

基于层次-灰色关联法的洱海农业面源污染控制技术综合评价

张萍^{1,2}, 卢少勇², 潘成荣^{1,3}

1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009
2. 中国环境科学研究院, 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 国家环境保护洞庭湖科学观测研究站, 北京 100012
3. 安徽省环境科学研究院, 合肥 230061

摘要 农业面源污染是导致洱海富营养化的重要污染源, 本文建立了考虑环境、经济和生态效益的面源污染控制技术评价指标体系, 评价指标包括总磷、氨氮及化学需氧量去除率、建设及运行成本、技术稳定度、管理方便度和生态协调性等。同时, 应用层次-灰色关联分析法, 在洱海面源污染控制技术初筛的基础上, 对备选技术进行综合关联度评判, 获得最优方案。评价结果表明: 生活污水污染控制备选方案中, 土壤净化槽最优; 在畜禽养殖污染控制备选方案中, 基质化栽培最优; 在农业径流污染控制方案中人工湿地最优。

关键词 洱海; 农业面源污染; 层次分析法; 灰色关联分析

在点源得到有效控制情况下, 面源污染对河湖水污染的贡献不断增加, 有资料显示, 农业面源污染是导致各种水体污染的重要因素^[1]。1993年, 在丹麦270条河流中94%的氮负荷, 52%的磷负荷来自非点源污染; 荷兰来自农业非点源污染的总氮、总磷分别占水环境污染总量的60%和40%~50%^[2]。巢湖流域(2007年), 农业面源总氮(TN)、总磷(TP)排放量分别为0.87万t、0.16万t, 分别占流域排放总量的32%、48%^[3]; 在太湖流域(“十五”期间), 83%的TN和84%的TP来自农田、农村畜禽养殖业和农村生活面源^[4]。因此, 选择合适的面源污染控制技术非常关键。

目前, 已有学者在建立面源污染控制技术指标体系、确定指标权重等方面开展了工作。刘莉等^[5]建立了4个环境效益指标、2个经济成本指标, 分析了太湖流域农业面源污染控制技术; 沈丰菊等^[6]从经济、技术、环境3个方面运用层次分析和熵值法构建农村生活污水评价技术体系。但是, 国内学者对农业面源污染控制技术筛选评价研究不多, 农业面源污染控制技术决策过程复杂, 不仅要考虑技术本身参数, 还要考虑环境、经济和生态效益, 所涉及指标和领域多样, 一些定性

指标难以量化。基于此, 本文用层次分析和灰色关联法综合评价农业面源污染控制技术, 充分利用层次和灰色关联法的优势, 使评价更合理。层次分析法定性与定量相结合, 通过分析各指标间关系、建立对比矩阵, 将复杂问题分解为若干层次和指标, 在各指标间比较和计算, 较合理地确定指标权重^[6]。灰色关联分析是建立在充分利用客观数据的基础上, 得到各方案与最优理想方案的接近度, 从而决策^[7]。

1 研究方法

1.1 基本流程

农业面源污染控制技术筛选基本流程如图1。

1.2 农业面源污染控制技术指标体系构建

面源污染控制技术筛选需考虑多个相关作用的评价指标, 其设施的建设和运行受自然和社会经济等因素影响, 技术方案选择要考虑环境、经济和生态效益, 本文评价指标体系共分3个层次, 各层次分别对应的指标见表1。环境效益主要考虑有机物和氮磷去除效果, 本文用TP、氨氮和化学需氧量(COD)3个指标反映; 经济效益主要考虑建设和运行成本;

收稿日期: 2016-07-12; 修回日期: 2016-08-12

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07105-002); 国家科技支撑计划课题(2014BAC09B02); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2012-YSKY-14)

作者简介: 张萍, 硕士研究生, 研究方向为水环境生态修复, 电子信箱: piaoziyuanfang@163.com; 卢少勇(通信作者), 研究员, 研究方向为水污染防治与水环境生态修复, 电子信箱: lushy2000@163.com

引用格式: 张萍, 卢少勇, 潘成荣. 基于层次-灰色关联法的洱海农业面源污染控制技术综合评价[J]. 科技导报, 2017, 35(9): 50-55. doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.09.006

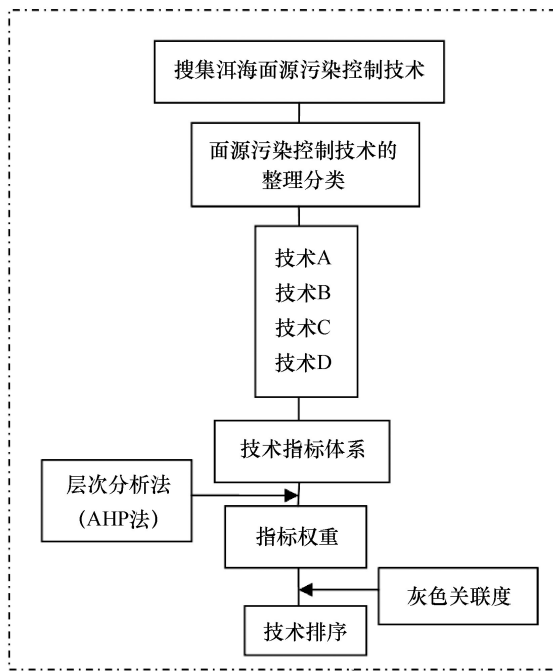


图1 农业面源污染控制技术筛选基本流程
Fig. 1 Flow diagram of non-point source pollution control technology screening

生态效益主要以技术生态效益来考虑,包括技术稳定度、管理方便度和生态协调性:技术稳定度主要反映技术成熟度,技术管理方便度主要考虑技术运行维护的难易程度,生态协调性主要反映技术是否利用当地的自然、水文和地理优势。

1.3 指标权重的确定

层次分析法是定性和定量相结合、层次化和系统化的分析法,其主要赋权步骤:1) 构建判断矩阵,依 Saaty T L 1~9 比

表1 面源污染控制技术评价指标体系

Table 1 Framework for evaluation of index system of non-point source pollution control technology

体系	指标
目标层	农业面源污染控制技术(A)
准则层	环境效益(B ₁),经济效益(B ₂),生态效益(B ₃)
指标层	TP去除率(C ₁),NH ₃ -N去除率(C ₂),COD去除率(C ₃),建设成本(C ₄),运行成本(C ₅),技术稳定度(C ₆),技术管理方便度(C ₇),生态协调性(C ₈)
方案层	技术A,技术B,技术C,……,技术N

率标度法^[8],基于专家意见咨询,通过指标因素间两两比较构建判断矩阵A-B_i,B₁-C_i,B₂-C_i,B₃-C_i:

$$A-B_i = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad B_1-C_i = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 \\ 1/2 & 1 & 2 \\ 1/4 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_2-C_i = \begin{bmatrix} 1 & 4 \\ 1/4 & 1 \end{bmatrix} \quad B_3-C_i = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 1/2 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

层次单排序指根据判断矩阵计算对上层某元素或本层与之有联系的元素重要次序的权值,是本层元素对上层元素进行重要性排序的基础。本文应用求和法计算目标层和3个准则层指标(A, B₁, B₂, B₃)的特征向量与特征根,进行层次单排序及一致性检验^[9-11],结果见表2。

指标层对目标层权向量计算,依据层次总排序算法,指标层对目标层权向量:

$$W = w \times w_i \quad (1)$$

式中, w 为准则层对目标层的权向量^[12], w_i 为指标层对准则层的权向量,计算结果见表3。

表2 层次单排序及一致性检验

Table 2 Hierarchical single ranking and consistency test

判断矩阵	特征向量	特征根	一致性比率 CR	一致性检验
A	[0.4000, 0.4000, 0.2000]	3.0000	0	满足一致性
B ₁	[0.5714, 0.2857, 0.1429]	3.0000	0	满足一致性
B ₂	[0.8000, 0.2000]	2.0000	0	满足一致性
B ₃	[0.5816, 0.3090, 0.1095]	3.0037	0.0032	满足一致性

表3 指标层元素相对于目标层的组合权重

Table 3 Combined weights of elements of indicator hierarchy corresponding to target hierarchy

指标	相对于指标层权重			相对于目标层权重
	环境效益	经济效益	生态效益	
TP去除率	0.5714	0	0	0.2286
NH ₃ -N去除率	0.2857	0	0	0.1143
COD去除率	0.1429	0	0	0.0571
建设成本	0	0.8000	0	0.3200
运行成本	0	0.2000	0	0.0800
技术稳定度	0	0	0.5816	0.1163
技术管理方便度	0	0	0.3090	0.0618
生态协调性	0	0	0.1095	0.0219

1.4 灰色关联分析数学模型

假设有 m 个面源污染控制技术备选方案, 记为 A ; 每个方案包括 n 个评价指标, 记为 $a_j (j=1, 2, 3, \dots, n)$, 在对待选方案进行灰色关联分析时, 引入能反应技术优劣度的理想方案, 记为 $a_0=(a_{01}, a_{02}, a_{03}, \dots, a_{0n})$, 构成 $(m+1) \times n$ 阶矩阵, 记为 \bar{A} 。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & \dots & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad \bar{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & \dots & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & \dots & a_{mn} \\ a_{01} & a_{02} & \dots & a_{0n} \end{bmatrix}$$

为消除各指标量纲不同对计算结果的影响, 需无量纲化处理, 将 \bar{A} 转化为规范矩阵 S , 越大越好型指标 $s_{ij} = \frac{a_{ij}}{a_{0j}}$, 越小越好型指标 $s_{ij} = \frac{a_{0j}}{a_{ij}}$, 可知 $0 \leq s_{ij} \leq 1$ 。 \bar{A} 转化为标准矩阵 S

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1n} \\ s_{21} & \dots & \dots & s_{2n} \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ s_{m1} & \dots & \dots & s_{mn} \\ s_{01} & s_{02} & \dots & s_{0n} \end{bmatrix}$$

1.5 灰色关联系数确定

决策矩阵 S 元素的关联系数 ε_{ij} 的计算公式^[13]为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\min_i [\min_j (s_{0j} - s_{ij})] + \rho \max_i [\max_j (s_{0j} - s_{ij})]}{(s_{0j} - s_{ij}) + \rho \max_i [\max_j (s_{0j} - s_{ij})]} \quad (2)$$

其中, ρ 为分辨系数, 一般按 $\rho=0.5$ 算, 关联系数用矩阵表示为 ε_i ; 关联度公式计算

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j \varepsilon_{ij} r_j = \sum_{j=1}^n w_j \varepsilon_{ij} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$\varepsilon_i = \begin{bmatrix} \varepsilon_{i1} & \varepsilon_{i2} & \dots & \varepsilon_{in} \\ \varepsilon_{21} & \dots & \dots & \varepsilon_{2n} \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ \varepsilon_{m1} & \varepsilon_{m2} & \dots & \varepsilon_{mn} \end{bmatrix}$$

2 洱海面源污染控制技术优选

2.1 研究区域概况

洱海流域位于云南省大理白族自治州, 地跨大理市和洱源县, 流域面积 2565 km², 湖泊面积约 251 km²。耕地面积 2.97×10⁴ hm², 全年农作物总播种面积 6.23×10⁴ hm², 流域包括 16 个行政村, 常驻人口约 9×10⁵ 人, 其中农村人口约占总人口数的 70%。随着对工业废水和城市生活污水等点源污染的有效控制, 面源污染尤其是农业面源污染已经取代点源成为水环境污染的最重要来源, 洱海面源污染源主要为村落生活、畜禽养殖及种植业, 3 者占比达 85.65%^[14]。

2.2 备选方案确定

结合洱海面源污染控制技术研究现状, 根据资料收集与调研, 目前洱海面源污染控制主要备选技术有: 1) 农村生活污染控制: 厌氧-接触氧化-砂滤、一体化净化槽、土壤净化槽、兼氧膜生物反应器; 2) 畜禽养殖污染控制: 户用堆沤池、户用沼气池、基质化栽培技术、蚯蚓堆沤池; 3) 农业径流污染控制: 人工湿地、三级生物净化塘、前置库、滨岸带; 备选方案及评价指标值见表 4, 其中定性技术稳定度、技术管理方便度、生态协调性等定性指标由专家^[15-16]按 81~100 分为优, 61~80 分为良, 41~60 分为中, 21~40 分为较差, 0~20 分为差打分获得, 在综合国内外及洱海地区污染控制技术发展现状的基础上, 建立面源污染控制技术评价标准表(表 5)。

表 4 面源污染控制方案及评价指标

Table 4 Non-point source pollution control scheme and assessment indicators

技术名称	TP 去除率/%	NH ₃ -N 去除率/%	COD 去除率/%	建设成本/ (元·m ⁻³)	运行成本/ (元·m ⁻³)	技术 稳定度	技术管理 方便度	生态 协调性	参考 文献
厌氧-接触氧化-砂滤	40.39	53.12	80.00	5500.00	0.41	76.00	73.50	63.50	[15]~[16]
一体化净化槽	84.90	94.20	90.00	3749.43	0.58	85.00	80.00	77.50	[17]~[18]
土壤净化槽	99.23	92.07	59.78	4000.00	0.45	85.00	81.00	82.50	[17]~[18]
FMBR	85.00	85.00	80.00	6000.00	0.50	87.50	77.50	77.50	
户用堆沤池	40.00	50.00	36.00	20.00	0.02	83.50	85.00	75.00	[19]~[21]
户用沼气池	50.00	70.40	50.00	22.10	0.02	77.50	82.50	87.50	[19]~[21]
基质化栽培技术	19.20	18.00	30.00	11.70	21.00	85.00	87.50	83.50	[19]~[21]
蚯蚓堆沤池	50.00	64.00	45.00	24.00	0.1	81.00	77.50	82.50	[19]~[21]
人工湿地	31.37	21.83	31.29	484.79	0.32	85.00	80.00	87.50	[22]
三级生物净化塘	31.69	32.25	27.97	1520.00	0.11	83.50	77.50	82.50	[23]
前置库	33.00	34.00	40.00	786.66	0.23	85.50	87.50	87.50	[24]
滨岸带	68.00	68.00	41.00	1232.22	0.13	80.00	85.00	92.50	[25]~[26]

表5 面源污染控制技术评价标准

Table 5 Non-point source pollution control technology evaluation criteria

等级	TP 去除率/%	NH ₃ -N 去除率/%	COD 去除率/%	建设成本/ (元·m ⁻³)	运行成本/ (元·m ⁻³)	技术稳定度	技术管理 方便度	生态协调性
优	>90	>90	>90	<1500	<0.1	81~100	81~100	81~100
良	80~90	80~90	70~90	1500~3000	0.10~0.35	61~80	61~80	61~80
中	70~80	70~80	60~70	3000~5500	0.35~0.45	41~60	41~60	41~60
较差	50~70	50~70	40~60	5500~7000	0.35~0.45	21~40	21~40	21~40
差	<50	<50	<40	>7000	>0.45	0~20	0~20	0~20

2.3 备选方案灰色关联矩阵建立

依 1.4 中矩阵的构建方法建立备选方案的灰色关联矩阵,以农村生活污水备选方案为例构建矩阵 \bar{A}_5 , 其中, $\mathbf{a}_0 = (100.00, 100.00, 100.00, 3000.00, 0.40, 100.00, 100.00, 100.00)$ 为理想方案,对特征矩阵按第 1.5 节进行归一化计算得到规范矩阵 S_5 ,对标准矩阵 S 进行 $s_{0j} - s_{ij}$ 转换可得矩阵 S_4 。

$$\bar{A}_5 = \begin{bmatrix} 40.39 & 53.12 & 80.00 & 5500.00 & 0.41 & 76.00 & 73.50 & 63.50 \\ 84.90 & 94.20 & 90.00 & 3749.43 & 0.58 & 85.00 & 80.00 & 77.50 \\ 99.23 & 92.07 & 59.78 & 4000.00 & 0.45 & 85.00 & 81.00 & 82.50 \\ 85.00 & 85.00 & 80.00 & 6000.00 & 0.50 & 87.50 & 77.50 & 77.50 \\ 100.00 & 100.00 & 100.00 & 3000.00 & 0.40 & 100.00 & 100.00 & 100.00 \end{bmatrix}$$

$$S_5 = \begin{bmatrix} 0.4039 & 0.5312 & 0.8000 & 0.5454 & 0.9756 & 0.7600 & 0.7350 & 0.6350 \\ 0.8490 & 0.9420 & 0.9000 & 0.8001 & 0.6897 & 0.8500 & 0.8000 & 0.7750 \\ 0.9923 & 0.9207 & 0.5978 & 0.7500 & 0.8889 & 0.8500 & 0.8100 & 0.8250 \\ 0.8500 & 0.8500 & 0.8000 & 0.5000 & 0.8000 & 0.8750 & 0.7750 & 0.7750 \\ 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

$$S_4 = \begin{bmatrix} 0.5961 & 0.4688 & 0.2000 & 0.4546 & 0.0244 & 0.2400 & 0.2650 & 0.3650 \\ 0.1510 & 0.0580 & 0.1000 & 0.1999 & 0.3103 & 0.1500 & 0.2000 & 0.2250 \\ 0.0077 & 0.0793 & 0.4022 & 0.2500 & 0.1111 & 0.1500 & 0.1900 & 0.1750 \\ 0.1500 & 0.1500 & 0.2000 & 0.5000 & 0.2000 & 0.1250 & 0.2250 & 0.2250 \end{bmatrix}$$

由 S_4 知

$$\min_i [\min_j (s_{0j} - s_{ij})] = 0.0077, \max_i [\max_j (s_{0j} - s_{ij})] = 0.5961$$

代入关联系数 ε_{ij} 的计算式,得 ε_i 的关联矩阵

$$\varepsilon_i = \begin{bmatrix} 0.3419 & 0.3987 & 0.6139 & 0.4062 & 0.9482 & 0.5683 & 0.5430 & 0.4611 \\ 0.6809 & 0.8587 & 0.7681 & 0.6140 & 0.5026 & 0.6824 & 0.6139 & 0.5846 \\ 1.0000 & 0.8103 & 0.4366 & 0.5579 & 0.7473 & 0.6824 & 0.6265 & 0.6463 \\ 0.6824 & 0.6824 & 0.6139 & 0.3831 & 0.6139 & 0.7227 & 0.5846 & 0.5846 \end{bmatrix}$$

2.4 备选方案综合关联度

依据关联度公式计算

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j \varepsilon_{ij} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

由第 1.3 节可知 $w_j = [0.2286, 0.1143, 0.0571, 0.32, 0.08, 0.1163, 0.0618, 0.0219]$,洱海农村生活污水 4 种备选技术的综合评价结果和排序见表 6,用同样方法可算畜禽养殖和农业径流污染备选技术的综合评价值和排序(表 6)。

根据洱海面源污染控制技术综合评价值可知,在农村生活污水污染控制备选技术中以土壤净化槽为最优;从环境、经济和生态效益单方面评价可知,土壤净化槽的环境效益最优,处理效率好,经济效益也最优,兼氧膜生物反应器的生态效益最优。在畜禽养殖污染控制备选技术中以基质化栽培技术为最优;从环境、经济和生态效益单方面评价结果可知,户用沼气池环境效益最优,基质化栽培技术的经济和生态效益最优。在农业径流污染控制备选技术中以人工湿地为最优;从环境、经济和生态效益单方面评价结果可知,滨岸带的环境效益最优,人工湿地的经济效益最优,前置库的生态效益最优。

表6 面源污染控制备选技术综合评价结果

Table 6 Comprehensive evaluation results of non-point source pollution control technology

技术名称	综合评价值	环境效益评价值	经济效益评价值	生态效益评价值	
农村生活污染 控制技术	厌氧-接触氧化-砂滤	0.4744	0.3970	0.5146	0.5488
	一体化净化槽	0.6645	0.7442	0.5917	0.6506
	土壤净化槽	0.7167	0.8653	0.5958	0.6612
	FMBR	0.5737	0.6726	0.4293	0.6650
畜禽养殖污染 控制技术	户用堆沤池	0.6695	0.5815	0.6249	0.9350
	户用沼气池	0.6868	0.6707	0.6023	0.8883
	基质化栽培技术	0.7302	0.4827	0.8582	0.9696
	蚯蚓堆沤池	0.6591	0.6497	0.5508	0.8945
农业径流污染 控制技术	人工湿地	0.6434	0.4382	0.7446	0.8517
	三级生物净化塘	0.5218	0.4482	0.4458	0.8209
	前置库	0.5693	0.4607	0.5177	0.8900
	滨岸带	0.6099	0.6442	0.4581	0.8450

3 结论

1) 本文运用层次-灰色关联分析法建立了能反映面源污染控制技术的环境、经济和生态效益的评价指标体系,可通过评判备选技术的总磷、氨氮及化学需氧量去除率、建设、运行成本和技术稳定度、管理方便度和生态协调性等方面来评判技术方案优劣,基于此计算各备选技术的综合关联度,从而得到最优方案。

2) 运用层次灰色关联分析对洱海生活污水控制4项备选技术、畜禽养殖污染控制4项备选技术、农业径流污染控制4项备选技术进行评价,结果表明各项备选技术中分别以土壤净化槽、基质化栽培技术和人工湿地最优,评价指标和评价权重对评价结果具较大影响。后续研究中,需加强对评价指标的选择和对指标权重的研究,在实际工程方案中还需要考虑各区域,全面衡量各因素,确定最佳方案。

3) 农业面源污染控制技术综合评价具动态性、复杂性,可借鉴研究成果较缺乏,本文仅是一次尝试,要建立实用有效的农业面源污染控制技术综合评价指标体系和方法还需深入研究,从以下方面完善:(1) 指标体系建立过程中,建立统计学方法对评价指标间的独立性检验;(2) 选择单项及组合技术,完成实地案例研究验证,完善指标体系;(3) 对比分析各评价方法应用效果,选择最适综合评价方法。

参考文献(References)

- [1] Julie Stauffer. The water crisis—constructing solutions to freshwater pollution[M]. London: Earth-scan Publications Ltd, 1998: 31-50.
- [2] 胡万里, 付斌, 段宗颜, 等. 低纬高原湖泊农业面源污染防治研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(8): 250-255.
Hu Wanli, Fu Bin, Duan Zongyan, et al. A review on the agriculture non-point source pollution and control research of the plateau watershed in low latitude[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(8): 250-255.
- [3] 张红举, 陈方. 太湖流域面源污染现状及控制途径[J]. 水资源保护, 2010, 26(3): 87-91.
Zhang Hongju, Chen Fang. Non-point pollution statistics and control measures in Taihu Basin[J]. Water Resources Protection, 2010, 26(3): 87-91.
- [4] 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 Li, Hu Zhengyi. 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 Taihuregion[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(4): 608-616.
- [5] 沈丰菊, 张克强, 李军幸, 等. 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): 272-281.
Shen Fengju, Zhang Keqiang, Li Junxing, et al. 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.
- [6] 韩利, 梅强, 陆玉梅, 等. AHP-模糊综合评价方法的分析与研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(7): 86-89.
Han Li, Mei Qiang, Lu Yumei, et al. Analysis and study on AHP-Fuzzy comprehensive evaluation[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(7): 86-89.
- [7] 罗毅, 李昱龙. 基于熵权法和灰色关联分析法的输电规划方案综合决策[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 77-83.
Luo Yi, Li Yulong. Comprehensive decision-making of transmission network planning based on entropy weight and grey relational analysis [J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 77-83.
- [8] Saaty T L. How to make a decision: The analytic hierarchy process[J]. European Journal of Operational Research, 1990, 48: 9-26.
- [9] 袁玲玲, 徐春红. AHP和模糊综合评价法在海洋工程标准体系建设中的应用研究[J]. 海洋技术, 2010, 29(1): 74-77.
Yuan Lingling, Xu Chunhong. Application of AHP and fuzzy comprehensive evaluation method in construction of ocean engineering standardized system[J]. Ocean Technology, 2010, 29(1): 74-77.
- [10] Michael A. Elliott. Selecting numerical scales for pairwise comparisons [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2010, 95: 750-763.
- [11] 周律, 赵巨尧, 羊小玉, 等. 采用层次分析法对排水管道非开挖修复技术优选研究[J]. 给水排水, 2015, 41(3): 94-97.
Zhou Lü, Zhao Juyao, Yang Xiaoyu. Analytic hierarchy process to select the optimal technique for trenchless sewer pipeline rehabilitation engineering[J]. Water Supply and Drainage, 2015, 41(3): 94-97.
- [12] 薛念涛, 张国臣, 陈坚, 等. 层次分析-灰色关联分析法评价黄姜皂素生产工艺[J]. 环境科学研究, 2014, 27(1): 99-105.
Xue Niantao, Zhang Guochen, Chen Jian, et al. Evaluation on diosgenin production processes from Dioscorea zingiberensis C.H. W right using analytical hierarchy process-grey relational analysis[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(1): 99-105.
- [13] 赵杰. 土石坝除险加固防渗技术方案多目标决策研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.
Zhao Jie. Study of multi-objective decision on anti-seepage programs in reinforcement of the earth-rock dam[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2012.
- [14] 陈书琴. 海菜花氮耐受性及其净化洱海低污染水研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2014.
Chen Shuqin. Studying on nitrogen tolerance and low-polluted water purification of oteliaacuminata (Gagnep.) dandy in Erhai Lake[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2014.
- [15] 张英民, 卢文洲, 王炜. 农村生活污水处理工程技术方案优选研究 [J]. 中国环境科学, 2013, 33(增刊1): 210-214.
Zhang Yingmin, Lu Wenzhou, Wang Wei. Research on optimum selection of rural domestic sewage treatment technology[J]. China Environmental Science, 2013, 33(suppl 1): 210-214.
- [16] 吕兴菊, 孟良. 厌氧-接接触氧化-砂滤组合工艺处理洱海流域农村生活污水的试验研究[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2010, 35(4): 93-98.
Lü Xingju, Meng Liang. Anaerobic contact oxidation sand filtration deal Erhai Lake basin of countryside household sewage study[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 35(4): 93-98.
- [17] 白献宇, 胡小贞, 庞燕. 洱海流域低污染水类型污染负荷及分布[J]. 湖泊科学, 2015, 27(2): 200-207.
Bai Xianyu, Hu Xiaozhen, Pang Yan. Pollution load, distribution and characteristics of low-polluted water in Lake Erhai watershed[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(2): 200-207.
- [18] 金丹越, 白献宇, 金相灿. 洱海流域农村生活污水调查与处理方案研究[J]. 农业资源与环境, 2007(9): 96-100.
Jin Danyue, Bai Xianyu, Jin Xiangcan. Investigation and rural sewage

- treatment scheme in Erhai Lake[J]. *Agricultural Resources and Environment*, 2007(9): 96-100.
- [19] 赵明, 徐东勇, 周北海, 等. 改进型土壤净化槽处理生活污水研究[C]. 2010 International Conference on Remote Sensing (ICRS), Hangzhou, China, October 5-6, 2010.
- Zhao Ming, Xu Dongyong, Zhou Haibei, et al. Study on modified soil trench for treatment of domestic sewage[C]. 2010 International Conference on Remote Sensing (ICRS), Hangzhou, China, October 5-6, 2010.
- [20] 黄国锋, 吴启堂, 孟庆强, 等. 猪粪堆肥化处理的物质变化及腐熟度评价[J]. *华南农业大学学报(自然科学版)*, 2002, 23(3): 1-4.
- Huang Guofeng, Wu Qitang, Meng Qingqiang, et al. Substance changes and maturity evaluation during pig manure composting[J]. *Journal of South China Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2002, 23(3): 1-4.
- [21] 黄凯. 洱海农村畜禽粪便氮磷流失规律及控制方案研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
- Huang Kai. Research on the laws of nitrogen and phosphorus loss and control scheme in Eryuan rural[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.
- [22] 贾丽娟. 洱海北部流域有机固体废物氮磷污染及其控制对策研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- Jia Lijuan. Pollution of nitrogen and phosphorus of rural organic solid waste and its control in northern Erhai-lake basin[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
- [23] 凌子微, 仝欣楠, 李亚红. 处理低污染水的复合人工湿地脱氮过程[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(3): 320-325.
- Ling Ziwei, Tong Xinnan, Li Yahong. Study on nitrogen removal process of treatments for slightly contaminated water on hybrid constructed wetlands[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(3): 320-325.
- [24] 杨鹏, 张克强, 倪喜云, 等. 三级净化塘生态修复技术用于处理农业种养废水[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(8): 87-91.
- Yang Peng, Zhang Keqiang, Ni Xiyun, et al. Three-stage purification pond ecological restoration technology for treatment of agricultural planting and breeding wastewater[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(8): 87-91.
- [25] 李彬, 吕锡武, 宁平, 等. 河口前置库技术在面源污染控制中的研究进展[J]. *水处理技术*, 2008, 34(9): 1-7.
- Li Bin, Lü Xiwu, Ning Ping, et al. Advances of pre-reservoirs technology for non-point sources pollution control[J]. *Technology of Water Treatment*, 2008, 34(9): 1-7.
- [26] 叶春, 金相灿, 孔海南, 等. 农村面源污染型湖滨带的生态修复[J]. *水资源保护*, 2007, 23(5): 1-5.
- Ye Chun, Jin Xiangcan, Kong Hainan, et al. Ecological restoration of lakeshore damaged by rural non-point pollution[J]. *Water Resources Protection*, 2007, 23(5): 1-5.

Evaluation of agricultural non-point source pollution prevention and control techniques using a grey analytic hierarchy process for Lake Erhai

ZHANG Ping^{1,2}, LU Shaoyong², PAN Chengrong^{1,3}

1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China
1. State Environmental Protection Scientific Observation Station of Dongting Lake, State Key Laboratory of Environmental Benchmark and Risk Assessment, National Engineering Laboratory for Lake Water Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China
3. Anhui Institute of Environmental Science, Hefei 230061, China

Abstract Agricultural non-point source pollution is probably the largest source of water pollution, contributing to eutrophication of Lake Erhai. In this paper, a non-point source pollution control technology evaluation index system considering environmental benefit, economic benefit and ecological benefit is established, and the indicators include TP removal efficiency, COD removal efficiency, ammonia removal efficiency, construction cost, operating cost, technology stability, management easiness degree and ecological coordination degree. At the same time, on the basis of non-point source pollution control technology choice in Lake Erhai, the hierarchy-grey correlation analysis method is used to evaluate the comprehensive correlation degrees of alternative technologies and obtain the optimal solution. The result shows that in the sewage pollution control alternatives, soil purification tank is the optimal scheme. In livestock and poultry breeding pollution control alternatives, substrate cultivation technique is the optimal. In farmland pollution control schemes, constructed wetland is the optimal.

Keywords Erhai Lake; agricultural non-point source pollution; analytic hierarchy process; gray correlation meth

(责任编辑 王媛媛)