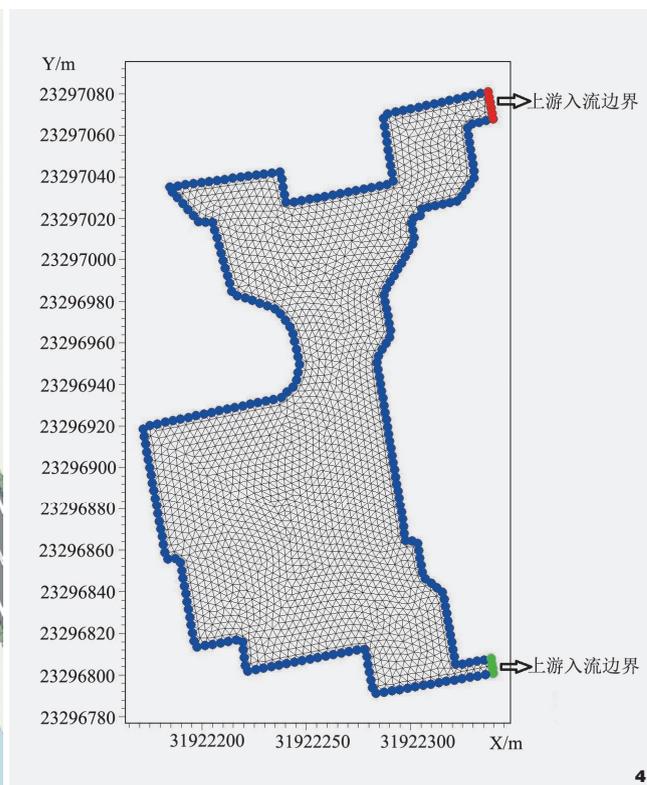


图4 项目区模型计算域网格图
Fig. 4 Grid diagram of project area model calculation domain

量。人工湖的水量平衡计算见公式(1)。

$$W = Q_l + q_1 - q_2 - q_3 \quad (1)$$

式中： W 为补充水量， Q_l 为绿化浇灌与硬地浇洒量， q_1 为蒸发水量， q_2 为水面降水量， q_3 为地表径流量。

降水量取崇明区1986-2015年间的平均值，即1 145.8 mm。从月均降水量来看，1986-2015年期间范围为38.8 ~ 199.2 mm，以6月、7月和8月最高，分别占全年降水量的17.39%、13.83%和15.49%；10月、11月、12月和1月最低，为少雨期，分别仅占全年降水量的4.51%、4.78%、3.39%和4.93% (表1)。

蒸发量取崇明区1986-2015年间的平均值，即1 290.4 mm；；但水库湖面蒸发量比气象站小型蒸发器测得值要小，据宝山站测

定结果年均值约为气象站蒸发量的73%，故设计实际蒸发量为942.0 mm。从月均蒸发量来看，1986-2015年期间月均蒸发量占全年比例为3.42% ~ 13.74%，12月、1月和2月蒸发量较小，为44.2 ~ 53.2 m³；3月、4月、10月和11月82.0 ~ 114.2 m³；5月、6月、7月、8月和9月都在100 m³以上，最高177.3 m³ (表2)。

根据有关标准和规定绿化浇灌日均用水标准为2.5 L/m²，硬地浇洒日均用水标准为2.0 L/m²，相当于一日降水量为2.5 mm和2.0 mm^[7]。1986 - 2015年平均降水量为1 145.8 mm，平均每年降水日数为159.5 d，平均每天降水量为7.18 mm。因此，可以认为有降水的日子无需进行绿化浇灌及硬地浇洒。

2.2 水动力分析

MIKE系列软件主要用于模拟水动力、水质变化等水环境问题，在国内外水环境研究领域已得到广泛应用。利用DHI MIKE二维水动力模块计算预测研究区域内的水动力分布状况，采用三角形计算网格，对于复杂岸线区域进行加密处理，最小水平分辨率可达0.20 m，计算网格中共有2 247个网格节点，包含4 206个三角形网格 (图4)。

模型模拟时长为1个月，从2020年12月1日0点至2021年1月1日0点，每0.5 h输出一次结果，计算中考虑干湿网格。研究区域水深大于1 m，运用公式(2)计算糙率系数。

$$n = n_0 + n_1/H \quad (2)$$

式中， n 为糙率系数， n_0 为河床沙粒糙

表1 崇明区1986-2015年月均降水量
Tab. 1 Average precipitation per month in Chongming District from 1986 to 2015

月份 Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
降水量/mm Precipitation	56.4	61.6	85.7	79.7	81.7	199.2	158.4	177.5	100.3	51.7	54.7	38.8
占比/% Proportion	4.93	5.37	7.48	6.95	7.13	17.39	13.83	15.49	8.76	4.51	4.78	3.39

表2 崇明区1986-2015年月均蒸发量
Tab. 2 Average evaporation per month in Chongming District from 1986 to 2015

月份 Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
蒸发量/m ³ Evaporation	44.2	52.4	82.0	114.2	150.1	132.7	177.3	170.9	131.3	108.4	73.7	53.2
占比/% Proportion	3.42	4.06	6.35	8.85	11.63	10.29	13.74	13.24	10.18	8.40	5.71	4.12

表3 封闭人工湖各月水量平衡的结果
Tab. 3 Results of water balance in each month for closed artificial lake

月份 Month	景观浇灌量/m ³ Landscape irrigation	蒸发水量/m ³ Evaporation water	水面降水量/m ³ Water surface precipitation	地表径流量/m ³ Surface runoff	补充水量/m ³ Supplement water
1	0	483.6	846.7	65.9	-429.0
2	0	574.1	923.4	71.9	-421.2
3	1 100.9	897.8	1 284.8	100.1	613.8
4	1 040.2	1 250.9	1 195.0	93.1	1 003.0
5	2 093.9	1 643.8	1 225.9	95.4	2 416.4
6	1 712.0	1 453.3	2 988.6	232.7	-56.0
7	2 031.0	1 941.2	2 376.3	185.0	1 410.9
8	1 995.0	1 870.9	2 662.2	207.3	996.4
9	2 300.6	1 437.9	1 505.1	117.1	2 116.3
10	1 408.7	1 187.1	775.3	60.4	1 760.1
11	1 330.0	806.6	821.2	63.9	1 251.5
12	0	582.7	582.1	45.3	-44.7

注：负值表示该月份因降水需从封闭人工湖向外部排水。

率系数(常数), n_1 为河床形态糙率系数(常数), H 为水深。

从 NOAA (ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa/) 获得同时期风场数据, 提高模拟准确性和边界条件完整性。根据项目设计要求, 制定两种方案进行水动力模拟, 除了入流和出流边界, 其他区域为陆地不可滑动边界。方案一: 设计要求 30 d 内循环 3 万 m³ 水量, 即每

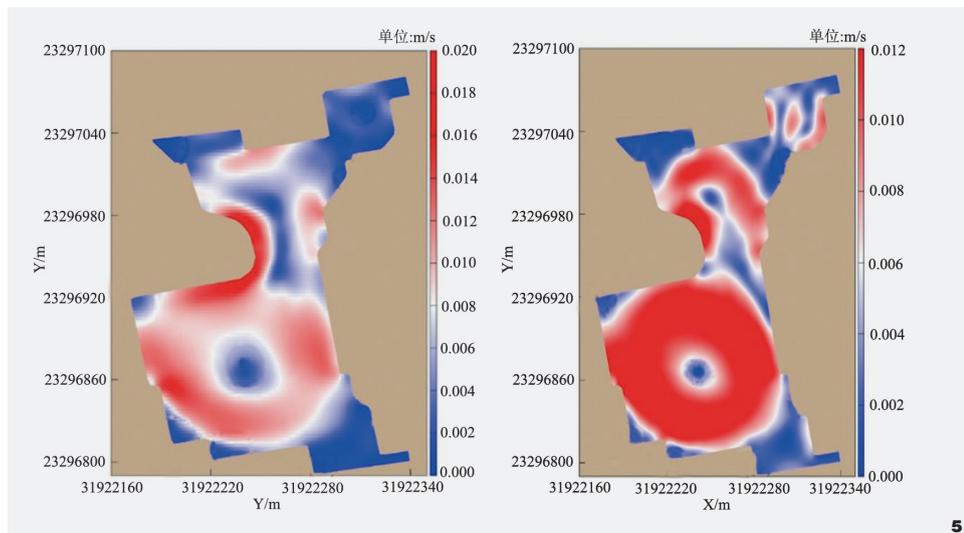
天循环 1 000 m³, 水体设计常水位 2.0 m; 方案二: 设计要求 15 d 内循环 3 万 m³ 水量, 即每天循环 2 000 m³, 水体设计常水位 2.0 m。

3 结果分析

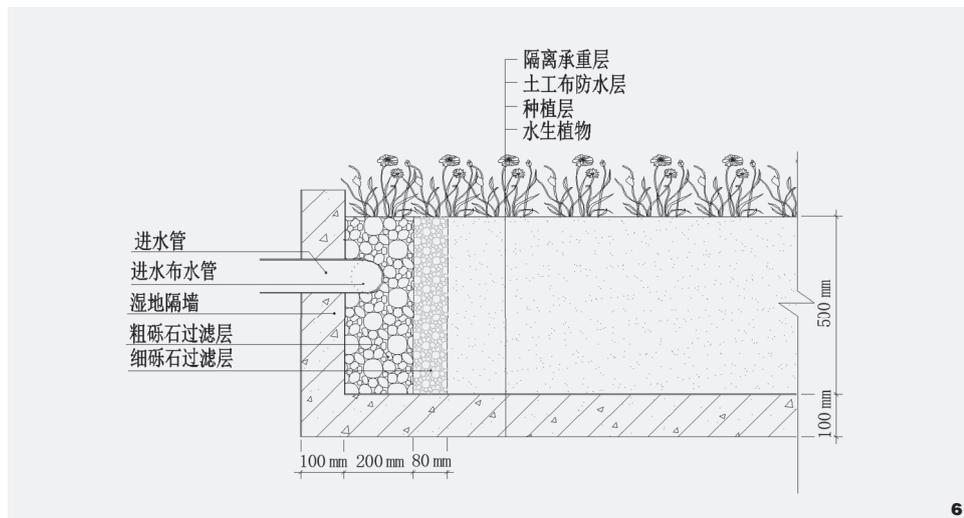
3.1 水量平衡

水量平衡计算是指对人工景观湖各类水量的收入和支出进行逐月计算分析, 以确定

人工景观湖是否能提供一定的水资源量, 实现人工湖功能并保障湖泊自身生态系统的良性发展^[4]。根据各部分水量计算值, 得出各月需要的补充水量如表 3 所示, 全年有 8 个月需要补充水量, 每月补水为 613.8 ~ 2 416.4 m³。其中 5 月份需要的补充水量最大, 为 2 416.4 m³, 则人工湖每天最大补充水量为 80.6 m³/d, 按照 10% ~ 20% 的未可预见量计算, 设计日补



5



6

图5 封闭人工湖水域流速分布图 (左: 15 d; 右: 30 d)
Fig. 5 Velocity distribution in the water area of closed artificial lake (left 15 d, right 30 d)

图6 水平潜流人工湿地设计剖面图
Fig.6 Design profile of horizontal subsurface flow constructed wetland

充水量为 $100\text{ m}^3/\text{d}$ 。

其中,绿化最高日浇灌用水量为 $71.82\text{ m}^3/\text{d}$,硬地浇洒最高日用水量 $50.76\text{ m}^3/\text{d}$,两项合计为 $122.58\text{ m}^3/\text{d}$,考虑10%未预见水量,浇灌浇洒用水量为 $134.8\text{ m}^3/\text{d}$,全年总浇灌浇洒需水量为 $1.94\text{ 万}\text{ m}^3$,每月平均值为 $1\ 618.8\text{ m}^3$ 。按照水面面积 1.5 hm^2 、全年湖面设计蒸发量 942.0 mm 和月均蒸发量比例计算,全年月蒸发水量 $1\ 177.5\text{ m}^3$,范围为 $483.6\sim 1\ 941.2\text{ m}^3$,

以7月蒸发水量最大,1月最小。按照全年降水量为 $1\ 145.8\text{ mm}$ 、降水水面面积 1.5 hm^2 和每月降水比例计算,全年月降水量为 $582.1\sim 2\ 988.6\text{ m}^3$,平均值为 $1\ 432.2\text{ m}^3$ 。10、11、12月和1月降水量少,分别为 775.3 m^3 、 821.2 m^3 、 582.1 m^3 和 846.7 m^3 ;雨季6、7、8月降水量多,分别为 $2\ 988.6\text{ m}^3$ 、 $2\ 376.3\text{ m}^3$ 和 $2\ 662.2\text{ m}^3$ 。项目景观设计总面积 $80\ 432\text{ m}^2$,扣除其他零散水面面积 $2\ 570\text{ m}^2$,按照约10%

面积进入人工湖计算,雨水的汇水面积约为 $7\ 786.2\text{ m}^2$ 。汇水面积内综合径流系数采用绿地的径流系数0.15计算,全年累计地表径流量为 $1\ 338.1\text{ m}^3$,月均变化范围为 $45.3\sim 232.7\text{ m}^3$,其中径流量在 100 m^3 以上的3、6、7、8、9等5个月份。

3.2 场地水动力

水动力是河湖水生植物分布和生长的关键因子^[12],主要受控于河湖水量、势能差异和万有引力。根据设计,人工湖水流速度为 $0\sim 0.02\text{ m/s}$,受进水流量大小的影响,导致整体流速非常小(图5)。循环周期为15 d时,整个水体岸线曲折凹陷处仍有多处缓流区,但缓流区面积和涡流中心明显减少,整个水体流速相对均衡。循环周期为30 d时,整个水体形成多处缓流区,尤其是岸线曲折凹陷处,共有三处涡流中心,水体流速非常缓慢。

3.3 人工湿地技术比选

水量平衡分析得知人工湖全年个别月份需要补充外源的地表水,进入湖区前需要设置预处理设施以达到景观水水质要求^[7]。人工湿地参数设计参考2017年住建部发布了《污水自然处理工程技术规程》(CJJ/T 54-2017)中的表面水力负荷和水力停留时间两项关键指标,具体指标和湿地面积要求如表4所示。通过比较表面流、水平潜流和垂直潜流三种不同人工湿地的表面水力负荷、水力停留时间和单位面积建设成本,发现表面流人工湿地的单位面积建设成本较低,但占地面积是水平潜流和垂直潜流的两倍;而在相同面积下,水平潜流人工湿地的单位面积建设成本相对较低。综合考虑用地需求、建设成本和处理效能,处理水量 $100\text{ m}^3/\text{d}$ 的外河补充水宜采用约 667 m^2 的水平潜流人工湿地,

表4 满足不同指标要求的人工湿地面积比较

Tab. 4 Comparison of constructed wetland area reaching the requirements of different indicators

湿地类型 Wetland type	表面水力负荷 Hydraulic surface loading		水力停留时间 Hydraulic retention time		建设成本 Construction cost
	指标/ (m ³ ·m ⁻² ·d ⁻¹) Index	面积/m ² Area	指标/d Index	面积/m ² Area	
	表面流人工湿地	≤0.08	≥1 250	≥4	
水平潜流人工湿地	≤0.25	≥400	≥2	≥667	较高
垂直潜流人工湿地	≤0.40	≥250	≥2	≥667	高

表5 上海地区常见35种水生植物的适宜水深和植株高度

Tab. 5 Suitable water depth and plant height of 35 common aquatic plants in Shanghai

序号 Number	植物名称 Plant species	适宜水深/cm Suitable water depth	植株高度/m Plant height
1	香菇草 <i>Hydrocotyle vulgaris</i>	0~5	0.2~0.3
2	金线蒲 <i>Acorus gramineus</i>	0~10	0.3~1.0
3	三白草 <i>Saururus chinensis</i>	0~15	0.3~1.0
4	石菖蒲 <i>Acorus tatarinowii</i>	0~15	0.3~1.0
5	花菖蒲 <i>Iris keampferi</i>	0~15	0.3~1.0
6	鸢尾 <i>Iris wilsonii</i>	0~15	0.3~1.0
7	矮生美人蕉 <i>Canna</i>	0~20	0.3~1.0
8	千屈菜 <i>Lythrum salicaria</i>	0~20	>1.0
9	水生美人蕉 <i>Canna glauca</i>	0~20	>1.0
10	旱伞草 <i>Cyperus alternifolius</i>	0~20	>1.0
11	再力花 <i>Thalia dealbata</i>	0~30	>1.0
12	灯心草 <i>Juncus effusus</i>	5~20	0.3~1.0
13	泽泻 <i>Alisma orientale</i>	5~25	0.3~1.0
14	慈姑 <i>Sagittaria sagittifolia</i>	5~30	0.3~1.0
15	小慈姑 <i>Sagittaria potamogetifolia</i>	5~30	0.3~1.0
16	雨久花 <i>Monochoria korsakowii</i>	10~20	0.3~1.0
17	宽叶香蒲 <i>Typha latifolia</i>	10~25	>1.0
18	黄菖蒲 <i>Iris pseudacorus</i>	0~35	>1.0
19	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	0~40	>1.0
20	梭鱼草 <i>Pontederia cordata</i>	5~35	0.3~1.0
21	芦竹 <i>Arundo donax</i>	5~35	>1.0
22	水烛 <i>Typha angustifolia</i>	5~35	>1.0
23	水葱 <i>Scirpus tabernaemontani</i>	30~35	>1.0
24	菖蒲 <i>Acorus calamus</i>	10~40	0.3~1.0
25	荷花 <i>Nelumbo nucifera</i>	20~40	>1.0
26	睡莲 <i>Nymphaea tetragona</i>	—	—
27	萍蓬草 <i>Nymphaea pumila</i>	—	—
28	荇菜 <i>Nymphoides peltata</i>	—	—
29	金银莲花 <i>Nymphoides indica</i>	—	—
30	水鳖 <i>Hydrocharis dubbia</i>	0~100	—
31	苦草 <i>Vallisneria spiralis</i>	0~200	—
32	金鱼藻 <i>Ceratophyllum demersum</i>	0~100	—
33	黑藻 <i>Hydrilla verticillata</i>	0~100	—
34	眼子菜 <i>Potamogeton distincus</i>	0~100	—
35	菹草 <i>Potamogeton crispus</i>	0~100	—

其设计效果如图6所示。

3.4 湖区水生植物配置设计

通过分析内部水体深度和流速等基本性状, 根据上海常见水生植物的适宜水深和植株高度的判断, 并参考主要水生植物对营养盐的去除能力^[7], 提出内部水生生态系统恢复的植物选择和种植设计。上海地区常见35种水生植物的适宜水深和株高范围见表5。在生态驳岸设计时, 植株高大植物可作为水景竖向设计中群落上层材料, 而植株矮小种类可作为横向设计的应用材料或居于竖向设计的下层。

在水面范围内, 睡莲、萍蓬草、荇菜、金银莲花和水鳖5种可作为生长于较深水域的水面景观材料。苦草、金鱼藻、黑藻、眼子菜和菹草5种沉水植物可作为生长较深水域的水下景观材料。

通过以上分析, 结合项目湖区湖底现状和景观需求, 共设计种植挺水植物和浮叶植物1 000 m², 主要分布在驳岸和水深0.5 m以内浅水区; 种植沉水植物15 000 m², 主要分布在水深0.5~1.2 m的水域。具体配置设计为驳岸边种植千屈菜、鸢尾、美人蕉等观花植物, 浅水区种植芦苇、芦竹、水烛、荷花、梭鱼草等挺水植物; 浮叶植物选用睡莲和荇菜等观赏植物, 沉水植物则选用苦草、黑藻、金鱼藻等乡土种类, 形成层次丰富、错落有致的湿生—挺水—浮叶—沉水植物构成的植被带。

4 讨论与结论

项目参考翟俊等^[16]水量计算公式, 采用崇明当地气象资料逐月分析降雨量和蒸发量, 结合浇灌用水和地表径流量, 计算出人工湖汇流区域内全年有8个月需要外界补水, 最

大需水量即每天最大补充水量为 $80.6\text{ m}^3/\text{d}$ ，按照 $10\% \sim 20\%$ 的损失量，设计每月补水量为 $100\text{ m}^3/\text{d}$ ；由于降雨和地表径流，也需要向外排水，日最大排水量为 $15\text{ m}^3/\text{d}$ 。同时，根据长兴岛2016-2018年监测断面水质结果存在主要污染物为氨氮，平均浓度达 2.02 mg/L （劣V类）^[16]，推荐采用人工湿地方式进行外河补水净化预处理^[12,17]，根据表面负荷水力和水力停留时间计算宜采用约 667 m^2 的水平潜流人工湿地，可达到人工湿地自然处理的水质目标。

新建人工湖蓄水初期，湖底沉积物较少，水体污染负荷主要为补水和地表径流污染，同时此阶段为TN、TP等营养盐累积高峰期^[17]，为藻类生长提供了条件，不利于水生植物的成功定植。同时，水流也能影响水生植物群落结构和物种分布，当水体流速 $< 0.1\text{ m/s}$ 时，宜种植沉水植物、浮叶植物、挺水植物；当水体流速 $> 0.9\text{ m/s}$ 时，不宜种植沉水植物和浮叶植物，可种植挺水植物^[18]。项目人工湖水流速为 $0 \sim 0.02\text{ m/s}$ ，由于受进水流量大小的影响，导致整体流速非常小，岸线曲折凹陷处有多处缓流区，易滋生藻类，会加剧水质恶化。因此，通过设计喷泉曝气系统和鱼池曝气装置，推动水体流动和增加溶解氧^[14]。利用缓流区域种植湿生和水生植物营造生态驳岸，可用鸢尾、梭鱼草、灯心草等低矮型挺水植物为主，点缀千屈菜、香蒲、美人蕉等株高 1 m 以上的种类，浮叶和沉水植物以睡莲、苦草、金鱼藻、黑藻等为主，形成层次丰富、错落有致的水生植被带^[19]；加上螺、蚌、虾等底栖生物和不同食性的鱼类，组成稳定的水生生态系统^[7,20]。

因此，参考已有研究经验和运行维护效果^[7,8,20]，针对项目补水来源周边河道劣V类水

质现状，人工湖水体现状和区域景观设计需求，提出利用潜流人工湿地处理补充水、设计曝气装置增加水动力和构建湿生—挺水—浮叶—沉水植物构成的植被带，可以有效维持Ⅲ类水标准，集成一整套适合人工湖建设初期和日常维护的技术体系。

注：文中图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] 俞孔坚, 李迪华, 袁弘, 等. “海绵城市”理论与实践[J]. 城市规划, 2015, 39(6): 26-36.
- [2] 黄玲玲, 刘滨谊. 基于海绵城市理念的园博园景观规划设计研究——以苏州太湖园博园为例[J]. 园林, 2020(4): 82-89.
- [3] 徐后涛, 赵凤斌, 张玮, 等. 城市人工湖的生态治理[J]. 环境工程学报, 2015, 9(9): 4300-4308.
- [4] 薛雨薇. 海绵城市理论及其在风景园林规划中的应用[J]. 武汉冶金管理干部学院学报, 2019, 29(1): 21-23.
- [5] 王朝宇. 海绵城市理念在河道水环境治理中的应用分析[J]. 地下水, 2020, 42(5): 308-309.
- [6] 朱义, 时珍宝. 城市绿地类型差异及其海绵城市建设技术途径[J]. 园林, 2020(8): 2-7.
- [7] 高侃侃, 万吉尔, 胡永红. 基于海绵城市的绿化技术实践与评价[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [8] 钟建红, 黄廷林, 解岳, 等. 城市河湖水质改善与保障技术研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2006, 38(6): 771-776.
- [9] 高侃侃. 城市大型景观水体水质维护系统管理优化探讨[J]. 中国园林, 2015(5): 71-74.
- [10] 张力, 王丽君, 陈亮, 等. 水生植物在水生态治理中的应用与设计[J]. 环境保护与循环经济, 2021(4): 44-49.
- [11] 周君薇, 陈一, 闻岳, 等. 上海东方体育中心人工湖水生态处理规划[J]. 中国给水排水, 2011, 27(16): 17-21.
- [12] 余帆洋, 鲁胜, 廖国庆, 等. 城市补水型人工湖生态系统构建方案初探[J]. 环境工程, 2018, 36(11): 8-12.
- [13] 高学平, 杨蕊, 张晨. 人工湖水生态系统构建方法研究[J]. 环境工程学报, 2016, 10(2): 948-954.
- [14] 唐丽虹. 福州市琴亭人工湖水量及水质保持设计[J]. 中国给水排水, 2010, 26(4): 45-48.
- [15] 翟俊, 孔花, 肖海文, 等. 城市人工景观湖的水量设计[J]. 中国给水排水, 2012, 28(12): 55-56.
- [16] 杨正东, 朱建荣, 黄菊. 崇明三岛水质空间分布和季节变化[J]. 长江技术经济, 2020(5): 85-87.
- [17] 高侃侃, 张国威, 万吉尔. 潜流人工湿地处理低污染水对植物生长的影响[J]. 净水技术, 2018(9): 120-125.
- [18] 张智, 杨冬雪, 王斌, 等. 某人工湖成库初期水环境特征研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(6): 1321-1326.
- [19] 高侃侃, 张国威. 上海辰山植物园生态驳岸的水生植被构建与应用[J]. 园林, 2017(10): 20-23.
- [20] 张勇伟. 上海辰山植物园景观水体生态净化技术集成应用[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2014,