

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0129

匡舒雅, 李天宏. 五元联系数在长江下游生态航道评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 93-101. KUANG S Y, LI T H. Application of five element connection number to assessment of ecological waterway in the lower reaches of Yangtze River[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 93-101. (in Chinese)

# 五元联系数在长江下游生态航道评价中的应用

匡舒雅<sup>1,2</sup>, 李天宏<sup>1,2</sup>

(1. 北京大学 环境科学与工程学院, 北京 100871; 2. 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871)

**摘要:** 针对生态航道评价中存在的模糊、不确定性问题, 基于集对分析理论和层次分析法, 建立了五元联系数模型, 根据生态航道评价指标体系各指标与等级标准的联系程度, 构造联系度公式, 结合层次分析法计算各评价指标的权重, 运用该模型开展了长江下游南京-浏河口段生态航道评价, 结果表明, 南京-浏河口段生态航道等级为Ⅲ级, 其中航运功能、自净功能和景观娱乐功能为Ⅰ级, 生态功能为Ⅳ级, 需要结合该河段实际情况加强生态环境保护工作。敏感性分析表明, 功能层权重的小幅度波动不会对评价结果造成较大影响, 说明对该河段的评价结果比较稳定。

**关键词:** 生态航道; 南京-浏河口河段; 评价体系; 五元联系数; 敏感性分析

**中图分类号:** X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)05-0093-09

## Application of five element connection number to assessment of ecological waterway in the lower reaches of Yangtze River

KUANG Shuya<sup>1,2</sup>, LI Tianhong<sup>1,2</sup>

(1. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Aiming at the fuzzy and uncertainty problems in ecological waterway assessment, we built a five element connection number model on the basis of AHP (Analytic Hierarchy Process) method and the SPA (Set Pair Analysis). According to the connection between each index of the ecological waterway assessment index system and the grade standard, we constructed the connection degree formula, and calculated the weight of each assessment index by AHP. The model was applied to assess the ecological waterway of Nanjing-Liuhekou reach in the lower reaches of Yangtze River. The results showed that the health condition of this ecological waterway was in Grade "III". The navigation function, self purification function, and landscape & entertainment function were in Grade "I", while the ecological function was in Grade "IV". It is necessary to strengthen ecological environmental protection of the reach. A sensitivity analysis indicated that the assessment results were not sensitive to small amplitude fluctuation of the weights of the function layer, suggesting that the evaluation results of the Nanjing-Liuhekou reach were stable.

**Key words:** ecological waterway; the Nanjing-Liuhekou reach; assessment system; five element connection number; sensitivity analysis

近年来,我国提出依托长江黄金水道发展长江经济带的发展战略,党的十九大报告指出:“以共抓

大保护、不搞大开发为导向推动长江经济带发展”,要求加快内河航运现代化发展的步伐,长江水运发

收稿日期: 2018-05-28 修回日期: 2018-08-01 网络出版时间: 2018-08-02  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180802.1111.004.html>  
基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402102)

**Fund:** National Key R & D Program of China (2016YFC0402102)

**作者简介:** 匡舒雅(1992-),女,辽宁葫芦岛人,主要从事水资源与水沙环境方面研究。E-mail: kuangshuya@pku.edu.cn

**通讯作者:** 李天宏(1970-),男,陕西渭南人,副教授,博士,主要从事水沙环境科学、环境信息方面的教学和研究。E-mail: lth@pku.edu.cn

展迎来了新的机遇。此外,生态文明建设也要求,长江航道在满足高效、安全的航运需求的同时,还要把长江河流生态系统的保护工作摆在压倒性位置,在此背景下,生态航道建设越来越受到重视<sup>[1]</sup>,而如何对生态航道进行科学评价是生态航道建设必不可少的基础性工作。

本文针对生态航道评价中,准则层对目标层的权重确定以及评价标准确定等环节遇到的不确定性问题,尝试应用中国学者赵克勤<sup>[2]</sup>提出的集对分析理论,开展长江下游生态航道评价。集对分析理论(简称 SAP, Set Pair Analysis)是处理系统确定性与不确定性相互作用的数学理论,其主要数学工具是联系数,集对分析理论是将确定的和不确定的问题视为一个整体,通过同异反联系数分析事物之间的联系度和差异度<sup>[3-4]</sup>。目前,该方法已经在知识创新<sup>[5-6]</sup>、医学<sup>[7-9]</sup>、工业<sup>[10-12]</sup>、农业<sup>[13-15]</sup>、防洪安全<sup>[16-18]</sup>、水环境质量<sup>[18-22]</sup>、生态评价<sup>[23-24]</sup>、教育<sup>[25-27]</sup>等方面得到广泛应用。

本文从生态航道建设必须满足河流航运功能和河流其他诸功能协调发展这一思路入手<sup>[28]</sup>,采用基于集对分析理论的五元联系数模型,结合统计资料 and 实际监测数据,以长江下游南京-浏河口段为研究区域,结合层次分析法对各指标赋值,建立了基于层次分析法的五元联系数长江生态航道评价模型,确定具体的等级划分原则,定量计算出该河段生态航道的健康程度等级,旨在为长江下游生态航道建设和河流可持续管理提供科学参考。

## 1 区域概况

长江源远流长,水量充沛,终年不冻,水运条件优越,素有“黄金水道”的称誉。长江下游的南京至浏河口河段长 306 km,位于江苏省境内。江阴以上常以分汊河型为主;江阴以下河道总体上自上而下成喇叭形逐渐展宽,河道中有较多沙体和潜洲,冲淤变化频繁,河床演变受径流和潮流共同作用,潮流影响较大(图 1)。南京至浏河口河段自然条件优越,具有建设深水航道的基本条件。该段航道整治的主要措施包括活动边滩治理、河势控导、减淤和疏浚等。目前,这些航道整治工程的实施也越来越关注对河流生态环境的影响。

## 2 生态航道评价指标体系构建

### 2.1 指标体系

生态航道的评价对象是具有航运功能的河流生态系统的健康水平,注重航运功能与其他诸功能的

协调发展。一个健康的河流生态系统应该具有自然结构稳定、功能健全、抵抗和恢复外界干扰的能力并且能够充分发挥其正常的生态效益以及社会经济效益<sup>[29]</sup>。基于对航道与河流系统关系的理解并借鉴相关研究成果<sup>[30]</sup>,本文构建了包括一个目标层 A(长江下游南京-浏河口段生态航道水平)、7 个准则层 B(航运功能、输水泄洪功能、输沙功能、自净功能、供水功能、生态功能、景观娱乐功能)、19 个指标层 C 的长江下游生态航道南京-浏河口段评价指标体系,见图 2。

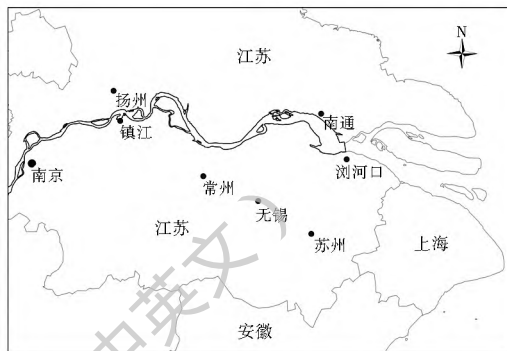


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the study area

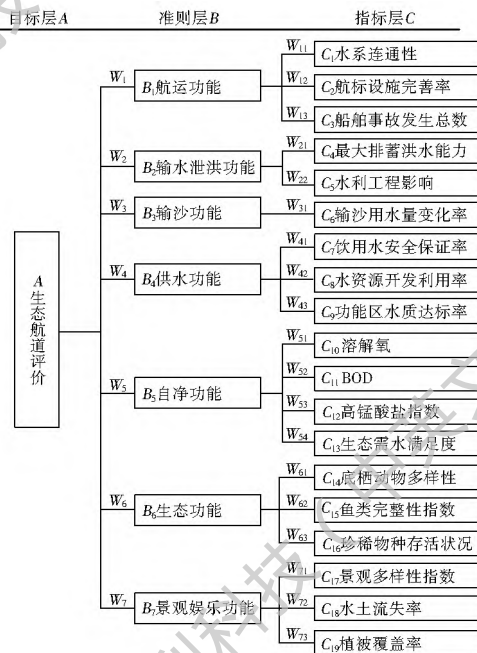


图 2 南京-浏河口段评价指标体系

Fig. 2 Assessment index system for Nanjing Liuhekou reach

采用定性与定量相结合的方法对单项指标进行分级,分级的依据优先采用相关国家、地区、行业标准,或参考与研究区域相似地区研究成果。将长江下游南京-浏河口段生态航道评价划分为“ $\tilde{N}$ 、 $\tilde{O}$ 、 $\tilde{O}$ 、 $\tilde{O}$ 、 $\tilde{O}$ ”五个等级,为采用五元联系数法评价长江下游生态航道健康水平做铺垫,具体指标及分级标准见表 1。

表1 单项指标分级标准

Tab. 1 Grading standards for each single index

评价指标标准	$\bar{N}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{0}$	划分依据
$C_1$ 水系连通性/[ $(\text{个}\cdot 100\text{ km})^{-1}$ ]	$\leq 0.3$	$\leq 0.6$	$\leq 0.9$	$\leq 1.2$	$> 1.2$	相关文献 <sup>[31-32]</sup>
$C_2$ 航标设施完善率(%)	$\geq 95$	$\geq 80$	$\geq 65$	$\geq 60$	$< 60$	《内河通航标准》 (GB 50139-2004)
$C_3$ 船舶事故发生总数	$\leq 50$	$\leq 100$	$\leq 200$	$\leq 300$	$> 300$	海事局历史统计数据
$C_4$ 最大排蓄水洪水能力	1000年一遇	100年一遇	50年一遇	20年一遇	10年一遇	《防洪标准》(GB 50201-94)
$C_5$ 水利工程影响	无干扰	较小	一般	较大	强烈	
$C_6$ 输沙用水量变化率(%)	$\leq 10$	$\leq 20$	$\leq 30$	$\leq 50$	$> 50$	相关文献 <sup>[30, 33]</sup>
$C_7$ 饮用水安全保证率(%)	$\geq 95$	$\geq 90$	$\geq 80$	$\geq 70$	$< 70$	相关文献 <sup>[34]</sup>
$C_8$ 水资源开发利用率(%)	$< 20$	$< 30$	$< 40$	$< 50$	$\geq 50$	国际公认40%
$C_9$ 功能区水质达标率(%)	$\geq 90$	$\geq 80$	$\geq 60$	$\geq 40$	$< 40$	相关文献 <sup>[35]</sup>
$C_{10}$ 溶解氧/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\geq 7.5$	$\geq 6$	$\geq 5$	$\geq 3$	$\geq 2$	《地表水环境质量标准》 (GB3838-2002)
$C_{11}$ BOD/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\leq 3$	$\leq 3$	$\leq 4$	$\leq 6$	$\leq 10$	
$C_{12}$ 高锰酸盐指数/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\leq 2$	$\leq 4$	$\leq 6$	$\leq 10$	$\leq 15$	
$C_{13}$ 生态需水满足度(%)	$\geq 90$	$\geq 80$	$\geq 60$	$\geq 40$	$\geq 20$	相关文献 <sup>[36-47]</sup>
$C_{14}$ 底栖动物多样性	$\geq 0.8$	$\geq 0.6$	$\geq 0.4$	$\geq 0.2$	$< 0.2$	相关文献 <sup>[38]</sup>
$C_{15}$ 鱼类完整性指数	58~60	48~52	40~44	28~34	$< 22$	IBI <sup>[39-41]</sup>
$C_{16}$ 珍稀物种存活状况	很好	较好	一般	差	极差	定性描述划分 <sup>[41]</sup>
$C_{17}$ 景观多样性指数	$\geq 3.5$	$\geq 1.5$	$\geq 1.0$	$\geq 0.5$	$< 0.5$	Shannon Wiener 指数
$C_{18}$ 水土流失率(%)	$< 10$	$< 15$	$< 25$	$< 30$	$\geq 30$	相关文献 <sup>[42]</sup>
$C_{19}$ 植被覆盖率(%)	$\geq 50$	$\geq 40$	$\geq 30$	$\geq 20$	$\geq 10$	相关文献 <sup>[43]</sup>

## 2.2 指标权重确定

本文采用层次分析法(AHP, Analytic Hierarchy Process)确定指标权重,层次分析法是最为常用的一种指标赋权方法,在层次分析法的基础上采用五元系数模型进行评价,以提高评价结果的客观性。

通过发放专家调查表获得专家打分结果,根据专家打分结果构造判断矩阵A-B和B-C,将各判断矩阵逐次输入Matlab软件中,应用函数 $eig(A)$ 求各判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 和特征向量,然后计算各判断矩阵的一致性,若一致性检验通过,则归一化特征向量w的各分量值即为各指标的权重。

取各位专家赋权平均值得到长江下游生态航道评价指标体系准则层的绝对权重,计算得到A-B判断矩阵 $\lambda_{\max} = 7.5236$ ,  $CI = 0.0873$ ,  $CR = 0.0661 < 0.10$ ,说明A-B判断矩阵具有一致性,对 $\lambda_{\max}$ 所对应的特征向量进行归一化得到 $W = \{0.1331, 0.3073, 0.1536, 0.1268, 0.1353, 0.1153, 0.0288\}^T$ ,采用层次分析法确定各指标绝对权重结果见表2。

表2 层次分析法赋权结果

Tab. 2 Weight results by AHP method

	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	$B_6$	$B_7$	权重
A	0.1331	0.3073	0.1536	0.1268	0.1353	0.1153	0.0288	
$C_1$	0.4974							0.0662
$C_2$	0.3215							0.0428
$C_3$	0.1811							0.0241
$C_4$		0.5671						0.1742
$C_5$		0.4329						0.1330
$C_6$			1.0000					0.1536
$C_7$				0.5581				0.0708
$C_8$				0.1352				0.0171
$C_9$				0.3066				0.0389
$C_{10}$					0.5182			0.0701
$C_{11}$					0.2692			0.0364
$C_{12}$					0.2127			0.0288
$C_{13}$						0.3252		0.0375
$C_{14}$						0.1946		0.0224
$C_{15}$						0.2936		0.0338
$C_{16}$						0.1866		0.0215
$C_{17}$							0.2117	0.0061
$C_{18}$							0.4081	0.0118
$C_{19}$							0.3802	0.0110

注: $\lambda_{\max} = 7.5236$ ,  $CI = 0.0873$ ,  $CR = 0.0661 < 0.10$ ,通过一致性检验权重赋值有效。

### 3 基于五元联系数法的生态航道评价

#### 3.1 五元联系数原理

五元联系数方法是集对分析理论中相同、相异、相反联系数的一种推广<sup>[44-45]</sup>, 将三元联系数  $\mu = a + bi + cj$  中的  $bi$  项进一步划分, 便可以得到基于集对分析理论的多元联系数<sup>[4]</sup>, 将相异的部分进一步细化, 能够更加准确的分析系统中的不确定性因素, 增加计算结果的准确性和有效性<sup>[45-46]</sup>。五元联系数表达式为<sup>[47]</sup>:

$$\mu = a + bi + cj + dk + el \quad (1)$$

式中:  $a, b, c, d, e$  具有明显的优序性, 即  $a$  表示事物的同一度,  $e$  表示事物的对立度;  $b, c, d$  为差异度; 且满足  $a + b + c + d + e = 1, a, b, c, d, e \in [0, 1]$ ; 联系分量系数  $i, j, k, l \in [-1, 1], l = -1$ ; 有时  $i, j, k, l$  不取任何值, 仅作为一种标记。

五元联系数集对模型评价生态航道健康水平分为以下几个步骤。

(1) 构造集对并确定评价等级。将生态航道健

$$\mu_n = \begin{cases} 1 + 0i + 0j + 0k + 0l, & x_n \leq S_1 \\ \frac{S_1 + S_2 - 2x_n}{S_2 - S_1} + \frac{2x_n - 2S_1}{S_2 - S_1}i + 0j + 0k + 0l, & S_1 \leq x_n \leq \frac{S_1 + S_2}{2} \\ 0 + \frac{S_2 + S_3 - 2x_n}{S_3 - S_1}i + \frac{2x_n - S_1 - S_2}{S_3 - S_1}j + 0k + 0l, & \frac{S_1 + S_2}{2} \leq x_n \leq \frac{S_2 + S_3}{2} \\ 0 + 0i + \frac{S_3 + S_4 - 2x_n}{S_4 - S_2}j + \frac{2x_n - S_2 - S_3}{S_4 - S_2}k + 0l, & \frac{S_2 + S_3}{2} \leq x_n \leq \frac{S_3 + S_4}{2} \\ 0 + 0i + 0j + \frac{2S_4 - 2x_n}{S_4 - S_3}k + \frac{2x_n - S_4 - S_3}{S_4 - S_3}l, & \frac{S_3 + S_4}{2} \leq x_n \leq S_4 \\ 0 + 0i + 0j + 0k + l, & x_n \geq S_4 \end{cases} \quad (3)$$

效益型指标(越大越好型指标)的联系度表达式<sup>[52]</sup>:

$$\mu_n = \begin{cases} 1 + 0i + 0j + 0k + 0l, & x_n \geq S_1 \\ \frac{2x_k - S_1 - S_2}{S_1 - S_2} + \frac{2S_1 - 2x_k}{S_1 - S_2}i + 0j + 0k + 0l, & \frac{S_1 + S_2}{2} \leq x_n \leq S_1 \\ 0 + \frac{2x_k - S_2 - S_3}{S_1 - S_3}i + \frac{S_1 + S_2 - 2x_k}{S_1 - S_3}j + 0k + 0l, & \frac{S_2 + S_3}{2} \leq x_n \leq \frac{S_1 + S_2}{2} \\ 0 + 0i + \frac{2x_k - S_3 - S_4}{S_2 - S_4}j + \frac{S_2 + S_3 - 2x_k}{S_2 - S_4}k + 0l, & \frac{S_3 + S_4}{2} \leq x_n \leq \frac{S_2 + S_3}{2} \\ 0 + 0i + 0j + \frac{2x_k - 2S_4}{S_3 - S_4}k + \frac{S_4 + S_3 - 2x_k}{S_3 - S_4}l, & S_4 \leq x_n \leq \frac{S_3 + S_4}{2} \\ 0 + 0i + 0j + 0k + l, & x_n \leq S_4 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $S_1, S_2, S_3, S_4$  分别为  $\tilde{N}$  至  $\tilde{O}$  类评价等级的临界值。

(3) 构造准则层联系度表达式。在通过式(3)、式(4)计算出各指标的联系度的基础上, 结合层次分析法的赋权结果, 计算生态航道评价一级子系统(准则层)的评价五元联系数  $\mu^{[48-49]}$ :

康水平划分为 5 级, 分别为“ $\tilde{N}$ 、 $\tilde{O}$ 、 $\tilde{O}$ 、 $\tilde{O}$ 、 $\tilde{O}$ ”级, 将长江下游生态航道评价指标体系的指标实测值视为集合  $C_n (n = 1, 2, \dots, n; n$  为评价指标体系中指标个数), 将各指标对应的  $\tilde{N}$  至  $\tilde{O}$  级评价标准视为集合  $B_t (t$  为评价等级“ $\tilde{N}$ 、 $\tilde{O}$ 、 $\tilde{O}$ 、 $\tilde{O}$ 、 $\tilde{O}$ ”), 集合  $C_n$  和  $B_t$  共同构成一个集对  $H (C_n, B_t, )$ , 将评价等级中的的  $\tilde{N}$  类标准作为同一度  $a$  的取值依据,  $\tilde{O}$  类标准作为对立度  $e$  的取值依据,  $\tilde{O}$ 、 $\tilde{O}$ 、 $\tilde{O}$  类评价标准分别作为差异度  $b, c, d$  的取值依据<sup>[48-49]</sup>, 用五元联系数来表示长江下游生态航道健康状况, 其表达式为:

$$\mu = a + bi + cj + dk + el \quad (2)$$

式中:  $a, b, c, d, e$  分别表示第  $n$  个指标  $C_n$  与该指标  $\tilde{N}$ 、 $\tilde{O}$ 、 $\tilde{O}$ 、 $\tilde{O}$  和  $\tilde{O}$  级分类标准的联系度。

(2) 构造指标层联系度表达式。某指标的实测值为  $x_n$ , 生态航道健康水平等级划分为 5 个等级, 有 4 个临界值分别表示为  $S_1, S_2, S_3, S_4$ , 根据公式(3)和公式(4)构造指标层联系度表达式。

成本型指标(越小越好型指标)的联系度表达式<sup>[49-51]</sup>:

$$\mu = \sum_{n=1}^m w_n a_n + \sum_{n=1}^m w_n b_n i + \sum_{n=1}^m w_n c_n j + \sum_{n=1}^m w_n d_n k + \sum_{n=1}^m w_n e_n l \quad (5)$$

式中:  $w_n$  为第  $n$  个指标的相对权重, 权重可通过层次分析法确定;  $m$  为每个准则层中指标的个数。

(4) 构造准则层联系度表达式。生态航道评价的总指标综合评价五元联系数为:

$$\mu_{C-B} = \sum_{n=1}^k w_n a_n + \sum_{n=1}^k w_n b_n i + \sum_{n=1}^k w_n c_n j + \sum_{n=1}^k w_n d_n k + \sum_{n=1}^k w_n e_n l \quad (6)$$

式中:  $w_n$  为第  $n$  个准则层的权重, 权重可通过层次分析法确定;  $k$  为准则层个数。

### 3.2 五元联系数评价等级划分

采用置信度准则来评价生态航道不同河流系统功能的健康等级<sup>[29]</sup>。计算公式为:

$$h_u = (f_1 + f_2 + \dots + f_l) > \lambda \quad (7)$$

式中:  $f_1, f_2, \dots, f_l$  为联系度分量,  $f_1 = \sum_{l=1}^k w_l a_l$ ,  $f_2 = \sum_{l=1}^k w_l b_l$ ,  $f_3 = \sum_{l=1}^k w_l c_l$ ,  $f_4 = \sum_{l=1}^k w_l d_l$ ,  $f_5 = \sum_{l=1}^k w_l e_l$ ;  $w_l$  为第  $l$  个指标的权重;  $\lambda$  为置信度, 取值范围通常为  $[0.5, 0.7]$ , 对于给定的  $\lambda$  如果  $h_{l-1} \leq \lambda$ ,  $h_l > \lambda$  则可以判定评价结果属于  $l$  级<sup>[48-49]</sup>。

采用上述方法进行等级划分, 各等级划分标准

见表 3。

表 3 生态航道评价健康状况等级划分  
Tab. 3 Health condition grading table for ecological waterway assessment

等级标准	优	良	中	差	劣
五元联系数	$\tilde{N}$	$\hat{0}$	$\acute{0}$	$\grave{0}$	$\bar{0}$

## 4 结果与讨论

### 4.1 评价结果

根据公式(3)、式(4)计算长江下游生态航道南京-浏河口段各指标的同一度分量  $a$ , 差异度分量  $b, c, d$  和对立度分量  $e$ , 结合各指标相应权重, 可由公式(5)计算不同准则层的同一度分量  $a$ , 差异度分量  $b, c, d$  和对立度分量  $e$ , 再结合各准则层相应权重, 可由公式(6)计算得到长江下游生态航道南京-浏河口段相对于 I 级状态的五元联系数为  $\mu = 0.3364 + 0.2332i + 0.2615j + 0.0815k + 0.0873l$ , 具体计算结果见表 4。

表 4 相对于 I 级评价标准的五元联系数计算结果

Tab. 4 Calculation results of five element connection number relative to Grade I standard

目标层 A	准则层 B	权重 w	相对于 $\tilde{N}$ 级评价标准的五元联系数
南京-浏河口段生态航道评价(A)	航运功能( $B_1$ )	0.1331	$\mu = 0.8189 + 0i + 0j + 0k + 0.1811l$
	输水泄洪功能( $B_2$ )	0.3073	$\mu = 0 + 0.6667i + 0.3333j + 0k + 0l$
	输沙功能( $B_3$ )	0.1536	$\mu = 0 + 0i + 0.6667j + 0.3333k + 0l$
	供水功能( $B_4$ )	0.1268	$\mu = 0.5581 + 0i + 0.1732j + 0.1334k + 0.1352l$
	自净功能( $B_5$ )	0.1353	$\mu = 0.9904 + 0.0096i + 0j + 0k + 0l$
	生态功能( $B_6$ )	0.1153	$\mu = 0 + 0.2351i + 0.2531j + 0.112k + 0.3998l$
	景观娱乐功能( $B_7$ )	0.0288	$\mu = 0.7883 + 0i + 0.1948j + 0.0169k + 0l$
			$\mu = 0.3364 + 0.2332i + 0.2615j + 0.0815k + 0.0873l$

确定合理的置信度  $\lambda$  根据公式(7)判别出南京-浏河口段生态航道所属健康等级, 本文  $\lambda$  取 0.6, 则南京-浏河口段联系度  $h_1 = f_1 = 0.3364$ ;  $h_2 = f_1 + f_2 = 0.3364 + 0.2332 = 0.5696 < 0.6$ ;  $h_3 = f_1 + f_2 + f_3 = 0.3364 + 0.2332 + 0.2615 = 0.8312 > 0.6$ , 故判定结果为南京-浏河口段生态航道评价等级为“ $\acute{0}$ ”, 同理, 可计算得到各准则层所属的健康等级, 具体计算结果见表 5。

从表 5 可以看出, 长江下游生态航道南京-浏河口段航运功能、输水泄洪功能、输沙功能、供水功能、自净功能、生态功能、景观娱乐功能的健康等级分别是  $\tilde{N}$  级、 $\hat{0}$  级、 $\acute{0}$  级、 $\acute{0}$  级、 $\tilde{N}$  级、 $\hat{0}$  级、 $\tilde{N}$  级。

### 4.2 敏感性分析

权重的选取对评价结果影响较大, 本文采用层次分析法确定指标权重主要是通过发放专家调查问卷, 根据专家对长江下游生态航道准则层 7 项功能

和各指标含义的个人理解进行重要程度排序, 根据

表 5 综合关联度计算结果及所属等级

Tab. 5 Calculation results and grade of the comprehensive correlation degree

目标层 A	准则层 B	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	等级
南京-浏河口段生态航道评价(A)	航运功能( $B_1$ )	0.8189	0.8189	0.8189	0.8189	1	$\tilde{N}$
	输水泄洪功能( $B_2$ )	0	0.6667	1	1	1	$\hat{0}$
	输沙功能( $B_3$ )	0	0	0.6667	1	1	$\acute{0}$
	供水功能( $B_4$ )	0.5581	0.5581	0.7314	0.8647	1	$\acute{0}$
	自净功能( $B_5$ )	0.9904	1	1	1	1	$\tilde{N}$
	生态功能( $B_6$ )	0	0.2351	0.4882	0.6002	1	$\hat{0}$
	景观娱乐功能( $B_7$ )	0.7883	0.7883	0.9831	1	1	$\tilde{N}$
综合联系度		0.3364	0.5696	0.8312	0.9105	1	$\acute{0}$

打分结果构造判断矩阵确定的权重会使结果具有一定的主观性, 因此, 需要对评价结果进行敏感性分析, 即每次变动一个功能指标的权重, 其他功能

的权重依比例做相应改变, 确保权重总和始终为 1, 以此求出某个指标本身变动对评价体系结果的影响程度, 进而检测评价结果的稳定性, 计算结果见表 6。

表 6 敏感性分析计算结果  
Tab. 6 Results of sensitivity analysis

权重减少 20%			权重增加 20%		
0. 8w	等级		1. 2w	等级	
0. 8w <sub>1</sub>	$h_2 = 0.5620$	$h_3 = 0.8316$ III	1. 2w <sub>1</sub>	$h_2 = 0.5773$	$h_3 = 0.8308$ III
0. 8w <sub>2</sub>	$h_2 = 0.5610$	$h_3 = 0.8162$ III	1. 2w <sub>2</sub>	$h_2 = 0.5782$	$h_3 = 0.8462$ III
0. 8w <sub>3</sub>	$h_2 = 0.5903$	$h_3 = 0.8372$ III	1. 2w <sub>3</sub>	$h_2 = 0.5490$	$h_3 = 0.8252$ III
0. 8w <sub>4</sub>	$h_2 = 0.5700$	$h_3 = 0.8341$ III	1. 2w <sub>4</sub>	$h_2 = 0.5693$	$h_3 = 0.8283$ III
0. 8w <sub>5</sub>	$h_2 = 0.5562$	$h_3 = 0.8259$ III	1. 2w <sub>5</sub>	$h_2 = 0.5831$	$h_3 = 0.8365$ III
0. 8w <sub>6</sub>	$h_2 = 0.5784$	$h_3 = 0.8401$ III	1. 2w <sub>6</sub>	$h_2 = 0.5609$	$h_3 = 0.8223$ III
0. 8w <sub>7</sub>	$h_2 = 0.5683$	$h_3 = 0.8303$ III	1. 2w <sub>7</sub>	$h_2 = 0.5709$	$h_3 = 0.8321$ III

功能的总权重值的某些小幅调整对评估结果不会造成很大影响, 这说明长江下游生态航道南京-浏河口段评价结果具有较高的稳定性。

## 5 结论

基于集对分析理论和层次分析法, 建立了长江下游南京-浏河口段生态航道健康评价五元联系数模型, 采用层次分析法计算各指标绝对权重, 根据五元联系数相关公式计算生态航道健康等级。该模型能够处理生态航道评价过程中分级标准边界模糊、信息不完整导致的不确定性问题, 等级划分更加合理。从结果来看, 南京-浏河口段生态航道健康等级总体处于 0 级, 从具体功能来看, 河流航运功能、自净功能和景观娱乐功能处于 1 级状态, 生态功能处于 0 级, 亟待结合该河段实际状况进行生态治理。对南京-浏河口段评价结果的敏感性分析也表明, 功能层权重的小幅度波动不会对评价结果造成较大影响。

### 参考文献(References):

- [1] 李天宏, 丁瑶, 倪晋仁, 等. 长江中游荆江河段生态航道评价研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017(2): 221-234. (LI T H, DING Y, NI J R, et al. Ecological waterway assessment of the Jingjiang River reach[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017(2): 221-234. (in Chinese)) DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2017.02.002.
- [2] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[J]. 大自然探索, 1994(1): 67-72. (ZHAO K Q. Set pair analysis and its preliminary application[J]. Discovery of Nature, 1994(1): 67-72. (in Chinese))
- [3] 陈丽燕, 付强, 魏丽丽. 集对分析在水文水资源应用的研究进展[J]. 水利科技与经济, 2007, 13(2): 104-106. (CHEN L Y, FU Q, WEI L L. Application of set pair analysis in hydrology and water resource[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2007, 13(2): 104-106. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-7175.2007.02.014.
- [4] 宋纯金, 郑育毅, 张江山. 五元联系数在垃圾填埋场地下水评价中的应用[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(3): 178-182. (SONG C J, ZHENG Y Y, ZHANG J S. Adaption of Five Element Connection Number to the Quality Assessment of Underground Water in Garbage Disposal Plant[J]. Environmental Science and Management, 2011, 36(3): 178-182. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-1212.2011.03.044.
- [5] 潘杰义, 杨青青, 司公奇. 基于集对分析法的产学研合作创新风险综合评价研究[J]. 科技管理研究, 2008, 28(10): 49-51. (PAN Y J, YANG Q Q, SI G Q. Comprehensive evaluation of risk factors during the collaboration innovation of industry-university-research institute based on set pair analysis[J]. Science and Technology Management Research, 2008, 28(10): 49-51. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7695.2008.10.018.
- [6] 刘凤朝, 潘雄峰, 施定国. 基于集对分析法的区域自主创新能力的研究[J]. 中国软科学, 2005(11): 83-91. (LIU F C, PAN X F, SHI D G. Research on the evaluation of regional independent innovation ability based on set pair analysis[J]. China Soft Science, 2005(11): 83-91. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-9753.2005.11.012.
- [7] 孟庆刚, 王连心, 赵世初, 等. 浅谈集对分析在证候规范化研究中的应用[J]. 北京中医药大学学报, 2005, 28(4): 9-13. (MENG Q G, WANG L X, ZHAO S C, et al. Application of set pair analysis in standardization of syndrome manifestations[J]. Journal of Beijing University of Traditional Chinese Medicine, 2005, 28(4): 9-13. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn.1006-2157.2005.04.002.
- [8] 辛焰, 易霞. 模糊集对分析法在评价公共场所卫生质量中的应用[J]. 数理医药学杂志, 2002, 15(6): 557-557. (Application of the fuzzy set pair analysis way in evaluation of sanitary quality of public places[J]. Journal of Mathematical Medicine, 2002, 15(6): 557-557. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-4337.2002.06.042.
- [9] 王亚鹏, 张必科, 王运斗, 等. 应急医学救援能力评估指标体系与评估模型研究[J]. 医疗卫生装备, 2017(10): 1-4. (WANG Y P, ZHANG B K, WANG Y D, et al. Research on evaluation ir

- dex system and model of emergency medical rescue capability assessment[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2017(10): 1-4. (in Chinese) DOI: 10. 7687/j. issn. 1003 8868. 2017. 10. 001.
- [10] 李聪, 陈建宏, 杨珊, 等. 五元联系数在地铁施工风险综合评价中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(10): 21-26. (LI C, CHEN J H, YANG S, et al. Application of five element connection number to comprehensive evaluation of risks involved with subway construction[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(10): 21-26. (in Chinese) DOI: 10. 16265/j. cnki. issn1003 3033. 2013. 10. 001.
- [11] 郑欣, 许开立, 周家红. 基于模糊数学和集对分析方法的尾矿库安全评价研究[J]. 工业安全与环保, 2008, 34(5): 4-6. (ZHENG X, XU K L, ZHOU J H. Safety evaluation research of tailing pond based on fuzzy mathematics and set pair analysis[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2008, 34(5): 4-6. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001 425X. 2008. 05. 002.
- [12] 邹长城. 基于集对分析的化工工艺本质安全性评价方法[J]. 工业安全与环保, 2016, 42(5): 74-76. (WU C C. Inherent safety evaluation for chemical process based on set pair analysis[J]. Industrial Safety and Environmental Protection 2016, 42(5): 74-76. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-425X. 2016. 05. 02.
- [13] 蒋尚明, 金菊良, 许浒, 等. 基于经验模态分解和集对分析的粮食单产波动影响分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 213-221. (JIANG S M, JIN J L, XU H, et al. Fluctuations effect analysis of grain yield per hectare based on empirical mode decomposition and set pair analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(4): 213-221. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-6819. 2013. 04. 027.
- [14] 郭瑞林, 陈现臣. 品种区试的四元联系数多因素态势排序分析法[J]. 土壤与作物, 2003, 19(3): 218-222. (GUO R L, CHEN X C. Analysis method of multifactor situation sequent for four element connection number in variety regional test[J]. Soil and Crops, 2003, 19(3): 218-222. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001 0068. 2003. 03. 017.
- [15] 于平福, 黄凤珠, 彭宏祥. 四元联系数多因素态势排序法在葡萄新品种评价中的应用[J]. 西南农业学报, 2005, 18(6): 806-809. (YU P F, HUANG F Z, PENG H X. Application on the evaluation of southern China grape new varieties with a four element connection number coefficient posture arrangement [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2005, 18(6): 806-809. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-4829. 2005. 06. 031.
- [16] 范秋映. 城市防洪系统评价的集对分析方法[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009. (FAN Q Y. Set Pair Analysis methods for system assessment of urban flood[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009. (in Chinese))
- [17] 赵吴静, 吴开亚, 金菊良. 防洪工程安全评价集对分析可变模糊集模型[J]. 水电能源科学, 2007, 25(2): 5-7. (ZHAO W J, WU K T, JIN J L. Data envelopment analysis model of urban water supply performance based on chaos optimization algorithm[J]. Water Resources and Power, 2007, 25(2): 5-7. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000 7709. 2007. 02. 002.
- [18] 徐高升, 王道善. 集对分析方法在水库防洪调度方案优选中的应用[J]. 江淮水利科技, 2011(3): 41-42, 50. (XU G S, WANG D S. Application of Set pair analysis method in the reservoir flood control operation plan optimization[J]. Jianghuai Water Resources Science and Technology, 2011(3): 41-42, 50. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1673 4688. 2011. 03. 017.
- [19] 王国平, 杨洁, 王洪光. 四元联系数用于污水处理厂出水水质评价及质量管理[J]. 环境研究与监测, 2007(2): 13-14. (WANG G P, YANG J, WANG H G. Four element contact number used for effluent quality evaluation and quality management of sewage treatment plant[J]. Environmental Study and Monitoring, 2007(2): 13-14. (in Chinese))
- [20] 李睿冉, 毛晓敏, 王慧. 四元联系数在区域水资源与社会经济协调发展评价中的应用[J]. 节水灌溉, 2010(8): 81-84. (LI R R, MAO X M, WANG H. Application four element connection number in evaluation of harmonious development of regional water resources and socioeconomy[J]. Water Saving Irrigation, 2010(8): 81-84. (in Chinese))
- [21] 李睿冉. 四元联系数在区域水资源承载力评价中的应用[J]. 节水灌溉, 2016(11): 85-87. (LI R R. Application four element connection number in regional water resources carrying capacity evaluation[J]. Water Saving Irrigation, 2016(11): 85-87. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-4929. 2016. 11. 021.
- [22] 宋丽婧, 魏琛, 宋玲梅. 五元系数法改进熵权法在水质评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2): 268-273. (SONG L J, WEI C, SONG L M. Application of five element connection number method improved method in water quality evaluation[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, [1] 2015, 13(2): 268-273. (in Chinese) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2015. 02. 017.
- [23] 陈晶, 王文圣, 陈媛. 基于集对分析的全国生态环境质量评价研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(2): 40-43. (CHEN Ji, WANG W S, CHEN Y. Study on nationwide ecological environment level evaluation based on set pair analysis[J]. Water Resources and Power, 2009, 27(2): 40-43. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-7709. 2009. 02. 013.
- [24] 刘朋钢, 杨海龙, 高甲荣, 等. 基于四元联系数原理的北京市郊安达木河生态评价[J]. 水土保持通报, 2012, 32(4): 242-245. (LIU P G, YANG H L, GAO J R, et al. Ecological rank evaluation of Andamu River in Suburban Beijing City based on principle of four element connection number[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(4): 242-245. (in Chinese) DOI: 10. 13961/j. cnki. sbctb. 2012. 04. 022.
- [25] 王传斌, 王继顺, 王子友. 五元联系数在高职院校学生综合素质评价中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2010, 40(24): 48-53. (WANG C B, WANG J S, WANG Z Y. Application on the appraising of the student comprehensive quality of higher vocational college with five element partial connection number

- [J]. *Mathematics In Practice and Theory*, 2010, 40(24): 48-53. (in Chinese)
- [26] 余国祥. 关于集对分析在教育测量与评价中的应用[J]. *教育学报*, 1997(1): 44-48. (YU G X. Application of set pair analysis in education measurement and evaluation [J]. *Journal of Educational Studies*, 1997(1): 44-48. (in Chinese)) DOI: 10.14082/j.cnki.1673-1298.1997.01.004.
- [27] 王薇. 集对分析原理在学业评价中的应用[J]. *上海教育科研*, 2012(9): 52-56. (Application of set pair analysis principle in academic evaluation [J]. *Shanghai Research on Education*, 2012(9): 52-56. (in Chinese)) DOI: 10.16194/j.cnki.31-1059/g4.2012.09.012.
- [28] Li T H, DING Y, XIA W. An integrated method for waterway health assessment: a case in the Jingjiang reach of the Yangtze River, China [J]. *Physical Geography*, 2017: 1-17. DOI: 10.1080/02723646.2017.1345537.
- [29] 吴阿娜, 杨凯, 车越, 等. 河流健康状况的表征及其评价[J]. *水科学进展*, 2005, 16(4): 602-608. (WU E N, YANG K, CHE Y, et al. Characterization of rivers health status and its assessment [J]. *Advances in Water Science* 2005, 16(4): 602-608. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.2005.04.023.
- [30] 倪晋仁, 刘元元. 河流健康诊断与生态修复[J]. *中国水利*, 2006(13): 4-10. (NI J R, LIU Y Y. River health diagnosis and ecological rehabilitation [J]. *China Water Resources*, 2006(13): 4-10. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2006.13.003.
- [31] 曹明弟. 城市河流生态系统健康评价指标体系研究及其应用[D]. 中国环境科学研究院, 2007. (CAO M D. Study on Evaluation Index System for Urban River Ecosystem Health and Its Application [D]. *Chinese Research Academy of Environmental Sciences*, 2007.)
- [32] 秦鹏, 王英华, 王维汉, 等. 河流健康评价的模糊层次与可变模糊集耦合模型[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2011, 45(12): 2169-2175. (QIN P, WANG Y H, WANG W H, et al. Integrated model of fuzzy analytical hierarchy process and variable fuzzy set model on evaluation river health system [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2011, 45(12): 2169-2175. (in Chinese)) DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2011.12.015.
- [33] 严登华, 何岩, 邓伟, 等. 东辽河流域河流系统生态需水研究[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(1): 46-49. (YAN D H, HE Y, DENG W, et al. Ecological water demand by river system in East Liaohe River Basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(1): 46-49. (in Chinese)) DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2001.01.013.
- [34] 王孟, 吴国平, 邱凉. 长江流域(片)重要饮用水水源地安全保障达标建设对策研究[J]. *中国水利*, 2014(3): 43-45. (WANG M, WU G P, QIU L. Measures for safeguarding key drinking water sources in Yangtze River Basin [J]. *China Water Resources*, 2014(3): 43-45. (in Chinese))
- [35] 冯彦, 何大明, 杨丽萍. 河流健康评价的主评指标筛选[J]. *地理研究*, 2012, 31(3): 389-398. (FENG Y, HE D M, YANG L P. Selection of major evaluation indicators on river health evaluation [J]. *Geographical Research*, 2012, 31(3): 389-398. (in Chinese))
- [36] 金鑫, 郝彩莲, 严登华, 等. 河流健康及其综合评价研究——以承德市武烈河为例[J]. *水利水电技术*, 2012, 43(1): 38-43. (JIN X, HAO C L, YAN D H, et al. Study on river health and its comprehensive assessment — a case of Wuliehe River in Chengde [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2012, 43(1): 38-43. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2012.01.008.
- [37] 常福宣, 张洲英, 陈进, 等. 长江流域河道生态环境需水满足程度研究[J]. *长江科学院院报*, 2009, 26(9): 1-5. (CHANG F X, ZHANG Z Y, CHEN J, et al. Study on satisfactory ratio of environmental water demand of river channels in Yangtze River Basin [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2009, 26(9): 1-5. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2009.09.001.
- [38] 王志刚. 北京北部山区河流健康评价及其诊断研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016. (WANG Z G. The evaluation and diagnosis of river health in Beijing Northern Mountainous Region [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016. (in Chinese))
- [39] MARZIN A, DDLAIGUE O, LOGEZ M, et al. Uncertainty associated with river health assessment in a varying environment: The case of a predictive fish based index in France [J]. *Ecological Indicators*, 2014, 43(43): 195-204. DOI: 10.1016/j.ecolind.2014.02.011.
- [40] JIA Y T, CHEN Y F. River health assessment in a large river: Bio indicators of fish population [J]. *Ecological Indicators*, 2013, 26(0): 24-32. DOI: 10.1016/j.ecolind.2012.10.011.
- [41] 刘绍平, 陈大庆, 段辛斌, 等. 长江中上游四大家鱼资源监测与渔业管理[J]. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(2): 183-186. (LIU S P, CHEN D Q, DUAN X B, et al. Monitoring of the four famous chinese carps resources in the middle and upper reaches of the Yangtze River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(2): 183-186. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-8227.2004.02.017.
- [42] 贾蕊. 赣江南昌段河流健康评价研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012. (JIA R. Study on river health evaluation about nanchang section of Ganjiang River [D]. Nanchang: Nanchang University, 2012. (in Chinese))
- [43] 蔡守华, 胡欣. 河流健康的概念及指标体系和评价方法[J]. *水利水电科技进展*, 2008, 28(1): 23-27. (CAI S H, HU X. Concept of river health and index system for its evaluation [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2008, 28(1): 23-27. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2008.01.007.
- [44] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000. (ZHAO K Q. Set pair analysis and its preliminary application [M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2000. (in Chinese))
- [45] 邓朝贤, 金菊良, 王宗志, 等. 基于模糊四元联系系数的防洪工程体系安全综合评价模型[J]. *灾害学*, 2008, 23(3): 41-43.



- (DENG C X, JIN J L, WANG Z Z, et al. Fuzzy four element connection number based security evaluation model for flood control engineering system[J]. Journal of Catastrophology, 2008, 23(3): 41-43. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2008.03.010.
- [46] 刘双跃, 王娟, 何发龙. 四元联系数对煤矿安全质量标准化的优化研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(12): 32-37. (LIU S Y, WANG J, HE F L. Optimization research of coal mine safety quality standardization based on four element connection number model[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(12): 32-37. (in Chinese))
- [47] 叶义城, 柯丽华, 黄德育. 系统综合评价技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006. (YE Y C, KE L H, HUANG D Y. System comprehensive evaluation technology and its application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006. (in Chinese))
- [48] 刘科峰. 合肥城区典型景观水体水环境变化特征及评价[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014. (LIU K F. Variation Characteristics and evaluations of water environment in typical landscape waters in Hefei City[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [49] 李文宾, 姚阿漫. 基于熵权的五元联系数在地下水水质评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(2): 118-120. (LI W B, YAO A M. Application of five element connection number in evaluation of groundwater quality based on entropy[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2013, 24(2): 118-120. (in Chinese))
- [50] 高军省. 湖泊富营养化综合评价的五元联系数法[J]. 人民长江, 2010, 41(21): 81-84. (GAO J S. Method of five element connection number for Lake Eutrophication assessment[J]. Yangtze River, 2010, 41(21): 81-84. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4179.2010.21.023.
- [51] 陆洲, 马涛. 地下水环境质量评价的一种新方法——集对分析法[J]. 环境保护科学, 2005, 31(5): 53-55. (LU Z, MA T. A new method to assess the environmental quality of underground water-set pair analysis[J]. Environmental Protection Science, 2005, 31(5): 53-55. (in Chinese)) DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2005.05.018.
- [52] 李焱, 姚佳. 基于熵权五元联系数在实验室安全管理评价中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(9): 285-288. (LI H, YAO J. Application of five element connection number in evaluation of university laboratory safety management based on entropy[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, 34(9): 285-288. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-7167.2015.09.070.

(上接第92页)

- [23] 邓鑫楠, 张慧, 吴湘滨. 高速公路路面径流及路侧水质污染研究[J]. 西部交通科技, 2007, (2): 7-9. (DENG X N, ZHANG H, WU X B. Study on the pollution in expressway pavement runoff and the roadside water quality[J]. Projects of Western China, 2007, (2): 7-9. (in Chinese) DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2007.02.003.
- [24] 唐荣, 钱国平, 秦志斌, 等. 路面径流污染成因与特征的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(12F): 425-429. (TANG R, QIAN G P, QIN Z B, et al. Research progress of pavement runoff pollution causes and characteristics[J]. Environmental Science and Technology, 2010, 33(12F): 425-429. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2010.12F.112.
- [25] 李春林, 刘淼, 胡远满, 等. 沈阳市降雨径流污染物排放特征[J]. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1327-1336. (LI C L, LIU M, HU Y M, et al. Characteristics of pollutants in urban rainfall runoff in Shenyang City[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(5): 1327-1336. (in Chinese) DOI: 10.13292/j.1000-4890.20140327.031.
- [26] 侯培强, 任玉芬, 王效科, 等. 北京市城市降雨径流水质评价研究[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 71-75. (HOU P Q, REN Y F, WANG X K, et al. Research on evaluation of water quality of Beijing urban stormwater runoff[J]. Environmental Science, 2012, 33(1): 71-75. (in Chinese)) DOI: 10.13227/j.hjks.2012.01.025.
- [27] 黄金良, 杜鹏飞, 欧志丹, 等. 澳门城市小流域地表径流污染特征分析[J]. 环境科学, 2006, 27(9): 1753-1759. (HUANG J L, DU P F, OU Z D, et al. Characterization of urban surface runoff in two urban catchments in Macau[J]. Environmental Science, 2006, 27(9): 1753-1759. (in Chinese)) DOI: 10.13227/j.hjks.2006.09.010.
- [28] 叶颖, 徐沛斌, 翟云波, 等. 高速公路关键地段路面径流污染特征研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(6): 134-137. (YE Y, XU P B, ZHAI Y B, et al. Characterization of highway runoff pollution[J]. Environmental Science and Technology, 2013, 36(6): 134-137. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2013.06.026.
- [29] 唐莉华, 何康茂, 梁宁, 等. 北京校园区降雨径流产污特性及其对水环境的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(8): 1025-1030. (TANG L H, HE K M, LIANG N, et al. Urban rainfall runoff pollution on the campus in Beijing and its impact on water body[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2014, 54(8): 1025-1030. (in Chinese)) DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxb.2014.08.008.