

文章编号: 1673-1719 (2008) 06-0336-06



## 气候变化条件下水资源短缺的状况及适应性措施： 海河流域的模拟分析

王金霞<sup>1,2</sup>, 李浩<sup>2</sup>, 夏军<sup>2</sup>, 任国玉<sup>3</sup>

(1 中国科学院农业政策研究中心, 北京 100101; 2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3 中国气象局国家气候中心, 北京 100081)

**摘要:** 运用中国科学院农业政策研究中心开发的中国水资源模型, 模拟分析了气候变化条件下海河流域的水资源短缺状况及相应的适应性措施的有效性。结果表明: 随着社会经济的发展, 到2030年海河流域的水资源短缺比例将提高25%, 气候变化将使水资源短缺比例进一步提高2%~4%。无论是供给管理还是需求管理的适应性措施, 在缓解水资源短缺方面都具有一定的有效性。但是, 多标准的评估结果表明, 所分析的几种需求管理的适应性措施比供给管理的适应性措施的可行性更高。在需求管理中, 采用既提高灌溉水价又提高工业水价的混合水价政策可能是最优的策略选择, 采用农业节水技术为次优策略选择。

**关键词:** 气候变化; 水资源短缺; 适应性措施; 海河流域

**中图分类号:** TV213.4/P467 **文献标识码:** A

### 引言

海河流域水资源的短缺状况越来越严重。20世纪50年代, 海河流域年平均径流量为324亿 $m^3$ , 目前已经锐减至111亿 $m^3$ , 下降了约66%<sup>[1]</sup>。过去的20 a, 海河流域浅层地下水年均降低1 m左右, 深层水位年均降低2 m多<sup>[2]</sup>。地下水位的迅速下降还导致了地面沉陷、水质恶化和海水入侵等环境问题。另外, 过去的50多年, 海河流域的总用水量增加了4.4倍多, 人均用水量增加了1.5倍多<sup>[3]</sup>。水需求的快速增长使得水资源短缺状况更为严重。同时, 地表水和地下水的污染形势日益严峻, 从而进一步加剧了水资源短缺的状况。

气候变化对海河流域水资源短缺的影响日益受

到人们的关注。1956—2000年, 海河流域的地表气温呈上升趋势, 倾向率为0.37 $^{\circ}C/10 a$ , 高于全国平均0.25 $^{\circ}C/10 a$ 的水平<sup>[4]</sup>。随着地表气温的升高, 海河流域也变得更为干燥。对中国气象局的数据(1956—2005年)分析表明, 海河流域20世纪80年代以后的年均降水量低于80年代以前的降水量。不仅降水呈现持续下降趋势, 而且持续性干旱的情况也越来越严重。1950年以来, 海河流域共发生了4次持续性干旱, 年均降水量均比正常年份低15%。第一次(1951—1952年)与第二次持续干旱(1980—1981年)之间相隔28 a, 而第三次(1992—1993年)与第四次(1997—2002年)之间的间隔仅为5 a。另外, 干旱持续的时间也在增长, 从第一次的2 a增长到第四次的6 a。

收稿日期: 2008-04-09; 修订日期: 2008-09-22

基金项目: 2007年国家发展和改革委员会“中-英气候变化”国际合作项目; 国家自然科学基金项目(70733004); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-YW-N-039); 科技部中澳合作项目(2006DFA21890)资助

作者简介: 王金霞(1972-), 女, 副研究员, 从事水资源管理和气候变化影响研究。E-mail: jxwang.ccap@igsnr.ac.cn

气候变化已经是不争的事实，理解未来气候变化对水资源供求的影响尤为迫切，如何采取有效的适应性措施来缓解气候变化的影响也相当重要。本文的主要目的是基于模拟的有关气候变化对海河流域水资源短缺的影响，探讨实施几种主要的适应性措施的有效性与可行性，从而为制定适应气候变化的政策措施提供科学依据。

## 1 不同气候变化情景下海河流域的水资源短缺状况

运用中国科学院农业政策研究中心开发的中国水资源模型<sup>[4-6]</sup>，分析了2030年在几种不同气候变化情景下海河流域的水资源供给、需求和短缺的状况。

在模拟中，共设置了3种气候情景：基准情景、A2和B2气候情景（表1）。在基准情景下，假设海河流域2030年的温度和降水与基年（2004年）保持相同的水平。也就是说，在基准情景下我们不考虑气候变化对水资源供求的影响，水资源供求主要受社会经济等非气候因素的影响<sup>[5]</sup>。A2和B2情景来自于政府间气候变化专门委员会（IPCC）第四次评估报告。其中，A2情景的经济发展主要以区域经济为主，人均经济增长与技术进步越来越分离；B2情景则强调区域性经济、社会和环境的可持续发展。

由表1可见，随着社会经济的发展，2030年海河流域的水资源将变得更为短缺。与2004年相比，2030年基准情景下海河流域的需水总量将从365亿 $m^3$ 增加到524亿 $m^3$ ，增加44%，用水量增长的主要原因是工业用水的大幅增长。模拟结果表明：2030年，海河流域的工业用水将增加293%，生活用水也将增加33%；然而，农业用水将呈现减少趋势，减少约9%。由于用水总量增加，2030年海河流域水资源的供需缺口将达到223亿 $m^3$ ，占用水总量的比例从2004年的18%增加到2030年的43%。因此，即便没有气候变化，随着社会经济的发展，海河流域的水短缺也将变得更加严重。

将2004年作为基年主要是由于我们的数据库的最新年份是2004年，在我们的模型中，没有考虑气候变化对工业和生活用水需求的影响

表1 海河流域不同气候情景下水资源供给、需求与短缺状况  
Table 1 Water supply, water demand and water shortage under various climate scenarios in the Haihe River basin

变量	基年(2004年)	2030年		
		基准情景	A2情景	B2情景
气候变化				
温度变化 /		0	1.5	1.3
降水变化 /%		0	-1	3
水供给总量 / 亿 $m^3$	301	301	295	303
水需求总量 / 亿 $m^3$	365	524	558	555
水短缺总量 / 亿 $m^3$	64	223	262	252
水短缺百分比 /%	18	43	47	45

说明：1) 水需求总量包括农业、工业和生活用水；2) 水短缺总量指水供给和水需求之间的差异；3) 水短缺百分比是指水短缺总量与水需求量的比例；4) A2和B2情景下温度和降水的预估结果来自于文献[7]

模拟结果进一步表明，气候变化将加剧海河流域水资源的短缺状况（表1）。与基准情景不同的是，在气候变化的条件下，不仅流域的水资源需求将受到影响，而且水资源的供给也将受到影响。气候变化（主要是温度的升高）导致了灌溉水需求的变化。与基准情景相比，在A2情景下海河流域的需水总量将增加33亿 $m^3$ ；而在B2情景下，由于其温度的变化稍微小些，其需水总量比A2情景少3亿 $m^3$ 。而在A2和B2情景下，由于降水量的变化不同，因而供水量的变化也有所差异。在A2情景下，如果降水量减少1%，海河流域的可供水量将比基准情景减少6亿 $m^3$ ；而在B2情景下，如果降水量增加3%，海河流域的可供水量将增加2亿 $m^3$ 。但是，无论是A2还是B2情景，与基准情景相比，水资源短缺的状况都将进一步加剧。例如，A2情景与基准情景相比，由于气候变化的影响，海河流域水资源的供需缺口将提高4%；在B2情景下，将提高2%。

## 2 几种适应性措施的有效性分析

为了缓解水资源短缺的状况，传统上我们主要

采用供给管理的适应性措施,即通过采用工程和技术的手段来提高水资源的可供给量来缓解水资源短缺的矛盾,例如实施区域间的调水工程(如南水北调工程)提高雨洪利用率(如通过提高水库的蓄水能力或采用人工回灌技术)或开发新水源(如开发地下水)等。但是,随着水资源短缺程度的加重,采用供给管理的适应性措施受到越来越大的经济、社会和政治等方面的阻力,而需求管理的适应性措施越来越受到研究人员和政府部门的重视。水资源管理的思路也逐渐从只重视供给面的管理向同时重视供给面和需求面的管理转变。顾名思义,需求管理是对水资源的需求进行有效管理,相应的适应性措施主要是运用水资源政策、制度和管理的手段(如水价政策、水权制度和改革等)或采用节水技术来减少水资源的需求,从而减缓水资源短缺的状况。运用建立的水资源模型,分别模拟和分析了几种主要的供给管理和需求管理的适应性措施在缓解气候变化条件下水资源短缺的有效性。

在供给管理方面,模拟分析了实施南水北调和提高洪水利用能力对增加水资源供给和缓解水短缺的有效性(表2)。结果表明,如果成功实施南水北调的中线和东线工程,到2030年,海河流域的水资源短缺状况会有所缓解。与没有实施南水北调工程相比(表1),无论是A2还是B2情景,水供给总量都将增加45亿m<sup>3</sup>,从而使得水短缺比例降低8个百分点。另外,实施南水北调工程后,A2和B2情景下的水短缺比例(39%和37%,表2)都低于基准情景(43%,表1);在不考虑南水北调的情况下,A2和

B2情景下水短缺比例分别为47%和45%(表1),都高于基准情景。A2和B2情景与基准情景间的差距可以反映气候变化对水短缺的单独影响。因而,这一结果说明,如果将A2或B2情景下的气候作为2030年的实际气候状况的话,南水北调工程就有可能缓解气候变化对水资源短缺的影响。但值得注意的是,尽管南水北调工程可能会缓解A2和B2情景下的气候变化对水资源短缺的影响,但并不能有效缓解社会经济发展对水资源短缺造成的巨大影响。另外,研究还表明,如果将洪水利用能力仅提高10%,A2和B2情景下的水短缺比例(46%和44%,表2)仍将高于基准情景。如果要想缓解气候变化的影响,洪水的利用能力最少得提高30%。

在需求管理方面,着重分析了采用农业节水技术和水价政策对缓解水资源短缺的有效性。首先分析了如果想抵消气候变化对水资源短缺的影响,农业水资源利用效率应该提高的量。模拟结果表明,在同样的社会经济条件下,如果要缓解A2情景下的气候变化的影响,农业水资源的利用效率需要提高15%,即从目前的45%提高到2030年的60%;在B2情景下,农业水资源的利用效率需要提高11%,即到2030年如果农业水资源的利用效率在目前的水平上提高11%~15%,那么就可以缓解气候变化的影响,但无法缓解社会经济发展对水资源短缺造成的影响。

其次,分析了采用水价政策对缓解水资源短缺的有效性。水价政策被认为是解决日趋严重的水资源短缺的有效措施之一。为了分析水价政策的可行

表2 2030年海河流域供给管理的适应性措施对水供给和水短缺的影响  
Table 2 Impacts of adaptation measures of supply management on the water supply and shortage in the Haihe River basin in 2030

变量	实施南水北调		洪水利用能力提高10%		洪水利用能力提高30%	
	A2情景	B2情景	A2情景	B2情景	A2情景	B2情景
水供给总量/亿m <sup>3</sup>	340	348	303	310	317	325
水短缺总量/亿m <sup>3</sup>	217	207	255	245	240	230
水短缺百分比/%	39	37	46	44	43	41

注:南水北调工程包括中线和东线工程在2030年可能调入海河流域的可用水量

性,首先需要确定水需求价格弹性。依据以往的经验和其他国家的研究,假设海河流域灌溉用水需求价格弹性为  $-0.05 \sim -0.25$ , 工业用水需求价格弹性为  $-0.1 \sim -0.3$  [8-9]。另外,设计了两种不同的价格调整方案,即灌溉水价政策和混合水价政策。灌溉水价政策是指只提高灌溉用水的价格,而混合水价政策是同时提高工业用水和灌溉用水的价格。模拟结果显示,采取混合水价政策比只推行灌溉水价政策更为可行(表3)。例如,在A2情景下,如果要使得2030年海河流域水资源的供求实现平衡,在只采用灌溉水价政策的情况和不同的需求价格弹性下,灌溉用水的价格需要提高2.3~11.3倍。显然,这样高的农业灌溉水价增幅是很难实施的。但是,如果采用混合水价政策,灌溉水价只需要提高0.4~1.9倍;而工业水价需要提高1.5~3.9倍。尽管工业水价的提高幅度比较大,但由于工业用水的效益较高,因而工业部门对水价的承受能力也较大。在B2情景下得到了类似的结果,由于水资源短缺的状况较A2情景稍乐观,因而所需要的水价提升幅度也较小。

表3 与采用提高水价政策平衡水短缺相对应的海河流域2030年水价提高幅度(单位:倍)

Table 3 Price-raising (times of the baseline year's price) of in the Haihe River basin in 2030 under the mix water price policy

水价政策	水价种类	A2 情景	B2 情景
灌溉水价政策	灌溉水价	2.3~11.3	1.8~8.8
混合水价政策	灌溉水价	0.4~1.9	0.3~1.5
	工业水价	1.5~3.9	1.2~3.0

注:1) 价格变化的估计相对于基年进行计算,其他条件保持不变(如不考虑未来通货膨胀等对价格的影响);2) 在采用混合水价的政策下,我们假设气候变化造成的水资源短缺80%靠提高工业用水的价格来缓解,20%靠提高灌溉用水的价格来缓解

### 3 适应性措施的多标准评估

为了对各种适应性措施的可行性进行综合的评判,开展了多标准评估的研究。在多标准评估中,选择了6个指标:双赢选择、适应效果、成本有效性、

适应灵活性、实施顾虑以及知识水平。双赢选择指的是适应性措施不仅能够提高适应能力,而且采取这些措施的成本也要相对较低,即应该具有相对较高的成本收益率。适应效果指的是这些措施可以明显提高适应能力,它是双赢选择的收益方。成本效率指的是采用这些措施的成本不是很大,它是双赢选择的成本方。适应灵活性指在调整适应性措施的实施中是否具有灵活性。实施顾虑说明的是实施这些适应性措施的可能性。知识水平主要是说明未来气候变化信息的可靠性。选好这些指标之后,在与专家讨论和相关文献分析的基础上,为各个指标分配了如下的权重:双赢选择最重要,权重是9;其次是适应效果和成本效率,权重分别是7和6;再次为实施顾虑(权重是5)、知识水平(权重是4)和适应灵活性(权重是3)。

图1是对各种适应性措施的多标准评估结果。由图可见,不同适应性措施的得分不同,需求管理的适应性措施得分普遍高于供给管理的适应性措施。其中,采用混合水价政策的得分最高(3.53),这意味着与其他适应性措施相比,它是应对气候变化的一种更为可行的措施。采用农业节水技术得分为1.89,可以被认为是应对气候变化次优的措施。实行单一灌溉水价政策的得分为1.71,仅次于采用农业

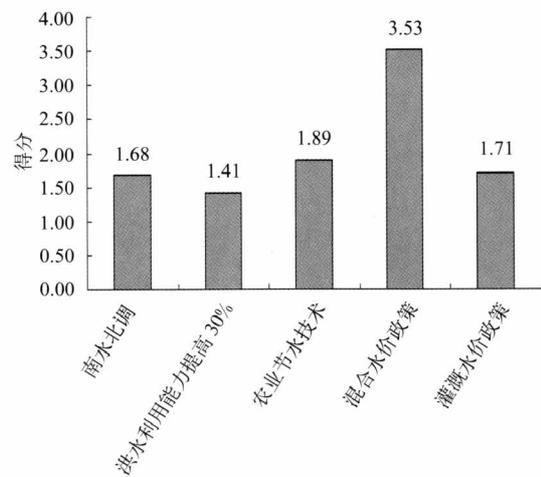


图1 各种适应性措施的多标准评估得分  
Fig. 1 Multi-criteria assessment results of some adaptation policies

水需求价格弹性就是水资源需求量变化的百分比与水价变化的百分比之间的比值

节水技术的措施,但远低于混合水价的措施。两种供给管理的适应性措施的得分都低于需求管理的措施。其中,实施南水北调的分数稍高,为1.68,而采用工程措施来提高洪水利用能力的措施得分仅为1.41。实际上南水北调的中线和西线工程已经正式开工,因而我们所期望的该工程对缓解海河流域水短缺的作用将在不久的将来得以实现。但多标准评估结果表明,除了南水北调工程,我们可能会找到一些更可行、更有效的适应性措施。

#### 4 结论与讨论

基于我们建立的中国水资源模型,对在气候变化条件下海河流域的水资源短缺状况及相关适应性措施的有效性进行了模拟和分析。结果表明,随着社会经济的发展,到2030年,海河流域的水资源短缺比例将从2004年的18%提高到43%。在A2和B2两种情景下,水资源短缺的状况会进一步加剧,短缺比例增加到45%和47%。为了缓解水资源的短缺状况,既可以采取供给管理的适应性措施(如南水北调和提高洪水利用能力等),也可以采取需求管理的适应性措施(如水价政策和采用节水技术),它们在缓解水资源短缺方面都具有一定的有效性。多标准的评估结果表明,所分析的几种需求管理的适应性措施得分都要高于供给管理的适应性措施。因此,为了缓解水资源短缺的状况,实施需求管理措施可能更具可行性。在需求管理中,混合水价政策可能是一种最优的策略选择,次优策略为采用农业节水技术。

值得注意得是,气候变化存在很大的不确定性,气候变化、水资源和社会经济发展之间的关系相当复杂。为了进一步深入了解气候变化、水资源和社会经济发展之间的关系,以及各种适应性措施的有效性和可行性,迫切需要开展大量的实地调查,运用调查的数据开展系统深入的实证研究。另外,

特别重要的是,我们需要加强对各种适应性措施的成本收益(包括社会、经济和环境等方面的成本和收益)的综合评估与分析。最后,适应性措施的选择还应该考虑到用水者对气候变化和水资源短缺的反应,有关这方面的内容也需要开展更多更深入的实证研究。 ■

#### 参考文献

- [1] 水利部海河流域委员会. 海河水资源公报 [M]. 天津: 水利部海河流域委员会, 2006
- [2] 王金霞, 黄季焜. 滏阳河流域的水资源问题 [J]. 自然资源学报, 2004, 19 (4), 424-429
- [3] Wang Jinxia, Huang Jikun, Scott R. Evolution of tubewell ownership and production in the North China Plain [J]. Australian Journal of Agricultural and Resource Economics, 2005, 49 (2): 177-195
- [4] Wang Jinxia, Li Hao. Water Conservation Project in China: Improved Efficiency of Agricultural Water Use in the Haihe River Basin [R]. Report submitted to National Development and Reform Commission in China and Development Foundation of International Development in England, 2007
- [5] Wang Jinxia, Huang Jikun, Li Hao. Water Scarcity in China: Future Trend and Potential Solutions [R]. Report submitted to World Bank, 2007
- [6] 李浩. 气候变化对中国水资源的影响及适应性措施初步分析 [D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2008
- [7] 任国玉. 气候变化与中国水资源 [M]. 北京: 气象出版社, 2007
- [8] Rosegrant M W, Cai Ximing, Cline S A. World Water and Food to 2025: Dealing with Scarcity [M]. Washington DC: the International Food Policy Research Institute (IFPRI), the International Water Management Institute (IWMI), 2002
- [9] Huang Q, Rozelle S, Howitt R, *et al.* Irrigation Water Pricing Policy in China [R]. Selected Paper Prepared for Presentation at the American Agricultural Economics Association Annual Meeting, Long Beach, California, 2006

## Water Shortage and Adaptation Measures Under Climate Change: Simulation Analysis in the Haihe River Basin

Wang Jinxia<sup>1,2</sup>, Li Hao<sup>2</sup>, Xia Jun<sup>2</sup>, Ren Guoyu<sup>3</sup>

(1 Center for Chinese Agricultural Policy, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101, China;

3 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Water shortage under climate change in the Haihe River basin and the effectiveness of adaptation measures were simulated and analyzed using China's Water Simulation Model. It shows that, with socio-economic development, water shortage in the Haihe River basin will increase by 25% in 2030, and climate change will further increase the shortage in water resources by 2% -4%. Both supply management measures and demand management measures can play important roles in mitigating water shortage. However, based on the multi-criteria assessment results, it is more feasible to implement demand management measures than supply management measures. For demand managements, the best policy is the mix water price policy through increasing both irrigation and industry water prices, and the next is adopting agricultural water-saving technology.

**Key words:** climate change; water shortage; adaptation measures; Haihe River basin

消息

### 《浙江省气候资源环境及其变化》一书出版

王守荣和苗长明等编著的《浙江省气候资源环境及其变化》一书已于2008年6月由气象出版社出版发行。该书是在浙江省重点科研社会发展研究项目“浙江省生态气候资源区划及气候变化影响评估”研究成果的基础上完成的，首次系统地评估了在全球变化背景下，浙江省的气候资源环境及其变化，全面、详细地揭示了浙江省气候资源的时空分布特征，评估了浙江省气象灾害的风险程度及其分布，分析了浙江省气候变化的事实及其趋势，利用全球和区域气候模式预估了浙江省21世纪的气候变化，同时利用分布式水文模式以兰江为例预估了气候变化对浙江省水资源的可能影响，通过情景分析预估了气候变化对浙江省农业、林业等部门的可能影响。在此基础上，提出了浙江省应对气候变化的对策建议。

中国气象局国家气候中心 赵宗慈