

基于正态云-模糊可变耦合模型的水环境质量评价

高玉琴¹, 赖丽娟¹, 姚敏², 张泽宇¹

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029)

摘要: 水环境质量评价作为了解和分析水环境现状及问题的基本内容, 是河流规划、治理和管理的重要依据。针对水环境质量评价存在的模糊性、随机性和最大隶属度不严谨等问题, 提出正态云-模糊可变评价耦合模型。模型对模糊边界问题进行定量化处理, 确定隶属函数和识别水质级别, 并采用最小相对熵原理计算组合权重。运用该模型评价秦淮河流域 2016 年的水环境, 评价结果同单因子指数评价法、模糊综合评价法和云模型评价法进行对比。结果表明: 正态云-模糊可变耦合模型更加合理、有效可靠; 模型级别特征值 H 分析表明秦淮河上游和秦淮新河段汛期水环境大部分优于非汛期, 但同时也表现出城镇工业、生活等污染特征; 内、外秦淮河段, 汛期河岸的污染物排入河流中, 故汛期水环境劣于非汛期, 表现出典型的城市生活及餐饮等“三产”污水污染特征。研究方法和结果对地区和流域的水环境质量评价和研究具有一定的借鉴和指导意义。

关键词: 云模型; 模糊可变集; 最小熵权; 水环境质量评价; 秦淮河流域

中图分类号: X824

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)05-0001-07

Water environment quality assessment based on normal cloud-fuzzy variable coupling model

GAO Yuqin¹, LAI Lijuan¹, YAO Min², ZHANG Zeyu¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, China)

Abstract: As an essential part for understanding and analyzing the status and problems of the water environment, water environmental quality assessment is an important basis for river planning, governance, and management. In the view of fuzziness, randomness, and non-rigidity of the maximum membership degree in water environment assessment, a normal cloud-fuzzy variable evaluation coupling model was proposed to quantify the fuzzy boundary problem, identify the membership function and water quality level identification, and adopt the minimum Relative Entropy Coupling Weights. This paper presents a quantitative treatment of the fuzzy boundary problem and identifies membership functions and water quality level identification by the normal cloud-fuzzy variable coupling model. In addition, we used the minimum relative entropy to couple the Shannon entropy and AHP weights. This model was used to evaluate the water environment in the Qinhuai River in 2016. The results were compared with the single-factor index evaluation method, fuzzy comprehensive evaluation method, and the cloud model. It was found that the evaluation results of water environment were more reasonable, effective and feasible. The analysis of model-level eigenvalue (H) shows that most of the water environment in Qinhuai River upstream and Qinhuai New River flood season is better than the non-flood season; however, it shows the pollution characteristics of urban industry and living; the water environment in Lower Qinhuai River flood season is worse than the non-flood season and it shows the typical pollution characteristics of urban living and catering. Research

收稿日期: 2017-12-17; 修回日期: 2018-05-08

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51309076); 中央高校基金前瞻性项目(2014B05814); 江苏省优势创新平台(3014-SYS1401); 江苏省自然科学基金项目(BK20181310)

作者简介: 高玉琴(1978-), 女, 四川成都人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水利规划与水利经济以及洪水控制方面的研究。

methods and results presented here will have certain reference and guidance for the future evaluation and research of regional and catchment water environment.

Key words: cloud model; variable fuzz set; minimum entropy weight; water environment quality assessment; Qinhuai River catchment

1 研究背景

随着社会经济高速发展,大量污染物排放到水体中对水环境构成威胁,也制约社会经济的可持续发展。水环境质量评价是指为了解水环境情况建立模型,对水体进行水质等级、污染情况评价,分析水环境质量分布规律和污染原因,提出有针对性的改善措施^[1-2]。国内外现有的水环境质量评价方法有:单因子评价法、模糊层次分析法、灰色评价法、人工神经网络法、集对分析、主成分分析法和云模型等^[3]。杨增宝等^[4]应用理想点法研究北京市朝阳区地下水水质情况,构建了理想点评价函数,确定各等级下的理想点贴近度,从而给出评价结果;杜明亮等^[5]基于熵权与超标倍数赋权法改进权重,应用集对分析法研究淮东水源地水质情况;徐光宇等^[6]运用主成分分析法对汾河太原城区段水质评价,考虑各个指标的关联性,利用降维思想,将多指标简化为若干个彼此不相关的综合指标,通过对这些综合指标的评价分析。

本文提出正态云-模糊可变耦合评价模型。该模型的特点有:(1)利用相对最小熵根据层次分析法权重 w_{1i} 和熵权法权重 w_{2i} 获得组合权重 w_i ,该方法避免了权重确定过程中过于主观或客观的弊端;(2)运用正态云模型对模糊可变的相对隶属公式的线性进行改进,兼顾了评价的模糊性和随机性;(3)采用模糊识别模型判断水质级别,避免了最大隶属度小于剩余隶属度总和时结果不合理的问题,同时级别特征值 H 用于同级别间的比较。最后将该评价模型运用到2016年秦淮河水环境质量评价中,评价结果与单因子指数评价法、模糊综合评价法和云模型进行比较,验证正态云-模糊可变评价模型的可行性和有效性。

2 正态云-模糊可变评价模型

2.1 云模型

云模型(Cloud model)是李德毅等^[7]提出的基于模糊性和随机性的一种定性与定量相互转换模型,正态云模型在作为正态隶属度函数时具有普适性。当前正态云模型发展较为成熟,已应用到时间序列预测、质量评价、风险评估和空间数据挖掘等领域。

云模型将定性概念 A 映射到论域 U 上,论域 U 中任意元素 x 对概念 A 都有一个稳定倾向的随机数 $U_A(x)$,即确定度。在水环境质量评价中 U 为水环境等级对应的区间, x 是某次的水质实测值, A 代表水环境质量评价的级别。

云模型由特征值反映水环境质量评价的不确定性、模糊性,由云发生器进行定性和定量的转换。特征值包含期望(Ex)、熵(En)和超熵(He)。其中,期望(Ex)指水环境质量评价论域 U 中最具代表的典型样本点,即所有云滴的平均值;熵(En)是水环境质量评价中模糊性和离散性的度量,代表论域中可被接受的范围;超熵(He)是水环境质量评价中模糊性和随机性的关联,反映熵的不确定性度量^[8],3个特征值的计算见公式(1)。

$$\begin{cases} Ex_{ih} = \frac{S_{ih,max} + S_{ih,min}}{2} \\ En_{ih} = \frac{S_{ih,max} + S_{ih,min}}{6} \\ He = 0.01 \end{cases} \quad (1)$$

云发生器分为3种:(1)将定性转化为定量的正向云发生器(FCG),即通过云 $C(Ex, En, He)$ 产生定量云滴 x_i 与隶属度 μ_i ;(2)由定量转换为定性的逆向云发生器(BCG),即通过精确的 $Drop(x_i)$ 转换到定性概念 $C(Ex, En, He)$ 进行分析;(3)由 X 云发生器与 Y 云发生器构成特殊的条件云发生器,即已知 $C(Ex, En, He)$ 和特定条件 X 或者 Y 来计算确定度。水环境质量评价通过 X 条件云发生器来实现定性与定量的转换,如图1所示。

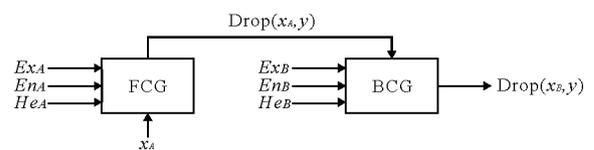


图1 单条件单规则云发生器

2.2 模糊可变集合

可变模糊集理论是陈守煜^[9]以模糊理论和辩证唯物论为基础,提出了隶属度与隶属函数动态可变概念。其中,相对差异函数、相对隶属函数理论修正Zadeh的模糊集合隶属函数的唯一、静态化缺点。模糊可变集已应用到模糊水文学、农田水利和电力系统的调度等领域。

对于任意 $u(u \in U)$ 在模糊概念 A 的相对隶属函数中都存在一个确定的值 $\mu_A(u)$, 即 u 对 A 的吸引隶属度, 与其对立模糊性的是排斥隶属度 $\mu_A^c(u)$ 。相对隶属度由 $\mu_A(u)$ 和 $\mu_A^c(u)$ 构成, 且 $\mu_A(u) + \mu_A^c(u) = 1$ 。相对差异函数 $D_A(u) = \mu_A(u) - \mu_A^c(u)$, 代表相对隶属度的差异程度。相对差异函数同相对隶属函数存在 $\mu_A(u) = (D_A(u) + 1)/2$ 关系, 如图 2 所示。

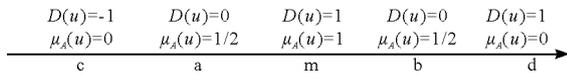


图 2 相对差异函数图

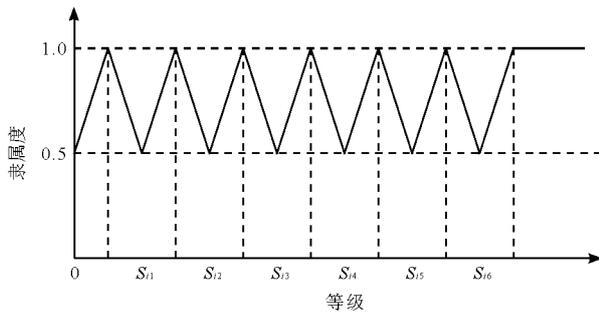
其中 $[a, b]$ 为吸引域, $[c, a], [b, d]$ 为排斥域, $m = (a + b)/2$ 。

模糊可变识别模型是在已知隶属度和权重的情况下, 通过识别对象级别特征值 H 分析评价对象级别^[10], 模型公式见公式(2)和(3)。

$$u_h = \frac{1}{1 + \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m [w_i (1 - \mu_A(u_{ih}))^p]^{\frac{\alpha}{p}}}{\sum_{i=1}^m [w_i \mu_A(u_{ih})]^p} \right\}} \quad (2)$$

$$H = \sum_{h=1}^c (h \cdot u_h) \quad (3)$$

式中: h 为等级数 ($h = 1, 2, \dots, c$); i 为指标数 ($i =$



(a) 模糊可变隶属度

$1, 2, \dots, m$); u_h 为识别对象指标综合相对隶属度; w_i 为指标权重; m 为识别指标数; α 为模型优化准则参数, $\alpha = 1$ 为最小一乘方准则, $\alpha = 2$ 为最小二乘方准则; p 为距离参数, $p = 1$ 为海明距离, $p = 2$ 为欧式距离。通过变换模型参数 α, p , 可模拟指标值与标准值间的不同关系^[11]。

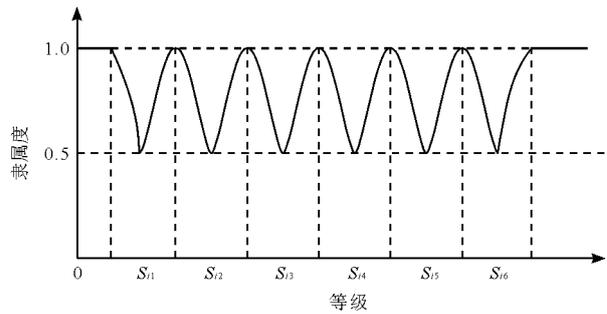
2.3 模型参数

2.3.1 云模型 双边约束时, 云模型结合模糊可变理论中相对差异度理论, 将在接近指标边界值对相邻等级的确定度趋近于 0 修正为 1/2, 有利于评价结果的区分。因此对参数公式(1)修正后得公式(4)。

$$\begin{cases} Ex_{ih} = \frac{S_{ih,max} + S_{ih,min}}{2} \\ En_{ih} = \frac{S_{ih,max} - S_{ih,min}}{2\sqrt{2\ln 2}} \\ He = 0.01 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $S_{ih,max}, S_{ih,min}$ 分别是第 i 个指标在 h 等级中的上下限。

2.3.2 隶属函数 运用正态云模型对模糊可变集的相对隶属函数的线性, 使水环境质量评价指标对各等级的隶属度符合正态分布规律, 具有更好的模糊性、随机性。根据确定的云模型参数 (Ex, En, He) 和 X 条件云发生器生成评价指标对各评价等级的吸引隶属度 $\mu_A(u)$ (见图 3)。



(b) 正态云-模糊可变隶属度

图 3 吸引隶属函数对比图

设第 i 个指标的实测值为 u_i , 由云模型计算第 i 个指标对 h 级别的吸引隶属度为 $\mu_A(u_{ih})$ 。根据《地表水环境质量标准》(GB3838 - 2002), 将水环境分为 I、II、III、IV、V、劣 V ($h = 1, 2, \dots, 6$) 共 6 个级别。第 i 个指标的相对隶属矩阵公式如式(5)、(6) 所示。

对于越大越优型指标:

$$\begin{aligned} x_i \geq Ex_{ih} \text{ 时, } \mu_A(u_{i,h-1}) &= 1 - \mu_A(u_{ih}); \\ \mu_A(u_{ik}) &= 0 \quad (k \neq h, k \neq h - 1) \\ x_i \leq Ex_{ih} \text{ 时, } \mu_A(u_{i,h+1}) &= 1 - \mu_A(u_{ih}); \\ \mu_A(u_{ik}) &= 0 \quad (k \neq h, k \neq h + 1) \end{aligned} \quad (5)$$

对于越小越优型指标:

$$\begin{aligned} x_i \leq Ex_{ih} \text{ 时, } \mu_A(u_{i,h-1}) &= 1 - \mu_A(u_{ih}); \\ \mu_A(u_{ik}) &= 0 \quad (k \neq h, k \neq h - 1) \\ x_i \geq Ex_{ih} \text{ 时, } \mu_A(u_{i,h+1}) &= 1 - \mu_A(u_{ih}); \\ \mu_A(u_{ik}) &= 0 \quad (k \neq h, k \neq h + 1) \end{aligned} \quad (6)$$

根据公式(2) 计算综合相对隶属度 u_h , 变换参数 p, α , 以 4 个模型的平均值代入公式(3) 可得级别特征值 H , 用于水环境质量评价。

2.3.3 组合权重 本文运用层次分析法和熵权法确定权重, 基于最小相对熵原理进行权重组合, 既要

表 2 秦淮河水环境质量评价指标及标准

指标类别	评价指标	地表水环境质量标准					
		I	II	III	IV	V	劣 V
氧平衡指标	u_1 溶解氧(DO)	7.5	6	5	3	2	≤ 2
	u_2 高锰酸盐指数(COD _{Mn})	2	4	6	10	15	≥ 15
	u_3 五日生化需氧量(BOD ₅)	3	3	4	6	10	≥ 10
营养盐指标	u_4 氨氮(NH ₃ -N)	0.15	0.5	1	1.5	2	≥ 2
	u_5 总磷(TP)	0.02	0.1	0.2	0.3	0.4	≥ 0.4
	u_6 总氮(TN)	0.2	0.5	1	1.5	2	≥ 2
毒物指标	u_7 氟化物(F ⁻)	1	1	1	1.5	1.5	≥ 1.5

mg/L

3.3 评价结果

采用层次分析法和熵权法分别可得权重 w_{1i} 和 w_{2i} ,运用组合公式(7) 可得水环境质量评价指标组合权重 w_i , 如表 3 所示。

根据云模型的参数公式(4) 和《地表水环境质量标准》(GB3838 - 2002) 确定云模型参数,如表 4 所示。

3.3.1 可行性分析 本模型评价结果与单因子指数评价法、模糊综合评价法和云模型方法进行比较,2016 年秦淮河水环境质量的评价结果比照如表 5 所示。

表 3 秦淮河评价指标权重

评价指标	指标权重		
	w_{1i}	w_{2i}	w_i
u_1	0.143	0.069	0.108
u_2	0.139	0.070	0.109
u_3	0.143	0.072	0.110
u_4	0.142	0.200	0.184
u_5	0.139	0.136	0.151
u_6	0.143	0.423	0.267
u_7	0.151	0.03	0.072

表 4 云模型参数

参数	等级	评价指标						
		u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7
E_x	I	11.25	1	1.5	0.08	0.01	0.1	0.5
	II	6.75	3	3	0.33	0.06	0.35	1
	III	5.5	5	3.5	0.75	0.15	0.75	1
	IV	4	8	5	1.25	0.25	1.25	1.25
	V	2.5	12.5	8	1.75	0.35	1.75	1.5
	劣 V	1	22.5	15	3	0.6	3	2.25
E_n	I	3.185	0.849	1.274	0.064	0.008	0.085	0.425
	II	0.637	0.849	0	0.149	0.034	0.127	0
	III	0.425	0.849	0.425	0.212	0.042	0.212	0
	IV	0.849	1.699	0.849	0.212	0.042	0.212	0.212
	V	0.425	2.123	1.699	0.212	0.042	0.212	0
	劣 V	0.849	6.369	4.246	0.849	0.17	0.849	0.637
He		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

如上表可见,对 4 种评价结果进行比较分析可得:(1)当其他 3 种评价方法的评价结果都为劣 V 时,本模型评价结果优于劣 V。对比研究可知,在劣

V 的相对隶属度确定时,单因子指数法和模糊综合评价法是 $x_i \geq S_{i5}$ 时 $\mu_A(u_{i6}) = 1$, 其评价结果大都为劣 V 类。根据图 3,当 $x_i \geq S_{i6}$ 时 $\mu_A(u_{i6}) = 1$, 该

模型对V评定区间 $[S_{15}, S_{16}]$ 划分更加准确,评价结果更为合理。

(2)当其他3种评价的结果不全为劣V时,本模型的评价结果介于其他评价结果之间,表明模糊识别解决了最大隶属度小于剩余隶属度总和的情况,其评价结果介于最大和最小隶属度评价结果之间,更加合理。

3.3.2 秦淮河水环境分析 由级别特征值公式(2)、(3)计算分析秦淮河水环境等级。当 $H \in [1, 1.5]$ 时为I级;当 $H \in (1.5, 2.5]$ 时为II级;当 $H \in (2.5, 3.5]$ 时为III级;当 $H \in (3.5, 4.5]$ 时为IV级;当 $H \in (4.5, 5.5]$ 时为V级;当 $H \in (5.5, \infty]$ 时为劣V级,秦淮河汛期、非汛期级别特征值 H 结果如表6所示。

表5 2016年秦淮河水环境质量评价结果比照表

河段	站点	汛期				非汛期			
		正态云-模糊 可变评价法	单因子指 数评价法	模糊综合 评价法	云模型 评价法	正态云-模糊 可变评价法	单因子指 数评价法	模糊综合 评价法	云模型 评价法
秦淮河上游	1	III	劣V	III	劣V	IV	劣V	劣V	劣V
	2	III	劣V	III	IV	IV	劣V	劣V	劣V
	3	IV	劣V	III	III	IV	劣V	劣V	III
	4	IV	V	III	IV	IV	劣V	劣V	III
秦淮新河	5	IV	劣V	III	IV	IV	劣V	劣V	劣V
	6	V	劣V	劣V	V	V	劣V	劣V	劣V
	7	IV	劣V	劣V	劣V	IV	劣V	III	IV
外秦淮河	8	V	劣V	IV	V	V	劣V	劣V	劣V
	9	V	劣V	劣V	劣V	IV	劣V	劣V	劣V
	10	V	劣V	劣V	IV	IV	劣V	劣V	劣V
	11	IV	劣V	劣V	劣V	V	劣V	劣V	劣V
内秦淮河	12	V	劣V	劣V	劣V	V	劣V	劣V	劣V
	13	V	劣V	劣V	劣V	V	劣V	劣V	劣V

表6 秦淮河汛期、非汛期级别特征值 H

河段	站点	级别特征值 H	
		汛期	非汛期
秦淮河上游	1	3.482	4.086
	2	3.436	4.273
	3	3.951	4.036
	4	3.553	3.882
秦淮新河	5	4.243	4.497
	6	4.516	4.608
	7	3.822	3.518
外秦淮河	8	4.698	4.606
	9	4.584	4.405
	10	4.656	4.492
	11	4.451	4.681
内秦淮河	12	4.975	4.527
	13	4.982	4.826

由表6可见,级别特征值 H 越小则水环境越好。(1)在秦淮河上游和秦淮新河段,汛期水量增加提高了水环境承载能力,故汛期水环境优于非汛期水环境。其中,秦淮新河闸监测点7在非汛期进行“引江换水”工程^[16],非汛期水环境优于汛期水环境。秦淮河上游和秦淮新河主要受城镇居民生活用水、江宁污水处理厂和部分工业废水影响,水环境在III、IV类间波动,表现出典型的城镇生活与工业污水污染等特征。(2)在内、外秦淮河段,汛期期间加快了河岸的污染物排入河流中,故汛期水环境劣于非汛期水环境。沿河为城市居民生活区,水环境稳定于V类,表现出典型的城市生活及餐饮等“三产”污水污染特征。

4 结论和讨论

针对水环境质量评价存在的模糊性、随机性和最大隶属度不严谨等问题,引入相对最小熵原理、云模型和

模糊可变集概念,提出正态云-模糊可变耦合模型。

(1)正态云-模糊可变耦合模型有效刻画了评价中评价标准和指标隶属的模糊性、随机性。其中,级别特征值 H 有效解决了在水环境等级的判断和同级别间的比较问题,组合权重综合考虑了主、客观因素,符合实际。运用该模型评价秦淮河流域 2016 年的水环境,评价结果同单因子指数评价法、模糊综合评价法和云模型评价法进行对比,验证正态云-模糊可变耦合模型评价结果更合理有效可靠。

(2)基于正态云-模糊可变耦合模型的水环境质量评价研究结果表明,秦淮河表现出城镇工业、生活等污染特征,需要引起环境等相关部门的重视,并积极采取应对措施。

对于如何确定云模型参数,没有统一的意见,笔者结合模糊可变理论,将边界对相邻级别的隶属度为 $1/2$ 来确定 En 参数。虽在结合模糊识别模型时,云模型表现出良好的可行性,但在单独运用该模型时,其可行性仍然未知,同时刻画的隶属度是否合理且有实际意义,都需要进一步研究。

参考文献:

- [1] SCHUBERT S, GUPTA J. Comparing global coordination mechanisms on energy, environment, and water[J]. *Ecology & Society*, 2013,18(2):344-365.
- [2] 樊明玉. 国内外城市水环境评价指标体系比较与技术模型研究[D]. 重庆:重庆大学,2011
- [3] 张小君,徐中民,宋晓谕,等. 几种水环境质量评价方法在青海湖入湖河流中的应用[J]. *环境工程*,2013,31(1):117-121.
- [4] 杨增宝,邢应寿,赵兵凯,等. 基于理想点法的水质综合评价模型及其应用[J]. *人民黄河*,2017,39(2):65-68+73.
- [5] 杜明亮,吴彬,张宏,等. 改进权重集对分析法在淮东水质评价中的应用[J]. *人民黄河*,2014,36(4):62-64.
- [6] 徐光宇,柴国平,徐明德,等. 主成分分析法在汾河太原城区段水质评价中的应用[J]. *环境工程*,2014,32(6):122-124+113.
- [7] 李德毅,刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. *中国工程科学*,2004,6(8):28-34.
- [8] 刘登峰,王栋,丁昊,等. 水体富营养化评价的熵-云耦合模型[J]. *水利学报*,2014,45(10):1214-1222.
- [9] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [10] 李云排,周维博,刘雷,等. 基于改进可变模糊集的延河水水质评价[J]. *人民黄河*,2014,36(4):59-61+64.
- [11] 胡素端,许士国,汪天祥,等. 基于可变模糊识别模型及 GIS 相耦合的水库水质综合评价[J]. *水电能源科学*,2015,33(11):21-24+163.
- [12] 刘顿开,吴以中. 改进的模糊综合评价法及在河道水质评价中的应用研究[J]. *环境科学与管理*,2017,42(3):190-194.
- [13] 沈海波,张妙仙,徐兵,等. 基于熵权和改进的 FAHP 的青山湖流域水质评价研究[J]. *环境科学与技术*,2013,36(12):181-185+209.
- [14] 金菊良,程吉林,魏一鸣,等. 确定区域水资源分配权重的最小相对熵方法[J]. *水力发电学报*,2007,26(1):28-32.
- [15] 刘久根. 南京外秦淮河水污染控制对策[J]. *现代城市研究*,2003(5):51-53.
- [16] 钱钧,黄振富,陆晓平. 秦淮河水环境治理的成效与举措[J]. *中国水利*,2014(14):15-16+22.