

文章编号: 1007-7588(2013)01-0140-08

北京市水资源短缺风险等级评价与预测

廖 强^{1,2}, 张士锋¹, 陈俊旭^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 本文利用 1979 年-2009 年的北京市水资源相关数据, 采用灰色关联分析方法筛选出主要水资源短缺风险因子; 用模糊聚类分析法对水资源系列进行聚类; 用灰色系统 GM(1,1) 法预测 2010 年-2015 年的水资源短缺风险, 将结果进行模糊聚类分析。结果表明, 降雨量、常住人口、第三产业及生活等其它用水量与北京市水资源短缺的关联度较大。在 1999 年之前, 北京市水资源风险主要处于中等以及较低的等级。1999 年之后, 北京市的水资源风险基本处于较高的等级。在丰水年条件下, 2010 年-2015 年北京市水资源风险处于较低等级; 在平水年处于中等等级; 在枯水年和极端枯水年, 将处于较高风险甚至高风险等级。2014 年后, 南水北调工程引水入京将有效缓解水资源短缺状况, 使水资源短缺的风险降低一个等级。

关键词: 水资源短缺风险; 灰色关联分析; 模糊聚类分析; 灰色系统 GM(1,1); 北京市

1 引言

近年来, 北京市人均水资源占有量不足 200m³, 仅为全国人均的 1/10, 世界人均的 1/40, 属重度缺水地区。自 20 世纪 50 年代以来, 北京市发生多次严重的水危机。1999 年以来连续 13 年干旱, 降雨量常年在 500mm 以下, 已经进入枯水周期。

北京市水资源短缺已经成为影响和制约社会和经济发展的的重要因素。随着人口增长、经济发展和城市化进程, 区域用水需求仍将旺盛。上游地区用水量增加导致北京入境水量的减少, 及流域的下垫面的变化显著减少了产流量, 北京水资源面临严重短缺风险。因此, 如何科学辨识北京市水资源短缺风险因子, 客观评价水资源短缺风险水平, 预判不同水平年风险情景, 划分风险等级, 对有效规避风险及其危害, 改进相关水资源规划、区域发展规划等政策和决策, 促进可持续发展具有重要意义。

对缺水地区的水资源风险评价是目前国内的研究热点, 很多学者已经做了大量的研究。水资源短缺风险, 泛指在特定的时空环境条件下, 由于来水和用水两方面存在不确定性, 使区域水资源系统

发生供水短缺的风险。阮本清等^[1]选取区域水资源短缺风险程度的风险率、脆弱性、可恢复性、重现期和 risk 度作为评价指标, 研究了水资源短缺风险的模糊综合评价方法, 对首都圈水资源短缺风险进行了评价。韩宇平等^[2]构建了区域水资源短缺的多目标风险决策模型, 研究了水资源短缺风险决策的期望损益值法, 同时构建了区域水资源短缺的多目标风险决策模型。张士锋等^[3]在对京津冀地区水资源背景进行分析的前提下, 计算了以年为时间尺度的风险指标, 对水资源风险进行分类和评价。王红瑞等^[4]基于模糊概率理论建立了水资源短缺风险评价模型, 对水资源短缺风险发生的概率和缺水影响程度给予综合评价。李九一等^[5]构建由水资源供给保障率、水资源保障可靠性、水资源利用率和水资源利用效率 4 项指标构成的区域尺度水资源短缺风险评估与决策体系, 给出了定量计算方法。郭跃华^[6]应用 BP 神经网络良好的数据拟合功能, 建立缺水量与导致水资源短缺各因子关系的 BP 神经网络模型, 从而确定北京市水资源短缺的主要风险因子。魏歆等^[7]综合运用了投影寻踪模型与灰色关联度模

收稿日期: 2012-09-02; 修订日期: 2012-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 41171032); 国家重点基础研究发展计划(编号: 2012CB955304)。

作者简介: 廖强, 男, 广东梅州市人, 硕士生, 主要研究方向为虚拟水贸易、水资源风险评价。E-mail: 806958182@qq.com

通讯作者: 张士锋, E-mail: zhangsf@igsnrr.ac.cn

2013年1月

型,有效筛选出降水量、日照时数、雨日数等八个指标是北京市水资源短缺的主要风险因子。

由于影响水资源短缺风险的因素众多且具有随机性、模糊性和不确定性,难以用确定的数学模型描述,增加了评估难度。目前,常用的评价方法有层次分析法、模糊评判法、灰色聚类评价、人工神经网络等综合评价方法,但某些方法缺乏比较客观可靠的确定评价指标权重的方法,通常采用主观确定权重的方法,如层次分析法(AHP),结果粗糙,主观因素作用大,结果可能难以服人。有些研究对导致水资源短缺的因子进行了筛选,但是没有进一步做综合的风险评价;或者只是对过去的水资源状况进行评价,很少对未来做出预测;有些研究用数字来表征缺水风险,没有划分等级,不能给人以直观认识。

因此,本文根据1979年-2009年的北京市水资源数据,采用灰色关联分析(GRA)方法,筛选出主要的水资源短缺风险因子;然后根据筛选后的短缺风险因子,用模糊聚类分析法,对北京市的缺水风险进行聚类;最后用灰色系统GM(1,1)法对未来6年的短缺风险因子的数值进行预测,并综合考虑了南水北调的调水作用进行模糊聚类分析,从而得出2012年-2015年的水资源短缺风险水平。

2 方法与数据

2.1 方法

2.1.1 灰色关联分析(GRA)方法 灰色关联分析是一种多因素统计分析方法。如果样本数据列反映出两因素变化的态势(方向、大小、速度等)基本一致,则它们之间的关联度较大,反之关联度较小。与其他传统的多因素分析方法相比,灰色关联分析对数据要求较低且计算量小,结果比较客观^[8]。水资源短缺风险的产生是一个多因素、多层次的复杂过程,受到多重条件的约束和众多繁杂因素不同程度的影响,即信息的不完全性和非确知性,这就是系统的灰色性^[9]。因此本文采用灰色关联分析法研究水资源短缺风险因子是可行的。

灰色关联分析一般包括:

- (1)确定分析序列;
- (2)对变量序列进行无量纲化;

(3)求差序列、最大差和最小差;

(4)计算关联系数;

(5)计算关联度;

(6)依关联度排序。

无量纲化后计算参考序列与其余各比较序列对应的绝对差值,形成如下绝对差值矩阵:

$$\Delta_{0i} = \begin{pmatrix} \Delta_{01}(1) & \Delta_{02}(1) & \cdots & \Delta_{0n}(1) \\ \Delta_{01}(2) & \Delta_{02}(2) & \cdots & \Delta_{0n}(2) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \Delta_{01}(N) & \Delta_{02}(N) & \cdots & \Delta_{0n}(N) \end{pmatrix}_{N \times n} \quad (1)$$

对绝对差值矩阵中数据作如下变换:

$$\xi_{0i}(k) = \frac{\Delta(\min) + \rho \Delta(\max)}{\Delta_{0i}(k) + \rho \Delta(\max)} \quad (2)$$

得到关联矩阵:

$$\xi_{0i} = \begin{pmatrix} \xi_{01}(1) & \xi_{02}(1) & \cdots & \xi_{0n}(1) \\ \xi_{01}(2) & \xi_{02}(2) & \cdots & \xi_{0n}(2) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \xi_{01}(N) & \xi_{02}(N) & \cdots & \xi_{0n}(N) \end{pmatrix}_{N \times n} \quad (3)$$

公式(2)中 ρ 称为分辨系数,一般依据公式(3)中数据情况多在0.1~0.5取值, ρ 越小越能提高关联系数间的差异,并无实际意义。 ρ 只影响关联度的大小,不影响相互之间的排序。在本文研究中依照惯例取 $\rho=0.3$ 。

比较序列与参考序列的关联程度是通过 N 个关联系数来反映的,求平均就可得到关联度:

$$d_{0i} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_{0i}(k) \quad (4)$$

对各比较序列与参考序列的关联度从大到小排序,关联度越大,说明比较序列与参考序列变化的态势越一致。

2.1.2 模糊聚类分析法 模糊聚类分析法是用数学方法定量地确定样本的亲疏关系,从而客观地划分类型的方法^[10]。事物之间的界限有些是清晰的,有些是模糊的。例如人群中的面貌相似程度是模糊的,天气阴晴之间的界限也是模糊的。由于水资源短缺风险分类界限往往不分明,带有模糊性,因此本文采用模糊聚类分析法进行分类。

模糊聚类分析步骤可以分为:

- (1)数据标准化;
- (2)建立模糊相似矩阵;

(3)求解传递闭包;

(4)求解模糊矩阵的截矩阵。

不同的数据有不同的量纲,因此需要进行适当的变换,将数据压缩到区间[0,1]。建立模糊相似矩阵又称为标定,标出衡量被分类对象间相似程度的统计量 r_{ij} 。其中 c 为适当选取的参数,它使得 $0 \leq r_{ij} \leq 1$,本文中取 $c=0.1$ 。

$$r_{ij} = 1 - c \cdot d(x_i, x_j) \quad (5)$$

本文用二次方法求解传递闭包。设 $\tilde{R}=(r_{ij})_{mn}$ 为模糊矩阵,对于任意的 $\lambda \in [0,1]$,称 $\tilde{R}_\lambda=(r_{ij}^{(\lambda)})_{mn}$ 为模糊矩阵 $\tilde{R}=(r_{ij})_{mn}$ 的 λ -截矩阵,其中:

$$r_{ij}^{(\lambda)} = \begin{cases} 1, & r_{ij} \geq \lambda \\ 0, & r_{ij} < \lambda \end{cases} \quad (6)$$

求出 λ 为某一数值时的截矩阵,将矩阵中相同的行归为同一类,即可得到对应的对象的分类。

2.1.3 灰色系统GM(1,1)法 GM(1,1)模型是运用灰色模型理论,将一组无规则的原始数据序列,通过逐次累加,生成新的有规律的数据序列,弱化原有数据序列的随机性,并在新的数据序列的基础上,用指数曲线逼近^[11]。相比其他预测模型,该模型能够充分利用已知信息寻求系统的运动规律,使原始数据的起伏显著弱化。

灰色系统GM(1,1)的建模步骤为:

- (1)由原始数据序列计算一次累加序列;
- (2)求解一阶线性微分方程;
- (3)计算时间响应方程;
- (4)精度检验与预测。

将原始数据累加以弱化随机序列的波动性和随机性,得到新的数据序列为:

$$x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(N)) \quad (7)$$

对 $x^{(0)}$ 建立一阶线性微分方程:

$$\frac{dx^{(0)}}{dt} + ax^{(0)} = u \quad (8)$$

式中 a, u 为待定系数。只要求出参数 a, u , 就可以求出 $x^{(0)}$, 进而求出 $x^{(0)}$ 的预测值。把 a 和 u 代入时间响应方程:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = [x^{(0)}(1) - \frac{u}{a}]e^{-ak} + \frac{u}{a} \quad (9)$$

当 $k=1, 2, \dots, N-1$ 时,由时间响应方程计算

得的 $\hat{x}^{(1)}(k+1)$ 是拟合值;但 $k \geq N$ 时, $\hat{x}^{(1)}(k+1)$ 为预报值。这是相对于一次累加序列 $x^{(1)}$ 的拟合值,用后减运算还原,就可以得到原始序列 $x^{(0)}$ 的拟合值和预报值。

最后计算后验差比值 C (即残差序列方差与原始序列方差的比值),进行精度检验与预测(表1)。

表1 预测精度等级对照

Table 1 Prediction accuracy level table

预测精度等级	后验差比值 C	预测精度等级	后验差比值 C
1级(好)	$C \leq 0.35$	3级(勉强)	$0.5 < C \leq 0.65$
2级(合格)	$0.35 < C \leq 0.5$	4级(不合格)	$C \geq 0.65$

2.2 数据来源

本文数据来源于《北京统计年鉴2010》、历年的《中国水资源公报》等。综合考虑代表性、一致性和数据的获取难易程度,本文统计了1979年-2009年的总用水量、农业用水量、工业用水量、第三产业及生活等其它用水量、降雨量、污水处理率、常住人口、水资源总量、缺水量等数据。降雨量采用水文数据。由于外流域调水仅在特殊年份出现,因此水资源总量不考虑应急调水。由于生态用水量统计年限较短,因此也不加以考虑。

3 研究结果与分析

3.1 数据预处理

本文选取农业用水量、工业用水量、第三产业及生活等其它用水量、降雨量、污水处理率、常住人口作为比较序列。由于各项指标的量纲不一,因此,首先分别对6个指标的数据进行归一化处理。由于降雨量的增加和污水处理率的提高意味着水资源短缺风险降低,而其他因素却随着数量的增加而增大水资源短缺的风险,因此,将降雨量和污水处理率归一化后再求倒数。将1979年-2009年的缺水率作为参考序列。缺水率=(总用水量-水资源总量)/总用水量,通常用于刻画区域水资源系统的缺水程度。

3.2 灰色关联分析结果

通过Matlab编程计算,求得6个指标与缺水率的关联度 d ,如表2所示。可以看出: $d_4 > d_6 > d_3 > d_1 > d_2 > d_5$, 所以,影响北京市水资源短缺的6个指

2013年1月

标的相对重要程度排序为:降雨量、常住人口、第三产业及生活等其它用水、农业用水、工业用水、污水处理率。

3.3 模糊聚类分析结果

根据灰色关联度的计算结果,污水处理率对缺水率的贡献远小于其他指标,而且,通过对已知数据的相关性检验得第三产业及生活等其它用水量与常住人口的相关系数为0.9601,呈现高度正线性相关。为使干扰因素更少,选取降雨量、农业用水量、工业用水量、第三产业及生活等其它用水量、缺水率作为模糊聚类分析的输入样本。通过 Matlab 进行编程计算,结果为:当 $\lambda = 0.9306$ 时,可以将 1979 年-2009 年的水资源数据归为 5 类。分类没有表明风险等级关系,为了区分这 5 类的风险等级,分别计算各类的缺水率。分析结果如表 3 所示。

依据模糊聚类分析结果,画出缺水风险等级图如图 1 所示(1 代表“低风险”;2 代表“较低风险”;3 代表“中等风险”;4 代表“较高风险”;5 代表“高风险”)。

3.4 灰色系统 GM(1,1)分析结果

将 1979 年-2009 年北京市水资源数据导入灰色系统 GM(1,1)进行模拟。发现模拟效果不甚理想,其中工业用水量和农业用水量的后验差比值分别为 0.6299 6 和 0.6799 2,预测精度仅为 3 级(勉强)。而第三产业及生活其他用水量的模拟效果较好,后验差比值为 0.2535 7,预测精度等级为 1 级(好)。

为了提高预测精度,在初次模拟之后,计算残差,剔除原始数据中的异常值。本文中的异常值定义为:残差与残差平均值的差值超过两倍的残差标准差的原始值,若超过三倍残差标准差,则称为高度异常的异常值。

剔除了原始数据中的异常值之后,重新用灰色系统 GM(1,1)模型进行模拟,此时模拟效果良好,预测

精度均达到了 1 级(好)。预测未来 6 年,即 2010 年-2015 年的北京市用水状况,计算结果如图 2 和表 4 所示。由于多年降雨量和水资源总量具有周期性规律,用 GM(1,1)模型进行预测效果不甚理想。所以本文采用水文频率分析方法,采用 P-III 型曲线分别计算 $P=25\%$ (丰水年)、 $P=50\%$ (平水年)、 $P=75\%$ (枯水年)和 $P=95\%$ (极端枯水年)的降雨量和水资源总量。

另外,根据南水北调工程调水计划,中线一期工程 2014 年秋季开始将为北京供水 3~5 亿 m^3 , 2015 年以后每年增加到 10 亿 m^3 。因此,本研究将北京市 2014 年的水资源总量增加 5 亿 m^3 , 2015 年的水资源总量增加 10 亿 m^3 。

综合以上计算结果,预测得 2010 年-2015 年北京市水资源状况如表 5 所示。

表 2 各指标与缺水率的关联度值

Table 2 Relevancy degree between factors and ratio of water deficiency

农业用水量	工业用水量	第三产业及生活等其它用水	降雨量	污水处理率	常住人口
d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6
0.8879	0.8817	0.8987	0.9124	0.7685	0.8999

表 3 1979 年-2009 年模糊聚类分析结果

Table 3 Results of fuzzy cluster analysis during 1979-2009

风险等级	年份	缺水率(%)
低风险	1985, 1987, 1996	-20
较低风险	1979, 1984, 1988, 1990, 1991, 1994, 1998	6
中等风险	1980, 1981, 1982, 1983, 1986, 1995, 2008	28
较高风险	1989, 1997, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2009	45
高风险	1992, 1993, 1999, 2000	58

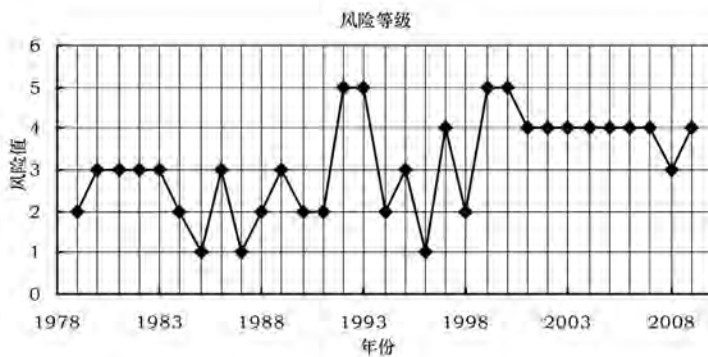


图 1 1979 年-2009 年北京市缺水风险等级

Fig.1 Water resources shortage risk level during 1979-2009

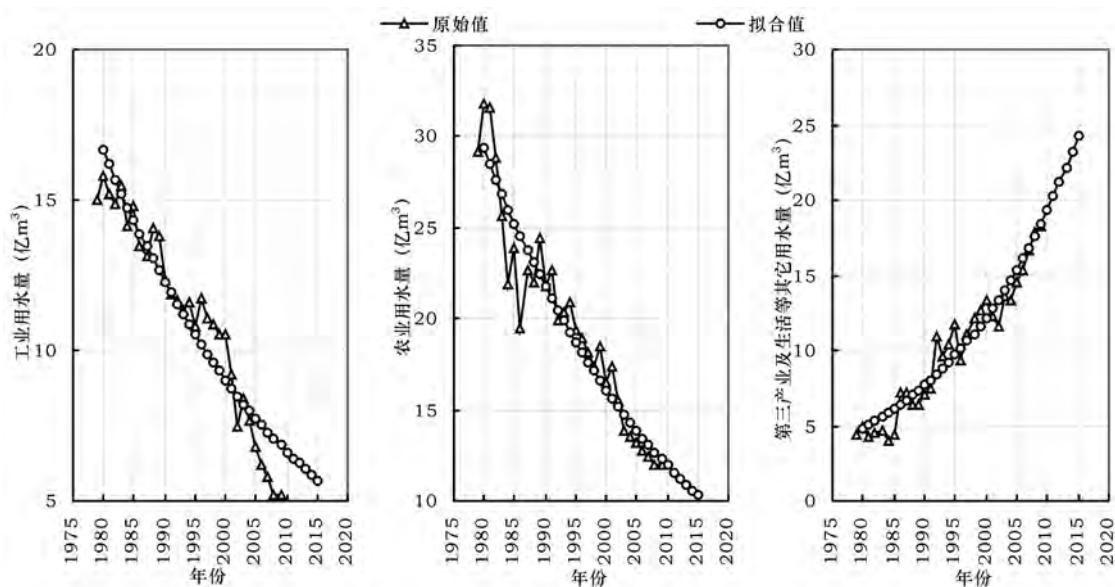


图2 各类型用水量拟合曲线

Fig.2 The fitted curve of water use

表4 2010年–2015年预测值

Table 4 Predicted value of 2010–2015

(亿 m³)

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	后验差比值
第三产业及生活等其它用水量	19.32	20.22	21.18	22.17	23.22	24.3	0.2535 7
农业用水量	11.93	11.58	11.24	10.91	10.59	10.27	0.3089 3
工业用水量	6.63	6.43	6.24	6.04	5.86	5.68	0.3008 1

将表5数据代入模糊聚类分析模型,分别预测在丰水年、平水年、枯水年和极端枯水年条件下的风险水平。将第三产业及生活等其它用水量、农业用水量、工业用水量进行归一化处理,处理成0至1区间的数值,显示出相对大小。结果如图3所示。

4 讨论

由灰色关联分析结果可知,降雨量是影响水资源的最为重要的因素。然而,近年来由于受到气候变化的影响,北京市的降雨量有减少的趋势。根据1956年–2010年的逐年降雨量(水文数据)计算得到,北京市的年降雨量以平均每年2.95mm的速率减少。80年代以来,北京市进入了一个枯水周期。其中,1999年降雨量仅有385mm,属于极端枯水年,此后除了2008年的降雨量达到了639mm,其他大部分年份都在500mm以下,属于枯水年。因此,进入新世纪以来,北京市的水资源状况不容乐观。这一观点在徐宗学^[17]、李森^[18]等学者的研究中可得以

验证。

常住人口和第三产业及生活等其它用水量具有很高的相关性,两者的关联度值非常接近。人口的膨胀,将会推动城市化的发展,很大程度上也会推动服务业的发展,从而增加第三产业及生活其他用水量的增加。童玉芬的研究认为:2011年–2020年,北京市的人口水资源承载力不高,人口对水资源的承载压力十分巨大^[19]。因此,适当控制人口增长,采用水资源集约型的增长方式和结构,大力推行节约用水,是十分必要的。

北京市的农业用水量逐年减少,但是仍然是用水大户,基本占到了总用水量的25%左右。农业生产占地面积大,用水效率低,而北京市水资源短缺的状况不适合发展耗水量比较大的农业。夏军等认为:农业水资源利用效率的高低直接影响到水资源可持续利用和整个国民经济的持续发展,必须将农业水资源的高效利用与替代途径纳入到国家的

2013年1月

表5 2010年-2015年北京市水资源状况
Table 5 Water Resources' value of Beijing during 2010-2015

年份		2010	2011	2012	2013	2014	2015
第三产业及生活等其它用水量(亿 m ³)		19.32	20.22	21.18	22.17	23.22	24.30
农业用水量(亿 m ³)		11.93	11.58	11.24	10.91	10.59	10.27
工业用水量(亿 m ³)		6.63	6.43	6.24	6.04	5.86	5.68
总用水量(亿 m ³)		37.88	38.23	38.66	39.12	39.67	40.25
降雨量(mm)	P=25%(丰水年)	633.45	633.45	633.45	633.45	633.45	633.45
	P=50%(平水年)	539.97	539.97	539.97	539.97	539.97	539.97
	P=75%(枯水年)	455.88	455.88	455.88	455.88	455.88	455.88
	P=95%(极端枯水年)	379.08	379.08	379.08	379.08	379.08	379.08
水资源总量(亿 m ³)	P=25%(丰水年)	34.94	34.94	34.94	34.94	39.94	44.94
	P=50%(平水年)	28.38	28.38	28.38	28.38	33.38	38.38
	P=75%(枯水年)	22.37	22.37	22.37	22.37	27.37	32.37
	P=95%(极端枯水年)	14.67	14.67	14.67	14.67	19.67	24.67
缺水率	P=25%(丰水年)	0.08	0.09	0.10	0.11	-0.01	-0.12
	P=50%(平水年)	0.25	0.26	0.27	0.27	0.16	0.05
	P=75%(枯水年)	0.41	0.41	0.42	0.43	0.31	0.20
	P=95%(极端枯水年)	0.61	0.62	0.62	0.63	0.50	0.39

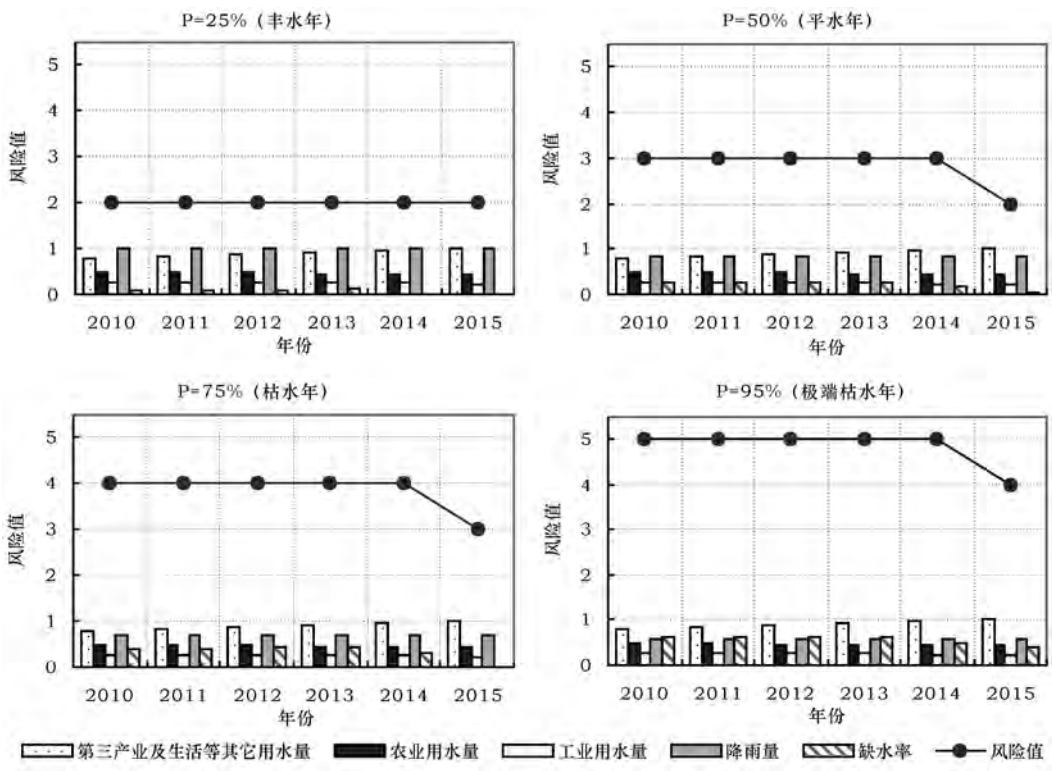


图3 2010年-2015年缺水风险等级

Fig.3 Water resources shortage risk level during 2010-2015

中长期科技战略规划^[20]。因此,发展高效率的节水灌溉技术,调整产业结构,提高用水效率,发展低耗水,高产出产业,能在很大程度上缓解水资源压力。

污水处理率和缺水率的关联度较低。从原始数据来看,在1995年以前,北京市的污水处理率都在10%以下,某些年份甚至仅有1.2%。从1995年

开始,污水处理率开始有了大幅度的提高,到2009年甚至达到了80.29%,可见,北京市在污水处理方面做了大量的工作。污水处理率与缺水率的关联度低,并不是意味着污水处理不重要,只是相对降雨量和其他用水量而言,污水处理率的提高对缺水率的影响较小。这也说明,要有效地缓解水资源矛盾,不能走先污染后治理的道路,而是应该提高节水意识,提高用水效率,从根源减少水资源浪费。

从模糊聚类分析的结果(图1)可以看出,在1999年之前,北京市的水资源短缺风险基本上处于较低水平,仅仅是在1992年和1993年这两个枯水年处于高风险水平。1999年之后,北京市连续遭遇枯水年,缺水风险长年处于较高水平。2008年的降雨量达到了626mm,属于丰水年,但是仍然属于中等风险。这可能是因为2008年以前连续干旱,导致了下垫面产生较大的变化,水库库容降低,地下水水位下降,“欠债”太多导致。这说明在同样的降雨量和用水条件下,连续的枯水年之后会导致相对较高的缺水风险。

根据聚类分析结果,在丰水年的情形下,北京市的水资源状况良好,全部处于较低风险水平。在2015年南水北调工程调水增加到10亿 m^3 时,甚至出现了水资源的富余。在平水年的情形下,北京市的水资源短缺处于中等风险水平,调水10亿 m^3 后,可降低至较低风险水平。在枯水年和极端枯水年情形下,形势不容乐观,水资源短缺风险将处于较高风险甚至高风险等级。尽管2014年可以调入5亿 m^3 水资源进行一定程度的缓解,但是不能降低风险等级。2015年调入10亿 m^3 水资源后,可以使短缺风险降低一个等级。

5 结论

(1)影响北京市水资源短缺的6个指标的相对重要程度依次为:降雨量、常住人口、第三产业及生活等其它用水量、农业用水量、工业用水量、污水处理率。近年来降雨量的减少是北京市水危机加重的最主要因素。此外,人口膨胀和城市化发展加大了第三产业及生活等其它用水量,也在很大程度加重了水资源危机。因此,采取有效管理措施,控制首都人口的继续膨胀,调整产业结构,加速产业升

级,同时开源与节流并重,是北京市水资源短缺局面得以扭转的有效举措。

(2)1979年-2009年的风险等级变化表明,在1999年之前,北京市的水资源风险主要处于较低风险等级,在某些丰水年和枯水年会有所波动。1999年之后,北京市的水资源状况长期处于较高的风险等级。因此,采取有效措施,扭转北京市水资源的供需矛盾刻不容缓。

(3)在丰水年条件下,2010年-2015年北京市水资源状况处于较低风险水平;在平水年处于中等风险水平;在枯水年和极端枯水年的条件下,将处于较高风险甚至高风险的水平。2014年南水北调工程为北京调水5亿 m^3 可以在一定程度上缓解水资源压力,但是不能降低风险等级。2015年增加调水至10亿 m^3 后,才能够使风险等级降低。

参考文献(References):

- [1] 阮本清,韩宇平,王浩,等. 水资源短缺风险的模糊综合评价[J]. 水利学报,2005,36(8):906-913.
- [2] 韩宇平,阮本清,汪党献. 区域水资源短缺的多目标风险决策模型研究[J]. 水利学报,2008,39(6):667-673.
- [3] 张士锋,陈俊旭. 华北地区缺水风险研究[J]. 自然资源学报,2009,24(7):1192-1200.
- [4] 王红瑞,钱龙霞,许新宜,等. 基于模糊概率的水资源短缺风险评价模型及其应用[J]. 水利学报,2009,40(7):813-821.
- [5] 李九一,李丽娟,柳玉梅,等. 区域尺度水资源短缺风险评估与决策体系[J]. 地理科学进展,2010,29(9):1041-1048.
- [6] 郭跃华. 水资源短缺的风险因子识别模型[J]. 南通大学学报(自然科学版),2011,10(4):79-83.
- [7] 魏歆,董小小,唐棣,等. 水资源短缺风险因子的筛选模型[J]. 数学的实践与认识,2011,41(2):140-146.
- [8] 杜栋,庞庆华,吴炎,等. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [9] 陈守煜. 工程水文水资源系统模糊集分析理论与实践[M]. 大连:大连理工大学出版社,1998.
- [10] 高新波. 模糊聚类分析及其应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2004.
- [11] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1990.
- [12] 北京市统计局,国家统计局北京调查总队. 北京统计年鉴2010[M]. 北京:中国统计出版社,2010.
- [13] 王红瑞,钱龙霞. 基于模糊概率的水资源短缺风险评价模型及

2013年1月

- 其应用[J]. 水利学报, 2009, 40(7):813-825.
- [14] 门宝辉, 梁川, 等. 评价区域水资源开发利用程度的集对分析法[J]. 南水北调与水利科技, 2003, 1(6):30-32.
- [15] 贾绍凤, 张士锋, 赵燮京, 等. 区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系[J]. 地理科学进展, 2002, 21(6):123-132.
- [16] 张士锋, 陈俊旭. 水资源系统风险构成及其评价—以北京市为例[J]. 自然资源学报, 2010, 25(11):1855-1860.
- [17] 徐宗学, 张玲, 阮本清. 北京地区降水量时空分布规律分析[J]. 干旱区地理, 2006, 29(2):186-192.
- [18] Li Miao, Xia Jun, Meng Dejuan. Long-term trend analysis of seasonal precipitation for Beijing China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2012, 3(1): 64-72.
- [19] 童玉芬. 北京市水资源人口承载力的动态模拟与分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(9):42-48.
- [20] 夏军, 刘孟雨, 贾绍凤, 等. 华北地区水资源及水安全问题的思考与研究[J]. 自然资源学报, 2004, 19(9):550-560.

Risk Assessment and Prediction of Water Shortages in Beijing

LIAO Qiang^{1,2}, ZHANG Shifeng¹, CHEN Junxu^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A shortage of water resources in Beijing has become a critical factor limiting its development. Many factors influence the risk of water shortage and because of their nature it is difficult to develop an accurate mathematical model to describe this risk. This study is based on water data from 1979 to 2009 for Beijing and uses grey relationship analysis to screen water shortage risk factors. Based on screened shortage risk factors, fuzzy cluster analysis was applied to cluster risk level and predict water shortage risk from 2010-2015. The results reveal the major risk factors as precipitation, population, service and domestic water, agricultural water, industrial water and percentage of waste water treatment. Prior to 1999, water shortage risk remained at a relatively low level, with fluctuations in high and low precipitation years. After 1999, risk has been consistently high. According to our predictive model, in high precipitation years, water shortage risk will be low, in normal precipitation years it will be medium, and in low or extremely low precipitation years the risk will be relatively high. Under the South-North Water Transfer Project, 0.5 billion cubic meters of water will be transferred to Beijing by September 2014. This will increase to one billion cubic meters by the end of 2015. It is clear that the South-North Water Transfer Project will play a key role in addressing the water crisis in Beijing. The results of our study are objective and provide a clearer understanding of the risk of water shortages in Beijing. These results will aid water resource planning, regional development planning and policy.

Key words: Water shortage; Risk; Grey relationship analysis; Fuzzy cluster analysis; Grey model; Beijing City