

# 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

沈丰菊<sup>1</sup>, 张克强<sup>1\*</sup>, 李军幸<sup>1</sup>, 黄治平<sup>1</sup>, 郑向群<sup>1</sup>, 唐杰伟<sup>2</sup>

(1. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 农业部农业资源与生态保护总站, 北京 100125)

**摘 要:** 目前生活污水污染问题是农村人居环境和生态环境恶化的重要原因之一。该文对现有中国农村生活污水处理技术和工艺、典型工程处理效果和运行状况以及存在的问题进行调查和分析, 从经济、技术、环境 3 个方面筛选评价指标, 通过层次分析法与熵值法相结合的主客观综合赋权法确定各评价指标的权重, 构建农村生活污水处理技术评价指标体系; 采用分层模糊积分模型对 15 种现有农村生活污水处理技术模式进行综合评价和排序, 最终筛选出三级塘生物生态强化处理技术、户用生态滤池、厌氧-(兼氧)-人工湿地、生物接触氧化-生态沟渠、一体化净化槽、厌氧-兼氧-好氧三级生物滤池、厌氧-土地处理、生态滤池-生态塘、厌氧-生物接触氧化-人工湿地、地埋式微动力氧化沟 10 种技术模式, 推荐作为中国农村生活污水处理典型技术模式。该文对中国农村生活污水治理工程建设具有一定的参考价值。

**关键词:** 水污染; 污水处理; 数学模型; 农村生活污水; 综合赋权法; 模糊测度; 模糊积分; 综合评价

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.15.035

中图分类号: X-1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-15-0272-09

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—280.

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 (Transactions of the CSAE), 2014, 30(15): 272—280. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

据调查, 中国农村生活污水的产生量达 80 亿 t/a, 约占全国生活污水排放量的 1/2, 并且仅有很少的村庄建有污水排放管网或污水处理设施, 绝大部分村庄的生活污水被随意排入附近的河流、湖泊、池塘等, 对农村生活环境造成了极大的污染<sup>[1]</sup>。水污染不仅影响农村居民身心健康, 而且在很大程度上影响和制约了农村生态环境保护和农村可持续发展。中国农村生活污水具有面广、分散、来源多、增长快、处理率低等特点。选择什么样的技术模式对农村生活污水进行无害化处理和资源化利用是目前亟待解决的问题之一<sup>[2-3]</sup>。

20 世纪 90 年代以来, 中国逐步开展了农村生

活污水处理技术研究, 根据不同地区农村的自然社会条件、经济发展水平、村镇发展规划以及农民生活习惯等开展了农村污水处理示范工程建设<sup>[4-7]</sup>。在技术评价指标体系构建方面, 仅有少量针对城市污水处理厂可行性分析和运行效果的研究, 而在农村生活污水处理技术评价方面的研究较少, 尚未建立科学、系统、全面的农村生活污水处理技术评价的指标系统和评价方法<sup>[8]</sup>。由于现有的技术模式繁多, 技术水平及成熟度参差不齐, 同时又缺乏科学、实用的评价方法和指标体系, 这在很大程度上制约了这些技术的推广应用。本研究在大量调查分析的基础上, 构建了一套具有科学性、可行性、实用性的评价指标体系和综合评价方法, 并对当前中国不同地区较为常用的、具有典型性的农村生活污水处理技术模式进行综合评价, 筛选出经济性好、技术成熟稳定、环境效益显著的 10 种农村生活污水处理技术模式, 为中国农村生活污水污染防治和处理工程建设提供参考。

## 1 评价指标体系构建

### 1.1 指标选取原则

目前, 常见的农村生活污水的处理技术有生物

收稿日期: 2013-04-26 修订日期: 2014-07-14

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项: 现代农业产业工程集成技术与模式研究(200903009)

作者简介: 沈丰菊(1979—), 女, 青海平安人, 助理研究员, 主要从事农业废弃物资源化利用研究。天津 农业部环境保护科研监测所, 300191。Email: shenfengju@sina.com

※通信作者: 张克强(1968—), 男, 湖北黄冈人, 研究员, 博士, 主要从事畜禽养殖污染防控技术研究。天津 农业部环境保护科研监测所, 300191。Email: kqzhang68@126.com

处理技术、土地处理技术和稳定塘处理技术等，农村生活污水综合评价指标体系，是科学评价农村生活污水处理工程处理效果的基础。影响农村污水处理技术选择的因素很多，各因素间既有相互区别、又密切联系。构建一个科学合理、可操作性强的评价指标体系，就是要从众多影响因素中选择最灵敏的、便于度量且内涵丰富的主导性因素作为评价指标。农村生活污水评价指标选择应遵循科学性及导向性原则、3 个效益统一原则、可比性与可操作性相结合原则、相对性与绝对性、系统性相结合原则、

定量与定性相结合原则<sup>[9-10]</sup>。

## 1.2 评价指标选择与指标体系构建

农村生活污水处理技术的评价指标主要从经济、技术、环境 3 个方面进行选择。其中经济指标包括工程投资、运行成本和占地面积；技术指标包括污染物去除率、技术的成熟度、工程运行的稳定性、技术操作和运行管理难易度和气候适宜性<sup>[11-12]</sup>；环境指标包括污泥产量、运行影响和资源化利用程度。根据各项指标的重要性，构建农村生活污水处理技术评价指标体系（见表 1）。

表 1 农村生活污水处理技术评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of rural domestic sewage treatment technologies

准则层 Guidelines	指标层 Index	分指标层 Sub-index	指标解释 Index explanation	性质 Nature
经济 A <sub>1</sub> Economy	工程投资 B <sub>1</sub> /(元·t <sup>-1</sup> )		工程的土建、设备及安装费用	定量指标
	运行费用 B <sub>2</sub> /(元·t <sup>-1</sup> )		主要包括动力费、药剂费、工资福利费、固定资产折旧费、设备修理费、日常检修维护费等	定量指标
	占地面积 B <sub>3</sub>		工程设施实际占用的土地面积	定性指标
技术 A <sub>2</sub> Technology	污染物去除率 B <sub>4</sub> %	生化需氧量去除率 C <sub>1</sub>	污水处理系统对进水中的生化需氧量去除量与进水中生化需氧量的总量的百分比	定量指标
		化学需氧量去除率 C <sub>2</sub>	污水处理系统对进水中的化学需氧量去除量与进水中化学需氧量的总量的百分比	定量指标
		悬浮物去除率 C <sub>3</sub>	污水处理系统对进水中的悬浮物去除量与进水中悬浮物的总量的百分比	定量指标
		总氮去除率 C <sub>4</sub>	污水处理系统对进水中的总氮去除量与进水中总氮的总量的百分比	定量指标
		总磷去除率 C <sub>5</sub>	污水处理系统对进水中的总磷去除量与进水中总磷的总量的百分比	定量指标
	工程运行的稳定性 B <sub>5</sub>	抗水力冲击负荷 C <sub>6</sub>	进水量变化对出水水质的影响	定性指标
		抗污染物冲击负荷 C <sub>7</sub>	进水水质变化对出水水质的影响	定性指标
	技术操作和运行管理难易度 B <sub>6</sub>	自动化程度 C <sub>8</sub>		定性指标
		工艺复杂程度 C <sub>9</sub>		定性指标
	技术成熟度 B <sub>7</sub>		处理技术的开发年代、示范推广情况	定性指标
	气候适宜性 B <sub>8</sub>		处理技术对温度的适应范围	定性指标
环境 A <sub>3</sub> Environment	污泥产量 B <sub>9</sub>		污水处理过程中产生的污泥	定性指标
	运行影响 B <sub>10</sub>	气味 C <sub>10</sub>	产生的臭气、甲烷、挥发性有机物等	定性指标
		噪音 C <sub>11</sub>	设备运行过程中产生的噪音	定性指标
	资源化利用程度 B <sub>11</sub>		处理后出水的去向或再利用方式	定性指标

## 2 农村生活污水处理技术评价指标权值确定

### 2.1 层次分析法

#### 2.1.1 层次分析法步骤

层次分析法（analytic hierarchy process, AHP 法）是一种定性和定量相结合的、系统化、层次化的分析方法。其赋权步骤主要包括构造判断矩阵、层次单排序及一致性检验、层次总排序及一致性检验<sup>[13-17]</sup>。

#### 2.1.2 计算结果

准则层：包含经济、技术和环境 3 项指标，指标权重分别为 0.131、0.218、0.651。

经济指标：包含工程投资 B<sub>1</sub>、运行费用 B<sub>2</sub> 和占地面积 B<sub>3</sub> 3 项分指标，指标权重分别为 0.535、

0.343、0.122。

技术指标：包含污染物去除率 B<sub>4</sub>、工程运行的稳定性 B<sub>5</sub>、技术操作和运行管理难易度 B<sub>6</sub>、技术成熟度 B<sub>7</sub> 和气候适宜性 B<sub>8</sub> 5 项分指标，指标权重分别为 0.433、0.251、0.149、0.115、0.053。

环境指标：包含污泥产量 B<sub>9</sub>、运行影响 B<sub>10</sub> 和资源化利用程度 B<sub>11</sub> 3 项分指标，指标权重分别为 0.511、0.266、0.223。

分指标层：包括生化需氧量（biochemical oxygen demand, BOD）去除率 C<sub>1</sub>、化学需氧量（chemical oxygen demand, COD）去除率 C<sub>2</sub>、悬浮物（suspended substance, SS）去除率 C<sub>3</sub>、总氮（total nitrogen, TN）去除率 C<sub>4</sub>、和总磷（total phosphorus, TP）去除率 C<sub>5</sub>、抗水力冲击负荷 C<sub>6</sub>、抗污染物冲

击负荷  $C_7$ 、自动化程度  $C_8$ 、工艺复杂程度  $C_9$ 、气味  $C_{10}$ 、噪音  $C_{11}$  11 项分指标, 各分指标权重分别为 0.345、0.310、0.078、0.154、0.113、0.523、0.477、0.593、0.407、0.628、0.372。

## 2.2 熵值法

熵值法确定指标权重的步骤大致分为选择备选方案、指标原始赋值、指标的无量纲化处理和指标权重计算 4 个步骤<sup>[18-19]</sup>。

首先, 根据实地调研情况分析, 本文选择地埋式微动力氧化沟技术、厌氧-(兼氧)-人工湿地组合处理技术、生态滤池-生态塘组合处理技术、生物接触氧化-生态沟渠组合技术、厌氧-兼氧-好氧(A-A-O)组合处理技术 5 项技术作为备选方案。

其次, 对可定量指标根据实际调查分析结果赋值, 对可定量的定性指标根据专家经验进行赋值<sup>[20]</sup>。具体赋值结果如下:

对  $B_3$  指标赋值为: 小=1.0, 较小=0.75, 较大=0.50; 对  $C_6$ 、 $C_7$  指标赋值为: 好=1.0, 较好=0.75, 一般=0.50; 对  $C_8$  指标赋值为: 高=1.0, 低=0.50; 对  $C_9$  指标赋值为: 简单=1.0, 一般=0.75, 较复杂=0.50; 对  $B_7$  指标赋值为: 高=1.0, 低=0.50; 对  $B_8$  指标赋值为: 强=1.0, 较强=0.75, 一般=0.50; 对  $B_9$  指标赋值为: 少=1.0, 较少=0.75, 较多=0.50; 对  $C_{10}$ 、 $C_{11}$  指标赋值为: 小=1.0, 较小=0.75, 较大=0.50; 对  $B_{11}$  指标赋值为: 好=1.0, 较好=0.75, 一般=0.50。

第三, 通过数学变换对指标原始变量进行无量纲化处理, 使得数据标准化、规格化<sup>[21]</sup>。其中效益型指标如污染物去除率、抗冲击负荷等采用式(1), 成本型指标如工程投资、运行费用等采用式(2)进行无量纲化处理。

对于正向指标, 令:

$$y_{kj} = \frac{X_{kj} - \min(k)X_{kj}}{\max(k)X_{kj} - \min(k)X_{kj}} \quad k=1, 2, \dots; j=1, 2, \dots \quad (1)$$

对于负向指标, 令:

$$y_{kj} = \frac{\max(k)X_{kj} - X_{kj}}{\max(k)X_{kj} - \min(k)X_{kj}} \quad k=1, 2, \dots; j=1, 2, \dots \quad (2)$$

式中:  $y_{kj}$  为技术模式  $k$  第  $j$  项指标无量纲化处理值;  $X_{kj}$  为技术模式  $k$  第  $j$  项指标值;  $\min(k)X_{kj}$  为  $k$  个技术模式第  $j$  项指标最小值;  $\max(k)X_{kj}$  为  $k$  个技术模式第  $j$  项指标最大值。

最后计算权重。

## 2.3 评价指标综合权值的确定

设用主观赋权法(层次分析法)求得的权向量

为  $\alpha=(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)^T$ , 用客观赋权法(熵值法)求得的权向量为  $\beta=(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)^T$ , 设对主观权向量的偏好程度为  $\mu$ , 客观权向量的偏好程度为  $(1-\mu)$ , 则指标综合权重公式如下:

$$W = [\mu\alpha_1 + (1-\mu)\beta_1, \mu\alpha_2 + (1-\mu)\beta_2, \dots, \mu\alpha_m + (1-\mu)\beta_m]^T \quad (3)$$

设主客观权重的偏好程度相同, 即取  $\mu=0.5$ , 由公式(3)即可求得各指标的综合权重。

## 3 基于分层模糊积分模型的农村生活污水处理技术综合评价

农村污水处理技术评价中涉及的因素很多, 各因素之间的主次关系也有所不同。本文采用采用分层模糊积分模型来对农村生活污水处理技术模式进行综合评价<sup>[22]</sup>。

### 3.1 备选对象的选择

用  $V_i$  表示不同的方案, 则构成备选对象  $V=\{V_1, V_2, \dots, V_{15}\}$ ,  $V_i$  ( $i=1, 2, \dots, 15$ ) 分别代表户用生态滤池、沼气净化池、一体化净化槽、厌氧-(兼氧)-人工湿地、生态滤池-生态塘、膜生物反应器(membrane bio-reactor, MBR)<sup>[23]</sup>、地埋式微动力氧化沟、三格式化粪池、生物接触氧化-生态沟渠<sup>[24-25]</sup>、厌氧-兼氧-好氧三级生物滤池、厌氧-生物接触氧化-人工湿地<sup>[26]</sup>、三格式化粪池+生态湿地+生态塘、厌氧-土地处理<sup>[27-29]</sup>、无动力地埋式厌氧反应器、三级塘生物生态强化处理技术<sup>[30-31]</sup>。

### 3.2 指标取值及隶属度的计算

#### 3.2.1 指标取值

本文设定各技术模式污水处理规模为  $50 \text{ m}^3$ , 对各技术模式的各项指标分别取值(见表 2)。

#### 3.2.2 隶属度计算

对于农村生活污水处理技术评价指标中, 有的指标是正向指标, 即指标取值越大越好; 有的指标是负向指标, 即值指标值越小越好。通常用隶属度来表示某项指标对某个系统影响的好坏程度。隶属度计算步骤如下:

1) 选取理想值  $S_i$ : 对于正向指标, 取各技术模式中的最大值为理想值; 对于负向指标, 取技术模式中的最小值为理想值。

2) 计算隶属度  $h(I)$ : 当  $0 < I \leq 1$  时,  $h(I)=1$ ; 当  $I > 1$  时,  $h(I)=e^{-(I-1)}$ 。对于正向指标,  $I_i=S_i/C_i$ ; 对于负向指标,  $I_i=C_i/S_i$ 。其中  $C_i$  表示实际值。

隶属度  $0 \leq h(I) \leq 1$ , 取值越大, 隶属度越大; 取值越小, 隶属度越小。15 种农村生活污水处理技术模式各项指标的隶属度  $h(I)$  见表 3。

表 2 15 种技术模式各项指标取值  
Table 2 Index value of 15 type's treatment technologies

序号 No.	评价指标 Index	技术模式 Types treatment technologies															三级塘生物 生态强化 处理技术式 $V_5$
		户用生态 滤池 $V_1$ Household eco-filter	沼气 净化池 $V_2$ Biogas tank	一体化 净化槽 $V_3$ Integrated purification tank	厌氧- (兼氧)- 人工湿地 $V_4$ Anaerobic - facultative- constructed wetland	生态滤池- 生态塘 $V_5$ Eco-filter & eco-pond	膜生物 反应器 $V_6$ Membrane bio-reactor	地埋式微 动力氧化沟 $V_7$ Buried micro-power oxidation ditch	三格式 化粪池 $V_8$ Three-grille mode septic tank	生物接触 氧化- 生态沟渠 $V_9$ Bio-contact oxidation & eco-ditch	厌氧-兼氧- 好氧三级 生物滤池 $V_{10}$ Anaerobic - facultative- biological filter	厌氧-生物- 接触氧化- 人工湿地 $V_{11}$ Anaerobic - bio-contact oxidation & constructed wetland	三格式化粪 池+生态塘 $V_{12}$ Three-grille mode septic tank & eco-pond	厌氧- 土地处理 $V_{13}$ Anaerobic- land treatment	无动力地 埋式厌氧 反应器 $V_{14}$ Underground unpowered anaerobic reactor		
1	工程投资 $B_1$ /(元·t <sup>-1</sup> )	1 800	2 500	2 500	3 000	2 500	6 000	3 000	1 000	2 000	2 000	2 500	3 500	1 000	3 000	2 500	
2	运行费用 $B_2$ /(元·t <sup>-1</sup> )	0.11	0.12	0.1	0.15	0.2	0.5	0.25	0.1	0.2	0.25	0.25	0.3	0.2	0.3	0.15	
3	占地面积 $B_3$	0.75	0.75	1	0.75	0.75	1	0.75	1	0.75	0.5	0.5	0.5	0.5	0.75	0.5	
4	生化需氧量去除率 $C_1$ %	95	50	95	85	85	80	95	45	95	96	95	90	92	85	96	
5	化学需氧量去除率 $C_2$ %	92	45	90	80	80	80	90	45	95	95	90	85	90	85	94	
6	悬浮物去除率 $C_3$ %	95	60	96	80	90	80	95	50	98	98	96	85	96	90	92	
7	总氮去除率 $C_4$ %	90	15	95	85	85	85	90	15	98	96	96	85	95	80	95	
8	总磷去除率 $C_5$ %	90	10	90	90	95	85	96	10	95	96	96	90	95	85	90	
9	抗水力冲击负荷 $C_6$	0.75	0.5	1	1	1	1	1	0.5	1	1	1	0.75	0.75	0.75	0.75	
10	抗污染物冲击负荷 $C_7$	1	0.75	1	1	1	1	1	0.5	1	1	1	0.75	0.75	0.75	0.75	
11	自动化程度 $C_8$	0.5	0.5	1	0.5	0.5	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	0.5	
12	工艺复杂程度 $C_9$	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.5	0.75	1	0.75	0.75	0.75	0.75	1	0.5	0.75	
13	技术成熟度 $B_7$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
14	气候适宜性 $B_8$	0.75	0.5	1	0.75	1	1	1	0.75	1	1	1	0.75	0.5	0.75	0.75	
15	污泥产量 $B_9$	1	1	1	1	1	1	1	0.75	1	1	1	0.75	1	1	1	
16	气味 $C_{10}$	1	1	1	1	1	1	1	0.5	1	1	1	1	1	1	1	
17	噪音 $C_{11}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
18	资源化利用程度 $B_{11}$	0.5	0.5	0.5	0.75	0.75	0.5	0.75	0.5	1	1	1	0.75	1	0.5	0.75	

表 3 各项指标的隶属度  $h(I)$   
Table 3 Membership degree of indicators of 15 types treatment technologies

评价指标 Index	理想值 $S_i$ Ideal value	技术模式的隶属度 $h(I)$ Membership degree of indicators														
		$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_8$	$V_9$	$V_{10}$	$V_{11}$	$V_{12}$	$V_{13}$	$V_{14}$	$V_{15}$
$A_1$	$B_1$	2 000	1.000	0.779	0.779	0.607	0.779	0.135	0.607	1.000	1.000	0.779	0.472	1.000	0.607	0.779
	$B_2$	0.15	1.000	1.000	1.000	1.000	0.717	0.097	0.513	1.000	0.717	0.513	0.513	0.368	0.717	0.368
	$B_3$	1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
$A_2$	$C_1$	90	0.990	0.399	0.936	0.879	0.879	0.819	0.990	0.322	0.990	1.000	0.990	0.936	0.936	0.879
	$C_2$	90	0.968	0.329	1.000	0.829	0.829	0.829	0.946	0.329	1.000	1.000	0.946	0.889	0.968	0.889
	$C_3$	96	0.990	0.549	1.000	0.819	0.936	0.819	0.990	0.399	1.000	1.000	1.000	0.879	1.000	0.936
	$C_4$	90	1.000	0.007	1.000	0.943	0.943	0.943	1.000	0.007	1.000	1.000	1.000	0.943	1.000	0.882
	$C_5$	95	0.946	0.000	0.946	0.946	1.000	0.889	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	0.946	1.000	0.889
	$C_6$	1	0.717	0.368	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.368	1.000	1.000	1.000	0.717	0.717	0.717
	$C_7$	1	1.000	0.717	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.368	1.000	1.000	1.000	0.717	0.717	0.717
	$C_8$	0.75	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	$C_9$	1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	$B_7$	1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	$B_8$	0.75	1.000	0.607	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.607	1.000	1.000
	$B_9$	1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
$A_3$	$C_{10}$	1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	$C_{11}$	1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	$B_{11}$	0.75	0.607	0.607	0.607	1.000	1.000	0.607	1.000	0.607	1.000	1.000	1.000	1.000	0.607	1.000

注：表 3 中字母的含义见表 1 和表 2。

Note: The meaning of letters in table 3 are shown in table 1 and table 2.

### 3.2.3 模糊测度（指标权重）

设 1 层指标集为  $A=\{A_1, A_2, A_3\}$ ，2 层指标集为  $B=\{B_1, B_2, \dots, B_i\}$  ( $i=1, 2, \dots, 11$ )，3 层指标集为  $C=\{C_1, C_2, \dots, C_i\}$  ( $i=1, 2, \dots, 11$ )，各指标含义及模糊测度见表 4。

表 4 各指标含义及模糊测度

准则层 Guidelines	指标层 Index	分指标层 Sub-index	模糊测度 Fuzzy measure
经济 $A_1$			0.321
	工程投资 $B_1$		0.373
	运行费用 $B_2$		0.327
	占地面积 $B_3$		0.300
技术 $A_2$	污染物去除率 $B_4$		0.317
		生化需氧量去除率 $C_1$	0.315
		化学需氧量去除率 $C_2$	0.213
		悬浮物去除率 $C_3$	0.116
		总氮去除率 $C_4$	0.172
		总磷去除率 $C_5$	0.184
	工程运行的 稳定性 $B_5$		0.223
		抗水力冲击负荷 $C_6$	0.512
		抗污染物冲击负荷 $C_7$	0.488
	操作管理难易 程度 $B_6$		0.175
		自动化程度 $C_8$	0.728
环境 $A_3$		工艺复杂程度 $C_9$	0.272
	技术成熟度 $B_7$		0.158
	对气候条件的 适应能力 $B_8$		0.127
	污泥产量 $B_9$		0.333
	运行影响 $B_{10}$		0.334
		气味 $C_{10}$	0.564
		噪音 $C_{11}$	0.436
	资源化利用程度 $B_{11}$		0.333

### 3.3 综合评价值计算

本文以备选对象  $V_1$  的综合评价值的计算来说明计算过程。

#### 3.3.1 分指标层指标的评价值计算

$V_1$  的  $B_4$  指标（污染物去除率）评价值  $E_{21}$ （下标 2 表示准则层指标中的技术指标，下标 1 表示技术指标下的第 1 个指标层指标）的计算如下：

$B_4$  下包含 5 个分指标层指标（ $C_1$  到  $C_5$ ），其隶属度分别为 0.990、0.968、0.990、1、0.946，按隶属度由大到小排序为  $C_4 > C_1 > C_3 > C_2 > C_5$ ，对应的权重（模糊测度）分别为 0.172、0.315、0.116、0.213、0.184，根据模糊积分评价模型  $\int_X h(x_i) \circ g(\cdot) =$

$$\sum_{i=1}^n [h(x_i) \cdot H(x_i)], \text{ 计算出评价值 } E_{21}=2.986。$$

同理可计算出： $V_1$  的  $B_5$  评价值  $E_{22}=1.205$ ， $V_1$  的  $B_6$  评价值  $E_{23}=1.728$ ； $V_1$  的  $B_{10}$  评价值  $E_{32}=1.564$ 。

#### 3.3.2 指标层指标的评价值计算

$V_1$  的  $A_1$  指标（经济）评价值计算同分指标层指标评价值计算相同，可求得评价值为  $E_1=2.073$ 。

$V_1$  的  $A_2$  指标（技术）评价值计算： $A_2$  下包含五个分指标层指标  $B_4$ （污染物去除率）、 $B_5$ （工程运行的稳定性）、 $B_6$ （技术操作和运行管理难易度）、 $B_7$ （技术成熟度）、 $B_8$ （气候适宜性）。以分指标层指标的评价值作为指标层指标的隶属度（无分指标层指标的除外），则各指标的隶属度分别为 2.999、1.207、1.728、1、1，按隶属度由大到小排序为  $B_4 > B_6 > B_5 > B_7 > B_8$ ，对应的权重（模糊测度）分别为 0.317、0.175、0.223、0.158、0.127，根据模糊积分评价模型计算出评价值  $E_2=4.531$ 。同理可计算

出  $V_1$  的  $A_3$  评价价值  $E_3=1.796$ 。

### 3.3.3 准则层指标的评价价值（综合评价价值）计算

以指标层指标的评价价值作为隶属度，根据模糊积分评价模型计算出  $V_1$  的综合评价价值  $E_0^1=5.440$ 。

采用同样方法可计算出其它备选对象  $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_4$ 、 $V_5$ 、 $V_6$ 、 $V_7$ 、 $V_8$ 、 $V_9$ 、 $V_{10}$ 、 $V_{11}$ 、 $V_{12}$ 、 $V_{13}$ 、 $V_{14}$ 、 $V_{15}$  的综合评价价值。15 种农村生活污水处理技术模式的综合评价价值及排序见表 5。

表 5 15 种技术模式的综合评价结果

Table 5 Comprehensive evaluation results of 15 type's treatment technologies

技术模式 Types treatment technologies	综合评价价值 $E_0$ Comprehensive evaluation value	经济性评价价值 $E_1$ Economical evaluation value	技术性评价价值 $E_2$ Technological evaluation value	环境性评价价值 $E_3$ Environmental evaluation value
$V_{15}$ 三级塘生物生态强化处理技术	5.607	1.909	4.453	2.189
$V_1$ 户用生态滤池	5.440	2.073	4.531	1.796
$V_4$ 厌氧-（兼氧）-人工湿地	5.424	1.737	4.425	2.189
$V_9$ 生物接触氧化-生态沟渠	5.381	1.587	4.666	2.189
$V_3$ 一体化净化槽	5.297	1.954	4.417	1.796
$V_{10}$ 厌氧-兼氧-好氧三级生物滤池	5.261	1.383	4.851	2.189
$V_{13}$ 厌氧-土地处理	5.209	1.587	4.283	2.189
$V_5$ 生态滤池-生态塘	5.034	1.373	4.371	2.189
$V_{11}$ 厌氧-生物接触氧化-人工湿地	4.946	1.169	4.629	2.189
$V_7$ 地埋式微动力氧化沟	4.897	1.074	4.729	2.189
$V_{12}$ 三格式化粪池+生态湿地+生态塘	4.524	0.855	4.387	2.189
$V_{14}$ 无动力地埋式厌氧反应器	4.228	0.929	4.240	1.796
$V_2$ 沼气净化池	4.201	1.909	2.006	1.796
$V_8$ 三格式化粪池	3.819	2.094	1.843	1.796
$V_6$ 膜生物反应器	3.760	0.399	4.377	1.796

根据综合评价价值，可得出排名前 10 位的农村生活污水处理技术模式，分别为： $V_{15}$ ，三级塘生物生态强化处理技术； $V_1$ ，户用生态滤池； $V_4$ ，厌氧-（兼氧）-人工湿地； $V_9$ ，生物接触氧化-生态沟渠； $V_3$ ，一体化净化槽； $V_{10}$ ，厌氧-兼氧-好氧三级生物滤池； $V_{13}$ ，厌氧-土地处理； $V_5$ ，生态滤池-生态塘； $V_{11}$ ，厌氧-生物接触氧化-人工湿地； $V_7$ ，地埋式微动力氧化沟。

以经济、技术、环境 3 个方面的单项评价结果和三者综合评价结果进行分析，结果如下：在环境效益无明显差别的情况下， $V_{15}$  三级塘生物生态强化处理技术的综合评价分值最高，其次是  $V_1$  户用生态滤池、 $V_4$  厌氧-（兼氧）-人工湿地和  $V_9$  生物接触氧化-生态沟渠，且  $V_1$  的经济性明显优于  $V_4$  和  $V_9$ ，而  $V_9$  在技术性能方面略优于  $V_1$  和  $V_4$ ；而  $V_3$  一体化净化槽、 $V_{10}$  厌氧-兼氧-好氧三级生物滤池、 $V_{13}$  厌氧-土地处理的综合评价分值相近，但  $V_{10}$  的技术性能较优， $V_3$  的经济性较好；最后， $V_5$  生态滤池-生态塘、 $V_{11}$  厌氧-生物接触氧化-人工湿地、 $V_7$  地埋式微动力氧化沟的综合评价分值略低于前 7 种，但  $V_7$  和  $V_{11}$  在技术性能方面表现出明显的优势。

## 4 结 论

从经济、技术、环境 3 个方面共筛选出 3 项准则层指标、11 项指标层指标和 11 项分指标层指标，

构建农村生活污水处理技术评价指标体系，并通过层析分析法和熵权法相结合的主客观综合赋权法确定各个评价指标的权重；采用分层模糊积分模型对 15 种现有农村生活污水处理技术模式进行综合评价和排序，最终筛选出三级塘生物生态强化处理技术、户用生态滤池、厌氧-（兼氧）-人工湿地、生物接触氧化-生态沟渠、一体化净化槽、厌氧-兼氧-好氧三级生物滤池、厌氧-土地处理、生态滤池-生态塘、厌氧-生物接触氧化-人工湿地、地埋式微动力氧化沟 10 种经济性、技术性能和环境效益较优的技术模式，为农村生活污水处理工程建设提供参考。

### 【参 考 文 献】

- [1] 梁祝，倪晋仁. 农村生活污水处理技术与政策选择[J]. 中国地质大学学报：社会科学版，2007，7(3)：18—22.  
Liang Zhu, Ni Jinren. Treatment technologies and approaches for rural domestic sewage[J]. Journal of China University of Geosciences: Social Sciences Edition, 2007, 7(3): 18—22. (in Chinese with English abstract)
- [2] 谢良林，黄翔锋，刘佳，等. 北方地区农村污水治理技术评述[J]. 安徽农业科学，2008，36(19)：5267—8269.  
Xie Lianglin et al. Comment on rural sewage treatment technology in Northern China[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(19): 5267—8269. (in

- Chinese with English abstract)
- [3] 陈琳, 刘杰, 纪荣平, 等. 农村生活污水处理技术与对策研究[J]. 污染防治技术, 2012, 25(2): 53—54.
- [4] 曾令芳. 简评国外农村生活污水处理新方法[J]. 中国农村水利水电, 2001(9): 30—33.
- Zeng Lingfang. A new method on rural sewage treatment in foreign country[J]. 2001(9): 30—33. (in Chinese with English abstract)
- [5] 傅阳, 纪荣平. 农村小型生活污水处理技术研究进展[J]. 污染防治技术, 2011, 24(2): 39—41.
- Fu Yang, Ji Rongping. Research progress on rural sewage treatment processes in small scale[J]. Pollution Control Technology, 2011, 24(2): 39—41. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李仰斌, 张国华, 谢崇宝. 我国农村生活排水现状及处理对策建议[J]. 中国水利, 2008 (3): 51—53.
- Li Yangbin, Zhang Guohua, Xie Chongbao. Current situation of sewerage in rural areas in China and solutions [J]. China Water Resources, 2008(3): 51—53. (in Chinese with English abstract)
- [7] 苏东辉, 郑正, 王勇, 等. 农村生活污水处理技术探讨[J]. 环境科学与技术, 2005 (1): 79—81.
- Su Donghui, Zheng Zheng, Wang Yong, et al. Discussion on treatment technology of rural domestic sewage[J]. Environmental Science and Technology, 2005 (1): 79—81. (in Chinese with English abstract)
- [8] 孟繁宇, 樊庆铎, 纪楠, 等. 城市污水处理厂综合评价指标体系构建与应用研究[J]. 环境与可持续发展, 2012(2): 84—90.
- Meng Fanyu, Fan Qingxin, Ji Nan, et al. Construction and application of comprehensive evaluation index system for municipal sewage treatment plant[J]. Environment and Sustainable Development, 2012(2): 84—90. (in Chinese with English abstract)
- [9] 纪楠, 樊庆铎, 石磊. 基于 CP 对污水处理厂综合评价指标体系的研究[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(8): 164—173.
- Ji Nan, Fan Qingxin, Shi Lei. Study on comprehensive evaluation index system for sewage treatment plants based on CP[J]. Environmental Science and Management, 2011, 36(8): 164—173. (in Chinese with English abstract)
- [10] 沈丰菊, 张克强, 杨鹏. 农业废水处理工程技术评价指标体系构建与评价方法研究[J]. 农业环境与发展, 2013, 30(4): 45—49.
- Shen Fengju, Zhang Keqiang, Yang Peng. Construction of evaluation index system and evaluation method for engineering technology of agricultural wastewater treatment[J]. Agro-Environment & Development, 2013, 30(4): 45—49. (in Chinese with English abstract)
- [11] 陈文立, 蒋伟萍. 污水处理厂清洁生产评价指标体系的构建[J]. 环境保护与循环经济, 2013(7): 28—30.
- Chen Wenli, Jiang Weiping. Construction of evaluation index system on cleaner production of sewage treatment plant[J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2013(7): 28—30. (in Chinese with English abstract)
- [12] 郭劲松, 杨渊, 方芳. 西部小城镇污水处理技术评价指标体系研究[J]. 重庆大学学报: 社会科学版, 2005, 11(2): 14—17.
- Guo Jingsong, Yang Yuan, Fang Fang. Study on the index system for assessing wastewater treatment technology in China's western small towns[J]. Journal of Chongqing University :Social Sciences Edition, 2005, 11(2): 14—17. (in Chinese with English abstract)
- [13] 赵丹婷, 慕金波. 南四湖流域水环境承载力评价指标体系构建[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2011, 21(6): 41—45.
- Zhao Danting, Mu Jinbo. The construction of water environmental carrying capacity evaluation system of Nansi lake basin[J]. Journal of Environmental Management College of China, 2011, 21(6): 41—45. (in Chinese with English abstract)
- [14] 姜丽莉. 军事物流能力优化模型与策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- Jiang Lili. Research on Models and Strategies of Military Logistics Capability Optimization[D]. Beijing Jiaotong University, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [15] 符学葳. 基于层次分析法的模糊综合评价研究和应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- Fu Xuewei. The Research and Application of Fuzzy AHP[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李旭宏, 李玉民, 顾政华, 等. 基于层次分析法和熵权法的区域物流发展竞争态势分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2004, 34(3): 398—401.
- Li Xuhong, Li Yuming, Gu Zhenghua, et al. Competitive situation analysis of regional logistics development based on AHP and entropy weight[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2004, 34(3): 398—401. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王书吉, 费良军, 雷雁斌, 等. 两种综合赋权法应用于灌区节水改造效益评价的比较研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(4): 138—142.
- Wang Shujie, Fei Liangjun, Lei Yanbin, et al. Comparative study of two combination weighting method applied to the transformation of water-saving irrigation area on benefit evaluation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(4): 138—142. (in Chinese with English abstract)

- [18] 杨渊. 西部小城镇污水处理技术综合评价研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.  
Yang Yuan. Study on Comprehensive Assessment of Wastewater Treatment Technology for Small Towns in Western China[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [19] 曹庆奎, 刘开展, 张博文. 用熵计算客观型指标权重的方法[J]. 河北建筑科技学院学报, 2000, 17(3): 40—42.  
Cao Qingkui, Liu Kaizhan, Zhang Wenbo. Weight calculation method of objective index by entropy[J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 2000, 17(3): 40—42. (in Chinese with English abstract)
- [20] 程楠, 祝彦知. 基于模糊积分多元决策模型的电源开发排序[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2009, 30(2): 45—49.  
Chen Nan, Zhu Yanzhi. Power development ranking based on fuzzy integration decision-making model[J]. Journal of Henan University of Science & Technology: Natural Science, 2009, 30(2): 45—49. (in Chinese with English abstract)
- [21] 夏训峰, 王明新, 闵慧, 等. 基于模糊优劣系数法的农村生活污水处理技术优选评价方法[J]. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2287—2293.  
Xia Xunfeng, Wang Mingxin, Ming Hui, et al. Rural sewage treatment technology evaluation method based on fuzzy advantages and disadvantages coefficient[J]. Journal of Environmental Sciences 2012, 32(9): 2287—2293. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张亮, 王冬梅, 滕新君. MBBR 工艺在农村水污染治理中的应用[J]. 中国给水排水, 2009, 25(16): 50—52.  
Zhang Liang, Wang Dongmei, Teng Xinjun. Application of MBBR process for wastewater pollution control in the rural[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(16): 50—52. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王青颖. 中国农村生活污水处理技术应用现状及研究方向[J]. 污染防治技术, 2007, 20(5): 37—41.  
Wang Qingying. Present situation and prospect on rural sewage treatment in China[J]. Technology, 2007, 20(5): 37—41.
- [24] 宋志文, 毕学军. 人工湿地及其在我国小城市污水处理中的应用[J]. 生态学杂志, 2003, 22(3): 74—78.  
Song Zhiwen, Bi Xuejun. Application of constructed wetlands in sewage treatment in small cities in China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2003, 22(3): 74—78. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李先宁, 吕锡武, 孔海南, 等. 农村生活污水处理技术与示范工程研究[J]. 中国水利, 2006(17): 19—21.  
Li Xianning, Lv Xiwu, Kong Hainan, et al. Research on rural sewage treatment techniques and application in demonstration projects[J]. China Water Resources, 2006(17): 19—21. (in Chinese with English abstract)
- [26] 董贝, 刘杨, 杨平. 人工湿地处理农村生活污水研究与应用进展[J]. 水资源保护, 2011, 27(2): 80—85.  
Dong Bei, Liu Yang, Yang Ping. Research and application progress of rural domestic wastewater treatment with constructed wetlands[J]. Water Resources Protection, 2011, 27(2): 80—85. (in Chinese with English abstract)
- [27] 张增胜, 徐功娣, 陈季华, 等. 生物净化槽/强化生态浮床工艺处理农村生活污水[J]. 中国给水排水, 2009, 25(9): 8—11.  
Zhang Zengsheng, Xu Gongdi, Chen Jihua, et al. Biological purification tank/enhanced ecological floating rafts process for treatment of rural domestic sewage[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(9): 8—11. (in Chinese with English abstract)
- [28] 赵振华, 王宁. 农村生活污水处理工艺选择探讨[J]. 给水排水, 2010, 36(增刊 2): 28—31.  
Zhao Zhenhua, Wang Ning. Investigation of rural sewage treatment process selection[J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(Supp.2): 28—31. (in Chinese with English abstract)
- [29] 郭迎庆, 黄翔峰, 张玉先, 等. 太湖地区农村生活污水示范工程处理工艺的选择[J]. 中国给水排水, 2009, 25(4): 6—9.  
Guo Yingqing, Huang Xiangfeng, Zhang Yuxian, et al. Selection of treatment process for rural domestic sewage demonstration project in Taihu lake region[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(4): 6—9. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李彬, 吕锡武, 宁平, 等. 自回流生物转盘/植物滤床工艺处理农村生活污水[J]. 中国给水排水, 2007, 23(17): 15—18.  
Li Bin, Lv Xiwu, Ning Ping, et al. Combined process of self-circulating rotating biological disk and aquatic plant filter bed for rural domestic wastewater treatment[J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(17): 15—18. (in Chinese with English abstract)
- [31] 吕兴菊, 孟良. 厌氧-接触氧化-砂滤组合工艺处理洱河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—97.  
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: Science and Technology, 2010, 35(4): 93—97. (in Chinese with English abstract)



## Evaluation method for engineering technology of rural domestic sewage treatment based on fuzzy integral model

Shen Fengju<sup>1</sup>, Zhang Keqiang<sup>1\*</sup>, Li Junxing<sup>1</sup>, Huang Zhiping<sup>1</sup>, Zheng Xiangqun<sup>1</sup>, Tang Jiewei<sup>2</sup>

(1. *Institute of Agro-environmental Protection, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China;*

2. *Rural Energy & Environment Agency, Ministry of Agriculture, Beijing 100125, China)*

**Abstract:** Rural domestic sewage is the main source of pollution of rural water pollution, including all kinds of washing water of daily life, kitchen waste water and animal wastes. Most of the rural domestic sewage flow directly into rivers, lakes and reservoirs. As a result, the content of nitrogen, sulfur, phosphorus increased and leading to the eutrophication of water body. It not only damaged the water environment but also affected the health of human body seriously. The difficulty of rural domestic treatment is that rural domestic sewage is widely distributed and has a big difference between areas. On the other hand, the rural sewage quality and quantity have great fluctuations. Due to the poor infrastructure construction, the sewage pipe network is not perfect in rural area. At the same time, the weak rural economy and the lack of professional sewage treatment technology and management personnel, make the rural sewage treatment and resource utilization degree inferior to the city sewage treatment plants. Currently, the rural domestic sewage emission leads to the problems of agricultural nonpoint source pollution and shortage of water resources in rural areas in China. The protection of rural water environment is the guarantee of the development of agricultural production and construction of beautiful countryside. The wastewater treatment in rural areas is the need to change the disorderly discharge situation of rural life sewage, and improve the living conditions of farmers. Because of different circumstances in thousands of counties, the rural domestic sewage treatment must accommodate one's measures to local conditions and classification guidance. It is very important to put forward the practical domestic sewage treatment methods and measures. The government departments attach great importance to this issue, which means that this question must be addressed in the coming construction and development of rural areas. Scientific research institutions have the responsibility to carry out scientific experiments and studies to support resolving this problem. In this study, a serial surveys were conducted on the status quo of rural domestic sewage pollution, emission characteristics, water quality characteristics and the existing treatment processes and technologies. Also site visits of the typical rural domestic sewage treatment works in the rural areas were carried through to learn and understand the treatment effect, operating conditions and existing problems of the projects. With choosing and analyzing the evaluation indexes from economic, technical characteristics and environmental effects, the evaluation index system of rural domestic sewage treatment technologies was constructed. With integrated analytic hierarchy process and entropy method, the index weights were determined by considering the subjective and objective weighting methods. Based on hierarchical fuzzy integral model, a comprehensive evaluation was made on 15 kinds of domestic sewage treatment engineering techniques existing and commonly used in rural areas. Through sorting the final results, 10 kinds of more excellent treatment technologies were selected, such as ecological filter tank, ecological pond, anaerobic (facultative) pond, constructed wetland, integrated purification tank, anaerobic biological contact oxidation constructed wetland. The research can provide a reference for the construction of rural domestic sewage treatment works.

**Key words:** water pollution; sewage treatment; mathematical models; rural domestic sewage; combination weighting method; fuzzy measure; fuzzy integral; synthetic evaluation