

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2014.02.009

# 江苏沭阳主城区地下水环境质量评价

汪名鹏, 吴建春

(江苏省水文地质海洋地质勘查院, 江苏 淮安 223005)

**摘要:** 在分析江苏沭阳主城区水文地质条件的基础上, 根据沭阳主城区水质实测数据和水质特点, 选取了总硬度、TDS、 $F^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、Mn、挥发酚类 8 个污染因子作为评价因子, 以 GB/T 14848—93《地下水质量标准》为评价标准, 运用内梅罗综合指数法与模糊数学法, 对沭阳主城区 10 个地下水水样进行了评价。综合评价结果表明, 沭阳主城区第 I 含水层水质局部地段已遭受严重污染, 不适宜饮用; 第 II、第 III 含水层地下水水质较好, 达到 II 类水质标准, 适用于各种用途。评价结果符合水质实际状况, 具有较高的可信度, 可为沭阳主城区地下水资源评价、为预测和预警城市环境地质问题和科学防治提供依据。

**关键词:** 地下水; 水环境质量评价; 内梅罗综合指数法; 模糊数学法; 沭阳主城区

中图分类号: X820.2 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2014)02-0041-05

## Evaluation of water environmental quality in downtown area of Shuyang City

WANG Mingpeng, WU Jianchun

(Jiangsu Province Hydrogeology and Marine Geological Exploration, Huai'an 223005, China)

**Abstract:** Based on analysis of the hydrogeological conditions in the downtown area of Shuyang City, the water quality of ten groundwater samples in the city was evaluated using the Nemerov comprehensive index method and fuzzy mathematical method. The total hardness, TDS,  $F^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , Mn, and volatile phenol were selected as the evaluation factors, and the Quality Standard for Ground Water (GB/T14848-93) as the evaluation criteria, according to measured data and the characteristics of the water quality of the downtown area of the city. The results of comprehensive evaluation show that the water of the first aquifer was seriously polluted in parts of the downtown area and was not suitable for drinking. Meanwhile, the water quality of the second and third aquifers was relatively good, reaching the grade II level, and was suitable for various uses. The evaluation results agreed with the actual conditions and had a high degree of credibility, providing a basis for groundwater resources evaluation in the downtown area of Shuyang City, as well as for the prediction, warning, and scientific prevention and control of urban environmental and geological problems.

**Key words:** groundwater; water environmental quality evaluation; Nemerov comprehensive index method; fuzzy mathematical method; downtown area of Shuyang City

地下水是人类赖以生存的重要资源。地下水环境质量的优劣直接影响城市的可持续发展, 正确地评价地下水水环境质量, 对保护地下水资源、准确掌握污染状况具有积极意义。

目前, 国内水环境评价的方法较多, 主要有内梅

罗指数综合评价法、模糊数学法、灰色关联法、数理统计法、人工神经网络法等, 其中内梅罗指数评价法是 GB/T14848—93《地下水质量标准》推荐的方法。地下水水环境评价中, 污染程度、水环境类别的评价存在概念模糊的现象<sup>[1-2]</sup>, 因此, 模糊数学法在地下

基金项目: 江苏省省级地勘基金(苏财建[2009]265号)

作者简介: 汪名鹏(1973—), 男, 高级工程师, 主要从事水文地质、工程地质、环境地质研究。E-mail: ahwmp@163.com

水水环境评价中的应用也较广泛。笔者在分析江苏沭阳主城区水文地质条件的基础上,应用内梅罗综合指数评价法和模糊数学法对江苏沭阳主城区地下水环境质量进行评价。

## 1 研究区水文地质条件

沭阳的地下水资源丰富,自上而下分为3个含水层组:第Ⅰ含水层组(潜水与微承压水)和第Ⅱ、第Ⅲ含水层组(深层承压水)。第Ⅰ含水层组岩性为粉细砂、中粗砂与粉质黏土,河流河堤近侧、河漫滩的岩性为粉土、砂土,远离河道处的岩性主要为粉质黏土,含水层厚度2~15 m。第Ⅰ含水层直接接受大气降水、地表水补给,排泄方式主要有蒸发、侧向径流和人工开采等。第Ⅱ含水层组岩性以中粗砂为主,厚度24.0~36.8 m,底板埋深多在56.1~68.9 m之间,含水层富水性受砂层厚度、粒度等控制。第Ⅲ含水层组岩性具有上细下粗特征,砂粒组成整体上比上部含水层的级配差,岩性以粉细砂、中粗砂、含砾中粗砂、砾砂等为主。砂层可见2~3层,厚度一般50~60 m,底板埋深113.0~115.6 m。在天然状态下,第Ⅱ含水层组和第Ⅲ含水层组的地下水基本无水力联系。第Ⅱ、第Ⅲ含水层不受大气降水的影响,主要接受区外的侧向水平径流补给,其次接受浅层水的越流补给(较微弱)。

沭阳主城区位于淮、沂、沭、泗流域下游,素有“洪水走廊”之称。新沂河和淮沭河贯穿沭阳主城区,地表水系相当发育。随着工业化进程的推进和城区人口密度的剧增,沭阳主城区地表水受污染的程度越发严重。由于沭阳的河堤、河漫滩多为粉土、砂土,大量工业及生活污水通过无防渗的沟渠排入河流,使污染水体连续渗漏,以直接或间接方式进入地下含水层,造成沭阳地下水特别是浅层地下水遭受污染。此外,沭阳主城区自20世纪80年代中期地下水持续过量开采,导致局部地区形成水位降落漏斗。地下水位的不断下降,加快了水质下降的速度。

针对沭阳的水质现状,以“沭阳主城区环境地

质调查与评价”项目为依托,在工作区共采集地下水样10组(图1),其中浅层(第Ⅰ含水层组)地下水4组,深层(第Ⅱ、Ⅲ含水层组)地下水6组。

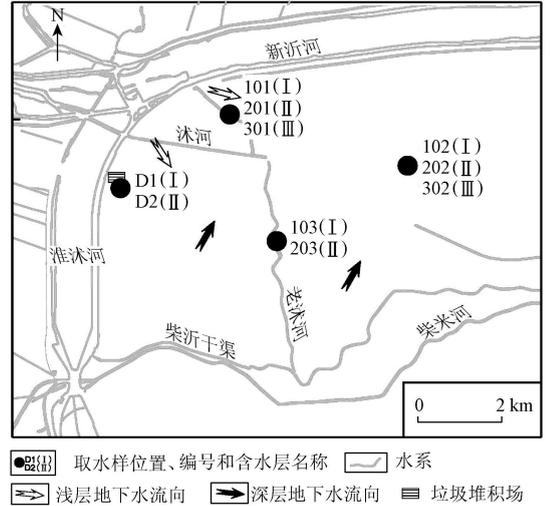


图1 工作区地下水采样位置示意图

沭阳主城区各含水层水质特征见表1。

## 2 评价因子的选择和评价标准

### 2.1 评价因子的确定

地下水化学成分复杂,一般根据标准,地下水水质标准涉及指标共39项,其中20项指标规定为水质监测项目<sup>[3]</sup>,如果把测试项目都参与评价,或者参与评价的因子较多,不但增加评价计算的工作量,且不具代表性。因此,选择评价因子时要考虑到以下几个方面<sup>[3-4]</sup>:①所选指标的涵盖面要广,要覆盖各种污染类型的污染因子,能够较全面地反映当地地下水水质污染的特点和污染程度。②反映人为污染的原则,所选因子应尽可能反映人为污染这一特点,顾及对人体健康影响的因素。根据沭阳主城区地下水特征和地下水水质特点,选择对水质有较大影响的总硬度、TDS、F<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Mn、挥发酚类共8个指标作为评价因子。

### 2.2 评价标准的选择

依据我国地下水水质现状、人体健康基准值及

表1 沭阳主城区主要含水层水质分布

含水层	水样编号	$\rho(\text{TDS})$	$\rho(\text{CaCO}_3)$	$\rho(\text{F}^-)$	$\rho(\text{NO}_3^-)$	$\rho(\text{Cl}^-)$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$	$\rho(\text{Mn})$	$\rho(\text{挥发酚类})$
第Ⅰ含水层组	101	707	357	1.0	2	61	72	1.86	<0.002
	102	599	220	0.8	0.5	26	79	0.02	<0.002
	103	562	369	0.4	0.4	34	37	0.04	<0.002
	D1	1147	723	1.2	3	101	210	<0.01	<0.002
第Ⅱ含水层组	201	584	308	0.6	4	41	60	0.06	<0.002
	202	539	244	0.6	0.4	20	61	0.02	<0.002
	203	494	200	0.6	<0.01	21	39	<0.01	<0.002
	D2	264	317	0.6	1	31	72	<0.01	<0.002
第Ⅲ含水层组	301	532	160	0.4	0.2	41	69	0.04	<0.002
	302	523	156	0.4	0.2	41	70	0.04	<0.002

水质标准	$\rho(\text{TDS})$	$\rho(\text{CaCO}_3)$	$\rho(\text{F}^-)$	$\rho(\text{NO}_3^-)$	$\rho(\text{Cl}^-)$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$	$\rho(\text{Mn})$	$\rho(\text{挥发酚类})$
I类	$\leq 300$	$\leq 150$	$\leq 1.0$	$\leq 2.0$	$\leq 50$	$\leq 50$	$\leq 0.05$	$\leq 0.001$
II类	$\leq 500$	$\leq 300$	$\leq 1.0$	$\leq 5.0$	$\leq 150$	$\leq 150$	$\leq 0.05$	$\leq 0.001$
III类	$\leq 1000$	$\leq 450$	$\leq 1.0$	$\leq 20$	$\leq 250$	$\leq 250$	$\leq 0.1$	$\leq 0.002$
IV类	$\leq 2000$	$\leq 550$	$\leq 2.0$	$\leq 30$	$\leq 350$	$\leq 350$	$\leq 1.0$	$\leq 0.01$
V类	$>2000$	$>550$	$>2.0$	$>30$	$>350$	$>350$	$>1.0$	$>0.01$

地下水质量标准,并参照生活饮用水、工业用水、农业用水水质的最高要求,选择 GB/T 14848—93《地下水质量标准》<sup>[5]</sup>将地下水质量划分为 5 类。地下水质量分类指标见表 2。

### 3 地下水水环境评价

#### 3.1 内梅罗综合指数法

##### 3.1.1 内梅罗综合指数法的原理

内梅罗综合指数法计算公式<sup>[6]</sup>为

$$P_j = \sqrt{\frac{\bar{F}^2 + F_{\max}^2}{2}} \quad (1)$$

其中

$$F_{\max} = \max(\rho_i/S_i)$$

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i/s_{ij}$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$$

式中: $P_j$ 为第  $j$  种用途的内梅罗综合指数; $\rho_i$ 为第  $i$  种评价因子的实测质量浓度值; $S_i$ 为第  $i$  种评价因子对应的各水质级别的标准值之和的平均值; $s_{ij}$ 为第  $i$  种评价因子  $j$  种用途的标准值; $\bar{F}$ 为  $\rho_i/s_{ij}$ 相加后的平均值; $F_{\max}$ 为  $\rho_i/s_{ij}$ 值中最大值;

根据研究区各评价因子的实测数据,选用 GB/T 14848—93《地下水质量标准》中 III 类水质标准为基准,将区内水质类别划分为 5 个级别,见表 3。

表 3 内梅罗综合指数与水质类别的对应关系

水质类别	I类	II类	III类	IV类	V类
内梅罗综合指数 $P$	$P < 0.76$	$0.76 \leq P < 0.82$	$0.82 \leq P < 1$	$1 \leq P < 7.40$	$P \geq 7.40$

##### 3.1.2 内梅罗指数法的评判结果

以总硬度、TDS、 $\text{F}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、Mn、挥发酚类为评价因子,采用式(1)计算研究区各取样点的内梅罗综合指数,确定水质等级,结果见表 4。

### 3.2 模糊数学法

#### 3.2.1 模糊数学法的原理

模糊数学方法<sup>[7]</sup>是系统评价方法的一种,在满足每一个集合都必须由确定的元素构成和元素对集合的隶属关系必须是明确的条件下,通过加权线性变换,弱化了指标和层次之间相互的独立性,使得评价结果中包括所有因素的共同作用,体现了评价方法综合性的特点。利用模糊数学法综合评判地下水

表 4 地下水质量级别

含水层名称	水样编号	内梅罗综合指数	水质等级
第 I 含水层组	101	13.30	V
	102	0.77	II
	103	0.77	II
	D1	1.27	IV
第 II 含水层组	201	0.79	II
	202	0.76	II
	203	0.75	I
	D2	0.76	II
第 III 含水层组	301	0.76	II
	302	0.76	II

水质的核心是,根据水质评价因子建立权重模糊矩阵,确定评价因子的权向量,根据模糊数学最大隶属度原则评定水样的等级。利用模糊数学法进行综合评价的步骤参见文献[8]。

#### 3.2.2 模糊数学法评判的过程

a. 计算隶属度,建立模糊关系矩阵  $R$ 。根据各因子 5 级标准设立 5 个级别的隶属函数, $r_{ij}$ 表示评价因子实测质量浓度  $\rho_i$  与其对应的第  $i$  个评价因子对应第  $j$  级水质标准的隶属度( $0 \leq r_{ij} \leq 1$ )。当地下水污染物实测质量浓度  $\rho_i$  小于或等于  $j$  级地下水标准值  $\rho_{ij}$  时,其隶属度取 0;当地下水污染物实测质量浓度  $\rho_i$  大于或等于  $j+1$  级地下水标准值  $\rho_{j+1}$  时,其隶属度取 1。介于  $j$  与  $j+1$  级的地下水质量浓度,其隶属度按式(2)和式(3)内插法确定。

$$r_{ij} = \frac{\rho_{j+1} - \rho_i}{\rho_{j+1} - \rho_{ij}} \quad (2)$$

$$r_{ij+1} = \frac{\rho_i - \rho_{ij}}{\rho_{ij+1} - \rho_{ij}} \quad (3)$$

b. 确定权重分配模糊向量  $A$ 。根据分指标超标比,可计算出各单项目参数的权重值,并对各项参数的权重值进行归一化处理,得出参数的权重。根据各因子指数计算各评价因子的权重矩阵为  $A = [a_1, a_2, \dots, a_m]$  ( $m$  为指标项目数)

$$a_i = \frac{\frac{\rho_i}{S_i}}{\sum_{i=1}^m \frac{\rho_i}{S_i}} \quad (4)$$

c. 模糊矩阵复合运算。模糊矩阵复合运算<sup>[9]</sup>是  $A$  与  $R$  矩阵进行复合运算  $B = A \cdot R$ ,实际是对各

评价因子进行加权的過程。模糊矩阵复合运算在模糊数学里是通过模糊算子进行的,常用的模糊算子有取小取大法、相乘取大法、取小相加法、相乘相加法,其中取小取大法为主因素突出型,相乘取大法为半主因素突出型,取小相加法、相乘相加法为加权平均型<sup>[10]</sup>。在模糊评判中,常用模糊算子为取小取大法和相乘取大法,计算公式如下:

$$\text{取小取大模型: } b_j = \bigvee_{i=1}^n (a_i \wedge r_{ij}) \quad (5)$$

$$\text{相乘取大模型: } b_j = \bigvee_{i=1}^n (a_i \times r_{ij}) \quad (6)$$

通过对研究区地下水水样进行模糊矩阵复合运算,得出每个水样相对于各个质量类别的综合评判隶属度,比较各级隶属度的大小,其中隶属度最大者所在的等级就是水样点的分类等级。若在评判结果中出现两个最大值,取靠近最大值的那个大值来确定级别。各取样点隶属度水质计算结果见表5。

从选用的两种模糊算子复合运算结果的对比表明,在本地区两种算法对水质级别的评判基本一致,只有10%的差别,且这10%隶属度很接近。

#### 4 结果分析与评价

a. 采用内梅罗综合指数法与模糊数学法在沭阳主城区地下水水环境评价的应用中,结果一致性较好,见表6。从表6可以看出,两种评价方法的结果相同率达80%,尤其是第II、第III含水层组地下水评价结果相同率达100%。

表6 两种方法水质评价结果

水样编号	水质评价结果		水样编号	水质评价结果	
	内梅罗综合指数法	模糊数学法		内梅罗综合指数法	模糊数学法
101	V	V	202	II	II
102	II	I	203	II	II ~ I
103	II	II	D2	II	II
D1	IV	V	301	II	II
201	II	II	302	II	II

b. 内梅罗综合指数法与模糊数学法在沭阳主城区地下水水环境评价的应用中各有优缺点。内梅罗综合指数法简洁、运算方便;模糊数学法是采用隶属度函数来评判地下水污染状况,避免了平均值或简单值的累加,体现了实际界限的模糊性,其优点是综合、客观,使评价结果更符合实际且合理、可信<sup>[11]</sup>。内梅罗指数法过分突出极大值对水质污染的影响,只要一项因子的 $\rho_i/s_i$ 值偏高,即使其他因子值较低,也会使内梅罗综合指数偏高;采用模糊数学法不足之处是计算较为繁琐,并且过分强调了极大值的作用,使评价结果朝污染重的方向偏移<sup>[12]</sup>。

c. 根据沭阳主城区对3层地下水含水层共10个水样的综合评判,第I含水层101、D1两个取样点分别是锰和溶解性总固体、总硬度严重超标,挥发酚、氟指标偏高。根据污染因子的主要毒副作用及危害性分类<sup>[13]</sup>,挥发酚属于I类危害因子,对人产生极大危害和严重后果;氟化物和锰属于II类危害因子;溶解性总固体、总硬度属于III类危害因子,一般不会产生特别严重后果。根据内梅罗指数法与模糊数学法的评判结果,第I含水层101、D1两个取样点水质类别为V类,表明研究区该层地下水局部地段已遭受严重污染,不适宜饮用(101取样点被污染的主要原因是城市居民生活污水的直接排放以及城市河流污染地表水的渗透所致;D1取样点位于垃圾堆积场附近,污染是渗滤液入渗所致);研究区第II、第III含水层地下水达到了II类水质标准,可以适用于各种用途。

#### 5 结论

a. 在分析沭阳主城区水文地质条件的基础上,运用内梅罗综合指数法与模糊数学法,对沭阳主城区各含水层地下水水环境质量进行了评判。评判结果表明,两种方法的评价结果在沭阳主城区的一致性较好;沭阳主城区第I含水层水质因旧城区和现

表5 沭阳主城区主要含水层地下水水质模糊评价结果

含水层名称	水样编号	模糊评价的B矩阵										水质级别
		取小取大法					相乘取大法					
		$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	
第I含水层组	101	0.074	0.092	0.092	0	0.742	0.081	0.063	0.047	0	0.810	V
	102	0.349	0.336	0.315	0	0	0.407	0.295	0.297	0	0	I
	103	0.176	0.567	0.257	0	0	0.238	0.414	0.348	0	0	II
	D1	0.088	0.182	0.198	0.171	0.361	0.063	0.107	0.248	0.050	0.531	V
第II含水层组	201	0.252	0.452	0.296	0	0	0.272	0.463	0.265	0	0	II
	202	0.434	0.434	0.132	0	0	0.480	0.480	0.041	0	0	II
	203	0.353	0.353	0.294	0	0	0.341	0.329	0.331	0	0	II ~ I
	D2	0.262	0.484	0.254	0	0	0.277	0.454	0.269	0	0	II
第III含水层组	301	0.313	0.360	0.327	0	0	0.448	0.517	0.035	0	0	II
	302	0.310	0.359	0.331	0	0	0.330	0.341	0.330	0	0	II

状垃圾堆积场周边受到严重污染,水质类别为V类,不适宜饮用;其他地点第I含水层水质达到I~II类水质标准,水质较好,第II、第III含水层地下水达到了II类水质标准,可以适用于各种用途。

b. 在进行定量评判水环境质量的同时,应结合水环境污染因子对人类的毒副作用与危害性开展研究,弥补采用不同方法评价水环境质量产生的差异,以保证评价的合理性。

### 参考文献:

[1] 梅学彬,王福刚,曹剑锋. 模糊综合评判法在水质评价中的应用及探讨[J]. 世界地质,2000,19(2):172-177. (MEI Xuebin, WANG Fugang, CAO Jianfeng. The application of fuzzy comprehensive evaluation on water quality and discussion[J]. World Geology,2000,19(2):172-177. (in Chinese))

[2] 束龙仓,邱汉学. 济宁市开采层地下水水质的FUZZY综合评判及FORTRAN程序[J]. 长春地质学院学报,1998,18(4):431-440. (SHU Longcang, QIU Hanxue. Fuzzy comprehensive method and the devised FORTRAN program evaluating the quality of groundwater from producing in Jining City [J]. Journal of Changchun University of Earth science,1998,18(4),431-440. (in Chinese))

[3] 韩银富,杨林. 运用模糊数学综合评判法评价宝应县地下水质量[J]. 地质灾害与环境,2000,11(1):17-20. (HAN Yinfu, YANG Lin. Evaluation of the quality of groundwater in Baoying using fuzzy mathematics comprehensive judgement [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation,2000,11(1):17-20. (in Chinese))

[4] 罗海江,朱建平,蒋火华. 我国河流水质评价污染因子选择方案探讨[J]. 中国环境监测,2002,18(4):51-55. (LUO Haijiang, ZHU Jianping, JIANG Huohua. The suggestion of selecting pollution items on water quality evaluation[J]. Environmental Monitoring in China,2002,18(4):51-55. (in Chinese))

[5] GB/T14848—93 地下水质量标准[S].

[6] 谷朝君,潘颖,潘明杰. 内梅罗指数法在地下水水质评

价中的应用及存在问题[J]. 环境保护科学,2002,28(1):45-47. (GU Zhaojun, PAN Ying, PAN Mingjie. The application and existed problems of nemero index in groundwater quality evaluation [J]. Environmental Protection Science,2002,28(1):45-47. (in Chinese))

[7] 吴万铎. 模糊数学与计算机应用[M]. 北京:电子工业出版社,1998.

[8] 张华侨,窦明,赵辉,等. 郑州市水安全模糊综合评价[J]. 水资源保护,2010,26(6):42-46. (ZHANG Huaqiao, DOU Ming, ZHAO Hui, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of water security in Zhengzhou City[J]. Water Resources Protection,2010,26(6):42-46. (in Chinese))

[9] 涂向阳,高学平. 模糊数学在海水入侵地下水水质评价中的应用[J]. 水利学报,2003(8):64-69. (TU Xiangyang, Gao Xueping. Application of fuzzy mathematical method in evaluation of seawater intrusion [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2003(8):64-69. (in Chinese))

[10] 刘洪,孙国曦. 南京市岩溶地下水质量的模糊评价[J]. 地质灾害与环境,2007,18(3):76-79. (LIU Hong, SUN Guoxi. The application of fuzz judgement in karst groundwater quality of Nanjing City [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation,2007,18(3):76-79. (in Chinese))

[11] 王淑文,刘臣. 水环境质量评价的模糊数学法[J]. 吉林水利,2001(2):20-22. (WANG Shuwen, LIU Chen. Brief discussion on fuzzy math method used in evaluation of quality for water environment[J]. Jilin Water Resources,2001(2):20-22. (in Chinese))

[12] 王勇,曹丽文,刘勇,等. 淮北某矿区地下水环境质量评价[J]. 煤田地质与勘探,2011,39(2):34-37. (WANG Yong, CAO Liwen, LIU Yong, et al. Groundwater environmental quality assessment for a mine area in Huaibei[J]. Coal Geology & Exploration,2011,39(2):34-37. (in Chinese))

[13] 范建华. 环滇池城区地质环境资源综合评价与规划[D]. 长春:吉林大学,2008.

(收稿日期:2013-03-07 编辑:彭桃英)

(上接第32页)

[20] 郑莉,段冬梅,陆凤彬,等. 我国猪肉消费需求集成预测:基于ARIMA、VAR和VEC模型的实证[J]. 系统工程理论与实践,2013,33(4):918-925. (ZHENG Li, DUAN Dongmei, LU Fengbin, et al. Integration forecast of Chinese pork consumption demand: empirical based on ARIMA、VAR and VEC models [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013,33(4):918-925. (in Chinese))

[21] 崔东文. 基于极限学习机的长江流域水资源开发利用综合评价[J]. 水利水电科技进展,2013,33(2):14-19. (CUI Dongwen. Comprehensive evaluation of water resources development and utilization in Yangtze River Basin based on extreme learning machine [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(2):14-19. (in Chinese))

(收稿日期:2013-05-31 编辑:彭桃英)