

# 多层次灰色关联模型在黄河相关省区火电行业用水定额评估中的应用

韩金旭<sup>1</sup>, 王若禹<sup>2</sup>, 焦 军<sup>3</sup>, 刘姝芳<sup>1</sup>, 张 丹<sup>1</sup>

(1.黄河水利委员会黄河水利科学研究院,河南 郑州 450003; 2.华北水利水电大学,河南 郑州 450045;  
3.中水淮河规划设计研究有限公司,安徽 合肥 230601)

**摘 要:**为科学合理地评估黄河流域相关省区用水定额,以火电行业为例,根据国家、行业有关标准及准入条件、实测数据资料等,基于多层次灰色关联理论建立评价模型,给出了模型结构、评价指标及相关参数的确定方法。评估结果表明,山西省火电行业用水定额评价结果最优,内蒙古、山东和甘肃用水定额较为合理。

**关键词:**沿黄省区;用水定额;火电;评估;灰色关联

**中图分类号:**TV213.9

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2019)02-0055-06

用水定额管理是开展计划用水,实行水资源有偿使用与取水许可制度的基础,也是落实“节水优先”方针,推动国家节水行动的重要抓手<sup>[1-2]</sup>。用水定额是一个动态指标,其制定、完善和实施也是一个随着经济社会发展而不断调整的动态过程。建立行之有效的用水定额评估、评价体系是规范用水定额编制、强化用水定额管理的基础性工作。目前,用水定额评估尚处于起步阶段,因涉及因素较多,单一指标法往往难以准确表达。国内部分学者采用多指标评价法<sup>[3]</sup>、投影寻踪法<sup>[4-5]</sup>、模糊评价法<sup>[6]</sup>、云模型<sup>[7]</sup>等对区域或重点行业用水定额评估进行了有益的尝试,取得了一定的成果。灰色系统理论中的关联度分析是明晰系统中多因素关联程度的有效方法,基于灰色理论的多层次分析模型可以较好的解决多指标评价问题,是对用水定额评估方法的有益探索。

黄河流域属于我国重要能源生产基地,火电行业发展迅速。目前,沿黄各省区发布的《用(取)水定额》均已涵盖火电行业。以火电行业为重点,运用多层次灰色关联模型从用水定额的覆盖性、合理性、先进性和实用性等方面构建指标体系,全面评估各省区火电行业用水定额,对落实最严格水资源管理制度,推动节水型社

会建设等具有重要的现实意义。

## 1 火电行业用水定额

### 1.1 火电行业用水定额指标

根据《取水定额》(GB/T 18916-2012),火电行业用水定额主要采用单位发电用水量、单位装机容量用水量两个指标进行评价<sup>[8]</sup>。

(1)单位发电用水量: $V_u = V_i / Q$

式中: $V_u$ 为单位发电量用水量, $\text{m}^3/(\text{MW} \cdot \text{h})$ ;  $V_i$ 为在一定计量时间内,生产过程中用水量总和, $\text{m}^3$ ;  $Q$ 为在一定计量时间内的发电量, $\text{MW} \cdot \text{h}$ 。

(2)单位装机容量用水量: $V_c = V_h / N$

式中: $V_c$ 为单位装机容量用水量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{GW})$ ;  $V_h$ 为夏季纯凝工况(频率为10%的日平均气象条件下)机组满负荷运行的单位时间用水量, $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $N$ 为装机容量, GW。

### 1.2 资料样本

全面搜集沿黄8省区(不含四川,下同)用(取)水定额标准、火电行业国家标准、行业准入条件及有关定额作为评估的主要数据基础。搜集整理沿黄8省区近年水资源论证、水平衡测试报告及有关批复148

收稿日期:2018-07-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0403604);中央科研院所基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2016-02, HKY-JBYW-2017-13)

作者简介:韩金旭(1984-),男,天津武清人,硕士,工程师,主要从事水资源管理、节水灌溉理论与水资源高效利用研究工作。E-mail:hanjinxu1984@126.com

份,其中热电联产项目 55 个,纯发电项目 93 个;按工艺划分,湿式冷却项目 64 个,空冷项目 84 个。此外,搜集黄河 8 省区火电行业能效对标基础数据,机组共计 385 台,其中 100~225MW 机组 43 台,300MW 级机组 204 台,600MW 级及以上机组 138 台。

以黄河 8 省区火电行业用水定额作为评估对象,搜集火电行业国家、行业及部门标准及准入条件等构建参比系列,对已建电厂实测运行资料和新建电厂取水许可审批结果进行分类整理,分区域、工艺计算火电行业运行水耗指标作为定额评估的数据基础。

2 评价方法与指标体系的建立

用水定额评价涉及定额制定、应用、修订等诸多内容,运用层次分析法构建评价体系。其中,目标层为用水定额综合评估,准则层包含定额覆盖性评估、合理性评估、先进性评估和实用性评估等 4 项,指标层包括规模及工艺技术的覆盖情况、分类分级情况及应用情况等 17 个指标(见表 1)。

3 多层次灰色关联模型的建立

3.1 确定各层次权重

(1)指标层权重确定

设系统有  $m$  个方案,方案中有  $n$  个特征值,则可建立相应的指标特征矩阵,即:

$$X_{n \times m} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中: $x_{ij}$  为方案  $j$  指标  $i$  的特征值, $i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m$ 。

指标层权重经专家调查法,利用落影公式确定各指标重要程度的覆盖频率:

$$\bar{x}(u_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m x_{pi}(u_i) \tag{2}$$

式中: $x_{pi}(u_i) = \begin{cases} 1, u_i \in P \\ 0, \text{其他} \end{cases}$  为特征函数; $\bar{x}(u_i)$  为样本落影函数; $P_i$  为对第  $i$  个指标的样本集。

为使数据具有可比性,对各指标覆盖频率进行格式化处理得出权重:

$$w_i = \frac{x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (i=1,2,\cdots,n) \tag{3}$$

经上式计算即可得该子体系指标权重向量  $\{w_1,$

$w_2, \cdots, w_n\}$ ,显然  $\sum w_i=1$ 。

(2)准则层权重确定

准则层权重确定过程中,专家对指标两两比较,构造判断矩阵  $B = \{b_{ij}\}_{n \times n}$ 。 $b_{ij}$  表示  $b_i$  对  $b_j$  的相对重要

表1 火电行业用水定额综合评价指标描述及层次划分

Table1 Comprehensive evaluation index description and hierarchy division of water consumption quota in thermal power industry

目标层	准则层	指标层	指标描述
用水定额合理性 评估(A)	覆盖性(B1)	产品类型覆盖情况(B11)	是否包含发电、热电联产等产品类型
		工艺类型覆盖情况(B12)	是否包含湿、空冷等主要的冷却方式
		规模类型覆盖情况(B13)	是否包含区域火电主要的规模类型
		指标覆盖情况(B14)	是否包含《取水定额》规定的主要指标
	合理性(B2)	与计算定额比较(B21)	定额严格/宽松于流域上中下游计算用水定额
		定额编制依据(B22)	是否依据实际调查和抽样分析方式制定
		定额行业划分(B23)	是否依据《国民经济行业分类与代码》进行行业划分
		与现行国家定额相符性(B24)	定额严于/宽松于国家现行定额标准
	先进性(B3)	定额分级情况(B25)	是否制定通用和先进定额
		定期修改情况(B26)	是否每 3~5 年按期修订
		用水定额与评价系列比较情况(B31)	定额在评价系列中的位置
		用水指标先进程度(B32)	实际电厂用水指标达到定额要求情况
	实用性(B4)	其他用水效率指标制定情况(B33)	调节系数、重复利用率等参数设定情况
		与上一版定额相比的改进情况(B34)	覆盖性及指标合理性较上一版改进情况
		在取水许可与审批中的应用情况(B41)	
		在取水计划制定与考核中应用情况(B42)	
		在节约用水管理方面的应用情况(B43)	

程度,一般取 $1,2,\cdots,9$ 及其倒数,如 $b_{ij}=3$ 表示 $b_i$ 比 $b_j$ 重要一点,且 $b_{ji}=1/3$ ,以此类推。确定判断矩阵后,指标权重如下计算:

(1)计算判断矩阵每一行元素的乘积 $P_i$ :

$$P_i=\prod_{j=1}^n b_{ij} \quad (i=1,2,\cdots,n) \tag{4}$$

(2)计算 $P_i$ 的 $n$ 次方根 $D_{ni};D_{ni}=\sqrt[n]{P_i}$

$$\tag{5}$$

(3)权重计算。对向量 $D_{ni}$ 归一化,即可得到权重值:

$$w_i=D_{ni}/\sum_{i=1}^n D_{ni} \tag{6}$$

(4)一致性检验。判断矩阵的偏差一致性指标:

$$CI=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1} \tag{7}$$

式中: $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征根:

$$\lambda_{\max}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n\frac{(B\cdot D_{ni})_i}{D_{ni}}$$

(5)随机一致性比率: $CR=CI/RI$  (8)

式中: $RI$ 为平均随机一致性指标,可按表2采用。 $CR<0.10$ 则满足一致性要求,否则应调整判断矩阵直至满足该条件为止。

表2 平均随机一致性指标 $RI$ 值  
Table2 The values of average random consistency index

阶数 $n$	1	2	3	4	5	6	7	8
$RI$	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41

3.2 确定指标灰色关联系数

(1)指标特征矩阵标准化

用水定额综合评价指标为混合型指标,指标量纲难以统一,需对其进行标准化处理:

$$y_{ij}=\frac{x_{ij}}{x_{i\max}}$$

(9)

式中: $y_{ij}$ 为标准化指标; $x_{ij}$ 为指标初始值; $x_{i\max}$ 为同一指标中最大值。

标准化后,可建立相对隶属度矩阵:

$$Y_{n\times m}=\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nm} \end{bmatrix}=(y_{ij})_{n\times m} \tag{10}$$

按上述规则规范化后,最优指标集为一维单位向量 $Y_0=(1,1,\cdots,1)^T$ ,个数 $m$ 由指标数确定。

(2)确定指标灰色关联系数

将最优指标集 $Y_0=(y_{10},y_{20},\cdots,y_{n0})^T$ 作为参考数据列,评价指标集 $Y_j=(y_{1j},y_{2j},\cdots,y_{nj})^T(j=1,\cdots,m)$ 作为被比较数据列,则可用式(11)求得第 $i$ 个方案第 $j$ 个指标与第 $j$ 个最优指标的关联系数 $\mu_{ij}$ :

$$\mu_{ij}=\frac{\min_i\min_j|y_{i0}-y_{ij}|+\xi\max_i\max_j|y_{i0}-y_{ij}|}{|y_{i0}-y_{ij}|+\xi\max_i\max_j|y_{i0}-y_{ij}|} \tag{11}$$

记 $m=\min_i\min_j|y_{i0}-y_{ij}|$ ,根据式(9)确定的相对隶属度矩阵和最优指标集可知 $m=0$ 。则:

$$\mu_{ij}=\frac{\xi\max_i\max_j|1.0-y_{ij}|}{|1.0-y_{ij}|+\xi\max_i\max_j|1.0-y_{ij}|} \tag{12}$$

式中:分辨系数 $\xi\in[0,1]$ ,一般取 $\xi=0.5$ 。

3.3 建立多层次灰关联评价模型

综合评价结果矩阵为: $R=W\times U$  (13)

式中: $R=(r_1,r_2,\cdots,r_n)$ 为 $n$ 个方案综合评价结果矩阵,其中 $r_j=\sum_{i=1}^n(w_i\cdot\mu_{ij})$ 表示第 $j$ 个方案的评判结果;

$W=(w_1,w_2,\cdots,w_m)$ 为 $m$ 个评判指标权重分配矩阵; $U=\{(\mu_{ij})_{n\times m}\}$ 为各指标关联系数矩阵。

根据评价矩阵,先计算出准则层的综合评价系数 $\{R_1,R_2,R_3,R_4\}$ 。将准则层评判结果构成目标层的评判矩阵,重复前述评判过程,即可求得最终评判结果。

4 模型应用

4.1 计算评价指标权重

选取5位具有相等权重的同领域专家对指标层各指标重要程度进行评价,依据式(1)~(3)确定各指标权重为 $w_1=(0.2,0.3,0.3,0.2),w_2=(0.3,0.1,0.1,0.2,0.1,0.2),w_3=(0.25,0.25,0.25,0.25),w_4=(0.4,0.3,0.3)$ 。准则层权重依据专家赋值结果,按式(4)~(8)得到判断矩阵并计算权重如表3所示,偏差一致性指标 $CR<0.1$ ,判断矩阵满足一致性要求。

表3 准则层判断矩阵及指标权重计算  
Table3 The criterion level judgment matrix and index weight calculation

指标	覆盖性 评估	合理性 评估	先进性 评估	实用性 评估	权重 $M$
覆盖性评估	1	1/2	2	4	0.30
合理性评估	2	1	2	4	0.43
先进性评估	1/2	1/2	1	2	0.18
实用性评估	1/4	1/4	1/2	1	0.09
$\lambda_{\max}=4.06 \quad CI=0.02 \quad RI=0.90 \quad CR=0.022<0.1$					

4.2 指标量化及关联系数计算

根据评价体系确定的指标属性，对能够通过统计资料量化的指标根据调查资料进行分化统计，计算得出满足判断条件占总判断条件的百分比为该指标取值，一个条件都不满足为最差，赋值为 0，所有条件都满足为最优，赋值为 1。定性指标采用专家区间评分法

量化，对各专家的打分结果进行加权平均得到定性指标的定量值。篇幅所限，以覆盖性为例各评估指标量化评价过程见表 4。

统计各分项指标得分，依据式(9)~(10)计算各评价指标标准化后相对隶属度及最优指标集，按式(11)~(12)计算各指标灰色关联系数如表 5 所示。

表4 覆盖性评估二级指标得分情况  
Table4 The scores of the secondary indicators in coverage assessment

指标	内容	指标相符性							
		青海	甘肃	宁夏	内蒙古	陕西	山西	河南	山东
产品类型覆盖情况 B11	纯发电	√	√	√	√	√	√	√	√
	供热	√	×	√	√	√	√	√	√
	指标值	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	直流冷却	—	—	—	—	—	—	√	√
工艺类型覆盖情况 B12	循环冷却	√	√	√	√	√	√	√	√
	空冷	√	√	√	√	√	√	×	√
	指标值	1	1	1	1	1	1	0.66	1
	<300MW	√	√	√	√	√	√	√	√
规模类型覆盖情况 B13	300~600MW	√	√	√	√	√	√	√	√
	600~100MW	×	×	√	√	×	√	×	×
	≥1000MW	×	×	√	√	×	√	×	×
	指标值	0.5	0.5	1	1	0.5	1	0.5	0.5
定额指标覆盖情况 B14	单位装机容量取水量(m³/s.GW)	√	√	√	√	√	√	×	×
	单位发电量取水量(m³/MW.h)	√	√	×	√	√	√	√	√
	指标值	1	1	0.5	1	1	0.5	0.5	0.5

注：表中“√”表示定额中该指标满足要求，“×”表示定额中该指标不满足要求，“—”表示该指标在该区域不做评价要求。

表5 二级评价指标相对隶属度和灰色关联系数计算结果  
Table5 The relative membership degree and grey correlation coefficient of the secondary evaluation index

准则层	指标代码	最优指标(Y <sub>0</sub> )	标准化指标得分(y <sub>ij</sub> )								权重(W)	灰色关联系数(μ <sub>ij</sub> )							
			青海	甘肃	宁夏	内蒙古	陕西	山西	河南	山东		青海	甘肃	宁夏	内蒙古	陕西	山西	河南	山东
覆盖性	B11	1	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.2	1.00	0.33	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	B12	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.66	1.00	0.3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.42	1.00
	B13	1	0.50	0.50	1.00	1.00	0.50	1.00	0.50	0.50	0.3	0.33	0.33	1.00	1.00	0.33	1.00	0.33	0.33
	B14	1	1.00	1.00	0.50	1.00	1.00	1.00	0.50	0.50	0.2	1.00	1.00	0.33	1.00	1.00	0.33	0.33	0.33
	B21	1	0.33	0.60	0.00	0.50	0.00	1.00	0.67	0.67	0.3	0.43	0.56	0.33	0.50	0.33	1.00	0.60	0.60
合理性	B22	1	0.00	0.40	0.80	1.00	0.60	0.60	1.00	1.00	0.1	0.33	0.45	0.71	1.00	0.56	0.56	1.00	1.00
	B23	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.80	0.80	1.00	0.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.71	0.71	1.00
	B24	1	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.2	0.33	1.00	1.00	0.33	1.00	1.00	1.00	1.00
	B25	1	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	0.1	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00
	B26	1	0.60	1.00	0.00	0.80	0.00	0.40	1.00	1.00	0.2	0.56	1.00	0.33	0.71	0.33	0.45	1.00	1.00
先进性	B31	1	0.43	0.10	0.35	0.60	0.35	1.00	0.45	0.60	0.25	0.44	0.33	0.41	0.53	0.41	1.00	0.45	0.53
	B32	1	0.98	1.00	0.95	0.93	1.00	1.00	0.98	1.00	0.25	0.95	1.00	0.90	0.86	1.00	1.00	0.95	1.00
	B33	1	0.50	0.50	0.50	1.00	0.50	0.50	0.50	0.50	0.25	0.47	0.47	0.47	1.00	0.47	0.47	0.47	0.47
	B34	1	1.00	1.00	0.75	1.00	1.00	1.00	0.50	0.75	0.25	1.00	1.00	0.64	1.00	1.00	1.00	0.47	0.64
实用性	B41	1	0.79	0.68	0.71	0.57	1.00	1.00	0.86	0.75	0.4	0.50	0.40	0.43	0.33	1.00	1.00	0.60	0.46
	B42	1	0.84	0.76	0.79	0.68	1.00	1.00	0.89	0.82	0.3	0.58	0.48	0.50	0.40	1.00	1.00	0.67	0.54
	B43	1	0.64	1.00	1.00	0.88	0.79	0.82	0.73	0.76	0.3	0.37	1.00	1.00	0.64	0.50	0.54	0.44	0.47

表6 不同省区火电行业用水定额各层次评价结果

Table6 The evaluation results of the water consumption quota of thermal power industry in different provinces and autonomous regions

层次	代码	指标内容	权重 (W)	评价结果(R)							
				青海	甘肃	宁夏	内蒙古	陕西	山西	河南	山东
指标层	B11	产品类型覆盖性	0.2	0.20	0.07	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
	B12	工艺类型覆盖性	0.3	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.13	0.30
	B13	规模类型覆盖性	0.3	0.10	0.10	0.30	0.30	0.10	0.30	0.10	0.10
	B14	定额指标覆盖情况	0.2	0.20	0.20	0.07	0.20	0.20	0.20	0.07	0.07
	B21	计算定额与现行定额相符性	0.3	0.13	0.17	0.10	0.15	0.10	0.30	0.18	0.18
	B22	定额编制依据	0.1	0.03	0.05	0.07	0.10	0.06	0.06	0.10	0.10
	B23	定额行业划分	0.1	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.07	0.07	0.10
	B24	与国家现行定额的相符性	0.2	0.07	0.20	0.20	0.07	0.20	0.20	0.20	0.20
	B25	是编制先进定额	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.10	0.10	0.10
	B26	定额修订	0.2	0.11	0.20	0.07	0.14	0.07	0.09	0.20	0.20
	B31	用水定额与评价系列比较	0.25	0.11	0.08	0.10	0.13	0.10	0.25	0.11	0.13
	B32	用水指标先进程度	0.25	0.24	0.25	0.23	0.22	0.25	0.25	0.24	0.25
	B33	其他相关指标制定	0.25	0.12	0.12	0.12	0.25	0.12	0.12	0.12	0.12
	B34	较上版定额改进情况	0.25	0.25	0.25	0.16	0.25	0.25	0.25	0.12	0.16
	B41	在取水许可应用情况	0.4	0.20	0.16	0.17	0.13	0.40	0.40	0.24	0.18
	B42	计划用水中应用情况	0.3	0.17	0.14	0.15	0.12	0.30	0.30	0.20	0.16
	B43	节水管理中应用情况	0.3	0.11	0.30	0.30	0.19	0.15	0.16	0.13	0.14
准则层	B1	覆盖性评估	0.30	0.80	0.67	0.87	1.00	0.80	1.00	0.49	0.67
	B2	合理性评估	0.43	0.49	0.76	0.59	0.61	0.57	0.82	0.85	0.88
	B3	先进性评估	0.18	0.72	0.70	0.61	0.85	0.72	0.87	0.59	0.66
	B4	实用性评估	0.09	0.48	0.60	0.62	0.45	0.85	0.86	0.57	0.49
目标层		综合评估		0.62	0.71	0.68	0.76	0.69	0.89	0.67	0.74

4.3 模型评价结果分析

依据指标层及准则层权重，根据各指标灰色关联系数,按照式(13)逐级计算各省区用水定额评价结果如表 6 所示。

本次综合评估模型最优指标集各分量选取各省区指标的最优值为综合评估标准，得到的评价结果为各省区相对优劣程度。从表 6 中最终评判结果可以看出，山西省火电行业用水定额评价结果最优，其次为内蒙古、山东和甘肃,再次为陕西、宁夏、河南和青海。定额的覆盖性和合理性最终决定了其实际可用性，过于宽松和落后的定额指标、工艺和规模等的覆盖程度偏低是影响定额评价结果的主要因素。

从覆盖情况来看,内蒙古、山西用水定额对指标及产品涵盖最为完整,河南最差,主要因为河南省定额对空冷机组没有覆盖,且规模划分不够详细所致。山西省在产品类型上覆盖最为完整，涵盖了纯发电、热电联产、煤气发电、生物发电及垃圾发电等,符合近年来生物质和垃圾电厂建设趋势,值得各省区借鉴。

从合理性方面来讲,山西、河南、山东 3 省现行定额严于国家定额,与流域内计算定额相差不大。此外，

在山西和河南两省,还制定了调节系数,更具操作性,合理性评价结果优良。其余各省区直接照搬了国家定额,指标过于宽松,无法起到实际的限制和调节作用。

参考文献：

[1] 张继群. 落实国家节水行动 强化用水定额管理[J]. 中国水利, 2018, 6:21–23.(ZHANG Jiqun. Strengthening quota management is a key driver for implementing national water conservation action[J]. China Water Resources, 2018, 6:21–23.(in Chinese))

[2] 孙婷, 张雨, 邵芳, 等. 我国工业用水定额理论与应用初探 [J]. 中国水利, 2015, 23:46–48.(SUN Ting,ZHANG Yu,SHAO Fang,et al. Theory and application on quota of industrial water use in China [J].China Water Resources, 2015, 23:46–48. (in Chinese))

[3] 韩云. 基于多指标综合评价方法的吉林省用水定额应用研究[D].河北工程大学, 2015 .(HAN Yun. The Application Research on Water Quota of Jilin Province Based on Multi-index Comprehensive Evaluation Method[D]. Hebei University of Engineering, 2015. (in Chinese))

[4] 李恩宽, 赵焱, 蔡大应, 等. 黄河流域重点用水行业用水定额合理性评估[A]. 第八届全国河湖治理与水生生态文明发展论坛论文集[C]. 2016: 28–31.(LI Enkuan,ZHAO Yan, CAI Daying,et al.Rationality evaluation of ater consumption quota of key industries in Yellow river basin [A].Proceedings of Eighth National Forum on River and Lake Governance and Development of Water Ecology Civilization



- [C]. 2016: 28–31. (in Chinese))
- [5] 邓敏慧, 周研来, 桑连海. 长江流域火电工业取用水定额多目标评价分析[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(5):23–27. (DENG Huimin, ZHOU Yanlai, SANG Lianhai. Multi-objective evaluation of water intake quantity and quota for fossil-fuel power stations in Changjiang River basin [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(5):23–27. (in Chinese))
- [6] 赵博, 李趋, 张勤, 等. 基于层次分析与模糊综合评价的辽宁省《行业用水定额》评价[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(1): 45–48. (ZHAO Bo, LI Qu, ZHANG Qin, et al. Evaluation of industry water quota in Liaoning Province based on AHP and fuzzy comprehensive evaluation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(1): 45–48. (in Chinese))
- [7] 李奎, 邢玉玲, 谭炳卿, 等. 基于云模型的黄河流域火电行业用水定额评估[J]. 人民黄河, 2017, 39(5): 64–68. (LI Kui, XING Yuling, TAN Bingqing, et al. Evaluation of thermal power industry water quota in the Yellow River Basin based on cloud model [J]. Yellow River, 2017, 39(5): 64–68. (in Chinese))
- [8] 杨尚宝, 韩买良. 火力发电厂水资源分析及节水减排技术[M]. 化学工业出版社, 2011. (YANG Shangbao, HAN Mailiang. Water Resources Analysis and Water Saving and Emission Reduction Technology of Thermal Power Plant [M]. Chemical Industry Press, 2011. (in Chinese))

## Application of Multilevel Grey Relational Model in Water Consumption Quota Evaluation of Thermal Power Industry in Yellow River Provinces

HAN Jinxu<sup>1</sup>, WANG Ruoyu<sup>2</sup>, JIAO Jun<sup>3</sup>, LIU Shufang<sup>1</sup>, ZHANG Dan<sup>1</sup>

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 2. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 3. China Water Huaihe Planning Design and Research Co. Ltd. Hefei 230601, China)

**Abstract:** In order to evaluate the water consumption quota of thermal power industry in Yellow River provinces, the evaluation model was established based on multi-level grey relational theory. Model structure, evaluation index and determination of related parameters were given. The Model was used to evaluate water quota of thermal power industry according to relevant national and industrial standards, access conditions and measured data. The evaluation results show that the water quota of Shanxi Province is relatively more reasonable, followed by Inner Mongolia Autonomous Region, Shandong and Gansu Provinces.

**Key words:** water consumption quota, thermal power plant, evaluation, gray correlation model

(上接第 80 页)

## Long-term Dynamic Changes and Variability of Heavy Rainfall in Nanjing

MA Chengchen<sup>1</sup>, XIAO Jianqiang<sup>2</sup>, YANG Guangyun<sup>3</sup>, FENG Ying<sup>1</sup>, LU Baohong<sup>1</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. China Water Resources Beifang Investigation, Design & Research Co. Ltd, Tianjin 300222, China;  
3. Hydrology Bureau of Heilongjiang Provinces, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Based on the monthly rainfall data (June–September) in Nanjing City during 1951–2016, this paper analyzed the long-term dynamic and variability of heavy rainfall in the flood season. Long-term dynamic results show that the occurrence frequency of heavy rainfall in Nanjing has increased significantly over the past 66 years with an average increase of 0.31 times per 10 years. Among different sizes of heavy rainfall, the occurrence frequency weather of the torrential rain and the heavy torrential rain both show increasing trends and torrential rain weather increase greatly. Multi-year monthly sliding standard deviation have passed through the confidence level of 99% significance test, and the mutation of torrential rain weather show a significant decrease trend. The heavy rainfall weather tends to be concentrated during the flood season (July), and the monthly pattern of it tends to be stable. It coincides with the result of the multi-year monthly sliding standard deviation that the heavy rainfall weather variability show a decreasing trend.

**Key words:** heavy rainfall weather; precipitation; variability; climate change; Nanjing City