

# 基于层次分析的安徽省水安全综合评价

汪红洲<sup>1</sup>, 段衍衍<sup>2</sup>, 傅春<sup>1,3</sup>

(1. 南昌大学 建筑工程学院, 南昌 330031; 2. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098;  
3. 南昌大学 中国中部经济社会发展研究中心, 南昌 330047)

**摘要:** 区域水安全是保障区域可持续发展的基础。在考虑水资源特性和安徽省具体情况的基础上, 构建了安徽省水安全综合评价指标体系, 并采用层次分析法对安徽省 2005 年- 2010 年水安全状况进行了评价。结果表明, 2005 年- 2010 年安徽省水资源安全状况分别处于“不安全”和“基本安全”之间, 水安全状况不容乐观。这一结论与集对分析法得出的结果有较好的一致性, 表明基于层次分析的水安全评价方法可行、结论可靠。最后, 从改善水安全状况的角度, 在促进节约、提高水资源利用效率、改善水质等方面提出建议。

**关键词:** 层次分析; 集对分析; 水质; 水量; 经济社会发展; 水生态; 水安全

**中图分类号:** TV213.4; X824 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)01-0037-05

## Water Security Evaluation of Anhui Province Based on Analytic Hierarchy Process

WANG Hongzhou<sup>1</sup>, DUAN Yanyan<sup>2</sup>, FU Chun<sup>1,3</sup>

(1. Civil Engineering College, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. Institute of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. China Central Economic and Social Development Research Center, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

**Abstract:** Regional water security is the basis of protection of the regional sustainable development. Based on the characteristics of water resources and specific situation of Anhui Province, a comprehensive evaluation index system of water security was developed, and AHP was used to evaluate the water security situation of Anhui Province from 2005 to 2010. The results suggested that the water security situation is between "unsafe" and "basically safe" in Anhui Province from 2005 to 2010 and thus water security situation is not optimistic. This conclusion was in coincidence with that determined by the set pair analysis, which indicated that AHP is feasible and reliable for water security evaluation. Finally, from the perspective of improving water security, some recommendations were proposed to promote savings, increase the utilization efficiency of water resources, and improve water quality.

**Key words:** analytic hierarchy process; set pair analysis; water quality; water quantity; economic and social development; water ecosystem; water safety

水是人类生存和发展的必要资源。近年来, 随着经济社会的迅速发展和人口规模的增长, 水资源短缺和水环境问题日益突出, 水安全问题日益引起学术界的重视。韩宇平<sup>[1]</sup>将水安全理解为, 在现在或将来由于自然的水文循环波动或人类的不合理作用, 使得区域水状况对人类社会各个方面产生不利的影响, 这些影响表现为水质污染、干旱、水环境破坏、水量短缺等方面, 并由此可能引发环境恶化、经济下滑、社会动荡以及地区冲突等等。水资源安全问题不仅仅是一个生态环境问题, 同时也是经济问题、社会问题、政治问题, 水安

全直接关系到国家的安全<sup>[2]</sup>。目前, 常见的水安全评价方法有人工神经网络法、模糊理论法、灰色系统理论法等, 但是人工神经网络法比较复杂, 模糊理论中对于隶属度的确定比较主观随意, 灰色系统理论法中的灰色关联分析法则存在评价价值趋于均化、分辨率不高的缺点<sup>[3-4]</sup>。层次分析法(AHP)作为对问题进行定性和定量分析的多层次决策方法, 已经在许多领域有比较成熟的应用<sup>[5-6]</sup>。鉴于此, 本文构建了安徽省水资源安全综合评价指标体系, 采用层次分析法进行了水安全综合评价, 并采用集对分析法对评价结果进行验证。评价

收稿日期: 2013-07-24 修回日期: 2013-11-12 网络出版时间: 2013-12-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3724/SP.J.1201.2014.01035.html>

基金项目: 教育部优秀人才计划(NCET100169)

作者简介: 汪红洲(1987-), 男, 湖北鄂州人, 硕士研究生, 主要从事水资源与水环境研究。E-mail: whz123142@126.com

通讯作者: 傅春(1966-), 女, 江西樟树人, 教授, 博士生导师, 从事资源与环境管理方面研究。E-mail: ccfu@ncu.edu.cn

结果对于改善安徽省水安全状况具有指导意义。

## 1 安徽省水安全评价指标体系

### 1.1 安徽省概况

安徽省地处华东腹地,处于东经 114. 9° - 119. 8° 与北纬 29. 4° - 34. 6° 之间,属于暖温带与亚热带的过渡带,气候多变,年平均降水量由北向南为 770~ 1 770 mm,主要集中在 6 至 9 月,且年际降水量悬殊较大,洪、涝、旱、渍等自然灾害频繁。在全国七大江河中,淮河、长江横贯省境,天然地把全省分为淮北、江淮、江南三大自然区域。全省总面积 13. 9 万 km<sup>2</sup>,辖 17 个地级市,2011 年的常住人口总数 5 968 万,其中农业人口占 77%。按水系分属淮河、长江及新安江三流域。

### 1.2 指标体系的构建

水资源系统是一个包括水资源、水生态、经济社会发展情况的复合系统,水资源评价具有典型的多层次、多指标特征。对水资源安全进行综合评价,必然要考虑社会发展、生态以及水资源的数量和质量等因素的影响及它们之间的相互作用关系<sup>[7]</sup>。由于水安全评价指标的选取,至今没有统一标准<sup>[8-9]</sup>。因此本文在对水安全进行评价时,综合考虑水资源自身特点和安徽省经济社会发展水平,参考相关文献<sup>[10-12]</sup>,遵照科学性、协调性、整体性、可操作性和独立性的原则,运用层次分析法,将研究水资源安全的评价因子分为水质、水量、经济社会发展以及水生态四大类,作为属性层。每一个属性层中又包含了更为详细的二级评价指标,见表 1。

表 1 水安全评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of water security

目标层 A	属性层 B	指标层 C
水安全状况 A	水质状况 B <sub>1</sub>	江河水质 C <sub>1</sub>
		湖泊和大型水库水质 C <sub>2</sub>
		水功能区水质 C <sub>3</sub>
		年入河污水排放量 C <sub>4</sub>
		饮用水源水质达标率 C <sub>5</sub>
	水量状况 B <sub>2</sub>	入境水量 C <sub>6</sub>
		人均水资源量 C <sub>7</sub>
		年降水量 C <sub>8</sub>
		地下水水量 C <sub>9</sub>
		地表水量 C <sub>10</sub>
	经济社会发展状况 B <sub>3</sub>	万元 GDP 用水量 C <sub>11</sub>
		万元工业增加值用水量 C <sub>12</sub>
		人均 GDP C <sub>13</sub>
		工业废水排放达标率 C <sub>14</sub>
		城市污水处理厂集中处理率 C <sub>15</sub>
	水生态状况 B <sub>4</sub>	生态用水量 C <sub>16</sub>
		森林覆盖率 C <sub>17</sub>
		突发水污染次数 C <sub>18</sub>

## 2 指标权重的确定及一致性检验

### 2.1 构造判断矩阵

根据确定的水安全评价指标体系,运用层次分析法来计

算各指标的权重。采用专家咨询的方法对同一层次的各项关于上一层中某一准则的重要性进行两两比较,并按照 9 位标度法给出判断,将其数值按矩阵的形式表示出来,即可构成判断矩阵。判断矩阵中一个因素对另一个因素的相对重要性分为同样重要、稍微重要、比较重要等,以此类推。

按照 9 位标度法构造判断矩阵时,水量因素比经济社会因素的重要程度为 3,即矩阵 A 的元素  $a_{23}$  数值为 3,由于水质和水生态对于一个地区水安全的重要性同样重要,因此构造的判断矩阵中水质因素比水生态因素的重要程度为 1,即  $a_{14}$  和  $a_{41}$  数值均为 1,同理依次进行其他因素间的重要性判断,可以构造出如下判断矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 3 & 2 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{2} \\ 1 & \frac{1}{2} & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \frac{1}{2} & 2 & \frac{1}{3} \\ 1 & 1 & \frac{1}{2} & 2 & \frac{1}{3} \\ 2 & 2 & 1 & 3 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{4} \\ 3 & 3 & 2 & 4 & 1 \end{bmatrix}$$

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

$$B_4 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} \\ 3 & 1 & 2 \\ 2 & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

### 2.2 计算权重及一致性检验

对于所得到的判断矩阵,需检验其一致性(即满足  $CR < 0. 1$ ),如果不满足一致性,则需要重新构造判断矩阵,直至满意。经过计算,矩阵 A、B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>、B<sub>4</sub> 均有满意的一致性,可得到矩阵 A 的权向量  $W_1 = (0. 227 4, 0. 423 1, 0. 122 2, 0. 227 4)$ , 矩阵 B<sub>1</sub> 的权向量  $W_2 = (0. 137 2, 0. 137 2, 0. 244 6, 0. 078 8, 0. 402 1)$ , 矩阵 B<sub>2</sub> 的权向量  $W_3 = (0. 120 9, 0. 477 4, 0. 120 9, 0. 070 3, 0. 210 5)$ , 矩阵 B<sub>3</sub> 的权向量  $W_4 = (0. 143 4, 0. 143 4, 0. 058 3, 0. 405 2, 0. 249 7)$ , 矩阵 B<sub>4</sub> 的权向量  $W_5 = (0. 163 4, 0. 539 6, 0. 297)$ 。根据得到的权向量值,将  $W_1$  分别与  $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$ 、 $W_5$  相乘,可得到指标层 C 每个指标相对于目标层 A 的权重,见表 2。

由表 2 可看出,人均水资源量的权重最大,为 0. 202 0,其次分别是森林覆盖率、饮用水源水质达标情况、地表水量、突发水污染次数,这五个指标权重占总权重的 57%。

## 3 水安全综合评价

### 3.1 原始数据标准化

参考安徽省统计年鉴(2005 年- 2010 年)、安徽省水资

表2 安徽省水安全综合评价各指标权重

Table 2 The weights of each index

in the water security evaluation index system of Anhui province

指标编号	权重	指标编号	权重
C <sub>1</sub>	0.031 2	C <sub>10</sub>	0.089 1
C <sub>2</sub>	0.031 2	C <sub>11</sub>	0.017 5
C <sub>3</sub>	0.055 6	C <sub>12</sub>	0.017 5
C <sub>4</sub>	0.017 9	C <sub>13</sub>	0.007 1
C <sub>5</sub>	0.091 4	C <sub>14</sub>	0.049 5
C <sub>6</sub>	0.051 2	C <sub>15</sub>	0.030 5
C <sub>7</sub>	0.202 0	C <sub>16</sub>	0.037 1
C <sub>8</sub>	0.051 2	C <sub>17</sub>	0.122 7
C <sub>9</sub>	0.029 8	C <sub>18</sub>	0.067 5

源公报(2005年-2010年)以及安徽省相关网站,得到安徽省2005年-2010年各指标数据原始值,对数据进行标准化处理。在评价指标体系中,有的指标数值对于方案评价来说是越大越优,这类指标称为正向指标,有的指标值则是越小越优,这类指标被称为逆向指标,参考李祚泳<sup>[13]</sup>的方法对正向和逆向指标分别进行标准化处理。

对正向指标,标准化公式为:

$$I_i = \begin{cases} 0 & (x_i < x_{im}) \\ \frac{x_i - x_{im}}{x_{im} - x_{im}} & (x_{im} \leq x_i \leq x_{im}) \\ 1 & (x_i > x_{im}) \end{cases} \quad (1)$$

对逆向指标,标准化公式为:

$$I_i = \begin{cases} 1 & (x_i < x_{im}) \\ 1 - \frac{x_i - x_{im}}{x_{im} - x_{im}} & (x_{im} \leq x_i \leq x_{im}) \\ 0 & (x_i > x_{im}) \end{cases} \quad (2)$$

上面两式中, $x_i$ 为第*i*个指标的实际值, $x_{im}$ 、 $x_{im}$ 分别为指标*i*设置的极小值和极大值。参考李祚泳等<sup>[13]</sup>设置饮用水源水质达标率等指标的极小和极大值,参考刘昕<sup>[14]</sup>、丁恒康等<sup>[15]</sup>设置人均水资源量、人均GDP、年降水量等指标的极小和极大值,参考黄英等<sup>[16]</sup>设置工业废水排放达标率、万元工业增加值用水量、生态用水量、森林覆盖率等指标的极小和极大值,其余指标的极大值和极小值则根据安徽省历年数据选取。因而,可得到各数据的标准化值见表3。

### 3.2 评价结果及等级划分

各指标值在其极大极小值范围内存在着一些特殊值(或临界值),临界值两侧反映了不同的水安全状况或者属性。临界值的确定是水安全评价中的关键技术之一<sup>[17]</sup>。本文参考相关文献<sup>[13-16]</sup>并结合安徽省的具体情况,为各指标确定了四个临界值。根据四个临界值组成的样本模型的计算结果可以将水安全状况划分为五个安全级别,依次为:特别安全、安全、基本安全、不安全、危机。判别标准如下:

$$R = \begin{cases} I_i \geq I_1 & \text{特别安全} \\ I_2 \leq I_i \leq I_1 & \text{安全} \\ I_3 \leq I_i \leq I_2 & \text{基本安全} \\ I_4 \leq I_i < I_3 & \text{不安全} \\ I_i < I_4 & \text{危机} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $I_4$ 分别为临界值1、临界值2、临界值3、临界

表3 各指标数据标准化值

Table 3 The standardization values of each index

指标层 C	数据标准化值					
	2005	2006	2007	2008	2009	2010
C <sub>1</sub>	0.400 8	0.551 2	0.556 6	0.596 2	0.602 4	0.640 5
C <sub>2</sub>	0.731 9	0.716 4	0.701 7	0.713 6	0.724 4	0.766 0
C <sub>3</sub>	0.495 2	0.562 8	0.541 9	0.599 0	0.613 5	0.657 3
C <sub>4</sub> /10 <sup>8</sup> t	0.429 0	0.475 3	0.381 7	0.452 3	0.404 7	0.463 0
C <sub>5</sub> (%)	0.910 0	0.190 0	0.370 0	0.430 0	0.655 0	0.670 0
C <sub>6</sub> /10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	0.416 8	0.194 5	0.287 8	0.336 7	0.276 6	0.522 3
C <sub>7</sub> /m <sup>3</sup>	0.181 6	0.128 6	0.189 9	0.182 8	0.198 8	0.308 1
C <sub>8</sub> /mm	0.708 3	0.569 0	0.674 3	0.646 0	0.694 0	0.808 9
C <sub>9</sub> /10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	0.323 1	0.242 5	0.293 0	0.284 6	0.301 0	0.328 5
C <sub>10</sub> /10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	0.310 2	0.194 0	0.305 1	0.293 2	0.321 6	0.480 2
C <sub>11</sub> /m <sup>3</sup>	0.253 1	0.249 1	0.431 3	0.469 3	0.466 0	0.581 1
C <sub>12</sub> /m <sup>3</sup>	0.290 9	0.319 6	0.471 3	0.566 9	0.605 3	0.741 6
C <sub>13</sub> /元	0.109 6	0.166 5	0.251 7	0.352 0	0.433 7	0.620 3
C <sub>14</sub> (%)	0.935 0	0.927 5	0.870 0	0.905 0	0.905 0	0.950
C <sub>15</sub> (%)	0.078 9	0.163 5	0.320 9	0.483 0	0.530 0	0.644 8
C <sub>16</sub> /10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	0.061 7	0.073 3	0.100 0	0.105 0	0.156 7	0.216 7
C <sub>17</sub> (%)	0.321 2	0.321 2	0.321 2	0.321 2	0.321 2	0.350 6
C <sub>18</sub> /次	0.133 3	0.733 3	0.333 3	0.600 0	0.400 0	0.533 3

值4对应的模型计算结果, $I_i$ 则是评价区域的实际计算结果。

根据得到的各指标标准化值和权重,可得到2005年-2010年水安全评价得分(表4)。从表中可以看出,安徽省的水安全评价价值最小为0.34(2006年),最大为0.51(2010年),根据公式(3)可判别2005年-2010年的评价等级见表4。

表4 安徽省2005年-2010年水安全评价结果

Table 4 The water security evaluation results of Anhui province from 2005 to 2010

指标	年份					
	2005	2006	2007	2008	2009	2010
水质	0.15	0.10	0.11	0.12	0.14	0.15
水量	0.13	0.09	0.12	0.12	0.13	0.18
经济社会发展	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09
水生态	0.05	0.09	0.07	0.08	0.07	0.09
综合	0.39	0.34	0.37	0.40	0.42	0.51
评价等级	不安全	不安全	不安全	基本安全	基本安全	基本安全

### 3.3 集对分析法对评价结果的验证

集对分析方法是我国赵克勤在1989年提出的将确定性与不确定性相结合,用于分析两者间不确定性关系的新方法。目前该方法在自然科学、社会科学和工程技术等领域都得到了广泛的应用<sup>[18]</sup>。本文采用五元联系数进行定量分析并采用置信度准则式来判别评价对象等级。先确定各指标分级标准,然后依据表2各属性层中各指标的权重,计算各属性层的联系数,见表5。

取置信度为0.65,则各属性层评价结果见表6。根据各属性权重,计算得出安徽省水安全状况,见表6。对比两种方法的评价结果(表4和表6),除2008年有所不同以外,其他年份完全一样,考虑到指标权重、指标临界值以及极大极小

表5 各属性层联系数

Table 5 Connection numbers of each attribute layer

属性层	指标	2005	2006	2007	2008	2009	2010
水质	a	0.446	0.023	0.002	0.019	0.130	0.235
	b	0.093	0.227	0.225	0.394	0.618	0.568
	c	0.370	0.447	0.737	0.576	0.229	0.188
	d	0.091	0.303	0.036	0.011	0.023	0.009
	e	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
水量	a	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	b	0.072	0.024	0.060	0.050	0.067	0.132
	c	0.294	0.148	0.255	0.266	0.268	0.525
	d	0.634	0.709	0.685	0.684	0.665	0.343
	e	0.000	0.119	0.000	0.000	0.000	0.000
经济社会发展	a	0.405	0.405	0.405	0.405	0.405	0.405
	b	0.000	0.000	0.000	0.029	0.075	0.304
	c	0.091	0.090	0.331	0.510	0.493	0.290
	d	0.235	0.332	0.264	0.056	0.026	0.000
	e	0.270	0.173	0.000	0.000	0.000	0.000
水生态	a	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	b	0.000	0.208	0.000	0.089	0.000	0.030
	c	0.218	0.307	0.366	0.426	0.426	0.563
	d	0.620	0.393	0.568	0.425	0.564	0.408
	e	0.162	0.092	0.065	0.060	0.010	0.000

值的设置均会对结果产生一定影响,可以认为两种方法的结果有较好的一致性,因此,层次分析的评价结果是可信的。

表6 集对分析评价结果

Table 6 Evaluation results of set pair analysis

年份	水质	水量	经济社会	水生态	综合	评价结果
2005	0	0	0	0	0	不安全
2006	0	0	0	0	0	不安全
2007	0	0	0	0	0	不安全
2008	0	0	0	0	0	不安全
2009	0	0	0	0	0	基本安全
2010	0	0	0	0	0	基本安全

### 3.4 结果分析

根据层次分析法得到的2005年-2010年安徽省水安全评价结果,可以得到水质、水量、经济社会发展、水生态各属性的变化特点,见图1。2005年-2010年这6年中,安徽省水安全总体状况自2006年起逐年改善,评价得分逐步上升,2010年得分最高。其中:水质方面,2006年得分最低,2005和2010年得分最高;水量方面,2006年得分最低,原因是年降水量、入境水量、地表水量等均低于多年平均值;经济社会发展方面,随着政府的重视以及企业节水投入的增加,用水效益成果显著,得分一直呈稳步上升趋势;水生态方面,虽然生态用水量 and 森林覆盖率等指标数据近年来有小幅提升,但由于突发水污染次数较多且变数大,导致水生态总体得分较低而且波动较大。

## 4 改善水安全状况的建议

影响安徽省水安全状况的主要因素有人均水资源量、森林覆盖率、饮用水水质达标情况、地表水量等,此外,安徽

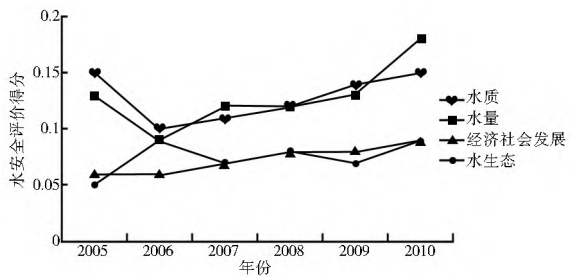


图1 安徽省2005年-2010年水安全评价各属性层结果

Fig. 1 Water security evaluation results of each attribute layer in Anhui Province from 2005 to 2010

省水安全状况还受到年降水量、政府对生态环境保护的投入等因素的影响。根据安徽省的实际情况,建议采取如下措施。

(1) 倡导节约用水的社会风气。借助网络、电视、报纸等各种工具,加强节水宣传力度,让人们持续关注水环境污染、水资源短缺以及洪涝、旱灾等各种水安全问题,积极引导全社会形成节约用水合理用水的良好风尚。

(2) 推广节水技术与节水设施。在全国范围来看,安徽省人均水资源量偏低,远不能满足全省用水总量,而且每年降水量波动较大,对水量的依赖较大。在提高全民节水意识的基础上,应加大节水技术改造力度,大力推广使用节水设施。

(3) 加强水利基础设施建设。作为农业大省,安徽省的农业灌溉用水量较大。一方面要加大对水库新建、续建、加固的力度,提高其蓄水能力,另一方面要对农业灌溉配套设施进行升级换代,做好“最后一公里”建设,提高灌溉能力,使灌溉用水效益最大化。同时,继续深入推进“两大民生水利工程”,切实解决农村人口饮水安全问题,全面推进水库除险加固工作。

(4) 提高污水处理能力,控制污水排放量。工业废水和生活污水的排放对水质均有很大影响,从历年数据可知,城市污水集中处理率和年入河污水排放量控制还有很大提升空间。对于高耗水行业,加强市场干预,可以适当提高用水收费,同时积极研究开发和推广中水回用技术,提高水资源利用率;对于高污染企业的达标排放实行“谁污染,谁治理”的原则;对于排污不达标企业征收高额污水处理费,淘汰污染严重的落后工艺;加强法制管理,对于偷排不达标废水的企业应予以严惩。

(5) 加强生态建设。积极推进流域水生态保护与修复,加大水土保持工作力度,稳步提高森林覆盖率。使水资源安全状况和经济社会发展相协调,既要高效利用,科学管理,还要加大投入,未雨绸缪。

### 参考文献(References):

- [1] 韩宇平,阮本清.区域水安全评价指标体系初步研究[J].环境科学学报,2003,23(2):267-272. (HAN Yur ping, RUAN Benqing. Research on Evaluation Index System of Water Safety [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, 23(2): 267-272. (in Chinese))
- [2] 王小民.二十一世纪的水安全[J].社会科学,2001,(2):25-29. (WANG Xiaomin. Water Security in the 21st Century [J]. Journal of Social Sciences, 2001, (2): 25-29. (in Chinese))
- [3] 尹志杰,管玉卉.南京市水资源安全综合评价方法研究[J].水

- 电能源科学, 2010, 28(6): 16-18. (YIN Zhi jie, GUAN Yur hui. Research on Comprehensive Evaluation Method of Water Resources Security in Nanjing City[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(6): 16-18. (in Chinese))
- [4] 许成娟, 梁川. 昆明市松华坝水源保护区水资源安全综合评价[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(1): 161-165. (XU Chengjuan, LIANG Chuan. Comprehensive Water quality Security Evaluation of Songhuaba Water resource Protection Zone in Kunming[J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(1): 161-165. (in Chinese))
- [5] 张臻, 王龙昌, 杨松, 等. 基于 AHP 法的四川省水资源可持续利用综合评价[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 213-218. (ZHANG Zhen, WANG Longchang, YANG Song, et al. Study on the AHP Comprehensive Evaluation of Sustainable Water Resources Utilization of Sichuan Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(4): 213-218. (in Chinese))
- [6] 曾现进, 李天宏, 温晓玲. 基于 AHP 和向量模法的宜昌市水环境承载力研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(6): 200-205. (ZENG Xianjin, LI Tianhong, WEN Xiaoling. Analysis on Carrying Capacity of Water Environment in Yichang City Based on AHP and Vector Norm Method[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(6): 200-205. (in Chinese))
- [7] 贡力. 基于 WPI 的水安全评价体系研究[J]. 中国农村水利水电, 2010, (9): 4-7. (GONG Li. Evaluation System of Water Security Based on Water Poverty Index[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010, (9): 4-7. (in Chinese))
- [8] 孙毓蔓, 夏乐天, 王春燕. 基于主成分分析的南京市水资源承载力研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(10): 74-75. (SUN Yurman, XIA Letian, WANG Chunyan. Nanjing Water Resources Carrying Capacity Research Based on Principal Component Analysis[J]. Yellow River, 2010, 32(10): 74-75. (in Chinese))
- [9] 邵东国, 杨丰顺, 刘玉龙, 等. 城市水安全指数及其评价标准[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(1): 122-126. (SHAO Dongguo, YANG Fengshun, LIU Yulong, et al. Urban Water Security Index and Its Evaluation Criterion[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(1): 122-126. (in Chinese))
- [10] 史正涛, 刘新有. 城市水安全研究进展与发展趋势[J]. 城市规划, 2008, 32(7): 82-87. (SHI Zhengtao, LIU Xinyou. Progress and Trend in Urban Water Safety Study[J]. City Planning Review, 2008, 32(7): 82-87. (in Chinese))
- [11] 王淑云, 刘恒, 耿雷华, 等. 水安全评价研究综述[J]. 人民黄河, 2009, 31(7): 11-13. (WANG Shuyun, LIU Heng, GENG Leihua, et al. Research Review of Water Security Assessment[J]. Yellow River, 2009, 31(7): 11-13. (in Chinese))
- [12] 史正涛, 刘新有, 黄英, 等. 基于边际效益递减原理的城市水安全评价方法[J]. 水利学报, 2010, 41(5): 545-552. (SHI Zhengtao, LIU Xinyou, HUANG Ying, et al. Evaluation Method for Urban Water Safety Based on Law of Diminishing Marginal Utility[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(5): 545-552. (in Chinese))
- [13] 李祚泳, 汪嘉杨, 王文圣, 等. 基于广义对比加权的水安全综合指数评价[J]. 水资源保护, 2009, 25(4): 5-11. (LI Zuoyong, WANG Jiayang, WANG Wensheng, et al. Comprehensive Index Assessment Method of Water Safety Based on Weighted Method with Generalized contrast[J]. Water Resources Protection, 2009, 25(4): 5-11. (in Chinese))
- [14] 刘昕. 区域水安全评价模型及应用研究[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2011. (LIU Xin. Research on Regional Water Security Assessment Model and Its Application[D]. Shanxi: Northwest Agriculture and Forestry University of Science and Technology, 2011. (in Chinese))
- [15] 丁恒康, 李祚泳, 汪嘉杨. 基于熵变加权法的水安全综合指数评价[J]. 成都信息工程学院学报, 2010, 25(3): 312-316. (DING Hengkang, LI Zuoyong, WANG Jiayang. Comprehensive Index Assessment of Water Safety Based on Entropy Weight Coefficient Method[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2010, 25(3): 312-316. (in Chinese))
- [16] 黄英, 刘新有, 史正涛, 等. 复杂系统评价指标的评价方法研究——以城市水安全为例[J]. 水文, 2009, 29(2): 45-49. (HUANG Ying, LIU Xinyou, SHI Zhengtao, et al. Study on Assessment Methods of Evaluate Indexes for Complex System: Taking Urban Water Safety as Case[J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(2): 45-49. (in Chinese))
- [17] 高媛媛, 王红瑞, 许新宜, 等. 水资源安全评价模型构建与应用——以福建省泉州市为例[J]. 自然资源学报, 2012, 27(2): 204-214. (GAO Yuanyuan, WANG Hongrui, XU Xinyi, et al. Assessment of Water Resources Security —Case of Quanzhou City in Fujian Province[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(2): 204-214. (in Chinese))
- [18] 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 Keqin. Set Pair Analysis and Its Preliminary Application[M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2000. (in Chinese))

(上接第 41 页)

- Precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 519-531. (in Chinese))
- [20] Xu Yueqing, Li Shuangcheng, Cai Yunlong. Wavelet Analysis of Rainfall Variation in the Hebei Plain[J]. Science in China Ser. D Earth Sciences, 2005, 48(12): 2241-2250.
- [21] Mathevet T, Leppiller M, Mangin A. Application of Time series Analyses to the Hydrological Functioning of an Alpine Karstic System: The Case of Bange L'Éclair Morté [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2004, 8(6): 1051-1064.
- [22] 郭慧芳. 基于小波分析的径流中长期预报模型研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2007. (GUO Huirang. Study of Long term Ruffoff Forecast Model Based on Wavelet Transform[J]. Zhengzhou: Zhengzhou University. (in Chinese))