

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0075

高峰, 齐真, 王好芳, 等. 现代水网建设的区域生态效应可变模糊评价[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 102-109. GAO F, QI Z, WANG H F, et al. Variable fuzzy evaluation of regional ecological effects of modern water network construction[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 102-109. (in Chinese)

现代水网建设的区域生态效应可变模糊评价

高峰¹, 齐真², 王好芳², 赵然杭², 王兴菊², 白珊²

(1. 山东省水利勘测设计院, 济南 250013; 2. 山东大学 土建与水利学院, 济南 250061)

摘要: 现代水网建设旨在解决区域水资源短缺、地下水超采以及生态恶化等问题, 为了评估现代水网建设的生态功能, 对现代水网建设产生的生态效应进行评价。以青州市为研究区域, 以2013年为基准年, 2020年和2025年为规划年, 在50%、75%和95%保证率下, 通过青州市现代水网进行水资源优化配置和调度, 根据配置和调度结果, 选取5个生态效应评价指标, 构建生态效应评价指标体系, 采用可变模糊评价法, 对青州市现代水网建设产生的生态效应进行评价。结果表明, 青州市现代水网建设后, 生态状况等级比建设前提升了1~3级, 生态环境明显改善。因此, 区域现代水网建设和生态调度对生态环境改善有重要作用。

关键词: 生态效应; 可变模糊评价; 现代水网建设; 水资源; 青州市

中图分类号: TV213.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)03-0102-08

Variable fuzzy evaluation of regional ecological effects of modern water network construction

GAO Feng¹, QI Zhen², WANG Haofang², ZHAO Ranhang², WANG Xingju², BAI Shan²

(1. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan 250013, China;

2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The modern water network construction is intended to solve the problems of water shortage, groundwater overdraft, and ecological deterioration. This paper evaluates the ecological effects of modern water network construction so as to assess the ecological function of modern water network construction. We took Qingzhou City as the research area, and took 2013 as the base year and 2020 and 2025 as the planning years. At 50%, 75% and 95% assurance rates, we conducted optimal allocation and dispatching of water resources through Qingzhou modern water network. According to the allocation and dispatching results, we selected 5 evaluation indexes of ecological effects, and constructed an index system of ecological effects evaluation. Using variable fuzzy evaluation method, we evaluated the ecological effects of the construction of modern water network in Qingzhou. The results showed that the ecological level improved by 1-3 grades after the modern water network was constructed, and the ecological environment was obviously improved. Therefore, the regional modern water network construction and ecological dispatching play an important role in improving the ecological environment.

Key words: ecological effect; variable fuzzy evaluation; modern water network construction; water resources; Qingzhou City

收稿日期: 2017-09-12 修回日期: 2017-11-17 网络出版时间: 2018-01-05

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180105.1502.002.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑项目“南水北调河渠湖库联合调控关键技术与示范”(2015BA B07B02); 山东省水利厅、山东省重大水利科研与技术推广专项资助项目“山东省区域水网运行管理技术与生态效应研究”(SDSLKY201501)与“跨流域调水工程水资源优化配置及供水决策支持系统研究”(SDSLKY201222)

Funds: National Science & Technology Pillar Program during the Twelfth Five year Plan Period "The Key Technology Research and Demonstration for Joint Regulation of River and Lake and Reservoir in the South to North Water Transfer Project" (2015BAB07B02); Special Funding Projects of Shandong Water Conservancy Bureau for Major Water Conservancy Research and Technology Promotion "Study on Operation Management and Ecological Effects of Regional Water Network in Shandong Province" (SDSLKY201501), "Study on Optimal Allocation of Water Resource and Decision Support System of Water Supply in Trans-Basin Water Transfer Project" (SDSLKY201222)

作者简介: 高峰(1969-), 男, 山东菏泽人, 研究员, 主要从事跨流域调水工程、水利水电枢纽工程方面研究。E-mail: 86956326@163.com

通讯作者: 王好芳(1970-), 女, 山东新泰人, 讲师, 主要从事水资源系统规划与管理方面研究。E-mail: whf29@sdu.edu.cn

生态效应是指人类活动引发的生态系统的变化和响应,按照性质可以分为正效应和负效应^[1]。水利工程生态效应是指人类通过修建各类水利工程对生态系统造成的结构和功能的影响,包括生态破坏及生态修复两种效果^[2,3]。针对缺水地区,进行区域水网建设是生态修复的有效途径。20世纪以来,美国、前苏联、澳大利亚及中国等国家,通过跨流域或区域调水,对水资源进行重新分配,以缓解区域水资源短缺等问题,促进社会经济的发展^[4]。近年来,随着生态问题的日益严重,水网建设等调水工程产生的生态效应逐渐受到关注^[5]。

生态效应具有一定的模糊性,一般是通过构建指标体系,采用相应评价方法进行评价。目前,常用的评价方法主要有模糊综合评价法^[6]、模糊模式识别法^[7]、可变模糊评价法^[8,13]、集对评价法^[14]等,其中,可变模糊评价法能够科学合理地确定各样本指标的相对隶属度和相对隶属函数,进而确定各样本的级别特征值。在水利行业,该方法广泛应用于河流健康评价、生态安全评价和风险评估等领域^[15-19]。因此,本文以青州市为研究区域,以2013年为基准年,2020年和2025年为规划年,在50%、75%和95%保证率下,通过研究区域现代水网的水资源优化配置和调度,应用可变模糊集理论^[8,9]和陈守煜提出的可变模糊评价法^[10,13]对基于现代水网建设的配置和调度结果,进行区域生态效应评价,为区域水网的运行调度提供科学依据。

1 研究方法与研究区域

1.1 研究方法

设 U 为论域 u 为 U 中的任意元素。设区间 $[a, b]$ 为实轴上模糊可变集合 V 的吸引域区间,相对差异度 $D_A(u) \in (0, 1]$; 区间 $[c, d]$ 为实轴上包含 $[a, b]$ 的 V 的范围域区间,相对差异度 $D_A(u) \in [-1, 1]$; 设 M 为 $[a, b]$ 中相对差异度 $D_A(u) = 1$ 的点值; 设 x 为 $[c, d]$ 中的任意点值,如图1所示^[10]。

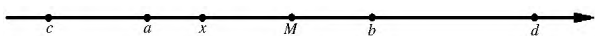


图1 点 x, M 与区间 $[a, b], [c, d]$ 的位置关系

Fig. 1 The position relationship between the points x, M and the interval $[a, b], [c, d]$

建立评价指标特征值矩阵 $X = (x_{ij})$ 、指标标准值矩阵 $Y = (y_{ih})$ 以及点值 M_h 的矩阵。其中, i 为指标; j 为样本; h 为级别, $h = 1, 2, \dots, k, k$ 为级别数。

根据标准值矩阵 Y , 建立吸引域矩阵 I_a 和范围域矩阵 I_d , 判断样本特征值 x_{ij} 的位置。根据式(1)计算相对差异度矩阵 $[D_A(x_{ij})_h]$, 根据式(2)计算相

对隶属度矩阵 $[u_h(x_{ij})_h]$ 。

$$\begin{cases} D_A(u) = \left[\frac{x-a}{M-a} \right]^\beta; x \in [a, M] \\ D_A(u) = - \left[\frac{x-a}{c-a} \right]^\beta; x \in [c, a] \\ D_A(u) = \left[\frac{x-b}{M-b} \right]^\beta; x \in [M, b] \\ D_A(u) = - \left[\frac{x-b}{d-b} \right]^\beta; x \in [b, d] \\ D_A(u) = -1; x \in (c, d) \end{cases} \quad (1)$$

$$u_h(u) = (1 + D_A(u))/2 \quad (2)$$

式中: β 为非负指数,通常可取 $\beta = 1$ 。

根据指标重要性排序一致性定理^[11], 确定评价指标的权向量 ω 。

应用公式

$$j u'_h = \frac{1}{1 + \left[\frac{\sum_{i=1}^m [\omega_i (1 - u_h(x_{ij})_h)]^p}{\sum_{i=1}^m (\omega_i u_h(x_{ij})_h)^p} \right]^{\frac{\alpha}{p}}} \quad (3)$$

式中: $j u'_h$ 为非归一化的综合相对隶属度; ω_i 为指标权重; α 为模型优化准则参数,取1或2; m 为识别指标数; p 为距离参数,取1或2,其中, $p = 1$ 为海明距离, $p = 2$ 为欧氏距离。

在 α 和 p 的不同组合情况下,分别求得样本的相对隶属度,并通过归一化公式

$$j u_h = \frac{j u'_h}{\sum_{h=1}^c j u'_h} \quad (4)$$

得到样本级别特征值矩阵 $[j U_h]$ 。式中, $j u_h$ 为归一化的综合相对隶属度。

应用公式

$$H = (1, 2, \dots, k) \cdot U \quad (5)$$

计算样本级别特征值 H 。

1.2 研究区域概况

青州市地处山东半岛中部,水资源短缺,人均水资源量仅为全国平均水平的1/6。受气候和地理位置影响,青州市河川径流量分布不均。西南部河川径流量占全市的85.4%,东北北部平原区仅占全市的14.6%。而青州市东北部又是工业区,水资源短缺严重,出现了工农业用水大量挤占生态环境用水,造成了东北部地下水严重超采,形成了漏斗区,对青州市的生态环境造成了严重影响^[20]。

为此,青州市于2012年开始进行了现代水网建设,见图2,以青州市“五库”(即仁河水库、黑虎山水库、七一水库、坝沟子水库和赵家庄水库)和“六河”(即淄河、仁河、大石河、南阳河、弥河和北阳河)为骨架,使库河联通、库库联通以及河河联通,实现青州

市水系贯通,丰枯互补。通过水资源合理配置和调度,将西南部丰富的水资源输送到东北部平原区,以解决青州市东北部缺水及地下水漏斗区问题^[21-22]。

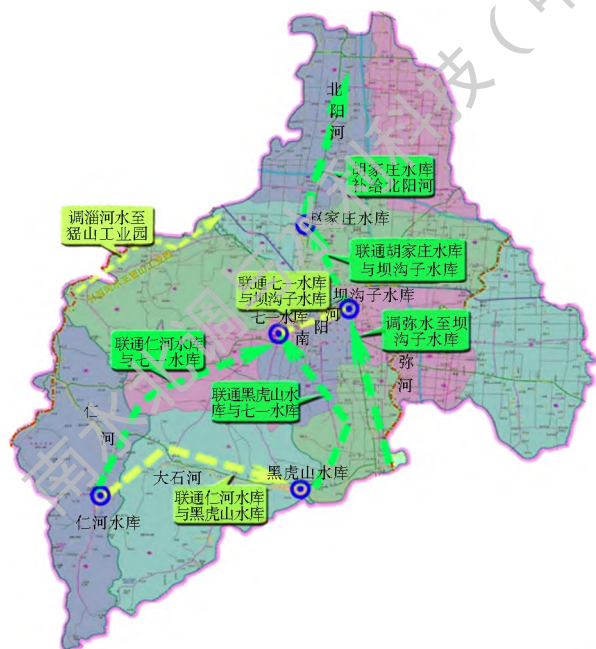


图 2 青州市水网规划联通示意图

Fig. 2 The diagram of planned connections in the water network of Qingzhou City

2 可变模糊评价

本文以 2013 年为基准年,2020 年和 2025 年为规划年,在 50%、75% 和 95% 保证率下,通过青州市现代水网建设的水资源优化配置和调度方案,对青州市现代水网建设产生的生态效应进行评价。

2.1 水资源优化调度方案

基于青州市现代水网建设,以 2013 年为基准年,2020 年和 2025 年为规划年,确定 50%、75% 和 95% 保证率下的各水源可供水量及各用水户需水量,以社会、经济和生态综合效益最大的为目标,建立多目标的水资源优化配置模型,见式(6)和式(7)。

$$\text{目标函数: } \begin{cases} \min f_1 = \sum_{k=1}^K (D_k - Q_k) \\ \max f_2 = \sum_{k=1}^K (b_k Q_k - c_k Q_k) \\ \min f_3 = \left(\frac{D_e - Q_e}{D_e} \right)^2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{约束条件: } \begin{cases} Q_{k\min} \leq Q_k \leq D_k \\ \sum_{k=1}^K Q_k \leq Q \\ Q_k \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: f_1 为社会效益; D_k 为第 k 个用户的需水量(万 m^3); Q_k 为第 k 个用水户的供水量(万 m^3); K

为用水户数量; f_2 为经济效益; b_k 为第 k 个用水户的供水效益系数(元/ m^3), c_k 为第 k 个用水户的供水费用系数(元/ m^3); f_3 为生态效益; D_e 生态需水量; Q_e 为生态供水量(万 m^3); $Q_{k\min}$ 为第 k 个用水户的供水下限, Q 为可供水量。

利用理想点法求解该模型,得到青州市水资源优化配置方案,然后,在近水近用、优水优用等原则下,既考虑水网工程的供水能力和用水实际需求,制定青州市水资源优化调度方案,其中,青州市水资源优化调度方案中生态部分详见表 1 和表 2。

表 1 水资源优化调度方案生态部分成果
Tab. 1 Ecological outcomes of the optimal dispatching scheme of water resources

规划年	保证率 (%)	生态供水量			生态需水量		
		河道外生态供水量	河道内生态供水量	合计	河道外生态需水量	河道内生态需水量	合计
		万 m^3			万 m^3		
2020	50	49	276	325	49	276	325
	75	62	256	318	66	276	342
	95	51	169	220	83	276	359
2025	50	54	276	330	54	276	330
	75	69	261	330	73	276	348
	95	47	143	191	91	276	367

注:表中生态需水量通过青州市水资源供需平衡分析得到。

表 2 水资源优化调度方案地下水开采量统计

Tab. 2 Groundwater exploitation quantity of the optimal dispatching scheme of water resources

规划年	保证率 (%)	地下水开采量	地下水可开采量
万 m^3			
2020	50	4 279	6 902
	75	5 522	5 522
	95	4 141	4 141
2025	50	2 830	6 902
	75	5 522	5 522
	95	4 141	4 141

注:表中地下水可开采量通过青州市可开采地下水模数计算得到。在 50% 保证率下,青州市需水量小于可供水量,为了缓解青州市地下漏斗区问题,减少地下水资源的开采;在 75% 和 95% 保证率下,青州市需水量大于可供水量,既能够使水资源综合效益最大化,又要防止地下漏斗区问题恶化,取地下水开采量等于地下水可开采量。

2.2 指标体系构建

为了有效地评价现代水网建设产生的生态效应,根据实地考察发现,青州市生态系统脆弱或恶化是由于水资源短缺,可供水量不能有效地满足生态用水需求造成的。因此,本文结合青州市生态状况,以科学性、代表性、简明和可操作性的原则,重点从水量方面考虑河道内和河道外生态用水状况,选取生态效应指标,构建生态效应评价指标体系,以评价青州市现代水网建设对青州市东北部生态状况的改善情况。各指标选取如下。

(1) 生态水资源满足程度(%)。

生态水资源满足程度指河道内外总的生态供水量与需水量的比值(以百分比表示)。该指标反映青州市东北部平原区生态用水的整体满足程度。

(2) 地下水开采率(%)。

地下水开采率是指地下水开采量与可开采量的比值(以百分比表示)。可开采量指每年的地下水补给量。当地下水开采量大于补给量时,就会造成地下水超采,超采严重时会导致地下漏斗区的产生。因此,地下水开采率能够反映青州市东北部平原区地下水开采对地下水漏斗区恶化或缓解程度。

(3) 河道内生态水资源满足程度(%)。

河道内生态水资源满足程度是指河道内生态供水流量与生态需水流量的比值(以百分比表示)。青州市东北部平原区最主要的两条河流为北阳河和南阳河。因此,河道内生态水资源满足程度主要是指北阳河和南阳河河道内的生态用水满足情况,反映北阳河和南阳河河道内的生态状况。

(4) 河道外生态水资源满足程度(%)。

河道外生态水资源满足程度是指河道外生态供水量与需水量的比值(以百分比表示)。主要指青州市东北部绿化用水、浇洒路面用水等满足情况。

(5) 生态供水保证率(%)。

生态供水保证率是指在用来供水的河道内,流量大于基本生态流量的天数比例。弥河是青州市最大的过境河流,水资源较为丰富,是重要的客水资源,从弥河调水可有效缓解青州市东北部的缺水状态,对地下漏斗区的修复具有重要作用。但从弥河调水时应首先要保证弥河河道内的基本生态用水,因此,选用该指标来度量弥河可向青州市东北部调度水资源的能力。

根据青州市 2013 年水资源开发利用情况、现代水网建设的水资源优化调度方案(表 1 和表 2) 以及各水平年弥河水资源状况,得到各评价指标特征值,详见表 3。

表 3 评价指标特征值统计
Tab. 3 The eigenvalues of evaluation indexes

评价指标	2013 年			2020 年			2025 年		
	50%	75%	95%	50%	75%	95%	50%	75%	95%
生态水资源满足程度(%)	31	24	16	100	93	61	100	95	52
地下水开采率(%)	127	199	338	62	100	100	41	100	100
河道内生态水资源满足程度(%)	20	12	5	100	93	61	100	95	52
河道外生态水资源满足程度(%)	65	60	50	100	93	61	100	95	52
生态供水保证率(%)	75	83	50	83	83	50	75	83	50

2.3 评价等级划分

评价等级划分是依据研究区的实际生态状况,结合水资源规划等相关资料,统计各指标的标准差、平均值、中位数、最大值和最小值等统计参数特征值,并参考相关文献[23-25],将青州市各评价指标分为 5 个等级,等级 1 情况属优,等级 2 情况属良,等级 3 情况属中等,等级 4 情况属较差,等级 5 情况属很差。各评价指标划分标准详见表 4。

表 4 评价指标等级划分统计

Tab. 4 The division criteria of evaluation indexes

评价指标	等级 1	等级 2	等级 3	等级 4	等级 5
生态水资源满足程度(%)	90~ 100	80~ 90	60~ 80	30~ 60	0~ 30
地下水开采率%	0~ 50	50~ 75	75~ 100	100~ 200	200~ 500
河道内生态水资源满足程度(%)	90~ 100	80~ 90	60~ 80	30~ 60	0~ 30
河道外生态水资源满足程度(%)	90~ 100	80~ 90	60~ 80	30~ 60	0~ 30
生态供水保证率(%)	95~ 100	85~ 95	70~ 85	50~ 70	0~ 50

2.4 评价过程及结果

以 2013 年青州市东北部生态状况评价为例,介绍可变模糊评价过程。

根据表 1 和表 2 建立青州市评价指标特征值矩阵 $X = (x_{ij})$ 与指标标准值矩阵 $Y = (y_{jh})$ 。

$$X = \begin{bmatrix} 31 & 24 & 16 \\ 127 & 199 & 338 \\ 20 & 12 & 5 \\ 65 & 60 & 50 \\ 75 & 83 & 50 \end{bmatrix} = (x_{ij})$$

$$Y = \begin{bmatrix} 90\sim 100 & 80\sim 90 & 60\sim 80 & 30\sim 60 & 0\sim 30 \\ 0\sim 50 & 50\sim 75 & 75\sim 100 & 100\sim 200 & 200\sim 500 \\ 90\sim 100 & 80\sim 90 & 60\sim 80 & 30\sim 60 & 0\sim 30 \\ 90\sim 100 & 80\sim 90 & 60\sim 80 & 30\sim 60 & 0\sim 30 \\ 95\sim 100 & 85\sim 95 & 70\sim 85 & 50\sim 70 & 0\sim 50 \end{bmatrix} = (y_{jh})$$

其中, $i = 1, 2, \dots, 5$ 为指标号; $j = 1, 2, 3$ 为水平年号; $h = 1, 2, \dots, 5$ 为级别编号。

参照指标标准值矩阵 Y, 建立青州市生态状况

评价指标可变集合的吸引域矩阵 I_{ab} 与范围域矩阵 I_{cd} 以及点值 M_{ih} 的矩阵。

$$I_{ab} = \begin{bmatrix} [90, 100] & [80, 90] & [60, 80] & [30, 60] & [0, 30] \\ [0, 50] & [50, 75] & [75, 100] & [100, 200] & [200, 500] \\ [90, 100] & [80, 90] & [60, 80] & [30, 60] & [0, 30] \\ [90, 100] & [80, 90] & [60, 80] & [30, 60] & [0, 30] \\ [95, 100] & [85, 95] & [70, 85] & [50, 70] & [0, 50] \end{bmatrix}$$

$$I_{cd} = \begin{bmatrix} [80, 100] & [60, 100] & [30, 90] & [0, 80] & [0, 60] \\ [0, 75] & [0, 100] & [50, 200] & [75, 500] & [100, 500] \\ [80, 100] & [60, 100] & [30, 90] & [0, 80] & [0, 60] \\ [80, 100] & [60, 100] & [30, 90] & [0, 80] & [0, 60] \\ [85, 100] & [70, 100] & [50, 95] & [0, 85] & [0, 70] \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} 100 & 85 & 70 & 45 & 0 \\ 0 & 65 & 90 & 150 & 500 \\ 100 & 85 & 70 & 45 & 0 \\ 100 & 85 & 70 & 45 & 0 \\ 100 & 90 & 80 & 60 & 0 \end{bmatrix}$$

根据公式(1)计算相对差异度矩阵 $[D_A(x_{ij})_h]$ 。

$$[D_A(x_{i1})_h] = \begin{bmatrix} -1.00 & -1.00 & -0.97 & 0.07 & -0.03 \\ -1.00 & -1.00 & -0.27 & 0.54 & -0.73 \\ -1.00 & -1.00 & -1.00 & 0.33 & 0.33 \\ -1.00 & -0.75 & -0.50 & 0.25 & -1.00 \\ -1.00 & -0.67 & -0.50 & 0.33 & -1.00 \end{bmatrix}$$

$$[D_A(x_{i2})_h] = \begin{bmatrix} -1.00 & -1.00 & -0.11 & -0.20 & 0.20 \\ -1.00 & -1.00 & -0.99 & 0.02 & -0.01 \\ -1.00 & -1.00 & -1.00 & -0.60 & 0.60 \\ -1.00 & -1.00 & 0.00 & 0.00 & -1.00 \\ -1.00 & -0.13 & 0.40 & -0.87 & -1.00 \end{bmatrix}$$

$$[D_A(x_{i3})_h] = \begin{bmatrix} -1.00 & -1.00 & -1.00 & -0.47 & 0.47 \\ -1.00 & -1.00 & -1.00 & -0.46 & 0.46 \\ -1.00 & -1.00 & -1.00 & -0.83 & 0.83 \\ -1.00 & -1.00 & -0.33 & 0.67 & -0.67 \\ -1.00 & -1.00 & -1.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}$$

根据公式(2)计算指标 j 对 h 级的相对隶属度矩阵 $[M_A(x_{ij})_h]$ 。

$$[M_A(x_{i1})_h] = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.02 & 0.54 & 0.49 \\ 0.00 & 0.00 & 0.37 & 0.77 & 0.14 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.34 & 0.67 \\ 0.00 & 0.13 & 0.75 & 0.38 & 0.00 \\ 0.00 & 0.17 & 0.75 & 0.34 & 0.00 \end{bmatrix}$$

$$[M_A(x_{i2})_h] = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.40 & 0.60 \\ 0.00 & 0.00 & 0.01 & 0.51 & 0.50 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.20 & 0.80 \\ 0.00 & 0.00 & 0.50 & 0.50 & 0.00 \\ 0.00 & 0.44 & 0.70 & 0.07 & 0.00 \end{bmatrix}$$

$$[M_A(x_{i3})_h] = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.27 & 0.74 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.27 & 0.73 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.09 & 0.92 \\ 0.00 & 0.00 & 0.34 & 0.84 & 0.17 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.50 & 0.50 \end{bmatrix}$$

根据指标重要性排序一致性定理^[11], 得到指标重要性排序一致性标度矩阵 F 。

$F =$	$\begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0.5 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0.5 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{bmatrix}$	排序 1 ° » ¼ ½
-------	---	-----------------------------

按矩阵 F 关于重要性的排序, 以排序为 1 的指标 x_1 逐一地与排序为 °、»、¼、½ 的指标, 进行二元比较。指标 x_1 与指标 x_2 相比, 处于“略为”; 指标 x_1 与指标 x_3 相比, 处于“明显”; 指标 x_1 与指标 x_3 相比, 处于“十分”; 指标 x_1 与指标 x_5 相比, 处于“非常”, 根据表 5 得到非归一化的评价指标权向量为

$$\omega_1 = (1.000, 0.667, 0.429, 0.250, 0.176)$$

表 5 语气算子与相对隶属度关系对照表^[12]

Tab. 5 The relationship between tone operator and relative membership degree

语气算子	同样	同样与稍稍之间	稍稍	稍稍与略为之间	略为	略为与较为之间	较为	较为与明显之间	明显	明显与显著之间	
φ_{ij}	1.0	0.905	0.818	0.739	0.667	0.60	0.538	0.481	0.429	0.379	
语气算子	显著	显著与十分之间	十分	十分与非常之间	非常	非常与极其之间	极其	极其与极端之间	极端	极端与无可比拟之间	无可比拟
φ_{ij}	0.333	0.290	0.250	0.212	0.176	0.143	0.111	0.081	0.053	0.026	0

归一化处理后得到归一化权向量

$$\omega_1 = (0.397, 0.264, 0.170, 0.099, 0.070) = (\omega_i)$$

应用公式(3)计算得到青州市生态状况的非归

一化相对隶属度矩阵 $[{}_j U_h]$ 。

$$[{}_1 U_h] = \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0248 & 0.0328 & 0.0006 & 0.0003 \\ 0.2324 & 0.2263 & 0.0839 & 0.0149 \\ 0.5369 & 0.5636 & 0.5734 & 0.0809 \\ 0.3454 & 0.4074 & 0.2178 & 0.0470 \end{bmatrix}$$

$$[{}_2 U_h] = \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0308 & 0.0562 & 0.0010 & 0.0008 \\ 0.1011 & 0.1207 & 0.0125 & 0.0041 \\ 0.3818 & 0.4083 & 0.2762 & 0.0416 \\ 0.5062 & 0.5572 & 0.5124 & 0.0817 \end{bmatrix}$$

$$[{}_3 U_h] = \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0337 & 0.0613 & 0.0012 & 0.0009 \\ 0.3119 & 0.2921 & 0.1705 & 0.0220 \\ 0.6947 & 0.7143 & 0.8382 & 0.1279 \end{bmatrix}$$

通过归一化公式(4)得到青州市各水平年生态状况的级别特征值矩阵 $[{}_j U_h]$ 。

$$[{}_1 U_h] = \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0217 & 0.0267 & 0.0007 & 0.0018 \\ 0.2039 & 0.1840 & 0.0959 & 0.1042 \\ 0.4712 & 0.4581 & 0.6547 & 0.5657 \\ 0.3031 & 0.3312 & 0.2487 & 0.3283 \end{bmatrix}$$

$$[{}_2 U_h] = \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0302 & 0.0492 & 0.0013 & 0.0062 \\ 0.0992 & 0.1057 & 0.0156 & 0.0317 \\ 0.3744 & 0.3574 & 0.3443 & 0.3246 \\ 0.4963 & 0.4878 & 0.6388 & 0.6375 \end{bmatrix}$$

$$[{}_3 U_h] = \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0324 & 0.0574 & 0.0012 & 0.0063 \\ 0.2998 & 0.2735 & 0.1688 & 0.1458 \\ 0.6678 & 0.6690 & 0.8300 & 0.8479 \end{bmatrix}$$

根据公式(5)计算级别特征值。同理,计算规划年 2020 年和 2025 年级别特征值。计算结果详见表 6。

表 6 生态状况评价结果

Tab. 6 The evaluation of ecological status

年份	保证率	级别特征值				稳定范围	评价等级
		$\alpha = 1, p = 1, \omega_1$	$\alpha = 1, p = 2, \omega_1$	$\alpha = 2, p = 1, \omega_1$	$\alpha = 2, p = 2, \omega_1$		
2013	50%	4.056	4.094	4.151	4.221	4.056~ 4.221	4
	75%	4.337	4.284	4.621	4.593	4.284~ 4.621	4~ 5
	95%	4.635	4.612	4.829	4.842	4.612~ 4.842	5
2020	50%	2.118	2.059	2.075	2.027	2.027~ 2.118	2
	75%	2.022	2.161	1.507	1.768	1.507~ 2.161	2
	95%	3.516	3.533	3.489	3.466	3.466~ 3.533	3~ 4
2025	50%	1.842	1.875	1.478	1.488	1.478~ 1.875	1~ 2
	75%	1.956	2.121	1.357	1.622	1.357~ 2.121	1~ 2
	95%	3.789	3.781	3.775	3.784	3.775~ 3.789	4

各指标取等权重,即权向量 $\omega_2 = (0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2)$ 时,计算各样本的级别特征值,计算结果详见表 7。

表 7 生态状况评价结果

Tab. 7 The evaluation of ecological status

年份	保证率	级别特征值				稳定范围	评价等级
		$\alpha = 1, p = 1, \omega_2$	$\alpha = 1, p = 2, \omega_2$	$\alpha = 2, p = 1, \omega_2$	$\alpha = 2, p = 2, \omega_2$		
2013	50%	3.797	3.788	3.798	3.807	3.788~ 3.807	4
	75%	3.964	3.800	4.280	4.039	3.8~ 4.28	4~ 5
	95%	4.507	4.392	4.697	4.607	4.392~ 4.697	5
2020	50%	2.314	2.300	2.280	2.307	2.28~ 2.314	2
	75%	2.075	2.235	1.696	1.973	1.696~ 2.235	2
	95%	3.647	3.745	3.587	3.649	3.587~ 3.745	3~ 4
2025	50%	2.372	2.399	2.331	2.375	2.331~ 2.399	1~ 2
	75%	2.017	2.201	1.535	1.841	1.535~ 2.201	1~ 2
	95%	3.882	3.908	3.868	3.892	3.868~ 3.908	4

2.5 分析与讨论

表4和表5结果表明,不同权重下,各样本评价等级一致,可作为最终结果;青州市现代水网建设后,相较于2013年,2020年生态状况在50%、75%和95%保证率下分别由4级、4~5级和5级提高到2级、2级和3~4级,2025年生态状况分别提高到1~2级、1~2级和4级。

其他的评价方法通常选择一套权重以及建立一套评价模型,往往不能保证结果的可靠性和准确性。本文采用可变模糊评价法,选取两套权重,并在基本模型的基础上通过变换参数来变化模型(通过变换参数 α 和 p ,将模型变化为线性和非线性),将稳定结果作为最终结果,对青州市现代水网建设的生态效应进行评价,提高了结果的可靠性和可信度。

3 结论

以青州市为研究区域,进行现代水网建设的区域生态效应评价。结果表明,青州市现代水网建设后,在不同保证率下,生态状况评价等级均有所提高,生态环境得到明显改善,生态效应显著。可变模糊评价法能够客观确定现代水网建设前后的生态状况等级,结果较为可靠准确,为定量评价生态效应提供了参考依据,对区域水生态文明建设具有积极意义。

随着水网建成,在实际运行管理中,建议增加水质和生物多样性等资料,使该指标体系更加完善,评价结果更加科学合理。

参考文献(References):

[1] 马铁民,曾容,徐菲.辽河流域典型水库生态效应评价[J].东北水利水电,2008(10):37-40.(MA T M,ZENG R,XU F.Ecological effect evaluation of typical reservoir in Liao river basin[J].Water Resources & Hydropower of Northeast,2008(10):37-40.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1002-0624.2008.10.015.

[2] 常本春,耿雷华,刘翠善,等.水利水电工程的生态效应评价指标体系[J].水利水电科技进展,2006(6):11-15.(CHANG B C,GENG L H,LIU C S,et al.Index system for ecological effect evaluation of hydropower projects[J].Advances in Science and Technology of Water Resources,2006(6):11-15.(in Chinese)) DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2006.06.003.

[3] 孙宗凤,董重川.水利工程的生态效应分析[J].水利水电技术,2004,35(4):5-8.(SUN Z F,DONG Z C.Analysis on ecological effect of water conservancy project[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2004,35(4):5-8.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-0860.2004.04.002.

[4] 杨立信,刘国纬.国外调水工程[M].北京:中国水利水电出版社,2003.(YANG L X,LIU G W.Foreign water transfer project[M].Beijing:China Water & Power Press,2003.(in Chinese)).

nes e)].

[5] 吕学研,吴时强,张咏,等.调水引流工程生态与环境效应研究进展[J].水资源与水工程学报,2015,26(4):38-45.(LV X Y,WU S Q,ZHANG Y,et al.Progress of ecology and environment effect of water diversion project[J].Journal of Water Resources & Water Engineering,2015,26(4):38-45.(in Chinese)) DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2015.04.08.

[6] 钱挹清.应用模糊综合评判法进行东莞市水资源规划宏观经济社会效益评价[J].珠江现代建设,2006,12(6):1-3,8.(QIAN Y Q.Evaluation of macro economy and social benefit of water resources planning in Dongguan City by Fuzzy Comprehensive Evaluation Method[J].Modern Construction of Zhujiang River,2006,12(6):1-3,8.(in Chinese)).

[7] 陈守煜.区域水资源可持续利用评价理论模型与方法[J].中国工程科学,2001,3(2):33-38.(CHEN S Y.Theoretical model and method of evaluation of regional water resources sustainable utilization[J].Engineering Sciences,2001,3(2):33-38.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1009-1742.2001.02.008.

[8] ZADEH L A.Fuzzy Sets[J].Information and Control,1965,8(3):338-353.

[9] 陈守煜.工程可变模糊集理论与模型模糊水文水资源学数学基础[J].大连理工大学学报,2005,45,(2):308-312.(CHEN S Y.The theory and model of engineering variable fuzzy set[J].Journal of Dalian University of Technology,2005,45,(2):308-312.(in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn.1000-8608.2005.02.031.

[10] 陈守煜,胡吉敏.可变模糊评价法及在水资源承载力评价中的应用[J].水利学报,2006,37(3):264-271.(CHEN S Y,HU J M.Variable fuzzy assessment method and its application in assessing water resources carrying capacity[J].Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(3):264-271.(in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn.0559-9350.2006.03.003.

[11] 陈守煜.工程模糊集理论与应用[M].北京:国防工业出版社,1998.(CHEN S Y.Theory and application of engineering fuzzy sets[M].Beijing:National Defense Industry Press,1998.(in Chinese))

[12] 陈守煜.开放的复杂水资源巨系统概念及决策技术[J].大连理工大学学报,1993,33(5):591-597.(CHEN S Y.Open complex water resources giant system concept and decision technology[J].Journal of Dalian University of Technology,1993,33(5):591-597.(in Chinese))

[13] 陈守煜.水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M].大连:大连理工大学出版社,2005.(CHEN S Y.The theory and method of variable fuzzy set for water resources and flood control system[M].Dalian:Dalian University of Technology Press,2005.(in Chinese))

[14] 王文圣,金菊良,丁晶,等.水资源系统评价新方法集对评价法[J].中国科学E辑:技术科学,2009,39(9):1529-1534.(WANG W S,JIN J L,DING J,et al.New method of water resources system evaluation-set pair evaluation method[J].Science in China(Series E):Technical Science,2009,39(9):1529-1534.(in Chinese))

[15] 田林钢,靳聪聪.景观建设对城市河流生态健康的影响[J].水力发电,2014,40(4):4-8.(TIAN L G,JIN C C.Influence

- of the construction of water landscape on urban river ecology health[J]. *Water Power*, 2014, 40(4): 48. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2014.04.002.
- [16] 陆志强, 李吉鹏, 章耕耘, 等. 基于可变模糊评价模型的东山湾生态系统健康评价[J]. *生态学报*, 2015, 35(14): 4907-4919. (LU Z Q, LI J P, ZHANG G Y, et al. Ecosystem health assessment based on variable fuzzy evaluation model in Dongshan Bay, Fujian, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(14): 4907-4919. (in Chinese) DOI: 10.5846/stxb201312052899.
- [17] 许雪青, 刘忠波, 张晋, 等. 基于可变模糊评价法的渤海海洋生态环境综合评价[J]. *海洋湖沼通报*, 2014, (3): 51-57. (XU X Q, LIU Z B, ZHANG J, et al. Assessment of the marine ecological environment in Bohai Sea based on a variable fuzzy sets method[J]. *Transaction of Oceanology and Limnology*, 2014, (3): 51-57. (in Chinese))
- [18] 曹永强, 朱明明, 张亮亮, 等. 基于可变模糊评价法的大连市水资源承载力分析[J]. *水利水运工程学报*, 2016(4): 40-46. (CAO Y Q, ZHU M M, ZHANG L L, et al. Analysis of carrying capacity of water resources in Dalian based on variable fuzzy assessment method[J]. *Hydr Science and Engineering*, 2016(4): 40-46. (in Chinese) DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.04.006.
- [19] 刘玉玉, 许士国. 可变模糊评价方法在浑河上游河段健康评价中的应用[J]. *水利水电科技进展*, 2013, 33(3): 64-67, 88. (LIU Y Y, XU S G. River health assessment in the upper Hun River based on variable fuzzy model[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2013, 33(3): 64-67, 88. (in Chinese) DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2013.03.014.
- [20] 赵敏敏, 张兴珏, 闫永奎, 等. 山东省青州市利用亚行贷款地下水漏斗区域综合治理示范工程可行性研究报告[R]. 2015. (ZHAO M M, ZHANG X Y, YAN Y L, et al. The report on the feasibility of demonstration project of comprehensive management of groundwater funnel in Qingzhou City, Shandong Province by ADB Loan[R]. 2015(in Chinese))
- [21] 郑良勇, 齐春三, 宋炜. 潍坊市现代水网构建研究[J]. *水利规划与设计*, 2005(11): 3-5, 47. (ZHENG L Y, QI C S, SONG W. Study on modern water network construction in Weifang City[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2005(11): 3-5, 47. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1672-2469.2015.11.002.
- [22] 李莉, 彭慧, 王传荣, 等. 山东省青州市现代水网建设规划[R]. 2012. (LI L, PENG H, WANG C R, et al. Planning of modern water network in Qingzhou City, Shandong Province [R]. 2012. (in Chinese))
- [23] 董哲仁. 河流生态系统研究的理论框架[J]. *水利学报*, 2009, 2(2): 129-137. (DONG Z R. The theoretical framework of rivers ecosystem research[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 2(2): 129-137. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2009.02.001.
- [24] 山东省水资源综合利用中长期规划[Z]. 2016. (Medium and long term plan for comprehensive utilization of water resources in Shandong Province[Z]. 2006. (in Chinese))
- [25] 青州统计年鉴 2013[Z]. 山东省青州市统计局, 2013. (Qingzhou statistical yearbook in 2013[Z]. Statistics Bureau of Qingzhou City, Shandong Province, 2013. (in Chinese))

(上接第 101 页)

- [17] 许强, 董秀军, 邓茂林, 等. 2010 年 7·27 四川汉源二蛮山滑坡-碎屑流特征与成因机理研究[J]. *工程地质学报*, 2010(5): 609-622. (XU Q, DONG X J, DENG M L, et al. The Erman-shan rock slide debris flow of July 27, 2010 in Hanyuan, Sichuan: characteristics and failure mechanism[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, (5): 609-622. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2010.05.003.
- [18] CRUDEN D M, HUNGR O. The debris of the Frank slide and theories of rockslide avalanche mobility[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1986, 23(3): 425-432.
- [19] 王玉峰, 程谦恭, 朱圻. 汶川地震触发高速远程滑坡-碎屑流堆积反粒序特征及机制分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012(6): 1089-1106. (WANG Y F, CHENG Q G, ZHU Q. Inverse grading analysis of deposit from rock avalanches triggered by Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012(6): 1089-1106. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2012.06.002.
- [20] 郝明辉, 许强, 杨兴国, 等. 高速滑坡-碎屑流颗粒反序试验及其成因机制探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015(3): 472-479. (HAO M H, XU Q, YANG X G, et al. Physical modeling tests on inverse grading of particles in high speed landslide debris[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015(3): 472-479. (in Chinese) DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.03.004.
- [21] WANG Y S, HE J X, LUO Y H. Seismic response of the Lengzhuguan slope during Kangding Ms5.8 earthquake[J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(11): 2337-2347. DOI: 10.1007/s11629-017-4368-1.
- [22] 罗永红, 王运生. 汶川地震诱发山地斜坡震动的地形放大效应[J]. *山地学报*, 2013, 31(2): 200-210. (LUO Y H, WANG Y S. Mountain slope ground motion topography amplification effect induced by Wenchuan Earthquake[J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 31(2): 200-210. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2013.02.009.
- [23] 张俊玲. 1879 年甘肃武都南 8 级地震新史料[J]. *西北地震学报*, 2007, 29(3): 264-266. (ZHANG J L. "A new historical record about Southern Wudu M8.0 Great Earthquake in 1879" [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2007, 29(3): 264-266. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2007.03.014.

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0076

何璟嫻, 周静雯, 赵堃, 等. 常州市面源污染减排优化和减排潜力研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 110-117. HE J Y, ZHOU J W, ZHAO K, et al. Optimization of emission reduction measures and assessment of emission reduction potential for Changzhou city[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 110-117. (in Chinese)

常州市面源污染减排优化和减排潜力研究

何璟嫻¹, 周静雯², 赵堃¹, 徐云强¹, 苏保林¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 海淀区上庄镇上庄村委会, 北京 100875)

摘要: 为了对面源污染进行总量控制, 需要对减排潜力进行合理评估, 减排潜力的定量化是基于对减排措施进行优选, 制定一套可行的、兼顾环境效益和经济成本的减排方案。以常州市为案例分析面源污染的减排潜力, 采用能同时进行定量和定性分析的层次分析法对减排方案进行多目标优化, 选取总氮削减率、总磷削减率、氨氮削减率、COD削减率作为环境指标, 建设成本和运行成本作为经济指标, 备选减排措施从常州市及其周边的示范工程和试验工程选取, 确保其可操作性。以2014年为基准年, 根据排污系数法估算常州市面源污染排放总量并根据优化措施计算削减量, 分析各污染指标的减排潜力。研究列出了常州市面源污染适用减排措施清单, 并运用层次分析法对减排工程措施进行优选, 得到了2014年常州市面源污染在综合考虑环境效益和经济成本下的减排潜力。

关键词: 面源污染; 层次分析法; 减排潜力; 最佳管理措施(BMPs); 畜禽养殖

中图分类号: X32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)03-0110-08

Optimization of emission reduction measures and assessment of emission reduction potential for Changzhou city

HE Jingyi¹, ZHOU Jingwen², ZHAO Kun¹, XU Yunqiang¹, SU Baolin¹

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. The Shang-zhuang Village Committee of Shang-zhuang Town, Beijing 100875, China)

Abstract: In order to control the total amount of non-point source pollution, it is necessary to make a reasonable assessment of the potential of emission reduction. The quantification of emission reduction potential is based on the optimization of emission reduction measures and the development of a feasible emission reduction plan with consideration to both environmental benefits and economic cost. In this study, we took Changzhou City as an example to analyze the emission reduction potential of non-point source pollution. We conducted multi-objective optimization of the emission reduction schemes by using the analytic hierarchy process (AHP), which can carry out quantitative and qualitative analysis at the same time. With the technical feasibility, economic rationality and operability as guidelines, we took total nitrogen reduction rate, total phosphorus reduction rate, ammonia reduction rate, COD reduction rate as environmental indexes, and construction costs and operating costs as economic indexes. We selected alternative emission reduction measures from the demonstration projects and pilot projects in Changzhou and its surrounding areas to ensure their operability. With 2014 as the base year, we estimated the total amount of non-point source pollution in Changzhou using the pollution coefficient method and calculated the reductions according to the optimization measures, and thus we analyzed the emission reduction potential of each pollutant index. We put forward a list of emission reduction measures suitable for non-point source pollution in Changzhou, and used the analytic hierarchy process to optimize the emission reduction measures, and determined the emission reduction potential of non-point source pollution in Changzhou in 2014 with consideration to both environmental benefits and economic costs.

Key words: non-point source (NPS) pollution; analytic hierarchy process (AHP); emissions reduction potential; best management practices (BMPs); livestock and poultry breeding

收稿日期: 2017-07-19 修回日期: 2017-12-21 网络出版时间: 2018-01-12
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180111.1026.008.html>

基金项目: 国家“十二五”重大科技资助项目(2013ZX07501005)

Fund: National Major Science and Technology Projects of the "Twelfth Five-year Plan" Period (2013ZX07501005)

作者简介: 何璟嫻(1992-), 女, 山西太原人, 主要从事水环境方面研究。E-mail: 1791636742@qq.com

通讯作者: 苏保林(1965-), 男, 云南安宁人, 副教授, 博士, 主要从事环境系统分析、非点源污染研究。E-mail: subl@bnu.edu.cn

面源污染,也称非点源污染,主要指大气、地表和土壤中非特定地点不确定数量的污染物在不确定的时间进入江河、湖泊、水库等所引起的水体污染^[1]。最早关注面源治理的是美国,美国于1972年将面源治理的相关内容写入到《清洁水法》中,提出了最佳管理措施(Best Management Practices, BMPs),并对概念进行了定义和解释,同时提出了多个实用模型,用来估测措施的实施效果^[2]。国内外关于BMPs的研究多集中于BMPs方案设计及评估择优,而对于多个BMPs的优化集成研究较少。除采用模型的方法进行情景分析,国内也有学者采用层次分析法对减排方案进行优化和选择^[3]。就目前研究现状来看,我国措施的优化方法案例较少,而且多关注技术层面,从环境、经济和社会效益等方面对面源污染减排方案进行优选和效果评估,将是今后的研究方向。国内外关于减排潜力的评估大多采用模型模拟的方法,通过设定不同情境来分析计算,或者基于现状减排条件来计算排放量,采用对措施进行优化集成后评估减排潜力的研究较少。本研究以常州市为案例分析面源污染的减排潜力,对减排工程方案进行优化研究,并进行实证分析,计算应用最优减排措施的削减量和投资成本。传统优化方法有灵敏度分析法、遗传算法等,这些优化算法过程复杂繁琐,寻优结果受主观影响大。本文采用能同时进行定量和定性分析的层次分析法对减排方案进行多目标优化,从量的层面对减排方案进行效益评估,并对各个方案从技术可行性、经济合理性以及可操作性三方面进行综合评价,以期为农业非点源污染的控源减排工作提供参考。

1 研究区概况

常州位于江苏省南部的太湖流域水网平原,是长江三角洲中心地带,常州四季分明、雨量充沛、日照丰富,为农业生产提供了优越的自然条件^[4]:全市水资源丰富,水面约占土地总面积的1/5,水资源总量为16.3亿m³,其中可利用养殖水面面积约3.3万hm²;常州市耕地面积广阔,种植类型以水稻-小麦轮作为主,面积4257hm²,旱地种植面积较小,约346hm²,农民大量施用化肥和农药,造成大量氮素和磷素进入水体,加速了流域水体的污染和富营养化。常州市畜禽养殖业规模较大,养殖污染物的排放是影响水质的一项重要污染来源。此外,常州市水产养殖业发达,以池塘养殖为主,养殖中投放过量饵料,加之鱼药的使用、水生动植物残体分解等均对水体产生污染,养殖户在换水时,直接将污水排入就近河道,影响水

质,造成养殖区附近水域的污染。一些农户家庭经济条件差,又保留传统的生活习惯,肆意排放生活污水,将污水直接倒在农田边或者附近的水渠里,这些污水经过沟渠或者汇集到水体里引起污染。

2 常州面源污染减排措施优化集成

2.1 减排措施决策指标

按照预防和源头控制、迁移控制和末端治理3大类,整理了常州市面源污染适用控制技术。其中种植业污染控制技术主要有13种^[5-10],畜禽养殖业污染控制技术主要有17种^[11-15],水产养殖业污染控制技术主要有16种^[16-21],农村生活污染控制技术主要有13种^[22-23]。

从以上控制技术里挑选工程措施为对象进行方案比选,主要是因为工程措施有比较完整的污染物削减率指标和成本指标,能够比较直观的得到环境效益和经济成本,从而兼顾环境效益和经济成本,进行费用效益分析,选取总氮、氨氮、总磷和COD的削减率以及建设成本和运行成本作为评价指标,整理各项措施的污染物削减率和经济指标值,具体值见表1至表4。

表1 畜禽养殖污染减排措施决策指标值

Tab.1 Decision making index values of emission reduction measures for livestock and poultry breeding pollution

方案	处理技术	污染物削减率(%)				建设成本 /(元·m ²)	运行成本 /(元·t ⁻¹)
		总氮	总磷	氨氮	COD		
C ₁	土地渗滤处理系统	90	99	94	95	3 300	4.07
C ₂	厌氧水解池/组合式人工湿地处理工艺	76	77	81	64	5 983	0.13
C ₃	组合式稳定塘处理工艺	94	90	93	99	3 960	0.99
C ₄	厌氧发酵/生物膜法/人工湿地组合处理工艺	79	86	89	97	3 297	1.27

表2 农田种植污染减排措施决策指标值

Tab.2 Decision making index values of emission reduction measures for farmland planting pollution

方案	处理技术	污染物削减率(%)				建设成本 /(元·m ²)	运行成本 /(元·t ⁻¹)
		总氮	总磷	氨氮	COD		
D ₁	生态拦截沟渠	42	50	45	47	151	0.07
D ₂	人工强化生物滤床	50	50	77	47	395	1.31
D ₃	水生植物-菌藻生物膜复合生态系统	82	93	91	76	451	0.53
D ₄	生态浮床-湿地组合系统	54	74	56	62	255	0.49

表 3 水产养殖污染减排措施决策指标值
Tab. 3 Decision making index values of emission measures for aquaculture pollution

方案	处理技术	污染物削减率 (%)				建设成本 /(元·m ⁻²)	运行成本 /(元·t ⁻¹)
		总氮	总磷	氨氮	COD		
E ₁	多级土壤 渗滤系统	41	68	43	80	4 780	0.20
E ₂	人工湿地	49	76	45	75	3 346	0.30
E ₃	序批式生物膜法	76	90	85	91	7 550	0.88
E ₄	沼气池/生态 塘处理工艺	77	82	62	70	5 000	2.20

表 4 村生活污染减排措施决策指标值
Tab. 4 Decision making index values of emission reduction measures for rural domestic pollution

方案	处理技术	污染物削减率 (%)				建设成本 /(元·m ⁻²)	运行成本 /(元·t ⁻¹)
		总氮	总磷	氨氮	COD		
F ₁	塔式生态滤池 人工湿地系统	85	95	85	80	3 000	0.25
F ₂	复合塘生态系 统组合净化技术	87	90	90	75	2 500	0.15
F ₃	户用生态滤池	90	90	84	92	1 800	0.11
F ₄	生物接触氧 化生态沟渠	80	65	80	84	2 000	0.20

2.2 层次分析法优选模型构建

2.2.1 层次结构模型的建立

根据常州市面源污染治理情况以及现有文献中相关工程措施的信息完整性^[24-26], 本文从环境效益和经济成本两方面选择评价指标。其中, 以总氮削减率、总磷削减率、氨氮削减率和化学需氧量削减率作为环境效益指标, 以建设成本和运行成本作为经济成本指标。所构建的评价指标体系见图 1。

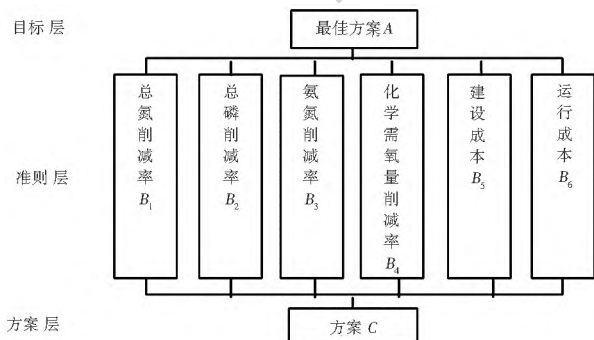


图 1 减排措施优选层次结构模型

Fig. 1 The optimal hierarchical model of emission reduction measures

2.2.2 构造判断矩阵并计算权重

建立层次结构模型后, 需要对每一层次中的因素进行两两比较^[27]。

(1) 构造准则层对目标层的判断矩阵 $A-B$ 。

根据常州市面源污染现状和减排目标, 综合分析准则层各评价指标, 采取专家打分法对准则层各影响因素的重要性进行评判, 构造判断矩阵 A 。其中, 本文设定面源污染控制技术方案的多元目标决策是从 n 个方案中选出最优者, 准则层由 6 个评价指标组成, 记为 $a_i (i = 1, 2, \dots, 6)$, 分别代表总氮、总磷、氨氮和 COD 削减率、建设成本、运行成本

$$A-B = A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{16} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{n6} \end{pmatrix}$$

(2) 构造准则层每个评价因子对方案层的判断矩阵 $B-C$ 。

$$B-C = B_i (i = 1, 2, \dots, 6) = \begin{pmatrix} b_{i1} & \dots & b_{i6} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ b_{n1} & \dots & b_{n6} \end{pmatrix}$$

(3) 几何平均法(方根法)计算权重^[28]。

$$W_i = \frac{(\prod_{j=1}^n a_{ij})^{\frac{1}{n}}}{\sum_{j=1}^n (\prod_{i=1}^n a_{ij})^{\frac{1}{n}}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

计算方法: 1 将判断矩阵的元素按行相乘, 得到新向量; 2 将新向量的每个分量开 n 次方; 3 将所得向量归一化即为权重向量。

2.2.3 层次单排序及其一致性检验

(1) 计算一致性指标 CI 。

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

其中, λ_{max} 为判断矩阵的最大特征值。

(2) 查找随机一致性指标 RI (见表 5)。

表 5 平均随机一致性指标^[29]

Tab. 5 The mean random consistency index														
n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$RI/0$	0	0.52	0.89	1.12	1.24	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58	

(3) 计算一致性比例 CR 。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

当 $CR < 0.10$ 时, 认为判断矩阵的一致性是可以接受的, 否则应对判断矩阵作适当修正。

2.2.4 层次总排序及其一致性检验

最终要得到方案层对目标层的权重, 从而得到方案的优劣顺序, 进行方案选择, 需要计算各层要素对总目标的合成权重, 并按照下列公式对层次总排序进行一致性检验。

$$CI = \sum_{i=1}^n b_i CI_i \quad (4)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n b_i RI_i \quad (5)$$

$$CR = CI/RI \quad (6)$$

式中: b_i 为 B 层(准则层)中各指标的层次权重; CI 为层次总排序的一致性指标; CI_i 为与 b_i 对应的该层次中判断矩阵的一致性指标; RI 为层次总排序的随机一致性指标; RI_i 为与 b_i 对应的该层次中判断矩阵的随机一致性指标; CR 为层次总排序的随机一致性比例。

2.3 常州市面源污染减排工程方案优选

2.3.1 畜禽养殖污染工程方案优选

按照污染源的不同,从畜禽养殖、农田种植、水产养殖和农村生活4个方面分别进行方案优选。以畜禽养殖污染工程方案的决策为例,具体过程如下。

技术方案评价因子判断矩阵 A , 总氮削减率、总磷削减率、氨氮削减率、COD 削减率、建设成本和运行成本判断矩阵 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 、 B_6 分别为:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 7 & 3 & 5 & 5 \\ 1/5 & 1 & 3 & 3 & 3 & 2 \\ 1/7 & 1/3 & 1 & 3 & 2 & 2 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 2 & 2 \\ 1/5 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 1/2 & 4 \\ 1/5 & 1 & 1/5 & 1/2 \\ 2 & 5 & 1 & 5 \\ 1/4 & 1/5 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B_2 = \begin{pmatrix} 1 & 6 & 3 & 4 \\ 1/6 & 1 & 1/4 & 1/3 \\ 1/3 & 4 & 1 & 2 \\ 1/4 & 3 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B_3 = \begin{pmatrix} 1 & 7 & 2 & 4 \\ 1/7 & 1 & 1/7 & 1/5 \\ 1/2 & 7 & 1 & 3 \\ 1/4 & 5 & 1/3 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B_4 = \begin{pmatrix} 1 & 7 & 1/2 & 1/2 \\ 1/7 & 1 & 1/8 & 1/7 \\ 2 & 8 & 1 & 2 \\ 2 & 7 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B_5 = \begin{pmatrix} 1 & 1/8 & 1/4 & 2 \\ 8 & 1 & 5 & 6 \\ 4 & 1/5 & 1 & 4 \\ 1/2 & 1/6 & 1/4 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B_6 = \begin{pmatrix} 1 & 8 & 5 & 3 \\ 1/8 & 1 & 1/4 & 1/6 \\ 1/5 & 4 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 6 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

以矩阵 A 计算为例,计算各项指标的权重,见表6。

表6 矩阵 A 的各项指标权重计算

Tab.6 The calculation of the weight of each index of matrix A

指标	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	$\prod_{j=1}^6 a_{ij}$	W_i	W_i
a_1	1	3	2	1/2	3	3	27.0000	1.7321	0.2520
a_2	1/3	1	1/2	1/4	1/2	1/2	0.0104	0.4673	0.0680
a_3	1/2	2	1	1/3	2	2	1.3333	1.0491	0.1527
a_4	2	4	3	1	2	2	96.0000	2.1398	0.3114
a_5	1/3	2	1/2	1/2	1	1	0.1667	0.7418	0.1080
a_6	1/3	2	1/2	1/2	1	1	0.1667	0.7418	0.1080
$\sum_i a_{ij}$	5	14	8	3	10	10			

计算最大特征值 $\lambda_{max} = 0.2520 \times 5 + 0.0680 \times 14 + 0.1527 \times 8 + 0.3114 \times 3 + 0.1080 \times 10 + 0.1080 \times 10 = 6.2424$ 。

对矩阵 A 进行一致性检验:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{6.2424 - 6}{6 - 1} = 0.0485$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0485}{1.24} = 0.04 < 0.10$$

根据计算结果确定矩阵 A 满足一致性条件,得到总氮削减率、总磷削减率、氨氮削减率、COD 削减率、建设成本和运行成本6个指标的权重是(0.2520, 0.0680, 0.1527, 0.3114, 0.1080, 0.1080)。

根据以上方法计算其他判断矩阵的指标权重及一致性指标,得到表7。

表7 畜禽养殖业减排措施判断矩阵指标权重及一致性指标
Tab.7 Index weight and consistency index of the judgment matrix for livestock and poultry breeding emission reduction measures

	W_1	W_2	W_3	W_4	λ_{max}	CI_j	CR_j
B_1	0.3308	0.0700	0.4946	0.1046	4.0888	0.0296	0.0333
B_2	0.5479	0.0646	0.2404	0.1472	4.0838	0.0279	0.0314
B_3	0.4892	0.0452	0.3219	0.1437	4.1272	0.0424	0.0476
B_4	0.2138	0.0418	0.4421	0.3023	4.1011	0.0337	0.0379
B_5	0.0813	0.6396	0.2174	0.0617	4.2665	0.0888	0.0998
B_6	0.5718	0.0464	0.1374	0.2443	4.1040	0.0347	0.0390

由表7的结果可知,判断矩阵 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 、 B_6 的一致性检验合格,各个判断结果是有效的,由此可以计算层次总排序的权值。具体结果如下:

$$\begin{pmatrix} 0.3308 & 0.5479 & 0.4892 & 0.2138 & 0.0813 & 0.5718 \\ 0.0700 & 0.0646 & 0.0452 & 0.0418 & 0.6396 & 0.0464 \\ 0.4946 & 0.2404 & 0.3219 & 0.4421 & 0.2174 & 0.1374 \\ 0.1046 & 0.1472 & 0.1437 & 0.3023 & 0.0617 & 0.2443 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.2520 \\ 0.0680 \\ 0.1527 \\ 0.3114 \\ 0.1080 \\ 0.1080 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.3324 \\ 0.1160 \\ 0.3661 \\ 0.1855 \end{pmatrix}$$

根据一致性检验公式进行层次总排序的一致性检验,结果如下:

$$CI = \frac{\sum_{i=1}^6 b_i CI_i}{\sum_{i=1}^6 b_i} = \frac{0.0296 + 0.0279 + 0.0424 + 0.0337 + 0.0888 + 0.0347}{0.2520 + 0.0680 + 0.1527 + 0.3114 + 0.1080 + 0.1080} = 0.0397$$

$$RI = \frac{\sum_{i=1}^6 b_i RI_i}{\sum_{i=1}^6 b_i} = \frac{0.89 + 0.89 + 0.89 + 0.89 + 0.89 + 0.89}{0.2520 + 0.0680 + 0.1527 + 0.3114 + 0.1080 + 0.1080} = 0.8901$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0397}{0.8901} = 0.0426 < 0.10$$

层次总排序的一致性检验合格,方案层四个方案的总权重是(0.3324, 0.1160, 0.3661, 0.1855),即 $C_3 > C_1 > C_4 > C_2$ 。

2.3.2 其他源污染工程方案优选

按照畜禽养殖业工程方案的优选过程,分别对农田种植业、水产养殖业和农村生活污染工程方案进行优选,计算结果参见表 8- 表 10。

表 8 农田种植减排措施判断矩阵指标权重及一致性指标

Tab. 8 Index weight and consistency index of the judgment matrix for farmland planting emission reduction measures

	W_1	W_2	W_3	W_4	λ_{max}	CI_j	CR_j
B_1	0.0731	0.1244	0.6399	0.2059	4.2274	0.0758	0.0852
B_2	0.0956	0.0956	0.5535	0.2475	4.0261	0.0087	0.0098
B_3	0.0679	0.2127	0.5919	0.1196	4.0795	0.0265	0.0298
B_4	0.0902	0.0902	0.5992	0.2446	4.1256	0.0419	0.0470
B_5	0.0485	0.2543	0.5590	0.1011	4.1378	0.0459	0.0516
B_6	0.0552	0.6577	0.1943	0.1222	4.2609	0.0870	0.0977

表 9 水产养殖业减排措施判断矩阵指标权重及一致性指标

Tab. 9 Index weight and consistency index of the judgment matrix for aquaculture emission reduction measures

	W_1	W_2	W_3	W_4	λ_{max}	CI_j	CR_j
B_1	0.0577	0.1095	0.4353	0.4353	4.2247	0.0749	0.0842
B_2	0.0748	0.1118	0.5235	0.2858	4.1797	0.0599	0.0673
B_3	0.0654	0.1032	0.5992	0.2529	4.1428	0.0476	0.0535
B_4	0.2057	0.1243	0.5878	0.0794	4.1001	0.0334	0.0375
B_5	0.1087	0.0558	0.5687	0.2023	4.0180	0.0060	0.0068
B_6	0.0632	0.0998	0.2274	0.6220	4.1712	0.0571	0.0641

从表 11 计算结果可以看出,对于农田尾水处理,水生植物-菌藻-生物膜复合生态系统为兼顾环境效益和投资成本的最优工程方案,人工强化生物

滤床次

表 10 农村生活减排措施判断矩阵指标权重及一致性指标

Tab. 10 Index weight and consistency index of the judgment matrix for rural domestic emission reduction measures

	W_1	W_2	W_3	W_4	λ_{max}	CI_j	CR_j
B_1	0.3832	0.0718	0.3832	0.1136	4.2766	0.0922	0.0936
B_2	0.5299	0.2137	0.2137	0.0517	4.1123	0.0374	0.0421
B_3	0.3328	0.4892	0.1177	0.0534	4.0689	0.0230	0.0258
B_4	0.3219	0.0516	0.4732	0.1518	4.0916	0.0305	0.0343
B_5	0.5851	0.2261	0.0795	0.0663	4.0326	0.0109	0.0122
B_6	0.5570	0.1104	0.0561	0.2584	4.0817	0.0272	0.0306

表 11 面源污染类型的 4 类控制方案总权重

Tab. 11 Total weight of the four kinds of control schemes for non point source pollution types

控制方案	总权重			
	C	D	E	F
	农田种植	畜禽养殖	水产养殖	农村生活
1	0.0746	0.3324	0.1122	0.4070
2	0.1969	0.1160	0.1065	0.1598
3	0.5572	0.3661	0.5058	0.2910
4	0.1873	0.1855	0.2815	0.1226

说明:表中每列数值分别代表农田种植、畜禽养殖、水产养殖、农村生活在其相对应的 4 类控制方案下(表 1 到表 4)的总权重。

之;对于畜禽养殖污水处理,组合式稳定塘处理工艺最佳,土地渗滤处理系统次之;对于水产养殖业污染,序批式生物膜法处理养殖废水为最佳工程方案,沼气池/生态塘处理工艺次之;对于农村生活污水处理,塔式生态滤池-人工湿地系统最佳,户用生态滤池次之。

3 常州面源污染减排潜力计算

常州市面源污染减排潜力的评估,是基于预防和源头控制措施等,都按照相关政府和规范的治理要

求,并得到了较好地实施和执行,因此主要针对后续末端治理的措施来计算最大削减量,评估减排潜力。

以2014年为基准年,根据排污系数法得到常州市农田种植、畜禽养殖、水产养殖和农村生活污染物排放总量(表12),将优选出的4项工程措施分别应用于各类污染的末端治理,结合常州市污染和减排现状拟定工程个数,计算污染物削减量,并根据工程个数和经济指标计算建设成本和运行成本(表13)。

表12 2014年常州市面源污染各污染物排放量

Tab.12 Emission of each non point source pollutant in Changzhou city in 2014

污染源类别	TN/t	TP/t	NH ₄ -N/t	COD/t
农田种植	1 072	25	110	793
畜禽养殖	5 659	1 914	4 179	61 189
水产养殖	717	132	181	6 864
农村生活	2 874	245	2 417	10 419
合计	10 322	2 316	6 887	79 265

表13 常州市面源污染减排优化技术方案费用效益分析

Tab.13 Cost benefit analysis of optimization technical schemes for non point source pollution reduction in Changzhou city

污染源类别	处理工艺	工程数量	污染物削减量/(t·a ⁻¹)				建设成本/万元	运行成本/(万元·a ⁻¹)
			TN	TP	NH ₄ -N	COD		
农田种植	水生植物-菌藻-生物膜复合生态系统	218	879	23	100	603	8 280	173
畜禽养殖	组合式稳定塘处理工艺	5 865	5 319	1 723	3 886	55 070	6 540	119
水产养殖	序批式生物膜法	2 488	545	119	154	6 246	13 590	1 743
农村生活	塔式生态滤池-人工湿地系统	9 261	2 443	233	2 054	8 335	7 464	2 615
合计		17 832	9 186	2098	6 194	70 254	35 874	4 650

农田种植:最优措施为水生植物-菌藻-生物膜复合生态系统处理工艺,该工程是一种纳污河道原位处理技术,属于表面流人工湿地的一种,利用水生植物-菌藻共生系统,配合人工填料等,对入河污水进行处理。该技术措施具有因地制宜、就地处理、处理系统灵活多样的特点,治理目标兼容了水环境的整治和水生态建设,可大量减少管网建设、投资运营费用等。在平原河网地区,水系发达,根据肥料流失系数计算的污染负荷量与农田径流污染的入河量相当,因此,在进行潜力计算时,直接根据污染物排放量和工程措施的削减率进行计算。

畜禽养殖:最优措施为组合式稳定塘处理工艺,该工艺主要利用不同类型的稳定塘来净化污水。稳定塘是通过改造天然坑塘或者人工修建池塘,依靠塘内的微生物来处理污水,其净化过程与自然水体的自净过程相似。养殖污水经过固液分离、自然塘、好氧塘、高效氧化塘、藻类沉降塘、生态塘等联合作用后,实现多级净化效果。依据该工艺进行削减量计算时,假定养殖废水在管网收集过程中无流失,能够全部进入到该工艺进行处理。

水产养殖:最优措施为序批式生物膜法处理工艺,该工艺通过在传统生物膜反应器内填装不同的填料,为微生物提供良好的生长环境。在纵向上微生物构成一个由细菌、真菌、藻类、原生动物、后生动物等多个营养级组成的复杂生态系统,横向上构成具有多种不同活动能力、呼吸类型、营养类型的微生物系统。该工艺占地面积小,节省基建费用,易于运行管理。常州市针对万亩连片的池塘推进循环水养

殖技术,在2020年实现100%推广比例,因此,该工艺仅针对非万亩连片的池塘废水进行处理并计算削减量。

农村生活:最优措施为塔式生态滤池-人工湿地系统,该工艺组合了厌氧、好氧和兼氧单元,在塔式生态滤池中,利用蚯蚓吞食有机物、提高土壤渗透性能和蚯蚓与微生物的协同作用等生态学功能实现污水的生态处理,后续根据土地现状增加适当规模的湿地处理单元,提高出水水质。该工艺基建和运行管理费用较低,氮磷的去除能力强,蚯蚓生态滤池占地面积较小,也可根据地形调节装置。进行削减量计算时,假定生活污水经管网集中收集过程中没有流失,全部进入到污水处理单元。

结合资料和已有示范工程,确定表中工程个数:

- (1) 农田种植:农田种植总面积为4 603 hm²,以6 67 hm²为一个单位,对应建设一项减排工程;
- (2) 畜禽养殖:将常州市畜禽养殖总量折算成猪当量^[30],养殖总量为218万头猪,以10 000头为一个单位,对应建设一项减排工程;
- (3) 水产养殖:养殖总面积为3.9万hm²,以6 67 hm²为一个单位,对应建设一项减排工程;
- (4) 农村生活:乡村总户数为74.65万户,以300户为一个单位,对应建设一项减排工程。

4 结论和不足

4.1 结论

本研究通过实地调研和总结国内外相关文献,

从管理性措施和工程性措施两方面,总结了目前常用的面源污染减排措施。以常州市的情况为例,以2014年为基准年,根据农田化肥施用量、畜禽养猪当量、水产养殖品种和养殖总量、农村人口状况等,通过排污系数法估算排污量。通过计算分别得到TN、TP、NH₄⁺-N和COD的排放总量,其中畜禽养殖污染排放量所占比重均是4类污染物排放总量的最大。其中畜禽养殖排放占得比值最大;因此,畜禽养殖污染对面源污染的贡献率最高,应作为首要减排对象。然后针对不同类型的污染,各选取4项工程措施,以总氮削减率、总磷削减率、氨氮削减率、COD削减率、建设成本和运行成本作为评价指标,采用层次分析法进行优选,得出不同污染类型的最优治理方案。对于农田尾水处理,水生植物-菌藻-生物膜复合生态系统最优;对于畜禽养殖污水处理,组合式稳定塘处理工艺最优;对于水产养殖业污染,序批式生物膜法处理养殖废水最优;对于农村生活污水,塔式生态滤池-人工湿地系统最优。最后将最优工程方案应用于常州市面源污染治理,估算减排潜力并计算经济成本。TN、TP、NH₄⁺-N和COD的减排潜力分别为9 186 t、2 098 t、6 194 t、70 254 t,从各项污染指标的潜力来看,畜禽养殖业污染治理潜力最大;4类不同污染类型的治理投资中,水产养殖业污染治理成本最高,为15 333万元,畜禽养殖业污染治理成本最低,为6 659万元。

4.2 不足

研究中进行技术优选的技术方案,经济成本中以建设成本和投资成本为指标,实际中应该考虑土地成本,但鉴于土地成本受到当地实际情况的限制,无法统一量化标准,没有作为评价指标。另外,优选的工程措施是基于现有工程的相关指标进行削减量和成本估算,在实际应用中要因地制宜,根据污染治理需要和实地情况对工程方案进行调整和改进。后续研究应该基于工程方案的各项指标进行更加全面的评价和优选,并将管理性措施也纳入到优选工作中,进行定性和定量的双重评价。

参考文献(References):

[1] 王淑莹,代晋国,李利生,等.水环境中非点源污染的研究[J].北京工业大学学报,2003,29(4):486-490.(WANG S R, DAI J G, LI L S, et al. Study on non point source pollution of water environmental[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2003, 29(4): 486-490. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0254-0037.2003.04.023.

[2] US Environmental Protection Agency. 2006. BMP Modeling Concepts and Simulation [EB/OL]. <http://nepis.epa.gov/>

Adobe/PDF/P10089G6.pdf.

[3] T L SAATY. Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process. management science[J]. 1986, 32: 841-855. DOI: 10.1287/mnsc.32.7.841.

[4] 常州市统计局. 2015年常州市统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2016.(Changzhou City Bureau of Statistics. 2015 Changzhou City Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016. (in Chinese))

[5] 战丽如,胡绵好,袁菊红,等.生态浮床-简易湿地组合系统对富营养化水体净化效果研究[J].安徽农业科学,2009,37(16):7642-7644,7647.(ZHAN L R, HU M H, YU AN J H, et al. Research on the efficiency of the integrated system of ecological floating bed and facility wetland on the purification to eutrophic water Body[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(16): 7642-7644, 647. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0517-6611.2009.16.131.

[6] 蒋斌,王永浩.组合生态浮床对富营养化水体水质改善效果的研究[J].环境科技,2011,24(6):11-14.(JIANG B, WANG Y H. Study on improvement effect? eutrophication water quality by combined ecological floating bed[J]. Environmental Science and Technology, 2011, 24(6): 11-14. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-4829.2011.06.004.

[7] 张文艺,冯国勇.水生植物-菌藻-生物膜复合生态系统污染物去除特性[J].环境化学,2013,32(11):2193-2201.(ZHANG W Y, FENG G Y. Pollutant removal characteristics in aquatic plants algae bacteriar biofilm complex ecosystem[J]. Environmental Chemistry, 2013, 32(11): 2193-2201. (in Chinese)) DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2013.11.025.

[8] 王忠敏,梅凯.氮磷生态拦截技术在治理太湖流域农业面源污染中的应用[J].江苏农业科学,2012,40(8):336-339.(WANG Z M, MEI K. Application of nitrogen and phosphorus interference technology in controlling non point source pollution in Taihu Lake Basin[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012, 40(8): 336-339. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-1302.2012.08.131.

[9] 杨雪,梅凯,吴昊.太湖流域农业面源氮磷流失生态拦截工程技术[J].中国给水排水,2012,(28)22:35-37.(YANG X, MEI K, WU H. Technologies for ecological interception of nitrogen and phosphorus loss from agricultural non point source in Taihu Lake Basin[J]. China Water and Wastewater, 2012, (28) 22: 35-37. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-4602.2012.22.009.

[10] 刘莉,胡正义.基于污染物削减效果和成本的农业面源污染控制技术优选—以太湖地区为例[J].生态与农村环境学报,2015,31(4):608-616.(LIU L, HU Z Y. Selection of optimal agricultural non point source pollution prevention and control techniques based on effect and cost of their pollution reduction: A case study of the Taihu Region[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(4): 608-616. (in Chinese)) DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2015.04.026.

[11] 谢胜.上海市农村生活污水治理工艺适用性评估与分类体系研究[D].上海:华东师范大学,2013.(XIE S. Shanghai rural sewage treatment process applicability assessment and classifi-

- fication system[D]. Shanghai: East China Normal University, 2013. (in Chinese)
- [12] 林克明. 化粪池出水的土地渗滤处理技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009. (LIN K M. Study on land infiltration treatment technology for septic tank effluent[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [13] 冯间开. 广州市茅岗村人工湿地处理农村污水的工程实践[D]. 广州: 华南理工大学, 2012. (FENG J K. Guangzhou Mao Gangcun artificial wetland treatment of rural sewage engineering practice[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [14] 彭军, 吴分苗, 唐耀武. 组合式稳定塘工艺处理养猪废水设计[J]. 工业用水与废水, 2003, 3(3): 44-46. (PENG J, WU F M, TANG Y W. Design of treatment of sewage from piggery by a composite, stabilization pond process[J]. Industrial Water and Wastewater, 2003, 3(3): 44-46. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1009-2455.2003.03.014.
- [15] 朱立安, 王继增, 胡耀国. 畜禽养殖非点源污染及其生态控制[J]. 水土保持通报, 2005, 25(2): 40-43. (ZHU L A, WANG J Z, HU Y G. Non point sources pollution from livestock and poultry and ecological control[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005, 25(2): 40-43. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-288X.2005.02.010.
- [16] 封红. 序批式生物膜法处理水产养殖废水研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2014. (FENG H. Research of aquaculture wastewater treatment by sequencing batch reactor of submerged biofilm process[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014. (in Chinese))
- [17] 万红, 宋碧玉. 序批式生物膜法处理水产养殖废水的研究[J]. 水生态学杂志, 2008, 11(2): 81-84. (WAN H, SONG B Y. Study on aquacultural wastewater treatment by sequencing batch biofilm reactor[J]. Journal of Hydroecology, 2008, 11(2): 81-84. (in Chinese))
- [18] 张浩. 集约化海水养殖废水多介质土壤滤层(MSL)与人工湿地技术处理效能的对比研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (ZHANG H. A comparative study on the effectiveness of multi media soil filter layer (MSL) and artificial wetland technology in intensive marine aquaculture wastewater[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))
- [19] 魏才俊, 吴为中, 杨逢乐等. 多级土壤渗滤系统技术研究现状及发展[J]. 环境科学学报, 2009, 29(7): 1351-1357. (WEI C J, WU W Z, YANG Fengle et al. Multi soil layer treatment technology: Current status and future perspectives[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(7): 1351-1357. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn.0253-2468.2009.07.002.
- [20] 吴海洋. 可移动式曝气生物滤池处理养殖废水工艺及其动力学原理的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012. (WU H Y. Study on the process and kinetics of aquaculture wastewater treated by movable aerated biological filter[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [21] 麻泽龙, 周芸, 王朝勇, 等. 养殖废水处理与高效再利用系统的设计[J]. 中国给水排水, 2009, 25(6): 44-51. (MA Z L, ZHOU Y, WANG C Y, et al. Design and application of breeding wastewater treatment and efficient reuse system[J]. China Water and Wastewater, 2009, 25(6): 44-51. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn.1000-4602.2009.06.011.
- [22] 沈丰菊, 张克强, 李军幸. 基于模糊积分模型的农村生活污水处理模式综合评价方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 272-280. (SHEN F J, ZHANG K Q, LI J X. Evaluation method for engineering technology of rural domestic sewage treatment based on fuzzy integral model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(15): 272-280. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.15.035.
- [23] 张后虎, 祝栋林. 农村生活污水处理技术及太湖流域示范工程案例[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011. (ZHANG H H, ZHU D L. Analysis on rural domestic sewage treatment technology and demonstration project of Taihu Lake Basin[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011. (in Chinese))
- [24] 万金宝, 侯得印. 层次分析法在环境工程方案优选中的应用[J]. 上海环境科学, 2005(5): 209-213. (WAN J B, HOU D Y. An application of analytical hierarchy process method in environmental engineering scheme optimization[J]. Shanghai Environmental Sciences, 2005(5): 209-213. (in Chinese))
- [25] 慕金波. 层次分析法在评定最优环境工程方案中的应用[J]. 环境科学进展, 1997(4): 33-40. (MU J B. Application of analytical hierarchy process in evaluating optimal environmental engineering[J]. Advances in Environmental Science, 1997(4): 33-40. (in Chinese))
- [26] 胡天觉, 陈维平. 运用层次分析法对株洲霞湾污水处理厂污水处理工艺方案择优[J]. 环境工程, 2000, 18(1), 61-63. (HU T J, CHEN W P. Choosing optimum technological scheme of disposal sewage of Zhuzhou Xiawan Sewage disposal plant by analytical gradation method[J]. Environmental Engineering, 2000, 18(1), 61-63. (in Chinese))
- [27] 张炳江. 层次分析法及其应用案例[M]. 电子工业出版社, 2014, 22-23. (ZHANG B J. Analytic hierarchy process and its application case[M]. Electronics Industry Press: 2014, 22-23. (in Chinese))
- [28] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100. (DENG X, LI J M, ZENG H J, et al. Research on computation methods of ahp weight vector and its applications[J]. Mathematics in Practice and Theory 2012, 42(7): 93-100. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0984.2012.07.012.
- [29] 汪应洛. 系统工程[M]. 第二版. 北京: 机械工业出版社, 2003, 130-140. (WANG Y L. Systems Engineering[M]. Second Edition. Beijing: Machinery Industry Press, 2003, 130-140. (in Chinese))
- [30] 环境保护部. 农村小型畜禽养殖污染防治项目建设与投资指南[S]. 2013. (Ministry of Environmental Protection. Rural small livestock and poultry breeding pollution prevention project construction and investment guide[S]. 2013. (in Chinese))