

兼顾排涝标准与水质净化要求的农业圩区最优水面率确定

程吉林¹, 徐 兢¹, 汪 靛¹, 蒋晓红¹, 高 山²

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009; 2. 江苏省水利工程建设局, 南京 210029)

摘 要: 针对农业圩区的排涝以及水环境问题, 该研究以江苏里下河地区为研究对象, 以满足里下河圩区设计排涝标准与水质净化要求为目标, 构建农业圩区坑塘-排水沟道湿地系统最优水面率数学模型。模型以工程系统总费用现值最小为目标函数, 以泵站涝水外排能力与圩内水面率、水面率上下限、水环境容量与圩内坑塘与排水沟道系统的关系(主要包括圩内坑塘沟道湿地系统对总氮、总磷以及铬的化学需氧量的去除率)等为约束条件, 以圩内坑塘(湖泊)水面率、排水沟道水面率、外排涝水泵站设计排涝流量为决策变量, 采用遗传算法对模型进行求解。对江苏里下河地区阜宁县渠南灌区的圩区河湖与排水工程系统进行实例优化分析可知: 当采用明沟排水系统, 圩内总水面率为 11.35% (其中坑塘、排水沟道系统水面率分别为 8.15%、3.20%)、设计排涝模数为 $0.86 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$ 时, 工程建设费用现值最小; 此时, 圩区可达到 20 年一遇设计排涝标准、且圩外周边水体为 V 类时, 圩内水体可达到 IV 类水标准。该方法可为同类地区在国土整治、防洪排涝规划、河湖水体净化等提供参考。

关键词: 污染; 排水; 水质净化; 农业圩区; 水面率; 优化方法

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.03.006

中图分类号: S27

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-03-0047-08

程吉林, 徐兢, 汪靛, 等. 兼顾排涝标准与水质净化要求的农业圩区最优水面率确定[J]. 农业工程学报, 2022, 38(3): 47-54. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.03.006 http://www.tcsae.org

Cheng Jilin, Xu Jing, Wang Liang, et al. Determining the optimal water surface ratio in agricultural polder areas considering drainage standard and water quality requirements[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(3): 47-54. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.03.006 http://www.tcsae.org

0 引 言

水域作为人居环境的重要组成部分, 不仅具有一定的防洪排涝功能, 还能美化环境、改善区域生态环境等^[1]。随着城镇化进程的加速, 农村地区大量的水域被侵占, 随之而来的是河沟断面缩窄以及区域行洪排涝能力下降, 水环境、水质恶化^[2], 自然景观和生态环境被破坏等一系列问题。然而, 适宜的水面具有一定的调节能力, 如: 坑塘湖泊防洪滞蓄的功能不仅可以增加可拦蓄水量, 减少地区所产生的径流量, 使得进入河道的水量减少, 提高地区防洪排涝体系的安全性^[3]; 又能够直接降解污染物、保护生物多样性、调节气候等^[4-5], 因此, 维护适宜的水域面积, 发挥水域的多种功能十分重要。

国内外许多学者对区域水面率的优化配置问题进行了研究。郭元裕等^[6]从工程经济出发, 运用线性规划模型确定湖区最优水面率。丁继辉等^[7]从防洪、抗旱、除涝等多角度出发, 提出了土地开发整理项目区适宜水面率模型。Bu 等^[8]采用个人电脑风暴水管理模型模拟城市降雨过程, 构建未来极端淹没情景, 确定了城市地区合理的水域率。Pal 等^[9]研究湿地流失、转换的趋势发现: 河道

的减少导致湿地供水不规律、农用地占用湿地导致水面率减小是环境资本缩减的主要原因。Clara 等^[10]拟定危害、暴露、影响、脆弱性和风险地图对 Júcar 流域区的海平面上升 (Sea level rise) 相关风险进行评估, 研究结果表明: 气候变化导致的水面增加反而会降低沿海湿地系统中生物多样性以及水体更新时间。盛子涵等^[11]针对圩垸地区的城市排涝问题, 基于海绵城市建设理念, 考虑城市内部下沉式绿地率和透水铺装率对降雨的集蓄和渗吸作用, 构建数学模型确定水面率。以上研究均指出水面率与区域的防洪除涝、生态环境相关, 但都没有考虑到水面率与水质间的定量关系。

近年来, 许多研究指出: 分布于农田之间的坑塘湖泊、排水沟道等组成的分布式沟塘系统具有湿地功能, 在满足区域排水要求的同时, 还具有净化水质、改善区域生态环境的作用。Vymazal 等^[12]通过调查研究表明: 防止农药输入水体最常用的缓解技术包括田间边缘和河岸缓冲带、植被沟渠和湿地系统, 具有自由水面的湿地对农药的去除效果是最好的。Gregoire 等^[13]研究结果表明: 湿地系统能够有效地降低农药造成的污染及其在环境中扩散, 从而减轻农业面源农药污染。许青等^[14]指出: 排水沟塘在承担农田排水任务同时还具有削减农业面源污染和提供野生动物栖息地的功能, 农田间的排水沟道是改善农业排水水质的重要场所, 排水沟道具备优越的去除农业污染物的水利条件。罗纨等^[15]分别计算考虑与不考虑水力联系 2 种情况下沟塘的污染物去除能力, 结果

收稿日期: 2021-08-23 修订日期: 2021-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52079119); 江苏省水利科技项目 (2020011)

作者简介: 程吉林, 博士, 教授, 研究方向为农业水土资源最优规划与管理。
Email: jlcheng@yzu.edu.cn

表明：水质净化作用主要集中在一些面积较大的支沟和池塘。Yang 等^[16]和 Gro 等^[17]证明：湿地中总氮的去除服从一级推流反应动力学，湿地可作为一个不断搅拌的反应器。Arheimer 等^[18]将自然湿地在水流流速缓慢且仅在汛期排水的条件下看作一个完全混合的批量反应器，因此，氮的去除和湿地面积相关。上述研究均指出排水沟道、坑塘水面、湿地对河湖水质降解净化有显著作用。

针对江苏省里下河地区的排涝和水环境问题，本文在圩区排涝工程规划时，考虑圩内坑塘-排水沟道湿地系统的水质净化作用，在传统南方圩区最优水面率模型构建的基础上^[6]，考虑圩内水体与农田面源的总氮、总磷以及化学需氧量 COD_{Cr} 去除效率等约束条件，构建了里下河圩区满足排涝标准以及水质净化要求的最优水面率数学模型，以期为水系发达的平原河网地区在国土整治与水利规划中，优化排涝设计参数、减轻农业面源污染，净化河湖水质等方面提供依据。

1 模型构建

1.1 系统概化

本文以江苏省里下河农业圩区为研究对象。该系统由圩堤、圩口闸等水利工程，圩内坑塘（包括湖泊）、排水沟道（或河道）系统、农田与居民区等组成，里下河圩区现状排涝工程及分布式沟塘系统概化见图 1。

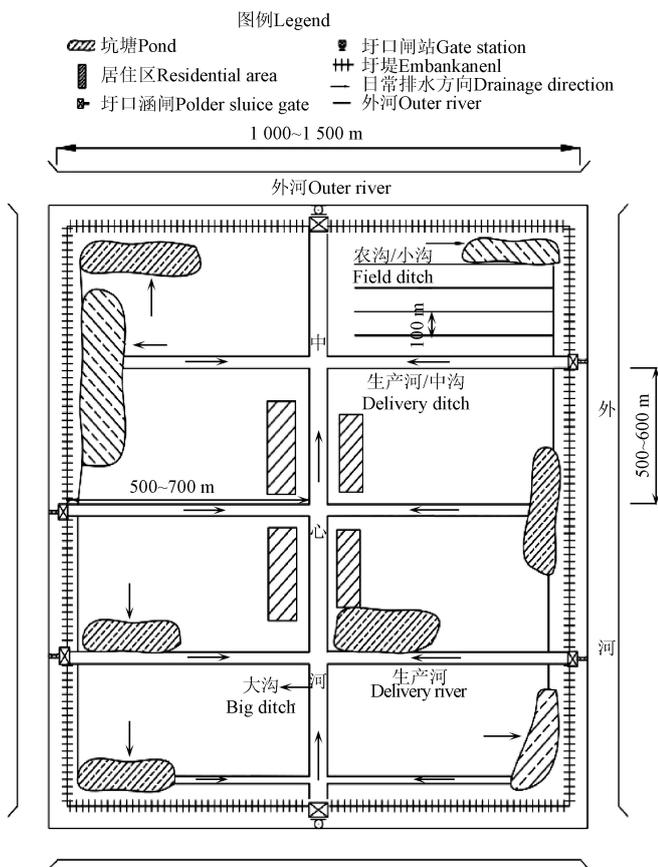


图 1 里下河圩区分布式沟塘系统概化图

Fig.1 System generalization map of distributed ditches and ponds in Lixiahe polder area

里下河圩区水网密布，一般呈“丰”字型或“井”字型布置，外河、中心河（大沟）、生产河（中沟），农

沟（小沟）等沟道系统与圩内坑塘水面（包括湖泊）组成一个排涝与分布式沟塘湿地系统，承担圩区的排涝与水质净化作用。垂直中心河布置生产河，相距 500 m 左右，生产河将圩区划分为若干小框，每 666.67 hm² 约 10 框，每框 66.67 hm² 左右，与外河相交处建闸站，用以排水、活水^[19]，农沟间距为 200 m 左右，长度为 500 m 左右。

1.2 模型构建思路

模型构建的主要思想是当遭遇设计暴雨时，通过圩区坑塘与排水沟道水面滞蓄与泵站抢排，及时排出设计暴雨产生的径流、不成灾；当非排涝时期，农田排水系统维持日常水位可控制地下水深、防止农田渍害，同时，流动的水体（排水沟道日常流量）还能够推动圩内坑塘和排水沟道中水体流动，利于水体水质净化、污染物降解。

1.3 目标函数

在满足圩区规定的排涝标准情况下，兼顾圩区坑塘水面、排水沟道系统组成的分步式沟塘湿地系统水质净化要求，对圩区排涝工程系统进行整治优化。圩区排涝工程整治包括：坑塘整治、排水沟道改造与排涝泵站建设。由于坑塘、排水沟道工程与泵站的运行经济寿命不一致，为此，计算分析期取泵站经济寿命。基于上述分析，以排涝工程计算分析期内的总费用折算现值最小为目标函数。

$$Z = \min \left\{ \sum_{i=1}^3 \phi_i(x_i) + \sum_{i=1}^3 (C_i - l_1 - l_2) \right\} \quad (1)$$

式中 Z 为排涝工程总费用折算现值，百万元。 x_1 、 x_2 分别为规划圩内坑塘水面率、排水沟道系统水面率（主要包括中心河、生产河、小沟），以日常水位统计，以占圩区总面积的百分比计，%； x_3 为泵站设计排涝流量，m³/s。 C_i ($i=1, 2, 3$) 分别为坑塘整治工程、排水沟道改造工程、泵站工程的年运行管理费用折算现值，百万元； l_1 、 l_2 分别为坑塘整治工程、沟道工程计算分析期末的投资残值折现，百万元； $\phi_i(x_i)$ 分别为圩内坑塘整治工程、沟道改造工程、泵站工程的投资折算现值，百万元。 C_i 、 l_1 、 l_2 和 $\phi_i(x_i)$ 表达式分别为

$$\begin{cases} C_1 = F \cdot x_1 \cdot C_{11} \\ C_2 = F \cdot x_2 \cdot C_{21} \\ C_3 = C_{31} \cdot x_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} l_1 = \frac{N - n_0}{N} \cdot \frac{\phi_1(x_1)}{(1+i)^{n_0}} \\ l_2 = \frac{N - n_0}{N} \cdot \frac{\phi_2(x_2)}{(1+i)^{n_0}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \phi_1(x_1) = \begin{cases} C_w \cdot (x_1 - H_s) \cdot F \cdot h_1, x_1 \geq H_s \\ C_t \cdot (H_s - x_1) \cdot F \cdot h_1, x_1 < H_s \end{cases} \\ \phi_2(x_2) = \begin{cases} C_w \cdot (x_2 - G_s) \cdot F \cdot h_2, x_2 \geq G_s \\ C_t \cdot (G_s - x_2) \cdot F \cdot h_2, x_2 < G_s \end{cases} \\ \phi_3(x_3) = C_b \cdot x_3 \end{cases} \quad (4)$$

式中 F 为规划区总面积，km²； C_{11} 为每平方米坑塘的管理维护费现值（包括清淤、除草费等），元/m²。 C_{21} 为每平方米排水沟道的管理维护费现值（包括清淤、除草费

等), 元/m²; C₃₁ 为排涝泵站单位装机流量的运行管理现值 (包括年大修理费提存、年维护费、职工工资及福利费、燃料动力费及其他费用), 万元·s/m³; N、n₀ 分别为坑塘沟道整治工程与泵站的经济寿命; i 为社会折现率。C_w、C_i 分别为每立方米开挖、填埋河网费用, 元/m³; C_b 为泵站单位装机流量的投资折算现值, 元·s/m³; H_S、G_S 分别为现有圩内坑塘、排水沟道系统水面率 (以占圩区总面积的百分比计), %; h₁、h₂ 分别为圩内坑塘湖泊、排水沟道系统的日常平均水深, m。

1.4 约束条件

1.4.1 排涝流量与水面率的关系

水面率是指一定区域范围内承载水域功能的区域面积占区域总面积的比率。对于远景用地规划为农业用地和生态旅游区的片区, 按圩区设计排涝标准 (分别以 10 年、20 年一遇暴雨, 雨后 1 天排出), 采用平均排除法计算设计排涝流量, 见式 (5)。

$$x_3 = \frac{R \cdot F}{3.6T \cdot t} = \left(\frac{\sum_{j=1}^4 R_j \cdot F_j}{3.6T \cdot t} \right) \quad (5)$$

式中 R 为设计径流深, mm; T 为设计排涝历时, d; t 为泵站在 1 d 内的运行时间, h; R₁、R₂、R₃ 和 R₄ 分别为坑塘湖泊、排水沟道水面、水田, 旱田和非耕地的设计径流深, mm; F₁、F₂、F₃ 和 F₄ 分别为坑塘湖泊、排水沟道水面、水田, 旱田和非耕地的面积, km²; 其余符号同前。

设圩区总面积 F, 水田面积 F₃ 在圩区规划前后保持不变。则: 规划后的坑塘水面 F'₁=F·x₁, 沟道系统水面 F'₂=F·x₂、水田面积 F'₃=F₃, 旱田和非耕地的面积 F'₄=F-F(x₁+x₂)-F₃。

1) 坑塘湖泊水面设计径流深(R₁, mm)

$$R_1 = P - h_{\text{坑塘}} - E_1 \quad (6)$$

式中 P 为设计暴雨量, mm; h_{坑塘} 为坑塘滞蓄水深, mm; E₁ 为排水期间坑塘的水面蒸发量, mm; 其余符号同前。

2) 排水沟道水面设计径流深(R₂, mm)

$$R_2 = P - h_{\text{沟道}} - E_2 \quad (7)$$

式中 h_{沟道} 为排水沟道滞蓄水深, mm; E₂ 为排水期间沟道水面蒸发量, mm; 其余符号同前。

3) 水田设计径流深(R₃, mm)

$$R_3 = P - h_{\text{田蓄}} - E \quad (8)$$

式中 h_{田蓄} 为水田滞蓄水深, mm; E 为水田耗水量, mm; 其余符号同前。

4) 旱田、非耕地设计径流深(R₄, mm)

根据前期影响雨量 P_a, 查(P+P_a)~R 关系图^[20], 得 R₄。

$$R_4 = \alpha(P + P_a) \quad (9)$$

式中 α 为径流系数, P_a 为前期影响雨量, mm; 其余符号同前。

将式 (6) ~ 式 (9) 和规划后的坑塘、沟道系统水面、水田, 旱田与非耕地面积代入式 (5) 得排涝流量 x₃ 与水面率 x₁、x₂ 的关系。

$$x_3 = f(x_1, x_2) \quad (10)$$

1.4.2 水面率上下限约束

一个地区的水面与当地的自然、乡土文化等因素有关, 应根据当地国土规划确定区域水面率的上下限:

$$x_{\min} \leq x_1 + x_2 \leq x_{\max}, \quad x_{2\min} \leq x_2 \leq x_{2\max} \quad (11)$$

式中 x_{max}、x_{min} 分别为坑塘和排水沟道系统总水面率的上下限; x_{2max}、x_{2min} 分别为排水沟道系统水面率的上下限, 其中, 里下河圩区排水沟道系统的水面率一般为 2%~4% (根据里下河地区国土整治高标准农田建设的排水沟道大、中、小沟统计)。

1.4.3 水质约束

水环境容量是指水体使用功能不受破坏条件下, 受纳污染物的最大数量^[21]。为保证区域水体使用功能不受破坏, 圩区需要有足够的容纳污染物质的能力, 根据国家对污染物总量控制的要求^[22], 选择总氮 (Total Nitrogen, TN), 总磷 (Total Phosphorus, TP), 铬的化学需氧量 (Chemical Oxygen Demand of Chrome, COD_{Cr}) 作为水环境容量的控制因子。根据一级推流反应动力学可知: 污染物质经过水体净化后的浓度见式 (12)。

$$C_c = C_i \cdot \exp(-\mu \cdot t_{\text{停}}) \quad (12)$$

式中 C_c 和 C_i 分别为出水、入水污染物浓度, mg/L; μ 为水质衰减数, d⁻¹; t_停 为水力停留时间, d。

江淮地区地下水位较高, 经常出现长时间的阴雨天气, 这一时期降雨形成的地下径流量 (日常流量) 需要外排, 否则会影响作物生长, 形成渍害; 同时, 水体流动时, 利于湿地系统对水体中杂质的降解净化。本文的水力停留时间通过坑塘与排水沟道系统中水体的有效容积 (即坑塘与沟道系统平均水深与对应水面的乘积) 与日常排水流量 (即农田降渍模数与对应耕地面积的乘积) 之比确定, 见式 (13)。

$$C_c = C_i \cdot \exp\left(-\mu \cdot \frac{V}{8.64 \times 10^4 Q_{\text{排}}}\right) \quad (13)$$

式中 V 为水体有效容积, m³; Q_排 为排水流量, m³/s。

1) TN 的去除和水面率的关系

圩区地面坡度平坦, 排水不畅, 日常降雨使地下水位抬升, 此时, 可按规定的排水线路 (如图 1) 排除日常流量, 经过坑塘湖泊、排水沟道组成的分布式湿地系统对水质的净化, 最终流出圩区水体中 TN 浓度应小于水质类别对应 TN 的水质标准值^[23]。

$$C_{\text{Nend}} = C_{\text{Nstart}} \cdot \exp\left(-\mu_1 \cdot \frac{F \cdot \sum_{i=1}^2 x_i \cdot h_i}{8.64 \times 10^4 q_{\text{排渍}} \cdot F_{\text{耕地}}}\right) \leq C_{\text{Nr}} \quad (14)$$

式中 C_{Nend} 和 C_{Nstart} 分别为流出、流入圩内水体 TN 浓度, mg/L; C_{Nr} 为 TN 的水质标准值, mg/L; μ₁ 为 TN 的水质降解系数, d⁻¹; q_{排渍} 为农田降渍模数, m³/(s·km²); F_{耕地} 为耕地面积, km²; 其余符号同前。

2) TP 的去除和水面率的关系

圩区日常排水时, 按规定排水线路排除日常流量, 根据相似系统氮的去除可得: 最终流出圩内水体中 TP 浓

度应小于水质类别对应 TP 的水质标准值。

$$C_{\text{Pend}} = C_{\text{Pstart}} \cdot \exp \left(-\mu_2 \cdot \frac{F \cdot \sum_{i=1}^2 x_i \cdot h_i}{8.64 \times 10^4 q_{\text{排渍}} \cdot F_{\text{耕地}}} \right) \leq C_{\text{Pr}} \quad (15)$$

式中 C_{Pend} 和 C_{Pstart} 分别为流出、流入圩内水体 TP 浓度, mg/L; C_{Pr} 为 TP 的水质标准值, mg/L; μ_2 为 TP 的水质衰减系数, d^{-1} ; 其余符号同前。

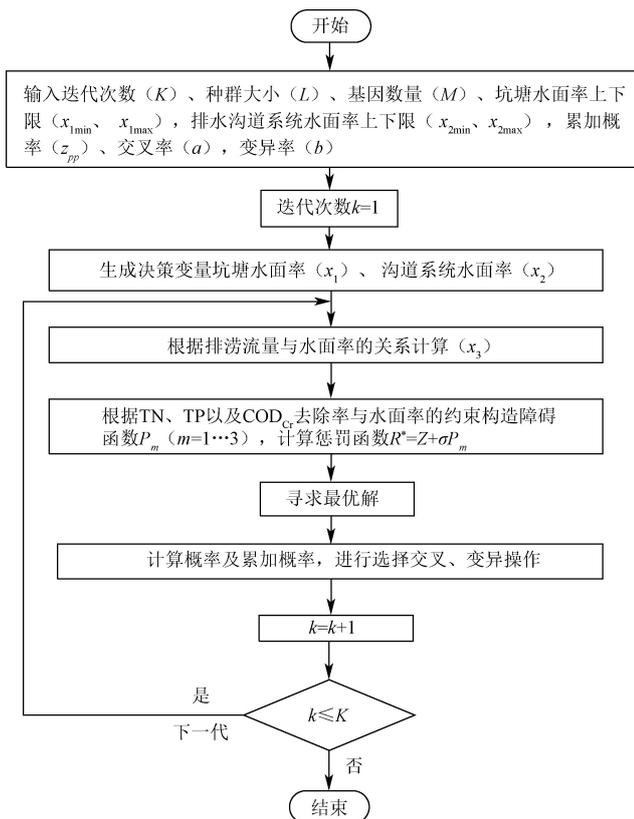
COD_{Cr} 的去除和水面率的关系

$$C_{\text{Crd}} = C_{\text{Crt}} \cdot \exp \left(-\mu_3 \cdot \frac{F \cdot \sum_{i=1}^2 x_i \cdot h_i}{8.64 \times 10^4 q_{\text{排渍}} \cdot F_{\text{耕地}}} \right) \leq C_{\text{SCOD}} \quad (16)$$

式中 C_{Crd} 和 C_{Crt} 分别为流出、流入圩内水体 COD_{Cr} 浓度, mg/L; C_{SCOD} 为 COD_{Cr} 的水质标准值, mg/L; μ_3 为 COD_{Cr} 的水质衰减系数, d^{-1} ; 其余符号同前。

2 模型求解方法

模型求解是通过逐次迭代寻求目标的最值, 遗传算法就是一种解决最值类问题的智能型优化方法, 本文所建立的非线性数学模型是为了求解目标函数的最小值, 因此, 采用遗传算法对模型求解。遗传算法求解本模型具体的流程见图 2。



注: K 为迭代总次数。 Z 为排涝工程总费用折算现值。 σ 为惩罚因子。
Note: K is total iterations; Z is present value of total drainage project costs. σ is penalization factor.

图 2 遗传算法流程图

Fig.2 Flowchart of genetic algorithm

本文所建立的模型中有 3 个决策变量, 其中, 决策变量 x_1 的变化区间为 $[x_{1\min}, x_{1\max}]$; x_2 的变化区间为 $[x_{2\min}, x_{2\max}]$; 决策变量 x_3 通过式 (5) 确定。采用罚函数法对约

束条件进行处理, 若规划水面率不满足总氮 (TN)、总磷 (TP) 以及 COD_{Cr} 的去除率约束, 则构造障碍函数 P_m ($m=1,2,3$), 如式 (17) ~ 式 (19) 所示。记: 流出圩内水体中 TN、TP 以及 COD_{Cr} 的浓度表达式分别为 $g_m(x_1, x_2)$ ($m=1,2,3$)。

如果 $g_1(x_1, x_2) > C_{\text{Nr}}$, 则构造障碍函数 P_1 :

$$P_1 = (C_{\text{Nr}} - g_1(x_1, x_2))^2 \quad (17)$$

如果 $g_2(x_1, x_2) > C_{\text{Pr}}$, 则构造障碍函数 P_2 :

$$P_2 = (C_{\text{Pr}} - g_2(x_1, x_2))^2 \quad (18)$$

如果 $g_3(x_1, x_2) > C_{\text{SCOD}}$, 则构造障碍函数 P_3 :

$$P_3 = (C_{\text{SCOD}} - g_3(x_1, x_2))^2 \quad (19)$$

在此基础上, 构造惩罚函数:

$$R^* = Z + \sigma P_m \quad (20)$$

式中 R^* 为惩罚函数, P_m 为障碍函数, σ 为罚因子; 其余符号同前。

依次进行选择、交叉、变异操作和迭代, 直至满足终止条件, 算法终止。

3 实例分析

江苏省里下河洼地阜宁县渠南灌区以平原和低洼圩区为主, 经度介于 $119^\circ 27' 49'' \text{E} \sim 119^\circ 58' 22'' \text{E}$ 之间, 纬度介于 $33^\circ 26' 52'' \text{N} \sim 33^\circ 59' 22'' \text{N}$ 之间, 土质多为粉砂土和砂壤土, 设计排渍模数 ($q_{\text{排渍}}$) 为 $0.04 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$, 约有 195.1 km^2 属低洼圩区, 需通过建设排涝泵站抽排, 以满足排涝、降渍要求; 规划区是处于小中河和大沙河之间的南部低洼圩区, 面积约 48 km^2 , 圩区现状水面率为 9.4%, 其中, 圩内坑塘水面率为 6.2%, 排水沟道水面率为 3.2%; 灌溉设计保证率为 80%, 主要河道基本达 5 年一遇、10 年一遇的排涝标准, 理论排涝模数虽然达到 $0.7 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$, 但圩内部分排涝泵站老化、失修现象严重, 难以正常发挥其效益, 实际排涝模数约 $0.65 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$, 排涝流量约 $30 \text{ m}^3/\text{s}$ 。同时, 随着社会经济快速发展, 人类活动对水系干扰加重, 河道淤积、渠沟断面缩窄等问题突出, 入河污染物的来源也日益增多, 圩外、圩内水体长期处于 V 类水质标准。因此, 对阜宁渠南灌区南部圩区的排涝工程进行优化, 确定圩区最优水面率与泵站设计排涝流量, 提高圩区排涝标准与提升圩内水体水质、水环境。

3.1 渠南灌区最优水面率数学模型的确定

3.1.1 目标函数中参数的确定

采用工程概算指标法结合当地建筑材料行情对工程费用现值进行估算, 模型中相关参数确定见表 1。

3.1.2 约束条件中参数的确定

1) 排除设计暴雨时, 排涝相关参数的确定

20 年一遇设计排涝标准时, 设计代表年为 2007 年。设计暴雨为 225.5 mm , 根据当地农田水利试验站资料得知: $h_{\text{田蓄}}$ 为 30 mm 、 E 为 14 mm 、 $h_{\text{坑塘}}$ 为 460 mm 、 $h_{\text{沟道}}$ 为 400 mm , $E_1 = E_2 = 6 \text{ mm}$ 。代入式 (6) ~ 式 (9) 计算得: R_1 为 -240.5 mm ; R_2 为 -180.5 mm ; R_3 为 181.5 mm ; R_4 为 160 mm 。

据统计，渠南灌区水稻种植区水田比例为 65%，即 $F_3=29.12 \text{ km}^2$ 。规划后的坑塘水面 $F'_1=48x_1$ 、规划后的沟道水面 $F'_2=48x_2$ 、规划后的水田面积 $F'_3=29.12 \text{ km}^2$ ，规划后的旱田与非耕地面积 $F'_4=18.88-48(x_1+x_2)$ 。将计算的径流深和规划后的面积 F'_j ($j=1\dots 4$) 代入式 (5) 得： $x_3+108x_1+102x_2-53.05=0$ 。

表 1 模型中相关参数
Table 1 Related parameters in model

参数 Parameter	数值 Value	参数 Parameter	数值 Value
现有坑塘水面率 Present water surface ratio of ponds/%	6.2	排涝泵站投资现值 Present investment value of drainage pumping station/ (万元·s·m ³)	110
现有排水沟道水面率 Present water surface ratio of drainage channels/%	3.2	坑塘管理维护费现值 Management and maintenance fee of ponds/(元·m ²)	2
坑塘日常水深 Daily water depth of ponds/m	0.8	排水沟道管理维护费现值 Management and maintenance fee of channels/(元·m ²)	2.5
沟道系统日常水深 Daily water depth of channel networks/m	1.2	排涝泵站运行管理费现值 Operation management fee of drainage pumping station/ (万元·s·m ³)	11
开挖河网费用 Cost of river network excavation/(元·m ³)	10	泵站工程经济寿命 Economic life of pumping station engineering/a	20
填埋河网费用 Cost of river network landfill/(元·m ³)	8	坑塘(湖泊)整治工程经济寿命 Economic Life of pond reconstruction engineering/a	35
规划区面积 Planning area/km ²	48	一次支付现值系数 Present value coefficient of one-shot payment	0.26

注：1) 社会折现率取 7%。2) 泵站运行管理费为其投资费用的 10%。
Note: 1) Social discount rate is 7%. 2) The operation and management fee of pumping station is 10% of its investment fee.

目标函数： $Z = \min \{G_1 + G_2 + 1.21x_3\}$

$$G_1 = \begin{cases} 341.76(x_1 - 6.2\%) + 96x_1, & x_1 \geq 6.2\% \\ 273.41(6.2\% - x_1) + 96x_1, & x_1 < 6.2\% \end{cases} \quad G_2 = \begin{cases} 512.64(x_2 - 3.2\%) + 120x_2, & x_2 \geq 3.2\% \\ 410.11(3.2\% - x_2) + 120x_2, & x_2 < 3.2\% \end{cases} \quad (21)$$

$$\text{约束条件: } \begin{cases} x_3 + 108x_1 + 102x_2 - 53.05 = 0 \\ 10\% \leq x_1 + x_2 \leq 20\% \\ 2\% \leq x_2 \leq 4\% \\ 2.0e^{(11.57 \times (-0.006) \times (38.4x_1 + 57.6x_2)) / (1.28)} \leq 1.5 \\ 0.2e^{(11.57 \times (-0.022) \times (38.4x_1 + 57.6x_2)) / (1.28)} \leq 0.1 \\ 40e^{(11.57 \times (-0.1) \times (38.4x_1 + 57.6x_2)) / (1.28)} \leq 30 \end{cases} \quad (22)$$

采用遗传算法对模型进行求解得：坑塘水面率 $x_1=8.15\%$ ，排水沟道水面率 $x_2=3.17\%$ ，排涝流量 $x_3=41.01 \text{ m}^3/\text{s}$ ，对应的排涝模数为 $0.86 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ ，工程总费用现值 Z 为 56.411 百万元。将圩内现状情形下的排涝参数和水质类别同规划情形下的参数进行对比，结果见表 3。

综上，当规划规划总水面率为 11.32%，其中：坑塘水面率为 8.15%、沟道水面率为 3.17%，设计排涝模数为 $0.86 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 时，圩区可达 20 年一遇设计排涝标准；圩内水体可达到 IV 类水标准。

2) 日常运行时，水质降解参数的确定

低洼地区的灌区沟塘-排水沟道系统在非排涝时间，一般保持日常水位，以保证农田降渍、滞涝蓄水、养殖等一种或多种功能。本文选取里下河地区渠南灌区枯水季节 11 月的水质为代表，进行典型分析，确定日常排水时的相关水质参数。其中，污染物初始浓度以及 IV 类水的水质标准值根据文献[23]确定；水质降解系数根据文献[24]和中国环境规划院制定的《全国地表水水环境容量核定技术复核要点》确定，具体取值见表 2。

表 2 渠南灌区 11 月水质相关参数
Table 2 Relevant parameters of water quality in Qunan irrigation district in November

水质指标 Water quality index	污染物初始浓度 Initial concentration of pollutant/ (mg·L ⁻¹)	水质降解系数 Water quality degradation coefficient/d ⁻¹	IV 类水的水质标准值 Water quality standard of class IV water/ (mg·L ⁻¹)
总氮 Total N	2.0	0.006	1.5
总磷 Total P	0.2	0.022	0.1
铬的化学需氧量 Chemical oxygen demand of chrome (COD _{Cr})	40	0.100	30

3.2 结果与分析

3.2.1 灌区优化模型

根据 3.1 节相关参数计算可得渠南灌区优化模型

表 3 圩内现状水面与规划水面下排涝相关参数及水质类别
Table 3 Waterlogging related parameters and water quality categories of present and planned water surface in polder area

参数 Parameter	现状 Present	规划 Planned
总水面率 Total water surface ratio/%	9.40	11.32
坑塘水面率 Water surface ratio of ponds/%	6.20	8.15
沟道系统水面率 Water surface ratio of channels/%	3.20	3.17
排涝模数 Drainage modulus/(m ³ ·s ⁻¹ ·km ²)	0.65	0.86
排涝标准 Drainage standard	5 年一遇、10 年一遇	20 年一遇
水质类别 Water quality categories	V	IV

3.2.2 现状灌排系统情况与基于暗管排水高标准农田模式下工程系统的优化

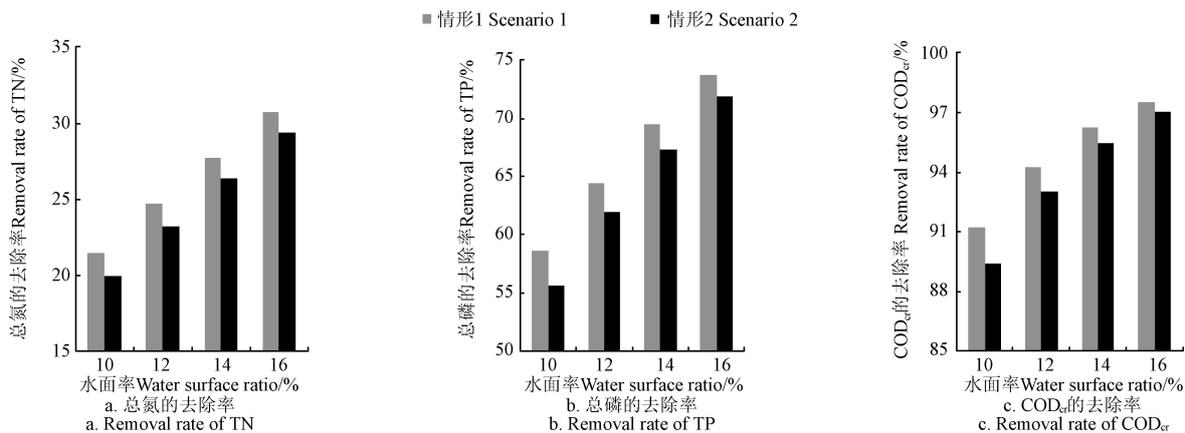
1) 高标准农田建设，如果依然采用明渠灌溉、明沟排水方式，即沟道系统水面率保持 3.20% 不变。当坑塘水面率为 8.15%，总水面率为 11.35% 时，工程建设总费用最小；圩区可达 20 年一遇设计排涝标准，圩内水体可达到 IV 类水标准。

2) 塑料暗管排水技术能够有效防止农田渍害、提高作物品质、保证农业机械及时下田耕作等优点, 是世界公认的低洼地区高标准农田建设发展的方向^[25]。如果渠南灌区高标准农田建设推广塑料暗管排水工程, 采用文献 26 的田块、暗管布置模式 (一级暗管, 布置暗管后, 田间排水明沟仅仅承担排涝任务、不再承担降渍与农田地下水水位控制功能), 即田块规格为 180 m×360 m。以此推算, 规划区内的沟道系统水面率仅为 1.4%。当总水面率为 13.75%, 坑塘水面率为 12.35% 时, 规划区达到 20 年一遇排涝设计标准, 圩内水体可达到 IV 类水标准。

3) 总水面率相同, 沟道水面率分别为 3.2% (情形 1)、1.4% (情形 2) 时对应污染物的去除率与不同排涝设计标准对应的排涝模数, 见表 4。

由表 4 可知: 随着总水面率增加, 圩内水体滞蓄涝水能力增强, 排涝模数逐渐减小; 但当总水面率相同时, 坑塘水面率越大, 对应的排涝模数越小, 圩内坑塘水体承担着主要排涝作用。随着总水面率增加, 水体对污染物的吸附、降解能力增强, TN、TP、COD_{Cr} 的去除率增加; 但当总水面率相同, 坑塘以及沟道水面率占比不同时, 对应的 TN、TP、COD_{Cr} 去除率不同, 水面的分布一定程度上影响了水体对污染物的截留、净化。

4) 绘制情形 1、情形 2 下污染物去除率, 见图 3。



注: 情形 1 和 2 分别指沟道水面率为 3.2%、1.4% 时对应的污染物去除率。

Note: Scenario 1 and scenario 2 refer to the corresponding pollutant removal rates when the channel surface ratios are 3.2% and 1.4%, respectively.

图 3 不同水面率下污染物的去除率

Fig.3 Removal rate of pollutants under different water surface ratio

本文采用情形 1 下的沟道水面率, 即保持沟道水面率为 3.2% 不变, 增加坑塘水面率的工程模式, 可提升圩区的防洪除涝与水质净化能力。

4 结论

本文构建了兼顾圩区排涝与水质要求的非线性数学模型, 采用遗传算法进行求解, 并对江苏省里下河地区渠南灌区进行实例分析。当圩内总水面率为 11.35%, 其中坑塘水面率为 8.15%、沟道系统水面率为 3.20%, 设计排涝模数为 0.86 m³/(s·km²) 时, 圩区的排涝能力以及水质类别均有提升, 排涝标准由 5 年一遇、10 年一遇提高到 20 年一遇, 水质类别由 V 类水提升为 IV 类水。该研究

由图 3 可知: 在总水面率相同时, 情形 1 对应污染物的去除率比情形 2 高; 但随着总水面率增加, 情形 1、情形 2 对应 TN 以及 TP 的去除率差值逐渐减小, 说明随着水面率增加, 坑塘 (湖泊) 对污染物的净化作用增强。因此, 在总水面率一定时, 可适当增加圩内的坑塘面积, 减小沟道系统面积, 推广基于暗管排水的高标准农田模式, 具有现实意义。

表 4 不同排涝标准与水面率下排涝模数和污染物去除率
Table 4 Drainage modulus and pollutant removal rate under different drainage standards and water surface ratio

水面率 Water surface ratio/%	污染物去除率 Removal rates of pollutants/%			不同排涝标准下排涝模数 Drainage modulus at different drainage standards/(m ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²)			
	坑塘 Ponds	沟道 Channels	TN	TP	COD _{Cr}	10 年一遇 Once every 10 years	20 年一遇 Once every 20 years
10	6.8	3.2	21.46	58.59	91.24	0.528	0.881
	8.6	1.4	19.98	55.66	89.43	0.521	0.878
12	8.8	3.2	24.67	64.43	94.25	0.476	0.836
	10.6	1.4	23.24	61.92	93.05	0.469	0.833
14	10.8	3.2	27.74	69.45	96.22	0.424	0.790
	12.6	1.4	26.37	67.29	95.44	0.417	0.787
16	12.8	3.2	30.69	73.76	97.52	0.372	0.744
	14.6	1.4	29.38	71.90	97.01	0.365	0.741

方法为水系发达的南方平原河网地区在国土整治与水利规划中, 改善土地利用结构、优化排涝设计参数、减轻农业面源污染、净化河湖水质等方面提供一条新的途径。

本文在模型构建中采用了一级推流方程来描述农田排水中污染物的降解过程, 这虽然是一种简化处理, 但是对于污染物浓度相对稳定的农业污染, 可以很好地描述污染物的动态变化。另外, 本文将坑塘与沟道系统组成的河网水系看作是湿地系统, 并没有考虑两者降解能力的差别, 将水体对污染物的物理、化学和生物净化作用概化为水质综合衰减系数, 用以反映污染物在水体中的降解速率。其实, 坑塘系统的分布及形态、水生植物的配置等都会影响圩区的排涝与水质净化能力, 后续研

究可就坑塘与沟道降解能力开展试验测定, 分析坑塘与沟道系统的生态功能。

[参 考 文 献]

- [1] Rova S, Pranovi F. Analysis and management of multiple ecosystem services within a social-ecological context[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 72: 436-443.
- [2] He J Q, Wang S J, Liu Y Y, et al. Examining the relationship between urbanization and the eco-environment using a coupling analysis: Case study of Shanghai, China[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 77: 185-193.
- [3] Wang J, Liu J H, Wang H, et al. Matching analysis of investment structure and urban inundation control function of sponge cities in China[J/OL]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 266. (2020-05-05) [2021-03-03] <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121850>.
- [4] Bodoque J M, Ladera J, Yela J L, et al. Recovering hydromorphological functionality to improve natural purification capacity of a highly human-modified wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 103: 332-343.
- [5] Cuaresma D C N, Soliguin B P U, Japitana R A, et al. Systems analysis and modelling of pollution loading for management of calumpang river in Batangas city, Philippines[J]. *International Journal of Environmental and Rural Development*, 2019, 7(2): 134-140.
- [6] 郭元裕, 白宪台, 雷声隆. 南方圩(湖)区最优水面率研究[J]. *水利学报*, 1982(7): 8-17.
Guo Yuanyu, Bai Xiantai, Lei Shenglong. The study on optimum ratio of water surface in plain polder areas of southern China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1982(7): 8-17. (in Chinese with English abstract)
- [7] 丁继辉, 俞双恩, 宋静茹. 土地整理项目区适宜水面率模型[J]. *排灌机械工程学报*, 2013, 31(2): 180-184.
Ding Jihui, Yu Shuangen, Song Jingru. Suitable water surface ratio of land consolidation project areas[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2013, 31(2): 180-184. (in Chinese with English abstract)
- [8] Bu J H, Peng C, Li C H, et al. A method for determining reasonable water area ratio based on flood risk and cost-effectiveness in Rainy City[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(19): 122-131.
- [9] Pal S, Talukdar S. Drivers of vulnerability to wetlands in Punarbhaba river basin of India-Bangladesh[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93(5): 612-626.
- [10] Clara E S, Gabriel G M, Ángel P M M. Risk assessment of climate change impacts on Mediterranean coastal wetlands: Application in Júcar River Basin District (Spain)[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 790: 148032.
- [11] 盛子涵, 蒋晓红, 龚志浩, 等. 基于海绵城市建设理念的圩垸地区城市排涝主要设计参数优化方法[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(5): 164-170.
Sheng Zihan, Jiang Xiaohong, Gong Zhihao, et al. Design parameters of urban drainage in polder areas based on sponge city construction concept[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(5): 164-170. (in Chinese with English abstract)
- [12] Vymazal J, Březinová T. The use of constructed wetlands for removal of pesticides from agricultural runoff and drainage: A review[J]. *Envi Inter*, 2015, 75(2): 11-20.
- [13] Gregoire C, Elsaesser D, Huguenot D, et al. Mitigation of agricultural nonpoint-source pesticide pollution in artificial wetland ecosystems[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2009, 7(3): 205-231.
- [14] 许青, 贾忠华, 罗纨, 等. 兼顾经济与环境效益的排水沟塘保护与改造模式研究[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(增刊1): 48-54.
Xu Qing, Jia Zhonghua, Luo Wan, et al. Study on protection and transformation model of drainage ditches considering economic and environmental benefits[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(Sup.1): 48-54. (in Chinese with English abstract)
- [15] 罗纨, 朱金城, 贾忠华, 等. 排水沟塘分布特性及与农田水力联系对水质净化能力的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(10): 161-167.
Luo Wan, Zhu Jincheng, Jia Zhonghua, et al. Effect of distribution characteristic and field hydraulic connection of drainage ditches and ponds on water quality purification[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(10): 161-167. (in Chinese with English abstract)
- [16] Yang J, Liu X J, Ying L M, et al. Correlation analysis of environmental treatment, sewage treatment and water supply efficiency in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 708: 135128.
- [17] Gros M, Blum K M, Jernstedt H, et al. Screening and prioritization of micropollutants in wastewaters from on-site sewage treatment facilities[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 328: 37-45.
- [18] Arheimer B, Wittgren H B. Modelling nitrogen removal in potential wetlands at the catchment scale[J]. *Ecological Engineering: The Journal of Ecotechnology*, 2002, 19(1): 63-80.
- [19] 江苏省水利厅. 江苏农村水利[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021: 21-22.
- [20] 李凯, 王永强, 许继军, 等. 基于 SWAT 模型的巴勒根河流域降雨径流关系研究[J/OL]. *长江科学院院报*, 1-9[2022-01-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.tv.20210624.2139.014.html>.
- [21] Li Kai, Wang Yongqiang, Xu Jijun, et al. Balgen River basin based on SWAT model study on the relationship between rainfall and runoff[J/OL]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1-9[2022-03-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.tv.20210624.2139.014.html>. (in Chinese with English abstract)
- [22] 马雪鑫, 李畅游, 史小红. 乌梁素海水环境容量分析[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(6): 105-112.
Ma Xuexin, Li Changyou, Shi Xiaohong. Environment capacity of the Wuliangsu Lake[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(6): 105-112. (in Chinese with English abstract)
- [22] 万金颖. 关于水污染物总量控制研究进展及问题分析[J]. *环境与发展*, 2020, 32(4): 83-84.
Wan Jinying. Research progress and problem analysis of total

- water pollutants control[J]. *Environment Development* 2020, 32(4): 83-84. (in Chinese with English abstract)
- [23] GB3838-2002, 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [24] 姜翠玲. 沟渠湿地对农业非点源污染物的截留和去除效应[D]. 南京: 河海大学, 2004.
Retention and Removal Effect of Ditch Wetlands on Non-point Source Pollutants from Agricultural Drainage[D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [25] Koshiyamar N. Influence of field water management by land consolidation in paddy field zone in Hokkaido, Japan[J]. *Irrigation and Drainage*, 2019, 68(1): 103-108.
- [26] 孙晨. 江苏省里下河洼地现代高标准农田水利工程模式研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
Sun Chen. Research on the Construction of Modern High Standard Farmland in Lixiahe Area of JiangSu Province[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021. (in Chinese with English abstract)

Determining the optimal water surface ratio in agricultural polder areas considering drainage standard and water quality requirements

Cheng Jilin¹, Xu Jing¹, Wang Liang¹, Jiang Xiaohong¹, Gao Shan²

(1. School of Water Conservancy Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Jiangsu Water Conservancy Engineering Construction Bureau, Nanjing 210029, China)

Abstract: This study aims to optimize the current engineering system for drainage waterlogging and water environment in agricultural polder areas. The research object was taken as the Lixiahe polder area in Jiangsu Province, China. Therefore, a mathematical model was also proposed to determine the optimal water surface ratio in the ponds and drainage channels wetland system in study areas. The objective function was set as the present minimum of the total project cost. The constraint conditions mainly included the following relational expressions: 1) The relationship between the drainage capacity of the pumping station and the water surface ratio of ponds and drainage channels. 2) The optimal range of the maximum and minimum water surface ratio was determined in the study area, which was closely related to the local natural conditions, indigenous culture, and land planning. 3) The removal rates of TN, TP, and COD_{Cr} were selected to determine the relationships between water environmental capacity, ponds, and drainage channels wetland system in polder areas. The decision variables included the water surface ratio of ponds, the water surface ratio of drainage channels, and the design of drainage flow. An Intelligent -Genetic Algorithms (GAs) was utilized to solve the mathematical model, due to the nonlinear calculation rather than the general. After that, a case study was applied to the pond and drainage channel engineering system in the polder area of Funing County. The specific results were as follows: 1) The water surface ratio reached 11.35% under the open ditch drainage system in the planning areas, where the water surface ratio of ponds was 8.15%, particularly increased, compared with the current. 2) The water surface ratio of drainage channels reached 3.20%, which remained the current status. 3) The design drainage discharge was 41.01 m³/s, and the designed drainage modulus reached 0.86 m³/(s·km²). An optimization scheme was expected to fully meet the standard requirements of the regional 20-year flood drainage. At the same time, the water body quality inside the polder areas reached Class IV level, where the outside was Class V. Therefore, the adsorption and degradation of water to pollutants were enhanced to accelerate the removal rates of pollutants, with the increase of total water surface ratio. There were different proportions of water surface ratio between ponds and drainage channels, leading to the different removal rates of TN, TP, and COD_{Cr}, although the total water surface ratio was all the same in the polder areas. Correspondingly, the distribution of water surfaces dominated the interception and purification of pollutants by water bodies. This finding can also provide a strong reference for similar areas in flood control, drainage planning, reallocation of land, and river-lake water purification.

Keywords: pollution; drainage; water quality purification; agricultural polder area; water surface ratio; optimization method