

Evaluation Research on Water Resources Sustainable Utilization in Nanchang City

Siyang Li, Xiuping Zhang*

Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, Nanchang Jiangxi
Email: *806206172@qq.com

Received: Aug. 7th, 2019; accepted: Aug. 29th, 2019; published: Sep. 16th, 2019

Abstract

Based on the comprehensive consideration of the main influencing factors of sustainable use of water resources, this paper selects 32 quantitative indicators as the evaluation factors from four aspects: water resources, society, economy and ecological environment. In order to reduce the subjectivity of the Analytic Hierarchy Process (AHP), the entropy method was used to modify the initial weight of the evaluation index, and the matter-element theory and principal component analysis method were introduced to comprehensively evaluate the sustainable utilization of water resources in Nanchang City from 2008 to 2017. The results show that the sustainable use of water resources in 2008 and 2009 is generally good, and the sustainable use of water resources in other years is better; the evaluation index of sustainable use of water resources is increasing year by year, and the evaluation index of sustainable use of water resources is reached in 2015 and 2017 the highest value. The evaluation results obtained by matter-element theory and principal component analysis are basically consistent in the trend of change year by year, which indicates that the evaluation results obtained by these two methods have certain scientific rationality and can provide reference for the sustainable use evaluation of water resources in other cities.

Keywords

Sustainable Use of Water Resources, Evaluation Index System, Matter-Element Theory, Principal Component Analysis

南昌市水资源可持续利用评价研究

李斯颖, 张秀平*

江西省水利科学院, 江西 南昌
Email: *806206172@qq.com

作者简介: 李斯颖(1992-), 女, 硕士研究生, 助理工程师, 主要研究方向为水利信息化。
*通讯作者。

文章引用: 李斯颖, 张秀平. 南昌市水资源可持续利用评价研究[J]. 水资源研究, 2019, 8(5): 473-482.
DOI: 10.12677/jwrr.2019.85054

收稿日期：2019年8月7日；录用日期：2019年8月29日；发布日期：2019年9月16日

摘要

本文在综合考虑水资源可持续利用主要影响因素的基础上，从水资源、社会、经济和生态环境四个方面选取32个定量指标作为水资源可持续利用评价因素。为了降低层次分析法(AHP)的主观性，采用熵值法修正评价指标初始权重，引入物元理论和主成分分析法对2008~2017年南昌市水资源可持续利用进行综合评价。结果表明，2008、2009年的水资源可持续利用一般，其他年份水资源可持续利用较好；水资源可持续利用评价指数逐年增长，且在2015年和2017年达到水资源可持续利用评价指数的最高值。物元理论、主成分分析法得到的评价结果在逐年变化趋势上基本保持一致，表明这两种方法得到的评价结果具有一定的科学合理性，能够为其他城市的水资源可持续利用评价提供参考。

关键词

水资源可持续利用，评价指标体系，物元理论，PCA

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水资源可持续利用是由可持续发展思想衍生的一种新概念，也是确定社会经济发展和生态环境战略的重要基础[1]。近年来，全球社会经济史无前例的发展，人口规模逐年增加、经济水平逐年提高、生产力水平也有了很大提高，这些都增加了资源和环境的压力。为实现人与社会的可持续发展，绿水青山就是金山银山的理念，及时对南昌市水资源可持续利用状况进行综合评价具有重要意义。金菊良等为了有效地解决水资源评价模型的模糊性、随机性和任意性，建立了基于加速遗传算法的评价模型[2]。董四方等基于 DPSIR 构建了水资源脆弱性评价指标体系[3]。陈午基于改进关系法，提出了水资源可持续利用评价指标体系[4]。邓绍云等从区域的角度出发，构建了一个高度适用于西北地区水资源可持续利用评价的指标体系[5]。马雪倩、魏玲玲从水资源、经济、社会与环境四个方面建立了水资源可持续利用评价指标体系[6]。王壬等通过相关分析和粗糙集属性约简相结合的指标体系，有效解决了区域水资源可持续利用评价中的干扰现象和指标信息重复[7]。崔莹构建了基于模糊理论的水资源可持续利用评价指标体系[8]。龚巧灵构建了基于 BP 神经网络的水资源安全利用评价指标体系，并运用 ARIMA 模型预测了各指标状况[9]。

本文以南昌市作为研究区，基于国内外有代表性的评价指标体系，从经济、社会、水资源和生态环境等方面构建了南昌市水资源可持续利用评价指标体系。选用层次分析法(AHP)确定不同评价指标的权重，同时利用熵值法消除主观判断对评价结果的偏差。在评价方法的选择上，分别采用物元理论和主成分分析法(PCA)对南昌市水资源可持续利用进行评价。通过比较分析两种评价方法的结果，发现了南昌市水资源可持续利用存在的问题，并针对当前水资源可持续利用状况，提出了提高水资源可持续利用状况的解决对策。

2. 建立综合评价模型

2.1. 评价体系构建及等级划分

通过参考文献资料并综合南昌市水资源安全的情况，从水资源、社会、经济和生态环境子系统方面考虑，

充分考虑指标数据的科学性、系统性、层次性、规范性、动态性及可操作性等，得出了具体的目标层、准则层和指标层，以南昌市水资源可持续利用作为目标层；水资源条件、社会、经济和生态环境作为准则层；32个基础性指标作为指标层。评价指标体系如图1所示。



Figure 1. Water resources sustainable utilization evaluation index system of Nanchang city
图1. 南昌市水资源可持续利用评价指标体系

2.2. 确定指标初始权重

层次分析法(AHP)是一种系统分析方法，可以将复杂的问题分解形成有序的渐进式层次结构，通过两两比较

的方式，确定每个元素的相对重要性，在此基础上进行多目标决策分析方法[10]。通过使用多元素分级处理，使人们的思维过程数学化、系统化以便于接受，从而来确定元素权重。

熵值法的概念源自于热力学，是对系统有序度的一种度量，1948年，Shannon首次引入信息熵来描述信号源信号的不确定性[11]。如果指标的信息熵越小，指标的变异度越大，提供的信息量越大，权重也就越大。因此，本文根据各指标的变异程度，采用信息熵来确定各指标的客观权重[12]。

AHP侧重于决策者的主观选择，而熵值法侧重于挖掘数据本身所包含的客观信息，因此，权重确定的科学方法应组合考虑主观与客观的因素[13]。选用AHP-熵值法组合赋权确定评价指标的综合权重为

$$w_i = \beta w'_i + (1 - \beta) w''_i \tag{1}$$

式中： w'_i 为层次分析法最终确定的权重值， w''_i 为熵值法最终确定的权重值， β 为偏好系数($0 \leq \beta \leq 1$)。咨询相关专家意见后确定系数 β 为0.5。

2.3. 基于物元理论的综合评价模型

本文研究的重点是评价水资源可持续利用状况，要在众多的评价指标中找出最重要的指标。水资源可持续利用评价是一个多目标的复杂过程，因为影响水资源可持续利用的因素较多，涉及的指标量过多，同时过多的指标之间可能存在不相容的状况，具有不确定性和模糊性。物元理论属于可以很好解决不相容问题的方法；主成分分析法(PCA)不仅可以大量相关性很高的指标转化成少量不相关的综合指标，还可以避免主观确定权重的缺陷对评价结果造成影响。因此在查阅相关文献的基础上，结合水资源可持续利用评价指标体系和指标数据的相关特征，本文拟采用物元理论和PCA对水资源可持续利用进行评价。

2.3.1. 建立物元矩阵

水资源可持续利用等级物元可用 $R = (N, C, V)$ 来描述，其中 N 表示水资源可持续利用等级，它关于特征 C 的量值为 V 。假设 D 有 n 个特征，以 C_1, C_2, \dots, C_n 及其对应的量值 V_1, V_2, \dots, V_n 来表示，则水资源可持续利用等级的物元矩阵可表示为：

$$R_0(N, C, V) = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ L \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_0 & C_1 & V_1 \\ & C_2 & V_2 \\ & L & L \\ & C_n & V_n \end{bmatrix} \tag{2}$$

2.3.2. 确定经典域与节域

确定经典域物元和节域物元。事物考虑维度用 N_j 来表示，第 i 项特征为 C_i ，在 C_i 的 j 等级分量取值区间为 $v_{ji} = (a_{ji}, b_{ji})$ 时，经典域物元表示为：

$$R_j(N, C, V_{ji}) = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ L \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j & C_1 & (a_{j1}, b_{j1}) \\ & C_2 & (a_{j2}, b_{j2}) \\ & L & L \\ & C_n & (a_{jn}, b_{jn}) \end{bmatrix} \tag{3}$$

标准事物 N_j 和可转化为标准事物共同构成物元 P ，称所组成的物元 R_p 为节域物元，可表示为：

$$R_p(P, C, X_{pi}) = \begin{bmatrix} P & C_1 & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & C_2 & (a_{p2}, b_{p2}) \\ & L & L \\ & C_n & (a_{pn}, b_{pn}) \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中： P 表示评价等级的全体， X_{pi} 为 P 关于 C_i 的取值范围， a_{pi}, b_{pi} 分别为 X_{pi} 的上限、下限。

2.3.3. 确定关联函数及关联度

物元符合要求的范围程度是遵循关联函数计算物元量值取值在实轴上点的位置得出的。区间范围用 X_0 表示，即 $X_0 = |b - a|$ ，由此可得任意一点 x 到经典域区间 X_0 的距离可表示为：

$$P = (x - X_0) = \left| x - \frac{1}{2}(a + b) \right| - \frac{1}{2}(b - a) \tag{5}$$

对关联函数 $K_j(X_j)$ 可定义为：

$$K_j(X_i) = \begin{cases} \frac{-P(X_i, X_{ji})}{|X_{ji}|}, & X_i \in X_{ji} \\ \frac{P(X_i, X_{ji})}{P(X_i, X_{pi}) - P(X_i, X_{ji})}, & X_i \notin X_{ji} \end{cases} \tag{6}$$

其中：

$$P(X_i, X_{ji}) = \left| X_i - \frac{a_{ji} + b_{ji}}{2} \right| - \frac{b_{ji} - a_{ji}}{2} \tag{7}$$

$$P(X_i, X_{pi}) = \left| X_i - \frac{a_{pi} + b_{pi}}{2} \right| - \frac{b_{pi} - a_{pi}}{2} \tag{8}$$

式中： $X_{ji} = |a_{ji} - b_{ji}|$ ； $K_j(X_i)$ 表示关联度，即 P_0 的评价指标 C_i 对应第 j 个等级的关联度，对象 N 关于第 j 评价等级的综合关联度可表示为：

$$K_i(P_0) = \sum_{j=1}^n W_j \cdot K_j(X_i) \tag{9}$$

式中： W_i ：第 i 项评价指标的权重； $K_i(P_0)$ ：待评单元隶属于第 i 级的综合关联度； $K_j(P_0)$ ： P_0 属于第 j 级的关联度值。

2.4. 基于主成分分析法的综合评价模型

2.4.1. 数据标准化

对原始 m 维随机变量 n 个样品的矩阵 X 进行标准化处理，得到 Y 。标准化公式为：

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j} \tag{10}$$

式中： $X = \{x_{ij}\}$ ， $Y = \{y_{ij}\}$ ， $i = 1, 2, \dots, n$ ， $j = 1, 2, \dots, m$ 。

2.4.2. 求相关系数矩阵

$$R = \frac{Y^T Y}{n - 1} \tag{11}$$

2.4.3. 求解系数矩阵 R 的特征方程

根据系数矩阵 R 的特征值和特征向量

$$|R - \lambda I_m| = 0 \tag{12}$$

即可得到特征值 $\lambda_j (j=1,2,\dots,p)$ ，将特征值 λ_j 按照从大到小的顺序排列，按照 $\lambda_j > 1$ 的原则提取前 p 个做为主成分，特征值 λ_j 对应的特征向量 $Rb = \lambda_j b$ 。

同时，一般认为当累计贡献率大于 85% 时，可以用新的主成分代替原变量，并包含原变量的主要信息。

$$\frac{\sum_{j=1}^p \lambda_j}{\sum_{j=1}^m \lambda_j} \geq 85\% \tag{13}$$

2.4.4. 确定主成分

$$F_{ij} = y_j^T b_i \tag{14}$$

式中： $y_i = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{nj})^T$ ， $F_i = (F_{i1}, F_{i2}, \dots, F_{ip})$ ， $i=1,2,\dots,p$ ， $j=1,2,\dots,m$ 。第一个主成分为 F_1 ，第二个主成分为 F_2 ，……，以此类推，共选取 p 个主成分。

2.4.5. 运用熵值法确定子系统的权重

根据下式计算综合得分

$$F_s = w_1 \times F_{B1} + w_2 \times F_{B2} + \dots + w_B \times F_{Bn} \tag{15}$$

3. 评价结果与分析

3.1. 指标权重的确定及修正

根据《江西省统计年鉴》、《江西省水资源公报》选取指标数据评价 2008~2017 年南昌市的水资源可持续利用状态。采用 AHP 法，请相关专家对指标的相对重要性做出评估，在结合熵值法修正权重，确定指标的最终权重 w_i ，如表 1 所示。层次分析法和熵值法对各指标权重的赋权总体上是较为接近的，部分指标赋权有点差异，这是由于各专家的偏好不同所导致的。从各指标的最终权重的大小来看，在一定程度上能够反映各指标对总体目标的重要性。

Table 1. Water resources sustainable utilization evaluation index combination weight of Nanchang city
表 1. 南昌市水资源可持续利用评价指标组合权重

| 指标 | AHP 权重值 | 熵权值 | 组合赋权值 | 子系统权重值 |
|-----|---------|--------|--------|--------|
| C11 | 0.0153 | 0.0294 | 0.0224 | |
| C12 | 0.0262 | 0.0314 | 0.0288 | |
| C13 | 0.0730 | 0.0304 | 0.0517 | |
| C14 | 0.0445 | 0.0292 | 0.0368 | |
| C15 | 0.0730 | 0.0306 | 0.0518 | 0.3007 |
| C16 | 0.0153 | 0.0280 | 0.0216 | |
| C17 | 0.0262 | 0.0284 | 0.0273 | |
| C18 | 0.0153 | 0.0299 | 0.0226 | |
| C19 | 0.0445 | 0.0308 | 0.0377 | |

Continued

| | | | | |
|-----|--------|--------|--------|--------|
| C21 | 0.0416 | 0.0289 | 0.0353 | |
| C22 | 0.0240 | 0.0296 | 0.0268 | |
| C23 | 0.0240 | 0.0302 | 0.0271 | |
| C24 | 0.0084 | 0.0269 | 0.0176 | 0.1897 |
| C25 | 0.0416 | 0.0302 | 0.0359 | |
| C26 | 0.0136 | 0.0369 | 0.0252 | |
| C27 | 0.0136 | 0.0300 | 0.0218 | |
| C31 | 0.0137 | 0.0299 | 0.0218 | |
| C32 | 0.0263 | 0.0299 | 0.0281 | |
| C33 | 0.0467 | 0.0287 | 0.0377 | |
| C34 | 0.0137 | 0.0272 | 0.0204 | 0.1853 |
| C35 | 0.0263 | 0.0277 | 0.0270 | |
| C36 | 0.0137 | 0.0309 | 0.0223 | |
| C37 | 0.0263 | 0.0296 | 0.0280 | |
| C41 | 0.0163 | 0.0727 | 0.0445 | |
| C42 | 0.0269 | 0.0304 | 0.0287 | |
| C43 | 0.0163 | 0.0295 | 0.0229 | |
| C44 | 0.0269 | 0.0297 | 0.0283 | |
| C45 | 0.0732 | 0.0275 | 0.0504 | 0.3245 |
| C46 | 0.0449 | 0.0269 | 0.0359 | |
| C47 | 0.0107 | 0.0277 | 0.0192 | |
| C48 | 0.0449 | 0.0422 | 0.0436 | |
| C49 | 0.0732 | 0.0287 | 0.0510 | |

3.2. 水资源可持续利用综合评价

3.2.1. 基于物元理论的水资源可持续利用综合评价

以 2008~2017 年南昌市的数据为例选取 32 个指标, 并对指标进行归一化处理, 基于物元理论构建南昌市水资源可持续利用评价模型, 通过式(2)~(9)计算出 2008~2017 年南昌市的综合关联度, 得出 2008~2017 年南昌市水资源可持续利用评价等级, 如表 2 所示。

Table 2. Comprehensive relevance evaluation of sustainable utilization of water resources in Nanchang city (2008-2017)

表 2. 2008~2017 年南昌市水资源可持续利用综合关联度评价

| 年份 | 南昌市综合关联度 | | | | | 判定等级 |
|------|----------|--------|--------|--------|--------|------|
| | I 级 | II 级 | III 级 | IV 级 | V 级 | |
| 2008 | -0.580 | -0.351 | -0.337 | -0.398 | -0.452 | III |
| 2009 | -0.611 | -0.417 | -0.407 | -0.429 | -0.473 | III |
| 2010 | -0.537 | -0.324 | -0.335 | -0.438 | -0.536 | II |
| 2011 | -0.591 | -0.377 | -0.383 | -0.424 | -0.495 | II |
| 2012 | -0.531 | -0.291 | -0.335 | -0.444 | -0.523 | II |
| 2013 | -0.567 | -0.379 | -0.397 | -0.458 | -0.51 | II |
| 2014 | -0.547 | -0.351 | -0.384 | -0.446 | -0.508 | II |
| 2015 | -0.555 | -0.362 | -0.384 | -0.456 | -0.54 | II |
| 2016 | -0.574 | -0.396 | -0.398 | -0.461 | -0.519 | II |
| 2017 | -0.582 | -0.408 | -0.409 | -0.471 | -0.533 | II |

3.2.2. 基于主成分分析法的水资源可持续利用综合评价

运用 SPSS25.0, 依据 2008~2017 年南昌市的 32 个评价指标统计数据, 依次对水资源条件、社会、经济和生态环境子系统进行主成分分析。利用 SPSS 软件中 Descriptive statistics 过程对以上数据进行标准化处理, 根据公式分别计算水资源条件子系统、社会子系统、经济子系统与生态环境子系统标准化后的指标数据的相关系数矩阵。运用 PCA 根据公式 10~15 计算各个子系统中各主成分的特征值、方差贡献率及方差的累计贡献率, 结果中特征值都大于 1, 且方差的累计贡献率最好能达到 85% 以上的几个主成分即为所提取的主成分, 然后根据成分矩阵, 可确定各个主成分中起到主要作用的指标变量。将水资源条件、社会、经济、生态环境四个子系统的主成分得分值与各个子系统的权重值(表 3)加权求和, 得到最终的水资源可持续利用指数值。

Table 3. Subsystems and comprehensive water resources sustainable utilization index in Nanchang city (2008-2017)

表 3. 2008~2017 年南昌市各子系统及综合水资源可持续利用指数

| 年份 | F _{B1} | F _{B2} | F _{B3} | F _{B4} | F _w |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 2008 | -0.98115 | -1.48107 | 1.64185 | -1.04929 | -0.57401 |
| 2009 | -1.13070 | -0.55606 | 1.24334 | -0.34375 | -0.27611 |
| 2010 | 1.215483 | -0.87141 | 0.9347 | -0.82726 | 0.07023 |
| 2011 | -0.82822 | -0.16409 | 0.32426 | 0.349551 | -0.08066 |
| 2012 | 0.739141 | -0.23890 | -0.21039 | -0.03653 | 0.092778 |
| 2013 | -0.29175 | 0.807277 | -0.26647 | 0.328571 | 0.142902 |
| 2014 | -0.00348 | 0.69799 | -0.61825 | 0.446653 | 0.162312 |
| 2015 | 0.706177 | 0.616767 | -0.87704 | 0.240982 | 0.21762 |
| 2016 | 0.197206 | 0.725546 | -0.80837 | 0.053859 | 0.059451 |
| 2017 | 0.377297 | 0.463941 | -1.36362 | 0.837212 | 0.185478 |

3.2.3. 两种评价方法对比分析

由于本文分别采用物元理论和 PCA 两种方法, 因此分析的水资源可持续利用评价等级和指数值不具有可比

性,但两种方法的测算结果可以从趋势的角度进行比较,如表4所示。

Table 4. Principal component analysis and matter element theory comparison analysis
表 4.主成分分析法和物元理论比较分析表

| 年份 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |
|--------|--------|--------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 物元理论 | -0.574 | -0.276 | 0.07 | 0.081 | 0.093 | 0.143 | 0.162 | 0.218 | 0.059 | 0.185 |
| 主成分分析法 | III | III | II | I | II | II | II | II | II | II |

3.3. 分析与建议

南昌市近几年来人口愈加密集,经济相对发达,水环境质量呈下降趋势,水资源开发利用率高。其中,2008、2009年的水资源可持续利用评价等级为 III 级标准,属于可持续利用一般,向可持续利用较好方向发展,其他年份水资源可持续利用较好。

从表4中分析可知,南昌市水资源可持续利用评价指数逐年增长,且在2015年和2017年达到极大值。从总体上看,采用两种方法计算得出的各市水资源可持续利用等级和指数值并不相同,并且分析、解释评价结果方面也存在差异,但就水资源可持续利用情况的纵向变化趋势而言,两者的评价结果还是趋于一致的。如表4显示:2008~2017年南昌市水资源可持续利用指数持续增长,评价等级总体保持稳定;2008~2009年评价指数值低于平均值,评价等级属于 III 级;2010~2017年评价指数值高于平均值,评价等级也一直稳定在 II 级,两种方法评价结果十分吻合。

4. 结论

本文以2008~2017年南昌市为实证区域,根据南昌市水资源开发利用的特点,构建了南昌市水资源可持续利用评价指标体系,运用 AHP 和熵值法确定指标权重,在此基础上,分别运用物元理论和 PCA 评价了南昌市水资源可持续利用等级,并对比分析结果,进而研究单个评价方法的局限性以及耦合评价模型的可行性。

主成分分析法、物元理论评价法都较为清晰地说明了水资源可持续利用及各子系统的变化情况。主成分分析法可以通过选取的主成分进一步观察其代表的主要影响因素的纵向变化情况,分析了水资源可持续利用与平均状态的位置关系;物元理论评价法通过计算各子系统对评价等级的隶属度,进一步研究同一年份中水资源可持续利用优劣隶属度的情况。物元理论和 PCA 运用于南昌市水资源可持续利用评价时,各有其优势和局限,而两种方法从不同层面进行耦合,某种程度上规避了单个方法存在的局限性,为水资源可持续利用综合评价提供了两种新思路。

基金项目

江西省重点研发计划项目(20161BBG70089)。

参考文献

- [1] 刘大根. 特大城市水资源承载能力研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
LIU Dagen. Study on water resources carrying capacity of super metropolises. Beijing: Tsinghua University, 2016. (in Chinese)
- [2] 金菊良, 洪天求, 王文圣. 基于熵和 FAHP 的水资源可持续利用模糊综合评价模型[J]. 水力发电学报, 2007, 26(4): 22-28.
JIN Juliang, HONG Tianqiu and WANG Wensheng. Entropy and FAHP based fuzzy comprehensive evaluation model of water resources sustaining utilization. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(4): 22-28. (in Chinese)
- [3] 董四方, 董增川, 陈康宁. 基于 DPSIR 概念模型的水资源系统脆弱性分析[J]. 水资源保护, 2010, 26(4): 1-3+25.
DONG Sifang, DONG Zengchuan and CHEN Kangning. Analysis of water resources system vulnerability based on DPSIR conceptual model. Water Resources Protection, 2010, 26(4): 1-3+25. (in Chinese)
- [4] 陈午, 许新宜, 王红瑞, 等. 基于改进序关系法的北京市水资源可持续利用评价[J]. 自然资源学报, 2015, 30(1): 164-176.

- CHEN Wu, XU Xinyi, WANG Hongrui, et al. The evaluation of water resources sustainable utilization in Beijing based on improved rank correlation analysis. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(1): 164-176. (in Chinese)
- [5] 邓绍云, 邱清华. 西北干旱区域水资源可持续利用评价指标体系的构建[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(1): 300-303.
DENG Shaoyun, QIU Qinghua. Structuring of evaluation index system for sustainable utilization of regional water resources in northwest China. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(1): 300-303. (in Chinese)
- [6] 马雪倩. 黑龙江省水资源可持续利用评价研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
MA Xueqian. Evaluation research on water resources sustainable utilization in Heilongjiang Province. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [7] 王壬. 区域水资源可持续利用评价指标体系构建和评价方法研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2015.
WANG Ren. Study on establishment of indicators system and assessment methods for sustainability of regional water resources use. Fuzhou: Fujian Normal University, 2015. (in Chinese)
- [8] 崔莹. 重庆市水资源可持续利用能力模糊综合评价[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
CUI Ying. Fuzzy comprehensive evaluation on sustainable utilization of water resource in Chongqing. Chongqing: Southwest University, 2017. (in Chinese)
- [9] 龚巧灵. 三峡库区(重庆段)水资源安全利用评价及其调控机制研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
GONG Qiaoling. Utilization evaluation and regulation mechanism of water resources safety in Three Gorges Reservoir area (Chongqing section). Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [10] 王晰哲. 江西省水资源利用效率研究[D]. 南昌: 江西财经大学, 2015.
WANG Xizhe. Research on efficiency of utilization of water resources in Jiangxi Province. Nanchang: Jiangxi University of Finance & Economics, 2015. (in Chinese)
- [11] 李远远, 刘光前. 基于 AHP-熵权法的煤矿生产物流安全评价[J]. *安全与环境学报*, 2015, 15(3): 29-33.
LI Yuanyuan, LIU Guangqian. Research on the safety evaluation of coal mine production logistics based on AHP-entropy method. *Journal of Safety and Environment*, 2015, 15(3): 29-33. (in Chinese)
- [12] 王雪. 基于 AHP-熵权法和模糊数学的城市生态系统健康评价研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
WANG Xue. Urban ecosystem health assessment based on the analytic hierarchy process (AHP)-entropy weight method and the fuzzy mathematic method. Shanghai: East China Normal University, 2016. (in Chinese)
- [13] 皮家骏, 欧阳澍, 张带琴, 等. 基于 PSR-物元模型的水生态文明评价研究——以南昌市为例[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(1): 55-61.
PI Jiajun, OUYANG Shu, ZHANG Daiqin, et al. Water ecological civilization evaluation based on PSR-matter element model: A case study of Nanchang City. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(1): 55-61. (in Chinese)