

区域尺度水资源短缺风险评估与决策体系 ——以京津唐地区为例

李九一¹, 李丽娟¹, 柳玉梅^{1,2}, 梁丽乔¹, 李 斌^{1,2}

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

摘 要:水资源短缺风险评估是当今风险研究中的热点问题之一。然而,区域内部差异性使得区域尺度水资源短缺风险相比城市尺度更为复杂。本文构建了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,并在京津唐地区进行了实例研究。结果表明,2020年北京、天津、承德、张家口为“低风险”,秦皇岛为“中风险”,唐山、廊坊为“高风险”。京津唐地区水资源短缺风险防范对策应以节约用水、加强非常规水源利用为主,并加强区域内部调节,适度增加唐山等地的分水量。在廊坊市,应考虑降低复种指数减少农业用水需求。区域水资源短缺风险评估与决策体系能够直观反映区域水资源风险和规避风险的能力,揭示区域水资源短缺问题的特征,从而能更好地服务于水资源管理决策。

关 键 词:水资源短缺;风险评估;风险决策;京津唐地区

1 引言

1.1 水资源短缺风险研究进展

据世界卫生组织(WHO)统计,全球约有12亿人口缺乏安全饮用水,1/3的人口面临水资源短缺问题,水资源危机已经成为全球性问题^[1]。20世纪80年代以来,国际上开展了大量有关水资源短缺(Water Scarcity)研究。水资源短缺表现为生活、工业、农业、环境等用户的用水需求得不到保障,与水资源数量及其时空分布、气候条件、经济结构、用水习惯、用水水平、管理水平等因素有关。Falkenmark指数^[2]、社会水资源压力指数(SWSI)^[3]、IWMI模型^[4]、水匮乏指数(WPI)^[5]等指数和模型,先后应用于全球尺度的水资源短缺风险评估。水资源短缺风险问题也日益得到国际社会及学术界的关注,2003年成立的国际综合风险防范理事会(IRGC)将水资源短缺风险作为其关注的焦点之一。

随着社会经济的发展,特别是城市化水平的提高,对水资源供给保障率的要求日益提高。因此,国际上开展了大量有关城市供水风险评估,研究单一

水利工程或城市综合水源的供水风险问题。1982年,Hashimoto等发展了可靠性、易损性、可恢复性3个指标评估供水风险^[6]。其中,可靠性代表系统处于正常状态的保障率,易损性用来描述失事事件对系统造成的损失,可恢复性用来描述系统从失事状态恢复正常的可能性。在此基础上得出的供水方案,是以降低供水系统失事概率、减少经济损失、保证恢复能力为目标的最优方案。在城市供水风险的研究中,这些指标得到了广泛的应用,如在日本福岡地区,采用这些指标评估了干旱期的供水风险,并通过建立水库调度与供水管理模型,优化了干旱期供水管理方案,进而降低干旱期供水风险^[7-10]。

随着全球气候变化对水资源系统的影响日益显著,近年来,国外开展了有关气候变化对区域水资源保障风险的研究。研究主要通过对气候变化情景下降水、蒸发等水文要素的分析,分析气候变化可能给水资源系统带来的影响,结合区域人口与经济发展愿景,探讨未来区域供水安全问题^[11-15]。

1.2 区域尺度研究难点与研究进展

在区域尺度上研究水资源短缺风险问题,有针

收稿日期:2010-01; 修订日期:2010-05.

基金项目:国家科技支撑项目(2006BAD20B06); 欧盟项目(SWITCH/WP5.2); 中科院地理科学与资源研究所创新项目资助。

作者简介:李九一(1982-),男,汉族,辽宁省建昌县人,助理研究员。主要研究方向为水资源保障及其风险评价与管理、生态需水理论与方法。E-mail: lijuyi@igsnrr.ac.cn.

通讯作者:李丽娟(1961-),女,吉林省吉林市人,研究员,博导,主要研究方向为水资源综合管理、生态需水理论与方法。

E-mail: lilj@igsnrr.ac.cn.

对性地提出风险管理方案,可以有效提高区域水资源安全保障程度。因此,区域尺度水资源短缺风险研究日益受到重视,国内外学者在理论与方法上取得了一系列进展。

与城市尺度相比,区域水资源短缺风险评价更为复杂。一方面,由于区域社会经济发展水平不均,缺水导致的经济损失难以定量计算。另一方面,由于区域来水—供水—用水体系过于复杂,水资源配置对区域水资源短缺风险的影响难以定量评估。在国外的研究中,主要是通过风险因子的分析,定性评估风险水平,为决策者制定合理的水风险管理措施提供理论支撑^[16-17]。

近年来,国内学者也开始研究水资源短缺风险问题。阮本清和韩宇平等人最早探讨水资源短缺风险评价理论与方法,认为水资源短缺风险是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概率以及由此产生的损失。在此基础上,以首都圈为例,研究了水资源短缺风险的模糊综合评价方法,并在水资源短缺风险分析和评价的基础上,构建了区域水资源短缺的多目标风险决策模型^[18-22]。马黎等^[23]构建了水资源短缺风险评价指标体系,采用模糊层次分析方法对全国水资源二级分区水资源短缺风险进行了评价,揭示了我国水资源短缺空间分布格局。刘登伟^[24]基于水资源承载力理论,构建了水资源短缺风险指数,对京津冀都市圈水资源短缺风险进行了评价。

缺水与经济损失关系的研究较少,无法建立缺水风险脆弱性曲线,使得定量计算缺水经济损失成为区域尺度水资源短缺风险研究中的难点。美国加利福尼亚大学构建了 CALVIN 模型,建立区域供水网络体系,设定各用水节点需水量、供水路线的供水能力,模拟水文变化在多水源供水体系中导致缺水事件发生的概率;通过研究各用水节点缺水—经济损失之间的关系,计算缺水导致的经济损失;基于风险管理理论,在定量评估经济损失的基础上,研究新建水源与供水工程、水资源优化调度、节水管理等方案的可行性,进而得出区域最优水资源管理方案。该成果在加利福尼亚州的应用取得了一系列的进展^[25-29],但由于模型参数较多,在其他区域的应用受到限制^[30]。国内有关缺水—社会经济损失关系的研究还较少,目前引入 CALVIN 等量化模型还存在困难,评价仍只能用定性分析指标与模型。

2 水资源短缺风险评估与决策体系

2.1 水资源短缺风险评估指标设计

由于基础水利工程建设边际成本的增加和水环境问题的日益尖锐,依靠工程措施来满足人类用水需求的模式逐渐受到质疑,而提高水资源利用效率的“软途径”越来越受到重视,包括制定合理水价、建立水市场等非工程措施^[31]。因此,在水资源相关问题的决策上,公众参与逐步成为大趋势。发展一种能为缺乏相关技术背景的官员、投资者、生态学家、经济学家以及普通大众所理解的技术手段,是给水资源专家提出的现实要求。概念明晰、计算简单、便于比较的指标,更适合作为这种决策体系中的工具。Martin-Carrasco 等^[32]在对西班牙埃布罗河流域的有关研究中,遴选了需水保障率、需水保障可靠性、水资源利用率、供水能力随保障率变化率等 4 个指标,评估干旱因素驱动的水资源短缺风险。该方法易于理解,方便在相关决策中应用。

借鉴上述方法,本文选择水资源供给保障率、水资源保障可靠性、水资源利用率、水资源利用效率 4 个指标,构建了区域尺度水资源短缺风险评估与决策框架。水资源供给保障率指标用于描述多年平均状态下供水保障程度,水资源保障可靠性指标用于描述一定风险水平下的供水保障程度,两者综合反映区域水资源短缺风险发生的概率。水资源利用率指标描述水资源开发利用的潜力,水资源利用效率指标描述节约用水的潜力,两者综合反映区域适应水资源短缺的潜力大小。4 个指标能够直观反映区域风险发生的概率以及规避风险的能力,揭示区域水资源短缺问题的特征,便于制定有针对性的应对策略。

2.2 水资源短缺风险评价指标

2.2.1 水资源供给保障率

水资源供给保障率用来描述区域供水保障能力,计算公式如下:

$$I_s=\frac{A}{D} \tag{1}$$

式中: I_s 表示水资源供给保障率; A 表示在正常水平下(多年平均、 $P=50\%$ 来水保证率)的区域可供水量; D 表示对应来水条件下的区域水资源需求总量。

正常条件下,水资源可供水量取决于水资源丰富程度与区域供水设施的完善程度;水资源需求主

要取决于区域人口、社会经济结构、用水管理水平等因素。 I_s 采用可供水量与水资源需求量之比来描述多年平均水平下的用水安全保障水平。若 $I_s < 1$ ，则代表区域需水量不能得到满足，会因供水不足而导致社会经济损失，或者会因为过度开发地下水资源等不当措施引发相关环境问题。

2.2.2 水资源保障可靠性

水资源保障可靠性用于描述在一定的保证率条件下，水资源需求是否能够得到满足，计算公式如下：

$$I_R = \frac{A_r}{D_r} \tag{2}$$

式中： I_R 表示水资源保障可靠性； A_r 表示在 $r\%$ 来水保证率时的区域可供水量； D_r 表示对应水平下的水资源需求量； r 表示.....。

鉴于工程建设成本边际效应的影响，建立完全无风险的供水体系是不经济的。每个区域都具有一定可接受的风险水平， I_R 用来描述该风险水平下，水资源需求能否得到有效满足。 r 的取值需要根据区域经济结构等因素来确定，如以灌溉农业为主的地区，可取 75%；而以城市为主要供水对象的区域，可取 95%。在实际操作中，应根据各用水户对水资源需求保障的要求，考虑区域水资源系统实际情况来具体确定。

在枯水条件下，可供水量小于多年平均水平，而灌溉需水的增加，需水量通常会大于多年平均水平，所以 $I_R < I_s$ 。如果 $I_R < 1$ ，则代表区域出现缺水的概率大于可接受的水平。

2.2.3 水资源利用率

水资源利用率是在评估区域水资源短缺状况时经常被采用的一个指标，计算公式如下：

$$I_U = \frac{U}{W} \tag{3}$$

式中： I_U 表示水资源利用率； U 表示多年平均水平下的区域实际用水量； W 表示包括可利用入境水资源量在内区域水资源总量。

I_U 用于描述区域用水对水资源系统的影响程度，也代表水资源可供进一步开发利用的潜力。在有关对全球水资源的评价中认为，当 $I_U < 20\%$ ，水资源系统受到的影响较小；当 $I_U > 40\%$ ，区域处

于较严重的水资源紧缺状态^[33]。但实际上，在很多缺水地区，该项指标远大于 40%，甚至超过 100%。所以，在划定该项指标的等级时，需要根据区域实际情况来具体确定。

2.2.4 水资源利用效率

水资源利用效率用于描述区域节水的水平。用水户分为农业、工业、生活与环境，其中前两者通常占绝大部分用水量。同时考虑到数据的可获取性，本文采用农业、工业两大系统的用水水平来代表整体水平，具体计算公式如下：

$$I_E = \frac{\alpha \cdot P_A + \beta \cdot P_I}{P_A + P_I} \tag{4}$$

式中： I_E 表示水资源利用效率； α 表示农业用水有效利用系数； β 表示工业用水重复利用率； P_A 、 P_I 分别表示农业用水、工业用水占总用水量的比例。

在经济发展水平较高、水资源较为紧缺的地区， I_E 通常会比较高。如果 I_E 偏低，表明区域节水工作有待加强。

2.3 水资源短缺风险评估与决策体系

根据以上 4 个指标，建立了区域尺度水资源短缺风险分析、评估与决策框架(表 1)。表 1 简明的阐述了如何根据 4 项指标的大小，分析区域风险问题，划定风险等级，并提出主要策略。

在表 1 中，“问题”分析了区域水资源短缺主要风险问题，包括：1 供水可靠性低于可接受水平，容易出现水资源短缺（其中，1A 代表轻度；1B 代表中度；1C 代表重度）；2 水资源利用率过高，容易引发生态与环境问题；3 用水浪费，用水效率与水资源紧缺程度不相匹配。

表 1 区域尺度水资源短缺风险评估与决策体系表

Tab.1 Framework for water scarcity risk assessment and solution at regional scales

			$I_U -$		$I_U =$		$I_U +$	
			$I_{\text{丰}}$	$I_{\text{平}}$	$I_{\text{丰}}$	$I_{\text{平}}$	$I_{\text{丰}}$	$I_{\text{平}}$
$I_{\text{丰}}$	$I_{\text{丰}} +$	问题措施					2	2-3
			1A	1A	1A	1A-3	A-C2	A-C2
	$I_{\text{平}} +$	问题措施	B1	A	B1	A	1A-2	1A-2-3
			B1	A	B1	A	A-C2	A-C2
$I_{\text{平}}$	$I_{\text{丰}} +$	问题措施	1B	1B	1B	1B-3	1B-2	1B-2-3
			B1	A-B1	B1	A	A-C2	A-C2
	$I_{\text{平}} =$	问题措施	1B	1B	1B	1B-3	1B-2	1B-2-3
			B2	A-B2	B2-C1	A-B2	A-B2-C2	A-C2
$I_{\text{丰}}$	$I_{\text{丰}} +$	问题措施	1C	1C	1C	1C-3	1C-2	1C-2-3
			B2	A-B2	B2-C1	A-B2-C1	A-B3-C2	A-B3-C2
	$I_{\text{平}} =$	问题措施	1C	1C	1C	1C-3	1C-2	1C-2-3
			B2	A-B2	B2-C1	A-B2-C1	A-B3-C2-D	A-B3-C2-D

注：①“+”代表相应指标较高，“=”代表指标数值为中等水平，“-”代表指标较低，具体划定需要根据实际情况确定；②表格填充颜色由浅至深分别代表“低风险”、“中风险”和“高风险”。

“措施”阐述了解决风险的措施,包括:A 节约用水,控制水资源需求;B 加强水源建设 (其中,B1 建设供水工程,增加供水能力;B2 通过建设多年调节水利工程、开发地下水源等加强多年调节能力;B3 在前两项基础上,积极开发雨水、微咸水、再生水等非常规水源);C 加强水资源管理与区域协调 (其中,C1 区域内部的水管理;C2 相邻区域间的水资源调配);D 改变经济结构适应水资源条件,或建设跨区域(流域)调水工程。

需要说明的是,评价指标选择、计算以及解决措施的确定不需要完全按照表 1,在具体应用中,可以根据区域实际特点、数据资料等情况,灵活选择类似的指标。

3 京津唐地区实例研究

3.1 研究区概况

本文选取的京津唐地区在行政区划上包括北京市、天津市以及河北省的唐山市、秦皇岛市、廊坊市、张家口市和承德市,该区大部分位于滦河及冀东沿海、海河北系水资源二级区,其他地区分属西辽河、东北沿黄渤海诸河、内蒙古内陆诸河、海河南系。京津唐地区总面积 13.1 万 km²,2005 年末常住人口为 4791 万人,区内人口集中、经济发达。研究区是我国水资源最紧缺的地区之一,1956–2000 年多年平均水资源量 153.5 亿 m³,人均水资源量仅 320 m³,属于重度资源型缺水地区。2005 年,区域用水总量 134.5 亿 m³,水资源利用率高达 88%。

20 世纪 80 年代以来,京津唐地区进入枯水周期,来水量减少,加剧了水资源供需矛盾^[34]。因地表水资源不足,只能过量开采地下水,已经形成了集中连片的浅层地下水漏斗和深层地下水漏斗。水资源的过度开发引发了一系列的生态与环境问题,包括洼淀萎缩及消失、河流断流、河口生态系统退化、地面沉降、海水入侵等。

水资源已经成为制约京津唐地区社会发展的重要因素,在区域尺度上研究该地区的水资源短缺风险问题,可以为相关水资源规划、区域发展规划等政策与决策提供依据,对于促进区域可持续发展具有重要意义。

3.2 风险水平选取

20 世纪 90 年代末期以来,京津唐地区用水量逐渐趋于稳定^[34]。但因水资源短缺导致供水不足,

用水受限制,用水量不能反应实际的水资源需求,未来用水量可能会进一步增加^[35],其中城市用水量会有较大规模增长^[36]。有研究预测,京津唐地区用水量将于 2020 年前后达到峰值^[37]。因此,本文选取 2020 年进行京津唐地区水资源短缺风险评估。

天然来水量越少,水资源可供水量越少,而需水量越大(灌溉用水需求增大),缺水事件发生的概率越大。建立完全无风险的供水体系是不经济的,每个区域可根据区域用水用户的特征及其重要性来确定可接受的风险水平。

根据水资源条件与社会经济状况,河北省各市可接受的风险水平在 75%~95%之间。由于该地区主要河流上均有多年调节型水库,对水资源的年际调节能力较强,加上地下水、外调水等相对稳定的水源占供水量比例较高,区域水资源供给受天然来水丰枯条件影响较小。极端枯水($P=95\%$)情景发生时,可以发挥大型水库的多年调节功能,适当超采地下水,区域供水能力与一般枯水年($P=75\%$)相差不大。而两种来水保障率下,农业需水量相同,所以两种保证率下缺水程度相差不大。因此,在分析河北省各市水资源保障可靠性指标时,可接受的风险水平一致选取 75%保证率来水情景。

与河北省各市相比,北京、天津两个直辖市对水资源安全保障的要求更高。海河流域水资源具有连枯连丰的特点,连续枯水年发生时,大型水库调节能力降低,地下水更新量减少,水资源供需矛盾更加突出。因此,选取连续枯水年作为北京、天津两市计算水资源保障可靠性指标时的风险水平。

3.3 可供水量与需水量计算

在有关研究^[34,38–39]的基础上,本文估算了 2020 年京津唐地区平水年($P=50\%$)、枯水年($P=75\%$)和连续枯水年 3 种情景下的可供水量(表 2)。各市可供水量是以现状工程条件、区域分水原则为基础,严格限制地下水超采,考虑外流域调水量与非常规水源开发利用后的最大可供水量。预测 2020 年京津唐地区可供水量为 177.8 亿 m³($P=50\%$)~164.9 亿 m³($P=75\%$),高于区域多年平均水资源量,这是因为可供水量中包括了可利用的过境水资源、南水北调工程调水量以及再生水利用、雨水利用、海水淡化利用等非常规水资源利用量。综合考虑区域社会经济发展与节水技术的推广,预计 2020 年京津唐地区需水总量 160 亿 m³($P=50\%$)~169.2 亿 m³($P=75\%$)。

与 2005 年实际用水量相比, 农业、工业需水量变化不大, 生活、生态需水量有较大幅度的增长, 与现状用水发展趋势保持一致。

从表 2 可以看出, 在南水北调工程通水、非常规水源大规模利用后, 京津唐地区水资源供需矛盾得以缓解。在平水年, 区域可供水量大于需水量, 局部地区的缺水问题

可以通过工程调度解决。 $P=75\%$ 的枯水情景下, 可供水量略小于需水量, 可以通过适度超采地下水加以调节。

其中, 北京、天津两地南水北调工程调水量大, 且非常规水资源利用量有较大幅度增长, 水资源保障程度有所提高, 只有在连续枯水情景下供水存在一定缺口。在现状区域分水原则下, 平水年水资源可利用量有较大富余。

$P=50\%$ 的平水年, 河北省各市 2020 年需水量与可供水量基本一致, 其中唐山、廊坊存在一定缺口。 $P=75\%$ 的枯水年, 各市基本都出现供水缺口, 其中唐山、廊坊缺口较大。

3.4 水资源短缺风险评估指标计算与等级划分

京津唐地区水资源短缺风险评估指标选取与等级划分标准见表 3:

- (1) 如前所述, 北京、天津 $r\%$ 选取连续枯水情景, 河北省各市 $r\%$ 选取 75%来水条件。
- (2) I_S 与 I_R 两项指标判断为“高”的下限, 按照区域供水管理能力确定。管理能力越强, 区域内部调节水资源的能力越强, 下限可适当取低。京津唐地区供水体系较完备, 水资源管理能力较强, 两指标判断为“高”的下限取 1.1。
- (3) I_U 指标用于描述水资源可供进一步开发利用的潜力, 如能考虑过境水资源利用相对更合理。水资源丰富指数(BWAI)^[40]综合考虑了区域自身与

表 2 2020 年京津唐地区多情景可供水量与需水量(单位: 亿 m^3)
Tab.2 Water available and water demand in 2020 under multiple scenarios in Beijing–Tianjin–Tangshan region (Unit: 10^8m^3)

	平水情景						缺水情景			连续枯水情景	
	农业	工业	生活	生态	需水量	可供水量	农业	需水量	可供水量	需水量	可供水量
北京	12.8	5.5	17.7	4.5	40.5	49.1	14.5	42.2	43.4	42.2	38.4
天津	13.1	6.5	8.8	2.2	30.6	38.5	15.6	33.1	34.6	33.1	29.6
唐山	24.7	6.6	5.7	0.9	37.9	35.6	26.5	39.8	34.2		
秦皇岛	8.3	1.5	2.9	0.5	13.3	13.5	8.7	13.6	13.5		
廊坊	8.5	1.4	3.1	0.3	13.3	13.2	9.6	14.4	12.6		
张家口	8.7	1.4	3.3	0.1	13.4	15.9	9.9	14.7	15.3		
承德	7.1	1.1	2.7	0.1	11.0	11.9	7.5	11.4	11.3		
总计	83.1	24.1	44.2	8.6	160.0	177.8	92.4	169.2	164.9		

表 3 水资源短缺风险评估指标选取与等级划分标准
Tab.3 Selection of indicators and criteria for classification in water scarcity risk assessment

	$r\%$	$I_S + / I_{R+}$	$I_S = / I_{R=}$	$I_S - / I_{R-}$	$I_U(BWAI) +$	$I_U(BWAI) =$	$I_U(BWAI) -$	$I_E +$	$I_E -$
北京	连续缺水	>1.1	0.95~1.1	<0.95	<60	60~75	>75	>0.80	<0.80
天津	连续缺水	>1.1	0.95~1.1	<0.95	<60	60~75	>75	>0.80	<0.80
唐山	75%	>1.1	0.95~1.1	<0.95	<60	60~75	>75	>0.75	<0.75
秦皇岛	75%	>1.1	0.95~1.1	<0.95	<60	60~75	>75	>0.70	<0.70
廊坊	75%	>1.1	0.95~1.1	<0.95	<60	60~75	>75	>0.72	<0.72
张家口	75%	>1.15	0.95~1.15	<0.95	<60	60~75	>75	>0.65	<0.65
承德	75%	>1.15	0.95~1.15	<0.95	<60	60~75	>75	>0.65	<0.65

表 4 水资源风险评估指标计算及等级划分
Tab.4 Caculation and classification of the indicators for water scarcity risk assessment

	I_S		I_R		$I_U(BWAI)$		I_E	
	I_S 值	等级	I 值	等级	I_U	等级	I_E	等级
北京	1.21	+	1.03	=	66.9	=	0.84	+
天津	1.26	+	1.05	=	69.6	=	0.82	+
唐山	0.94	-	0.86	-	63.0	=	0.75	+
秦皇岛	1.02	=	0.99	=	64.2	=	0.75	+
廊坊	0.99	=	0.87	-	55.3	+	0.75	+
张家口	1.19	+	1.04	=	65.7	=	0.70	+
承德	1.08	=	0.99	=	75.5	-	0.70	+

上游来水的丰富程度, 用于评价行政单元的水资源丰富程度更具合理性。因此, 本文选取了 BWAI 替代原有指标, 并根据京津唐地区实际特点确定了分级阈值。

(4) I_E 分级阈值根据行政区的水资源紧缺程度与经济能力来选取(表 3)。

在明晰京津唐地区水资源短缺风险评估指标的选取条件的基础上, 按照式(1)、式(2)、式(3)和式(4)分别计算 I_S 、 I_R 、 I_U 和 I_E 的值, 然后按照风险评估等级划分标准(表 3)划分了各项指标等级(表 4)。

3.5 水资源短缺风险评估与对策

根据表 4 的指标评价结果与表 1 所示的体系, 综合考虑京津唐地区水资源与社会经济发展实际情况, 确定水资源短缺风险评估与决策框架(表 5)。需要说明的是, 解决措施的选取与表 1 有一定区

表 5 2020 年京津唐地区水资源短缺风险评估与决策表
Tab.5 Water scarcity risk assessment and solution system in Beijing-Tianjin-Tangshan Region in 2020

地区	存在问题	解决措施	备注
北京	1A	B3	问题：1.供水可靠性低于可接受水平，容易出现水资源短缺(1A轻度，1B中度，1C重度)；2.水资源利用率过高，容易引发生态与环境问题；3.用水浪费，用水效率与水资源紧缺程度不相匹配。 措施：A.节约用水；B.加强水源建设(B1.建设供水工程；B2.提高年际间调节能力；B3.开发非常规水源)；C.加强水资源管理与区域协调(C1.区域管理；C2.区域间调配)；D.改变经济结构适应水资源条件，或建设跨区域(流域)调水工程。 填充颜色由浅至深分别代表“低风险”、“中风险”、“高风险”。
天津	1A	B3	
唐山	1C	A-B3-C2	
秦皇岛	1B	A-B2	
廊坊	1C-2	A-B3-D	
张家口	1A	B1	
承德	1B	B2	

别。比如,北京、天津应选取 B1 方案(建设供水工程),但考虑到两地供水系统建设较为完备,则选择了 B3 方案(开发非常规水源)。

由评价结果可以看出,张家口、承德两地地处区域上游,水资源相对丰富,水资源短缺风险水平较低。两地存在的主要问题是供水工程建设较为落后,风险防范应以加强水源建设为主,提高供水保障程度。

在南水北调工程通水以及加大非常规水源利用后,北京、天津两市平水年可供水量有较大富余,连续枯水年才出现一定供水缺口,水资源短缺风险水平较低。但考虑区域水资源短缺程度,仍需加强水资源管理,抑制水资源需求的增长。可考虑适当分水给河北省各市,如减少于桥水库天津分水量,提高唐山市供水保障程度。

秦皇岛、唐山、廊坊水资源短缺风险水平相对较高,其中唐山、廊坊两地平水年即出现供水缺口,风险水平高。应进一步节约用水,压缩水资源需求,并通过工程建设与管理提高年际调节能力。在唐山市,应进一步加大再生水、海水等非常规水源的利用,并考虑增加于桥水库分水量。廊坊市过境水资源较少,可考虑适度增加南水北调工程调水量保障城市生活用水,降低复种指数减少农业用水需求,减少地下水超采量。

4 结论

(1) 本文构建了由水资源供给保障率、水资源保障可靠性、水资源利用率、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,4 项指标分别表征区域水资源短缺发生的概率以及区域应对水资源短缺问题的潜力,直观揭示区域水资源短缺问题的特征,便于制定有针对性的应对策略。

(2) 应用上述指标体系评价了京津唐地区的水资源短缺风险,并划分了风险等级,提出了相应的对策措施。结果表明,南水北调工程供水后,2020 年京津唐地区水资源短缺程度有所降低。其中,北京、天津、承德、张家口为“低风险”,秦皇岛为“中风险”,唐山、廊坊为“高风险”。综合考虑区域水资源与社会经济状况,风险防范应以节约用水、加强非常规水源利用为主。可考虑在平水年适度增加河北省各市分水量,提高唐山等地的水资源保障程度。在廊坊等地,可考虑降低复种指数减少农业用水需求,降低区域水资源短缺风险。

(3) 京津唐地区实例研究表明,指标的选取及阈值划分具有一定灵活性,能够适应不同研究区的实际特点与数据条件;且体系结构合理,指标与框架便于理解,适用性较强。

参考文献

[1] WHO. Water Sanitation and Health. http://www.who.int/water_sanitation_health/hygiene/en/. 2003.

[2] Falkenmark M, Lundquist J, Widstrand C. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: aspects of vulnerability in semi-arid development. *Natural Resources Forum*, 1989, 13(4): 258-267.

[3] Ohlsson L, Appelgren B. Water and Social Resource Scarcity. Rome, Italy: FAO Issue Paper, 1998.

[4] Cosgrove W J, Rijsberman F R. *World Water Vision: Making Water Everybody's Business*. London, UK: Earthscan Publications, 2000.

[5] Sullivan C. Calculating a water poverty index. *World Development*, 2002, 30(7): 1195-1211.

[6] Hashimoto T, Stedinger J R, Loucks D P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research*, 1982, 18(1): 14-20.

[7] Jinno K, Xu Z X, Kawamura A, et al. Risk assessment of a water supply system during drought. *Water Resources Development*, 1995, 11(2): 185-204.

[8] Xu Z X, Jinno K, Kawamura A, et al. Performance risk analysis for Fukuoka water supply system. *Water Resources Management*, 1998, 12(1):13-30.

[9] Kawamura A, Merabtene T, Jinno K. Development of Integrated Decision Support System for the Water Supply System in Fukuoka, Japan//Water 99 Joint Congress. 25th Hydrology & Water Resources Symposium, 2nd International Conference on Water Resources & Environment

- Research; Barton, ACT: Institution of Engineers, Australia, 1999: 341–347.
- [10] Merabtene T, Kawamura A, Jinno K, et al. Risk assessment for optimal drought management of an integrated water resources system using a genetic algorithm. *Hydrological Processes*, 2002, 16(11): 2189–2208.
 - [11] Jones R N, Page C M, Herron N, et al. Climate change and the risk to long-term water supply in the Murray–Darling Basin//Australian Water Association. *Proceeding of 2001 A Water Odyssey*, 2001.
 - [12] Jones R N, Page C M. Assessing the risk of Climate Change on the Water Resources of the Macquarie River Catchment//Ghassemi F, Whetton P, Little R, et al. *Integrating Models for Natural Resources Management across Disciplines, issues and scales(Part 2). Modsim 2001 International Congress on Modelling and Simulation, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Canberra, 2001: 673–678.*
 - [13] Jones R N, Pittock A B. Climate change and water resources in an arid continent: Managing uncertainty and risk in Australia// Beniston M. *Climatic Change –Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management*. Amsterdam, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2002: 465–501.
 - [14] Fowler H J, Kilsby C G, O’Connell P E. Modeling the impacts of climatic change and variability on the reliability, resilience, and vulnerability of a water resource system. *Water Resources Research*, 2003, 39(8): 1222–1232.
 - [15] Jones R, Preston B, Brooke C, et al. Climate change and Australian water resources: First risk assessment and gap analysis. Canberra, Australian: Australian Greenhouse Office and the National Water Commission, 2007.
 - [16] Iglesias A, Moneo M, Garrote L, et al. Drought and water scarcity: current and future vulnerability and risk//Garrido A, Llamas M R. *Water policy in Spain, resources for the future*. Washington D C, 2006.
 - [17] Iglesias A, Garrote L, Flores F, et al. Challenges to manage the risk of water scarcity and climate change in the Mediterranean. *Water Resources Management*, 2007, 21(5):775–788.
 - [18] 阮本清, 韩宇平, 王浩, 等. 水资源短缺风险的模糊综合评价. *水利学报*, 2005, 36(8): 906–912.
 - [19] 韩宇平, 阮本清. 水资源短缺风险经济损失评估研究. *水利学报*, 2007, 38(10): 1253–1257.
 - [20] 韩宇平, 许拯民. 区域水资源短缺风险调控研究. *河北工业大学学报*, 2007, 24(4): 81–84.
 - [21] 韩宇平, 李志杰, 赵庆民. 区域水资源短缺风险决策研究. *华北水利水电学院学报*, 2008, 29(1): 1–3.
 - [22] 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. *水利学报*, 2008, 39(6): 667–673.
 - [23] 马黎, 汪党献. 我国缺水风险分布状况及其对策. *中国水利水电科学研究院学报*, 2008, 6(2): 131–135.
 - [24] 刘登伟. 京津冀大都市圈水资源短缺风险评价. *水利发展研究*, 2010, 10(1): 20–24.
 - [25] Draper A J, Jenkins M W, Kirby K W, et al. Economic–engineering optimization for California water management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2003, 129(3): 155–164
 - [26] Newlin B D, Jenkins M W, Lund J R, et al. Southern California water markets: Potential and limitations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2002, 128(1): 21–32.
 - [27] Jenkins M W, Lund J R, Howitt R E, et al. Optimization of California’s water system: Results and insights. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2004, 130(4): 127–136.
 - [28] Null S, Lund J R. Re-Assembling hetch hetchy: Water supply implications of removing O’Shaughnessy Dam. *Journal of the American Water Resources Association*, 2006, 42(4): 395–408.
 - [29] Harou J J, Pulido-Velazquez M, Rosenberg D E, et al. Hydro–economic models: Concepts, design, applications, and future prospects. *Journal of Hydrology*, 2009, 375(3): 627–643.
 - [30] Medellin–Azuara J, Mendoza–Espinosa L G, Lund J R, et al. Virtues of simple hydro–economic optimization: Baja California, Mexico. *Environmental Management*, 2009, 90(11): 3470–3478.
 - [31] Gleick P H. Global Freshwater resources: Soft–path solutions for the 21st century. *Science*, 2003, 302: 1524–1528.
 - [32] Martin–Carrasco F J, Garrote L. Drought–induced Water Scarcity in Water Resources Systems. *Nato Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences*, 2007, 78(4): 301–311.
 - [33] Alcamo J, Henrichs T, Rosch T. World water in 2025: global modeling and scenario analysis//Rijsberman F R. *World Water Scenarios Analyses*. London, UK: Earthscan Publications, 2000.
 - [34] 张士锋, 贾绍凤. 海河流域水量平衡与水资源安全问题研究. *自然资源学报*, 2003, 18(6): 684–691.
 - [35] 任宪韶, 户作亮, 曹寅白, 等. 海河流域水资源评价. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
 - [36] 金凤君. 华北平原城市用水问题研究. *地理科学进展*, 2000, 19(1): 17–24.
 - [37] 刘昌明, 陈志恺. 中国水资源现状评价和供需发展趋势分析. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
 - [38] 河北省水利厅. 河北省水资源评价, 2004.
 - [39] 北京市南水北调工程建设委员会办公室. 北京市南水北调配套工程总体规划. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
 - [40] 李九一. 中国水资源短缺及其风险评价与管理对策研究. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.

Framework for Water Scarcity Assessment and Solution at Regional Scales: A Case Study in Beijing–Tianjin–Tangshan Region

LI Jiuyi¹, LI Lijuan¹, LIU Yumei^{1,2}, LIANG Liqiao¹, LI Bin^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences & Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract:Water scarcity risk assessment is a research hotspot worldwide. Regional scale risk assessment is more complex than that at a city scale because of the internal differences. A water scarcity risk assessment and decision-making system as established at a regional level in this article, which constituted by four indexes, i.e. the demand satisfaction index, the demand reliability index, the rate of water resources utilization, and water-use efficiency. A case study in the Beijing–Tianjin–Tangshan region was conducted. The results show that the water scarcity risk level of Beijing, Tianjin, Chengde and Zhangjiakou is lower in 2020, better than the present situations. The risk level of Qinhuangdao is moderate, and that of Tangshan and Langfang is high. Saving water and unconventional water use should be wildely adopted in this region. Besides, water supply to Tangshan should be increased to reduce the water scarcity risk. In Langfang, agricultural water demand should be decreased by reducing the multiple cropping indexes. This system can directly reflect the probability of water scarcity and the capacity to avoid risks. Reasonable water resource management decision-making can be made based on this study because the characteristics of regional water scarcity are clearly revealed by the four indexes.

Key words: water scarcity; risk assessment; risk solution; Beijing–Tianjin–Tangshan region

本文引用格式：
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: 以京津唐地区为例. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1041–1048.