

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.10.012

# 雄安新区孝义河河口湿地水质净化工程设计

宋凯宇<sup>1</sup>, 章粟粲<sup>1</sup>, 魏俊<sup>1</sup>, 陈奋飞<sup>1</sup>, 杨棠武<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 2. 南大<常熟>研究院有限公司, 江苏 常熟 215501)

**摘要:** 雄安新区孝义河是白洋淀八条入淀河流之一, 为保证白洋淀水质, 实施孝义河河口湿地水质净化工程, 工程设计处理规模为  $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 采用“前置沉淀生态塘+潜流湿地+表流湿地+沉水植物塘”组合处理工艺, 工程建成后将作为国内第二大水平潜流湿地。根据设计规范和设计经验预测, 当湿地来水满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) IV类标准时, 冬季 TP 去除率 $\geq 30\%$ ; 当来水满足 V 类标准时, 出水水质满足 IV 类标准; 当来水劣于 V 类标准时, 冬季 TP 去除率 $\geq 30\%$ , 其他主要超标污染物去除率 $\geq 20\%$ 。工程总占地为  $1.98 \text{ km}^2$ , 建设成本约 2 150 元/ $\text{m}^3$ , 处理成本约 0.098 元/ $\text{m}^3$ 。

**关键词:** 雄安新区; 白洋淀; 组合人工湿地

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)10-0062-08

## Design of Water Purification Project of Xiaoyi River Estuary Wetland in Xiongan New Area

SONG Kai-yu<sup>1</sup>, ZHANG Su-can<sup>1</sup>, WEI Jun<sup>1</sup>, CHEN Fen-fei<sup>1</sup>, YANG Tang-wu<sup>2</sup>

(1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 2. Nanjing University Ecological Research Institute of Changshu, Changshu 215501, China)

**Abstract:** Xiaoyi River in Xiongan New Area is one of the eight rivers flowing into Baiyang Lake. In order to purify water in Xiaoyi River, the river estuary constructed wetland project was constructed, the treatment capacity of which was  $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ . The treatment process was combined by “pre-precipitation ecological pond + subsurface wetland + surface wetland + submerged plant pond”, the project would become the second largest horizontal subsurface wetland in China. Prediction based on design specification and engineering experience, if the wetland inflow could meet the class IV standard of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838 - 2002), total phosphorus (TP) removal would be required not lower than 30% in winter; if the inflow could meet the class V standard, the effluent should meet the class IV standard; if the inflow quality is worse than the class V standard, TP removal should be above 30% in winter, and the other major over-standard pollutants removal ought to be more than 20%. The area of this project was  $1.98 \text{ km}^2$ , the construction cost of this project was 2 150 yuan/ $\text{m}^3$ , and the operation cost was 0.098 yuan/ $\text{m}^3$ .

**Key words:** Xiongan New Area; Baiyang Lake; combined constructed wetlands

### 1 项目概况

2017年4月1日,中共中央、国务院印发通知,

决定设立河北雄安新区。雄安新区定位为建设蓝绿交织、清新明亮、水城共融的生态城市,而华北平原

最大的湖泊白洋淀则是雄安新区蓝色核心。受人类活动干扰,作为“华北之肾”“华北明珠”的白洋淀,水质恶化、生态环境退化问题突出<sup>[1]</sup>,其中,水质方面,白洋淀淀区控制断面水质达标率较低,污染源主要来源于入淀河流输入及淀区内源污染。

作为八条入淀河流之一,孝义河的来水主要是污水处理厂尾水,对淀区水质影响较大。为削减孝义河上游来水污染,并与马棚淀退耕还淀生态湿地工程、孝义河新区段河道综合治理工程有机衔接,共同保障入淀河流水质达标,河北省委省政府决定在孝义河入淀河口处建设人工湿地水质净化工程。工程对于削减孝义河流域入淀污染负荷、保障白洋淀水质安全、恢复白洋淀生态环境、提升区域环境质量具有重要的作用和意义。

该湿地工程于2019年6月完成了EPC+O招标,施工期1年,运行期3年,目前处于施工阶段。工程设计处理规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,总占地面积为 $1.98 \text{ km}^2$ ,有效净化面积为 $1.42 \text{ km}^2$ ,其中生态塘 $2.8 \text{ hm}^2$ 、氧化塘 $19.0 \text{ hm}^2$ 、潜流湿地 $26.0 \text{ hm}^2$ 、多级表流湿地 $79.0 \text{ hm}^2$ 、沉水植物塘 $15.3 \text{ hm}^2$ ,配套工程包括取水泵站、湿地配水主管、湿地土建工程、湿地植物等。工程位于雄安新区安新县同口镇龙华乡,孝义河马棚淀入淀口处,场址东侧靠近白洋淀生态功能区,工程周边情况见图1,工程位置见图2。

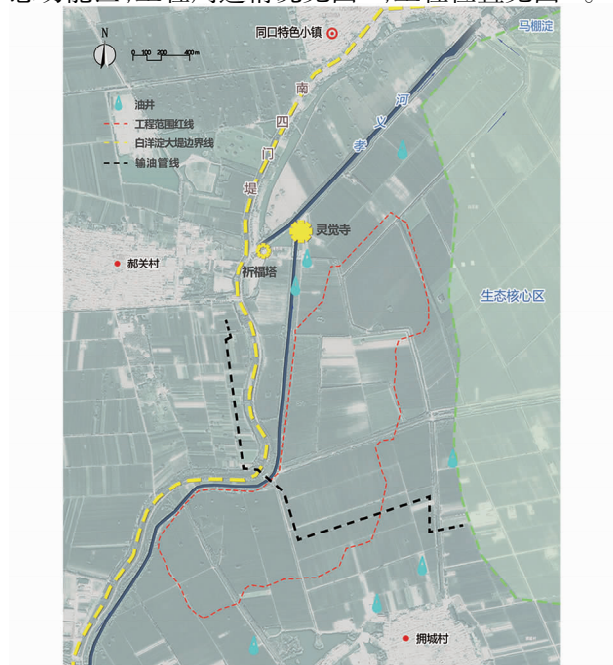


图1 工程周边情况

Fig. 1 Surrounding condition of the project

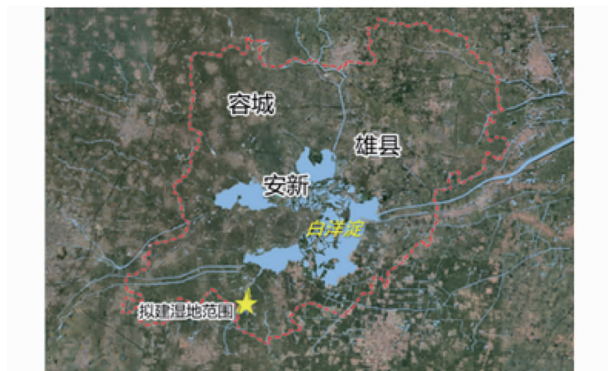


图2 工程地理位置

Fig. 2 Location of project

## 2 工程设计

### 2.1 设计策略

河道旁路净化湿地工程建设边界条件复杂,为保证实施效果,同时保留适度的弹性,设计初期确定了算水账、选工艺、就地势、营生境、谋远近、利运维六大设计策略。

#### ① 算水账

在调研收集资料基础上,对进入湿地的孝义河内外现状及规划来水量情况进行分析。通过流域范围内直排污水、中水排放以及外调水补水等来水情况分析,计算孝义河的入湿地水量,同时收集水量监测资料和补充监测工作,核实湿地水量。

#### ② 选工艺

常用的河道水质净化工艺主要包括生态湿地<sup>[2]</sup>、深度处理厂、原位水处理等工艺。根据孝义河入淀水质现状,为达到水质净化目标,主要可采取生态湿地、深度处理厂和原位水处理技术等三种解决方案。由于深度处理厂过于工程化,原位水处理技术净化效果有限,不能保证氮磷控制效果。工程所在区域的生态敏感性高,同时考虑结合各处理工艺的建设和后期的防洪影响、运营管理需求、各工艺的运营维护成本以及建设投资,选用生态湿地作为本工程处理工艺。

#### ③ 就地势

方案设计以因地制宜为原则,充分利用湿地内部坑塘、农田,营造深潭浅滩生境;充分利用现状沟渠、鱼塘等构造生态塘、沉水植物塘等,整体上避免大面积开挖与回填,节约建设成本;充分利用湿地内部地势较高区域新建配套管理用房等;充分利用现有地势进行湿地生态功能和生态风貌营建,在发挥

水质提升作用的同时,增加湿地景观效果。

#### ④ 营生境

白洋淀是候鸟迁徙内陆通道途中的重要食物与能量补充栖息地。区内有鸟类 203 种,野生两栖爬行动物 3 种,哺乳类 14 种,鱼类 54 种,生物多样性较高<sup>[3]</sup>。本项目结合首要的水质净化功能,对区域内整体生境进行微调,以达到提高生物多样性的效果。项目设计区域内大部分为芦苇湿地,可供大量雀形目栖息,同时芦苇地植物收割后有利于丹顶鹤、灰鹤等觅食。并且,沉水植物塘的大部分区域为开敞水面,适合白洋淀地区的雁鸭类栖息,并在其中设置部分生态岛,为雁鸭类提供夜栖场所,同时可适当设置浅滩、深潭,供鱼类繁殖及越冬。

#### ⑤ 谋远近

本工程为孝义河河口湿地恢复工程的一期工程,结合项目近远期功能定位及目标,对湿地水质净化功能、生态恢复功能及景观提升功能均进行了分步分期设计。

近期湿地以水质净化功能为主,远期淀区水位逐步恢复,将淹没大部分马棚淀,届时将根据上游来水水质,对湿地运行进行适应性调整;此外,近期工

程在净化水质的同时,将适当兼顾湿地动植物栖息地与湿地生态系统恢复,远期则结合白洋淀生态服务功能区,最大程度限制人为干扰,保护培育白洋淀原生动植物物种,逐步恢复自然生态系统。

#### ⑥ 利运维

人工湿地相对于其他污水处理设施,在大多数情况下运行相对容易且稳定,但由于人工湿地是模拟天然的生态系统建造而成,因此管理上需考虑湿地系统结构的维护及运行条件的控制,特别是本项目中尺度面积大、单元数量多的人工湿地,需对其处理系统加强集中管理,确保湿地正常运作,充分发挥其改善水质和提升生态环境的多重功能。

## 2.2 设计规模及水质

### 2.2.1 设计规模

本湿地处理对象为孝义河河水,其主要来源于安国、博野、蠡县和高阳县等市县的污水处理厂尾水及部分漏排污水,雨季时有部分天然径流流入,逐月入流量见表 1。湿地的设计进水量为孝义河流域污水和尾水量扣除沿途蒸发渗漏,故处理规模为  $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,汛期多余水量直接从主河道下泄至白洋淀淀区。

表 1 孝义河河道逐月入流量统计

Tab. 1 Monthly inflow statistics of Xiaoyi River channel

$10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$

项 目	入流量											
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
污水和尾水	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1
天然径流	1.2	2.1	1.7	2.3	1.1	2.4	11.0	21.9	5.6	3.3	3.0	2.7
河道总入流量	20.7	21.5	21.0	21.2	19.9	21.2	29.9	40.9	24.7	22.6	22.4	22.2

### 2.2.2 设计进、出水水质

根据白洋淀流域相关治理规划,孝义河上游将开展相关水环境整治,入淀水质也将逐步好转,根据白洋淀水质目标要求,工程设计进出水水质分为三个工况考虑。工况一进水水质为地表水Ⅳ类水,工况二进水水质为地表水Ⅴ类水,工况三进水水质为现状水质(劣于地表水Ⅴ类水)。本项目选取最不利水质作为设计边界,其他两种工况作为验证条件。

根据不同的进水和季节条件,工程水质目标:

① 当湿地进水水质符合地表水标准Ⅳ类(河流标准,下同)时,湿地出水水质主要考核总磷,非冬季总磷去除率不低于 40%,冬季总磷去除率不低于 30%,其他污染物浓度不得增加。

② 当湿地进水水质符合地表水标准Ⅴ类时,湿地出水水质需符合Ⅳ类标准。

③ 当湿地进水水质劣于地表水标准Ⅴ类时,非冬季总磷去除率不低于 40%,其他主要超标污染物去除率不低于 30%;冬季总磷去除率不低于 30%,其他主要超标污染物去除率不低于 20%。

结合以上进水条件和水质目标,以现状不利水质条件为例,工程设计进、出水水质见表 2。

表 2 设计进、出水水质

Tab. 2 Design influent and effluent quality

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	COD	$\text{NH}_3 - \text{N}$	TN	TP
设计进水水质	57.6	1.5	3.1	0.54
非冬季设计出水水质	40.3	1.05	2.2	0.32
冬季设计出水水质	46.0	1.2	2.5	0.38

## 2.3 工艺选择及工艺流程

主体工艺方面,工程进水水质主要为污水厂尾



水,主要污染因子为 COD、TN 和 TP,且项目所在区域为白洋淀生态服务区,生态环境敏感性高。因此,初步考虑选择以表流湿地和潜流湿地为主的生态处理工艺。预处理和深度处理方面,为减小潜流湿地堵塞风险,在主体处理单元前增加沉淀环节,另外,污水厂尾水中含有部分工业废水,COD 难降解,为增加水体的可生化性同时优化潜流湿地脱氮效果,考虑在前端设置厌氧单元起到水解酸化的作用。结合工艺分析,本工程选择“前置沉淀生态塘+潜流湿地+表流湿地+沉水植物塘”处理工艺。

在湿地进水方式上,可通过河道内新建构筑物(水闸、堰坝),抬升河道水位重力流进入湿地处理区,或通过新建提升泵站将河道水提升至湿地内。由于孝义河河道坡降仅有约 0.01%,河道建闸壅高水位后将造成上游回水,回水长度超过约 16 km,影响上游排水口正常排水,甚至影响汛期排涝安全,因此,设计方案选择通过泵站直接从河道取水进入湿地。

具体工艺流程见图 3。

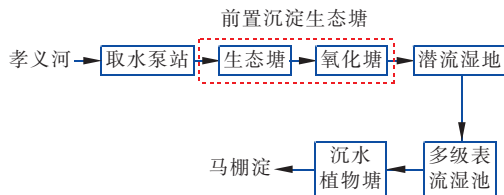


图3 湿地工艺流程

Fig.3 Wetland process flow

## 2.4 主体工程设计

### 2.4.1 总平面布置

人工湿地平面设计需根据湿地设计工艺,同时结合现状场地条件进行布置。由于项目建设场地为狭长状,考虑到配水均匀性及水流水力损失,湿地内部分为多个处理单元。

湿地现状地形总体呈西高东低,分区设计充分利用现状地形条件进行划分,且设计高程随现状高程变化。各处理单元充分利用区域内现有道路、田埂、沟渠进行设计,且每个处理单元间以道路相隔,形成四通八达的交通网络,方便后期湿地运维管理。沉水植物塘外侧与湿地外部农田通过 3 m 的围堤进行分隔;湿地出水直排至沟渠,进而汇入孝义河内。湿地总体平面布置见图 4。

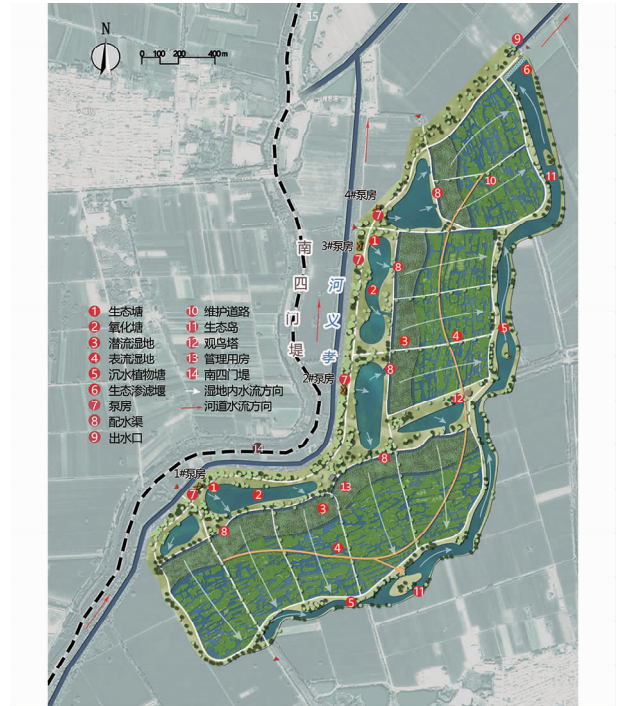


图4 湿地总体平面布置

Fig.4 General layout of the wetland

### 2.4.2 竖向设计

本工程竖向设计合理利用场地现状高程,将湿地分为五个处理单元,每个处理单元末端出水进入沉水植物塘,沉水植物塘末端设有生态渗滤堰,末端出水通过调节堰门控制。

湿地竖向设计见图 5。

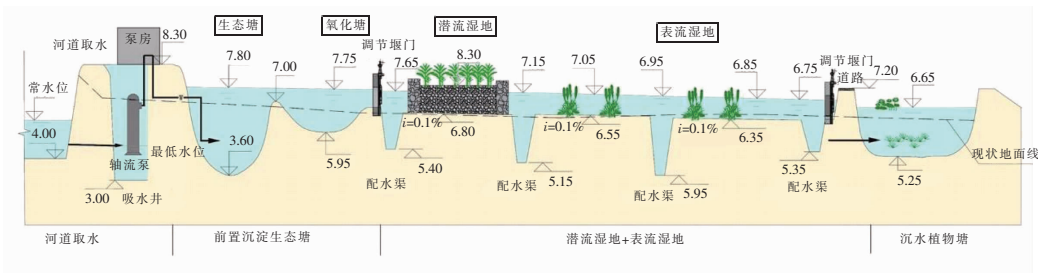


图5 工程竖向高程

Fig.5 Vertical design of the wetland

### 2.4.3 前置沉淀生态塘

前置沉淀生态塘由生态塘和氧化塘组成。

#### ① 生态塘

生态塘主要起沉淀、水解和配水作用。生态塘承接管道进水,均匀配水至每个小单元的氧化塘,进水口设置在高于塘底 0.6~1.0 m 左右,设计有效水深为 4.0 m,总面积为 2.8 hm<sup>2</sup>,有效容积为  $5.0 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,水力停留时间为 6.0 h。生态塘内以围网种植漂浮植物、浮动湿地及填料为主,通过浮动湿地及填料达到强化的目的<sup>[4]</sup>。生态塘典型断面见图 6。

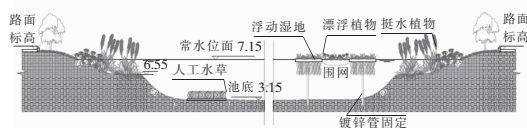


图6 生态塘典型断面示意

Fig.6 Typical section of the ecological pond

#### ② 氧化塘

氧化塘内布置浮动湿地、围网种植漂浮植物,塘内设置曝气设备,主要去除河水中氨氮、BOD<sub>5</sub> 等有机污染物<sup>[5]</sup>。氧化塘总面积为 19.0 hm<sup>2</sup>,有效水深为 1.5 m,有效容积为  $20.3 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,水力停留时间为 1.0 d。氧化塘典型断面见图 7。

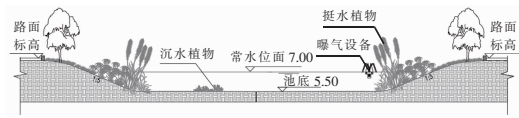


图7 氧化塘典型断面示意

Fig.7 Typical section of the oxidation pond

### 2.4.4 潜流湿地

潜流湿地典型断面见图 8。

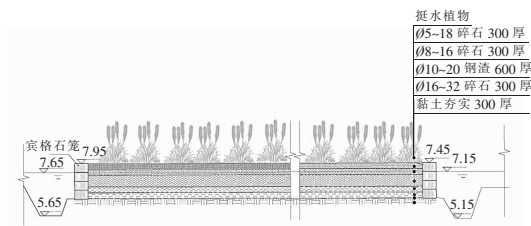


图8 潜流湿地典型断面示意

Fig.8 Typical section of the subsurface wetland

潜流湿地为湿地水质净化的核心区,考虑项目区域冬季冻土厚度,潜流湿地填料设计深度为 1.5 m,出水口处顶部设置 0.25 m 的挡板,潜流填料有效深度为 1.25 m。潜流湿地总面积为 26.0 hm<sup>2</sup>,有

效水深为 1.25 m,有效容积为  $11.375 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,水力停留时间为 0.57 d,水力负荷为  $0.77 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

### 2.4.5 表流湿地

表流湿地为水质深度净化区,通过硝化及反硝化作用去除污水中的氨氮和总氮,同时,植物的吸收与微生物同化作用可去除水中污染物。表流湿地共分为四级,每级表流湿地宽约 60 m,湿地末端设置调节堰门,可方便调节湿地内部水位,水生植物以芦苇为主,多种挺水植物搭配。表流湿地总面积为 79.0 hm<sup>2</sup>,有效水深为 0.3~0.5 m,有效容积为  $34.5 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,水力停留时间为 1.73 d,水力负荷为  $0.25 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

多级表流湿地典型断面见图 9。



图9 多级表流湿地典型断面示意

Fig.9 Typical section of the multistage surface wetland

### 2.4.6 沉水植物塘

沉水植物塘主要起到水质提升及清水展示的作用,塘内以沉水植物为主,并搭配挺水植物、浮水植物,既可以提高生物多样性,还可抑制藻类暴发。同时,塘内设置一定数量的生态岛,为鸟类及水生动物提供栖息地,提高湿地动植物多样性。沉水植物塘总面积为 15.3 hm<sup>2</sup>,有效水深为 1.5 m,有效容积为  $22.95 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,水力停留时间为 1.15 d,水力负荷为  $1.30 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

沉水植物塘典型断面见图 10。生态岛典型断面见图 11。

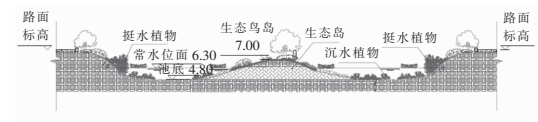


图10 沉水植物塘典型断面示意

Fig.10 Typical section of the submerged plant pond

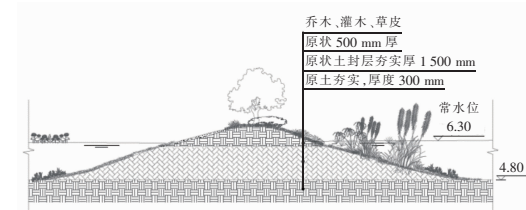


图11 生态岛典型断面示意

Fig.11 Typical section of the ecological island

## 2.5 专项设计

### 2.5.1 配水系统设计

泵站提水通过管道从底端配水至生态塘,每个生态塘出水溢流至氧化塘,氧化塘与氧化塘部分通过涵管连通,氧化塘出水通过调节堰门控制流量。

潜流湿地区宽度约为100 m,设计采用多级配水、多级集水相交互的配水方式(见图12),其中配水干渠宽为10 m,深为1.5 m;配水支渠宽为5 m,深为1.5 m。

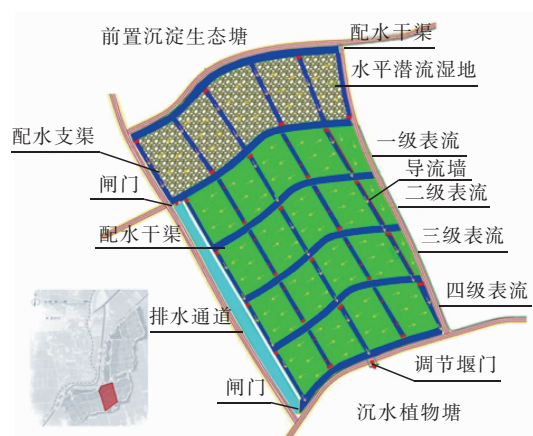


图12 配水系统设计

Fig. 12 Design of the water distribution system

表流湿地区宽度约为300 m,宽度较大,一级湿地很可能造成配水不均匀的现象。因此将表流湿地分为3~4级处理,各级湿地之间通过配水干渠配水,每级湿地采用多级配水、多级集水相交互的配水方式(见图12),同时增加配水渠深度,确保冬季水流通过。其中配水干渠宽为10 m,深为2 m;配水支渠宽为5 m,深为2 m。

表流湿地经调节堰门出水至沉水植物塘,调节堰门可根据不同植物生长季节水深需求调节水位。

每个处理单元一侧增加应急排水通道,作为表流湿地维护或大修期间排水通道,同时作为严寒天气表流水体全部结冰后的排水通道。排水通道宽为5 m,深为3 m,排水通道坡度比为1:3。

### 2.5.2 防渗设计

为防止污染扩散,保障湿地的运行水位,湿地建设应根据需要,采取一定的防渗措施<sup>[6-7]</sup>。本工程遵循生态优先的原则,整体工艺流程均采用绿色生态化处理设施,且场区现状地层中含有大量的粉质黏土层,从控制投资和生态性考虑,工程各单元采用原土夯实方式进行防渗,黏土厚度不小于30 cm。

### 2.5.3 填料设计

本项目对总磷去除率要求高,如何确保湿地的除磷效果尤其重要,填料作为人工湿地的重要组成部分,对除磷起到关键作用。

钢渣作为炼钢过程中的一种副产品,由生铁中的硅、锰、磷、硫等杂质在熔炼过程中氧化而成的各种氧化物,以及这些氧化物与溶剂反应生成的盐类组成。根据文献及现有人工湿地案例运行情况<sup>[8]</sup>,钢渣对磷的去除效果在多种填料中较有优势,且本项目地处河北腹地,钢铁产能高,故本项目填料层考虑在碎石的基础上补充部分钢渣强化除磷效果。

填料自上而下依次为:覆盖层,300 mm厚粒径为5~8 mm碎石;过渡层,300 mm厚粒径为8~16 mm碎石;吸磷层,600 mm厚粒径为10~20 mm碎石和钢渣混合料;排水层,300 mm厚粒径为16~32 mm碎石。覆盖层上种植挺水植物,在去除污染物的同时可提高湿地内部景观效果。

### 2.5.4 植物设计

各单元植物设计均从水质净化、乡土植物、景观搭配的角度进行配置,丰富湿地景观多样性。前置沉淀生态塘岸边设置5 m宽水深种植区,恢复挺水植物和浮叶植物,挺水植物主要为芦苇、菖蒲、水葱、荷花,浮叶植物主要为睡莲和荇菜。潜流湿地以滤料床为植物种植基质,挺水植物主要选择对种植基质要求不高的品种,主要为本地种芦苇、香蒲、菖蒲、水葱、花叶芦竹等。表流湿地采用近自然湿地恢复方法,恢复挺水植物、浮叶植物和沉水植物,挺水植物主要为芦苇、香蒲、菖蒲、水葱、荷花,浮叶植物主要为睡莲、荇菜和芡实,沉水植物主要为矮生苦草、菹草、黑藻、狐尾藻、金鱼藻。沉水植物塘结合水下地形及功能定位,恢复沉水植物,选择净化能力强、景观效果好的品种,主要为矮生耐寒苦草(四季常绿型)、狐尾藻、金鱼藻、苦草、菹草等。

### 2.5.5 动物设计

水体中投放适当的水生动物可以通过食物链的迁移转化,有效去除水体中富余的营养物质,抑制藻类生长。滤食性鱼类可以有效去除水体中的藻类物质,从而使水体透明度增加;滤食性贝类以浮游植物、微生物和有机碎屑为食,可加速悬浮物质的沉降及有机质的循环作用,进而改善水质;肉食性鱼类以小型鱼类为食,可防止过量草食性鱼类破坏水生植物系统,确保食物链网的完整,利于生态系统的有



运行。水生动物配置见表3。

表3 水生动物配置

Tab.3 Design of aquatic animals

项 目	品 种
滤食性鱼类	鲢、鳙鱼
杂食性鱼类	麦穗鱼、餐条
肉食性鱼类	黄颡鱼、乌鳢、鳊鱼
螺类	环棱螺、田螺
贝类	无齿蚌、河蚬
虾类	青虾、沼虾
浮游动物	滤藻虫

### 3 水质达标分析

根据工程的设计任务和目标,按照三种水质工况进行水质目标可达性分析,各工况下的去除率按冬季极端不利条件下运行进行计算。

#### ① 工况一:进水水质达到地表水Ⅳ类标准

考虑不利情况(冬季运行),当进水水质达到地表水Ⅳ类标准时,各单元污染物去除率分析见表4。可见,满足TP去除率≥30%的水质目标要求。

表4 工况一下冬季各单元污染物去除率分析

Tab.4 Analysis of pollutants removal rate of each unit in winter under the first condition

项 目	COD	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP
Ⅳ类水进水水质/(mg·L <sup>-1</sup> )	30	1.5	1.5	0.3
生态塘	去除率/%	5	2	2.5
	出水水质/(mg·L <sup>-1</sup> )	28.50	1.47	1.46
氧化塘	去除率/%	10	6	2.5
	出水水质/(mg·L <sup>-1</sup> )	25.65	1.38	1.45
潜流湿地	去除率/%	27.5	15	20
	出水水质/(mg·L <sup>-1</sup> )	18.60	1.17	1.16
表流湿地	去除率/%	6	3	12
	出水水质/(mg·L <sup>-1</sup> )	17.48	1.14	1.09
沉水植物塘	去除率/%	3	1.5	3
	出水水质/(mg·L <sup>-1</sup> )	16.96	1.12	1.06
总去除率/%	43.48	25.19	29.23	36.75

#### ② 工况二:进水水质达到地表水Ⅴ类标准

当进水水质达到地表水Ⅴ类标准时,考虑不利情况(冬季运行),各单元污染物去除率分析见表5。可见,出水水质满足地表水Ⅳ类标准的水质目标要求。

表5 工况二下冬季各单元污染物去除率分析

Tab.5 Analysis of pollutants removal rate of each unit in winter under the second condition

项 目	COD	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP
Ⅴ类水进水水质/(mg·L <sup>-1</sup> )	40	2	2.5	0.4
生态塘	去除率/%	5	2	2.5
	出水水质/(mg·L <sup>-1</sup> )	38.00	1.96	2.44
氧化塘	去除率/%	10	6	2.5
	出水水质/(mg·L <sup>-1</sup> )	34.20	1.84	2.41
潜流湿地	去除率/%	27.5	15	20
	出水水质/(mg·L <sup>-1</sup> )	24.80	1.57	1.93
表流湿地	去除率/%	6	3	12
	出水水质/(mg·L <sup>-1</sup> )	23.31	1.52	1.81
沉水植物塘	去除率/%	3	1.5	3
	出水水质/(mg·L <sup>-1</sup> )	22.61	1.50	1.77
地表水Ⅳ类标准/(mg·L <sup>-1</sup> )	30	1.5	不考核	0.3

#### ③ 工况三:进水水质为现状水质(劣Ⅴ类)

以现状水质作为进水边界条件,考虑不利情况(冬季运行),各单元污染物去除率分析见表6。可见,满足TP去除率≥30%、其他污染物去除率≥20%的水质目标要求。

表6 工况三下冬季各单元污染物去除率分析

Tab.6 Analysis of pollutants removal rate of each unit in winter under the third condition

项 目	COD	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP
现状进水水质/(mg·L <sup>-1</sup> )	57.6	1.5	3.31	0.54
生态塘	去除率/%	5	2	2.5
	出水水质/(mg·L <sup>-1</sup> )	54.72	1.47	3.23
氧化塘	去除率/%	10	6	2.5
	出水水质/(mg·L <sup>-1</sup> )	49.25	1.38	3.19
潜流湿地	去除率/%	27.5	15	20
	出水水质/(mg·L <sup>-1</sup> )	35.70	1.17	2.56
表流湿地	去除率/%	6	3	12
	出水水质/(mg·L <sup>-1</sup> )	33.56	1.14	2.40
沉水植物塘	去除率/%	3	1.5	3
	出水水质/(mg·L <sup>-1</sup> )	32.56	1.12	2.34
总去除率/%	43.48	25.19	29.23	36.75

#### 4 建设及运行成本分析

本工程总投资为39 969.54万元,运行费用为715.34万元/a,单位处理成本为0.098元/m<sup>3</sup>。考虑资源化利用,本工程实施后芦苇年产值约为161万元/a。

#### 5 结语

工程实施后,孝义河入白洋淀水质可得到全面净化,对削减白洋淀淀区外源输入污染负荷、修复白洋淀湿地生境、恢复河口区自然湿地景观风貌具有重要意义,同时,该工程可为中国典型北方湖泊、河流湿地生态修复提供可参考的实践经验。

#### 参考文献:

- [1] 宋中海. 白洋淀流域水文特性分析[J]. 河北水利, 2005(9):10-11.  
Song Zhonghai. Analysis of hydrological characteristics of Baiyangdian watershed[J]. Hebei Water Resources, 2005(9):10-11 (in Chinese).
- [2] 魏俊,赵梦飞,刘伟荣,等. 我国尾水型人工湿地发展现状[J]. 中国给水排水, 2019, 35(2):29-33.  
Wei Jun, Zhao Mengfei, Liu Weirong, et al. Development status of constructed wetland (CWs) for treatment of terminal effluent of wastewater treatment plants (WWTPs) in China[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(2):29-33 (in Chinese).
- [3] 刘春兰. 白洋淀湿地退化与生态恢复研究[D]. 石家庄:河北师范大学, 2004.  
Liu Chunlan. Research on Ecological Degeneration and Restoration of Baiyangdian Wetland[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2004 (in Chinese).
- [4] 张莹琦,贺菊花,程刚. 生态浮岛技术用于河湖污染修复进展研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(6):138-142.  
Zhang Yingqi, He Juhua, Cheng Gang. Application of ecological floating island technology in lake systems remediation [J]. Environmental Science and Management, 2015, 40(6):138-142 (in Chinese).
- [5] 刘延恺,陆苏,孟振全. 河道曝气法——适合我国国情的环境污水处理工艺[J]. 环境污染与防治, 1994, 16(1):22-25.  
Liu Yankai, Lu Su, Meng Zhenquan. River aeration method—environmental sewage treatment process suitable for China's national condition [J]. Environmental Pollution & Control, 1994, 16(1):22-25 (in Chinese).
- [6] CJJ/T 54—2017, 污水自然处理工程技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2017.  
CJJ/T 54 - 2017, Technical Specification for Wastewater Natural Treatment Project [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017 (in Chinese).
- [7] HJ 2005—2010, 人工湿地污水处理工程技术规范[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2011.  
HJ 2005 - 2010, Technical Specification of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment Engineering [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011 (in Chinese).
- [8] 赵桂瑜,周琪. 钢渣吸附除磷机理研究[J]. 水处理技术, 2009, 35(11):45-47.  
Zhao Guiyu, Zhou Qi. Mechanism of phosphorus adsorption from aqueous solution on steel converter slags [J]. Technology of Water Treatment, 2009, 35(11):45-47 (in Chinese).



作者简介:宋凯宇(1985—),男,河南登封人,硕士,高级工程师,副主任,主要从事水污染防治、环境保护咨询和设计等工作。

E-mail:song\_ky2@ecidi.com

收稿日期:2019-09-19