

南水北调对海河流域水生态环境影响分析

裴源生, 王建华, 罗 琳

(中国水利水电科学研究院水资源所, 北京 100044)

**摘要:**提出可定量分析研究流域水循环变化对水生态环境影响的关联分析方法,并对海河流域现状进行了关联分析和和评价。分析研究表明人类对水资源的过度开发利用已改变了海河流域的天然水循环并导致水生态环境全面退化。进一步对未来无南水北调和有南水北调的情况进行定量模拟计算,结果表明在无南水北调的情况下,未来海河流域将处于无法兼顾发展经济和保护环境的双重困境;在实施南水北调的情况下,水资源可支撑海河流域经济发展并影响和改善整个流域的水循环状态,从整体上遏制海河流域水生态环境恶化的趋势,但入海水量仍无法改善。

**关键词:**南水北调; 流域水循环; 水生态环境; 关联分析

Analysis of effect of South-to-North Water Transfer Project on aquatic ecosystems of Haihe River Basin

PEI Yuan-Sheng, WANG Jian-Hua, LUO Lin (China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2115~2123.

**Abstract:** The aquatic ecosystems are closely correlated with the water cycle in a river basin. The large-scale water resources and utilization in the Haihe River basin have altered the natural water cycle, thus resulting in the overall degradation of the aquatic ecosystems in the river basin. The South-to-North Water Transfer Project may transfer water from the Yangtze River to the Haihe River basin, thus increasing flux of the water cycle and influencing the ecosystems in the river basin. This paper develops a method of correlation analysis of water cycle and aquatic ecosystems in a river basin on the basis of the river basin as an independent spatial unit and yearly time span. First of all, water inflows into the unit (including the local water resources, water transferred from other river basins and exploitation of deep groundwater), total changes of water storages in the unit (including changes of the reservoirs/lakes storages and the shallow groundwater storages) and water consumptions by the unit (including flows to the sea, socioeconomic water consumptions and non-socioeconomic water consumptions that may be classified as consumptive water uses by the aquatic ecosystems in water systems and the consumptive water uses by the aquatic ecosystems on lands) are analyzed to make the water cycle, that is, water balance clear. Then, the relations of components of the water cycle with the aquatic ecosystems are studied as (i) a minus value of the average annual change of the groundwater storage indicates groundwater overdraft with such ecological problems as land desertification, land surface subsidence seawater encroachment; (ii) reductions in the consumptive water uses by the aquatic ecosystems in water systems and the consumptive water uses by the aquatic ecosystems on lands, especially the former may bring about such ecological problems as drying-up of rivers, reduction of lake areas and disappearance of wetlands; and (iii) reduction in flows to the sea may bring about such ecological problems as higher salt concentration than usual at estuary, slowing rise of temperature and sediment accumulation. Based on the above analyses, a mathematical model of correlation of water cycle with aquatic ecosystems in a river basin was formulated to calculate the water cycle in the Haihe River basin in each year by applying the historical data to evaluate the

基金项目:国家水利部南水北调工程总体规划专项课题“黄淮海流域水资源合理配置研究”资助项目

收稿日期:2004-05-11;修订日期:2004-06-20

作者简介:裴源生(1948~),男,山西人,教授级高工,主要从事水资源高效利用和合理配置研究。E-mail:peiys@iwhr.com

**Foundation item:** the National Integrated Plan of South-to-North Water Transfer Project “water resomces rational allocation of Huang-Hui-Hai River Basin” of the Ministry of Water Resources, PRC

**Received date:** 2004-05-11; **Accepted date:** 2004-06-20

**Biography:** PEI Yuan-Sheng, Professorate senior engineer, mainly engaged in Efficient Utilization and Rational Allocation of Water Resources. E-mail: peiysh@iwhr.com

conditions of the aquatic ecosystems. The results indicate that in case of shortage of the local resources plus water transfers from other river basins, the change of the groundwater storage become minus, thus implying severe groundwater overdraft, and in case of a dry year, the water consumptions are considerably reduced mainly because of reduction in the non-socioeconomic water consumptions, that is, ecological water consumptions, thus implying severe ecological degradation. The model was applied for the analyses of four scenarios under the conditions with and without the South-to-North Water Transfer Project. In the scenario I, without the South-to-North Water Transfer Project and continuing the current pattern of the water resources development and utilization, the socioeconomic water consumptions are increased to support the socioeconomic development, but the water consumptions by the aquatic ecosystems are not increased, thus resulting in severe groundwater overdraft and sharp reduction in flows to the sea. Therefore, the regional ecosystems tend to collapse. In the scenario II, without the South-to-North Water Transfer Project and with the focus on the ecological protection, as the groundwater overdraft stopped and the aquatic ecosystems in water systems fairly improved, the overall ecology is improved although the flows to the sea further decreases. As the socioeconomic water consumptions reduced, thus resulting in economic losses, the regional socioeconomic development may retrogress. In the scenario III, with the alternative of low water transfer by the South-to-North Water Transfer Project, the groundwater overdraft is stopped, the targets of the water consumptions by the aquatic ecosystems in water systems are achieved, and water requirements of the socioeconomic development are basically met. However, the flows to the sea are reduced. In the scenario IV, with the alternative of high water transfer by the South-to-North Water Transfer Project, the flows to the sea are slightly increased, and, as compared with the scenario III, the water requirements of the socioeconomic development are further met. In conclusion, the aquatic ecosystems in the Haihe River basin may be significantly restored and improved in case the South-to-North Water Transfer Project is commissioned.

**Key words:** South-to-North water transfer; water cycle; water environment; interrelated analysis

文章编号:1000-0933(2004)10-2115-09 中图分类号:TV213.4,X143 文献标识码:A

海河流域多年平均水资源总量为 372 亿  $\text{m}^3$ ,流域人均总水资源占有量仅有 305 $\text{m}^3$ ,是全国缺水最为严重的大河流域,水资源的严重短缺大大制约了区域国民经济的发展<sup>[1]</sup>。更为严重的是,长期以来海河流域水资源的开发利用片面强调了满足经济发展需求,忽略了生态环境的保护和改善,致使流域的生态环境出现整体退化。在南水北调工程总体规划中,工程供水目标以城市生活和工业用水为主,兼顾农业和生态。依据《黄淮海流域水资源合理配置与南水北调工程总体布局》的研究成果,推荐的基本调水量方案 2010 年和 2030 年向海河流域供水分别为 60.6 亿  $\text{m}^3$  和 95.7 亿  $\text{m}^3$ ,高方案 2010 年和 2030 年向海河流域分别供水 69.3 亿  $\text{m}^3$  和 103.3 亿  $\text{m}^3$ 。如此大量外调水的流入必将对海河流域的水循环和水生态环境产生巨大影响,本文就这个问题展开相关分析。

## 1 海河流域水生态环境现状

### 1.1 水污染严重

1998 年,全流域废污水排放总量已达到 55.6 亿 t,这些废污水中大部分未经处理就直接排入河流和水库,造成地表水和地下水的严重污染,流域现状地表水的污染河长比例高达 75%,2/3 站井的地下水达不到饮用水要求,水污染形势十分严峻。

### 1.2 河道干涸、功能退化

由于用水大量增加,造成河道干涸断流、河道功能退化等问题。现状流域各河大都成为季节性河流。据初步统计,在流域一、二、三级支流的近 10000km 河长中,已有约 4000km 河道长年干涸。一些河道虽然有水,但主要是由城市废污水和灌溉退水组成,基本没有天然径流,“有河皆干,有水皆污”已成为海河流域的一个突出问题。河道干涸还引发河道内杂草丛生、土地沙化、土壤盐分累积。山前平原与河道两岸附近的浅层地下水位持续下降地区,河流冲积沙地和砂质褐土、砂质潮土、砂质草甸土等耕地沙化趋势严重,沙土随风迁移造成覆盖沙地。近 30a 来,流域内“沙化”土壤面积不断扩大。由于缺少入海水量,山区进入平原的径流、引黄水量和降雨中带来的盐分不能排出,引起区域性的积盐。

### 1.3 入海水量锐减、河口生态环境退化

统计表明,20 世纪 90 年代与 20 世纪 50 年代相比,流域年平均入海水量减少了 72%。20 世纪 90 年代年平均入海水量只有 68.5 亿  $\text{m}^3$ ,只相当于总水资源量的 18%,而且 40%集中在滦河及冀东沿海地区。由于入海径流减少,各河河口相继建闸拒咸蓄淡,引起闸下大量海相泥沙淤积。据统计,闸下总淤积量达 9500 万  $\text{m}^3$ ,致使海河流域骨干行洪河道泄洪能力衰减 40%。另外陆源污染也给河口地区造成很大影响。渤海湾接纳天津、北京两大城市的污水,无机氮、无机磷、化学耗氧量等指标严重超标。由于入海径流减少和严重的污染,河口地区具有经济价值的鱼类基本上绝迹,渤海湾著名的大黄鱼等优良鱼种基本消失。近

10a 来,渤海赤潮频频发生,造成了严重的经济损失。

1.4 湿地大幅度减少、生物多样性衰退

20 世纪 50 年代海河流域有万亩以上的洼淀 190 多个,洼淀面积超过 10000km<sup>2</sup>。现今,除白洋淀和部分洼淀修建成水库外,大部分的洼淀都已消失或退化,即使加上 30 多座大型水库和 100 多座中型水库,湿地面积仅剩 2000 多 km<sup>2</sup><sup>[3~7]</sup>。在区域湖泊洼地演变过程中,人类活动干扰是其中最重要的驱动因素。以白洋淀为例,50 年代以后,白洋淀上游兴建了总库容达 36 亿 m<sup>3</sup> 的水库群,大大减少了入淀水量,1964~1981 年,白洋淀因围垦造田减少了 90% 的湖面面积,导致 1966~1995 年出现 5 次干淀,1990~2000 年又多次面临干淀的威胁,依靠定期补水才得以维持。

1.5 地下水严重超采

海河流域地下水大规模开采始于 20 世纪 70 年代。到 1998 年,扣除补给量后,全流域已累计消耗地下水储量 896 亿 m<sup>3</sup>,其中浅层地下水 471 亿 m<sup>3</sup>,深层水 425 亿 m<sup>3</sup>。地下水过度开采造成了地面沉降、地裂和塌陷等一系列环境地质问题。天津和流域中东部平原已发生区域性地面沉降。至 1998 年,河北平原累计沉降量大于 300mm 的面积达 1.82 万 km<sup>2</sup>,天津市累计沉降量大于 1500mm 的面积 133km<sup>2</sup>。平原区已经发现地裂缝近 200 多条。地下水位下降还引发海水入侵和咸水入侵等问题,使得咸淡水边界向淡水区移动。

1.6 水土流失严重

水土流失是海河流域主要自然灾害之一。海河流域年降雨量虽然不大,但多以暴雨形式出现,而另一方面流域内山区地面坡度较大,且土质疏松,植被覆盖率低,加之人口密度大,生产落后,广种薄收,陡坡开荒等人为因素,导致流域内山丘区存在严重的水土流失问题。

1.7 污灌造成环境污染和健康危害

由于水资源短缺,海河流域排放的废污水很大一部分被用于农业灌溉,绝大部分灌溉污水未经任何处理,给周边环境和人体健康带来危害。

2 海河流域水循环与水生态环境关联分析

流域的水循环与水生态环境有着极为密切的天然联系,千万年来大自然所形成的自然水循环造就了一个地区特有的稳定水生态环境。而近几十年来由于人类对水资源的大规模开发利用改变了水的自然循环,使一些地区稳定的水生态环境趋于不稳定,并出现流域水生态环境整体退化现象,海河流域就是这样一个典型。南水北调工程直接对流域进行大规模补水,加大了流域水循环通量,虽然其直接主要供水目标不是流域生态环境,但也会对流体的水生态环境产生一定影响。为了定量研究评估这种影响,首先需要研究流域水循环与水生态环境之间的自然关联。

2.1 流域水循环与水生态环境关联分析方法

为了比较简单清晰地描述流域总体水循环的状态及其与水生生态环境的关系,本研究不着眼于流域内降雨、地表水、地下水和土壤水之间的转换关系,而以整个流域为一个单元,以年为尺度,重点描述流域各种水量变化与各种耗水之间的关系,以揭示水循环过程、状态与水生态环境演变的宏观关联。

研究的方法是在水平方向以流域边界为界,在竖直方向以深层地下水上隔水层为下边界,以地表及其附属物、植被为上边界形成一个封闭的单元。首先分析年度间进入单元的总水量,单元内的总蓄变量和总消耗量,摸清水循环过程中各种水量之间的转化关系,然后分析各种水量对不同水生态环境子类的驱动关系,以此分析和判断流域水生态环境的现状和对未来的水生态环境进行分析和评估。水循环的过程可通过水量均衡方程式来表示:

$$TW_e - \Delta TW_s = TW_c$$

式中, $TW_e$  为进入单元的总水量; $\Delta TW_s$  为单元的总蓄变量; $TW_c$  为单元的总耗水量。

在水量均衡方程式中,进入这一单元的水量有降雨形成的当地水资源总量(包括地表水和地下水资源量并扣除二者的重复计算量)、从外流域调入的地表水水量和从深层开采的地下水量 3 项;平衡方程中的总蓄变量是当年在单元内增加(或减少)的水量,包括水库蓄变量和浅层地下水蓄变量;总耗水量是指通过不同方式排出本单元的总水量,主要包括水平排出单元的入海水量和竖直排出的蒸发消耗量。总耗水量又可以根据其消耗性质分为经济社会耗水量和非经济社会耗水量。经济社会耗水量是指由人工供给的用于国民经济发展和人类生活所消耗的水量,包括农业用水、工业用水、城市生活和农村生活用水的消耗。而非经济社会耗水可视为水生态环境消耗水量,包括维护河口生态环境的入海水量,水系生态环境耗水量和陆地生态环境耗水量。其中水系生态环境耗水量包括天然河道水面蒸发量、湖泊湿地水面蒸发量和城市河湖水面蒸发量。陆地生态环境耗水是指平原区和山区河谷盆地的地下水的腾发量,但不计灌溉回归地下水的腾发量。

应用以**官方数据**描述流域单元的水循环过程和状态,同时由于水循环中的各项几乎都与水生态环境有着极为密切的关系,因此通过水循环中各项的分析就可以反映出流域水生态环境的状况。上述水量均衡方程式中的各收支项可以对 3 类

水生态环境问题进行分析评价;第 1 类有关地下水超采问题,包括进入单元的总水量中的深层开采量以及浅层地下水蓄变量。从多年平均来看,如深层开采量过大形成深层超采或浅层地下水蓄变量小于零形成浅层地下水超采时,水生态环境就受到破坏,超采量越大,受破坏的程度就越深,直至出现地面沉降、地裂和塌陷以及引发海水入侵等各种环境问题;第 2 类是水系生态环境耗水量和陆地生态环境耗水量减少问题,如果二者特别是水系生态环境耗水量不能达到一定要求,则会出现河道干涸、湖泊萎缩、湿地消失、土壤沙化、生物多样性消失等一系列生态环境问题;第 3 类是入海水量衰减问题,如果入海水量不能满足河口生态环境要求,则河口海区会出现盐度升高、升温迟缓、松散的底质消退,进而影响鱼类产卵、生长,导致近海渔业资源的衰退。此外,入海水量减少还造成泥沙淤积、河道萎缩、河道自然功能下降。

在流域水循环中,水量平衡方程两侧收支各项是遵循流域水循环的规律相互关联的,即来水、蓄存和消耗量之间存在此消彼涨的关系,比如经济社会耗水增加,非经济社会耗水必然减少;河道、湖泊湿地耗水增加,入海水量也会减少。因此区域水循环的状态可能会因为人类不合理的开发利用而被改变,从而引发严重水生态环境问题;但另一方面通过区域水资源合理的开发利用与优化配置,甚至采用跨流域调水,可以重新调节水循环状态而使区域水生态环境得以改善。

从以上分析可以看出,流域水循环的收支平衡关系直接影响流域水生态环境状况,因此既可以利用水循环的状态来评价水生态环境情况,还可以通过分析预测不同水资源开发利用方案情况下的流域水循环状态去预测流域水生态环境未来情景,进而从流域水生态环境的角度去调整水资源的开发利用方案,以实现区域水资源开发利用与生态环境的相互协调,这就是水循环与水生态环境关联的分析方法和思路。

在此需要特别补充说明的是,由于本单元将深层地下水上隔水层作为单元的下边界,对深层地下水的开采作为系统的输入处理,因此关于地下水超采问题并不放在循环过程当中进行研究,而是利用深层地下水补给相对稳定的特点,通过直接比较单元该部分输入和深层地下水补给量的大小来进行判断。

2.2 海河流域现状水循环与水生态环境关联分析与评价

根据以上水循环与水生态环境关联物理模型的分析,建立了相应的流域水循环与水生态环境关联的数学模型。应用 1994~1999 年水资源公报和海河流域水资源规划<sup>[2]</sup>的相应数据,对单元水量平衡方程各项进行了计算,得到相关的水生态环境现状评价结果,见表 1。

表 1 海河流域 1994~1999 年流域水循环相关数据* 与计算结果 (亿 m <sup>3</sup> )									
Table 1 Base data and calculation results of water cycle in Haihe River basin 1994~1999(×10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )									
项目 Item		年份 Year						平均 Mean	
		1994	1995	1996	1997	1998	1999		
降雨量 Precipitation(mm)		577	609	599	366	551	385	490	
进入单元的总水量	水资源总量 Local water resources	426.6	440.5	522.3	212.1	353.9	192.5	358.0	
Inflow into unit	外调水量 Diversion	57.3	52.3	55.0	56.4	51.1	53.7	54.3	
	深层开采量 Deep groundwater	54.0	63.8	57.8	61.2	63.7	71.5	62.0	
	小计 Total	537.9	556.5	635.1	329.6	468.7	317.6	474.2	
蓄变量	水库蓄变量 Reservoir	29.0	10.7	8.8	−45.0	10.2	−23.8	−1.7	
Change in storage	地下水蓄变量 Groundwater	10.4	4.0	46.0	−31.9	−7.0	−75.0	−8.9	
	小计 Total	39.4	14.7	54.8	−76.9	3.2	−98.8	−10.6	
总耗水量	经济耗水量 Socioeconomic	281.4	272.0	284.5	291.0	281.0	285.7	282.6	
Water consumption	非经济耗水量	水系生态耗水 Water system	2.6	2.5	2.5	2.9	2.7	2.9	2.7
	Nonsocioeconomic	陆地生态耗水 Land	111.9	159.2	119.7	98.6	127.7	110.1	121.2
		入海量 To sea	102.7	108.1	173.6	14.0	54.1	17.7	78.4
		小计 Subtotal	217.2	269.8	295.8	115.6	184.5	130.6	202.3
		合计 Total	498.6	541.8	580.3	406.5	465.5	416.3	484.8

\* 数据来源:1994~1999 年《水资源公报》和《海河流域水资源规划》Source: Water Resources Bulletin 1994~1999 and Plan of Water Resources Development in Haihe River Basin

从表 1 中进入单元总水量栏可以看出,进入单元的总水量主要受降雨影响。如降雨最小的 1997 年和 1999 年,年降雨量分别为 366mm 和 385mm,进入单元的总水量分别为 329.6 亿 m<sup>3</sup> 和 317.6 亿 m<sup>3</sup>;降雨量最大的 1995 年和 1996 年,年降雨量分别为 609mm 和 599mm,进入单元的总水量分别为 556.5 亿 m<sup>3</sup> 和 635.1 亿 m<sup>3</sup>。进一步考察表 1 数据总体构架和变化,由于流域降雨年际变化大,因此不同年份进入流域的总水量变化很大,变幅可高达 300 亿 m<sup>3</sup>,导致相应的蓄变量和总耗水量变化也很大。



当流域单元在输入减少条件下,总耗水量也减小,同时蓄变量也呈现为负值,说明枯水年份会消耗地表水和地下水的蓄存量以支撑国民经济的发展。

另外从表1输入栏和蓄变量栏间的数据波动关系看出,总水量加外调水量与深层开采量加浅层超采量之间有非常明显的负相关关系,前者越小,后者就越大,说明在当地水资源与外调水量不足的情况下,对深层地下水的开采量和浅层地下水的开采量成为满足区域用水需求的主要途径,从而发生超采并引发相关生态环境问题。

考察枯水年份的各分项耗水,可以发现尽管总耗水量大幅度减少,但在一定国民经济发展水平下经济耗水量的变化不大,变幅大多在10亿m<sup>3</sup>以内,而非经济社会耗水会大幅度减少,与总耗水量呈明显的正相关关系。这进一步说明了即使在降雨小、水资源量少的情况下,经济社会用水并未因此受到较大幅度的影响,仍然通过超采深浅层地下水、挤占非经济社会耗水等手段来维持,总耗水的减少几乎完全转嫁为非经济社会耗水量的减少。在非经济社会耗水项各栏中,水系生态耗水目前所占比例很小,非经济社会耗水的大量衰减主要是减少了入海水量,从而对河道内和入海口的生态环境造成破坏。

比较非经济社会耗水和入海水量,可以发现二者之间存在着良好的正相关关系(图1)。对非经济社会耗水量和入海水量进行回归得到方程:

$$y = 0.0014x^2 + 0.2603x - 35.976$$

式中, $x$ 为流域非经济社会耗水量, $y$ 为入海水量。该关系式相关系数 $R^2=0.9381$ ,相关关系极为显著。因此在得知非经济社会耗水的情况下可由此式推求入海水量,反之亦然。

以上探讨了海河流域近年的水循环状态,从它与生态环境的关联中可知,目前海河流域地下水超采严重,虽然全流域浅层地下水蓄变量6a平均衰减8.9亿m<sup>3</sup>,但由于超采区比较集中,因此超采区生态环境破坏严重;另一方面流域水系生态环境耗水量很小,说明流域内河道干涸、湖泊湿地萎缩现象由来已久,水系生态系统长期处于破坏状态,给今后流域的河流、湖泊、湿地生态系统的恢复带来很大困难;现状入海水量在偏早年份仅有十几亿m<sup>3</sup>,在一般年份也只有几十亿m<sup>3</sup>,河口生态环境堪忧。

### 3 不同情景下海河流域水生态环境预测

通过以上水循环与水生态环境关联分析方法的介绍和现状生态环境评价案例分析可知,只要对水量平衡方程式两端的若干输入和输出变量进行界定和计算,并确定好状态约束条件,即可根据未来不同时段流域水循环收支项变化去预测同期的水生态环境的情景。

作为情景分析,本报告中拟定对两种类型的4种水资源配置方案下的水生态环境进行预测,简要分析如下:

(1)无南水北调条件下的水生态环境预测 包括两种情景,一是延续现状水资源开发利用方式,包括保持现状外调水平、继续保持现状深层和浅层地下水超采水平以尽量满足经济社会耗水需求;二是以生态环境保护为中心的水资源开发利用方式,包括停止深层浅层地下水超采,恢复湖泊、湿地等水系生态面积。

(2)南水北调工程实施条件下的水生态环境预测 包括两种调水方案相对应的两种情景,其中基本方案2010和2030年调水总规模分别147.0亿m<sup>3</sup>和223.0亿m<sup>3</sup>,其中调入海河流域片分别为61.0亿m<sup>3</sup>和96.0亿m<sup>3</sup>;高方案2010和2030年调水总规模分别164.0亿m<sup>3</sup>和249.0亿m<sup>3</sup>,其中调入海河流域片分别为69.0亿m<sup>3</sup>和103.0亿m<sup>3</sup>。两种调水方案情况下均采用以生态环境保护为中心的水资源开发利用方式,包括停止深层浅层地下水超采、恢复湖泊、湿地等水系生态环境面积。

#### 3.1 计算条件和输入变量

3.1.1 无南水北调情景 在无南水北调工程供水时,水量平衡方程式两端各项输入和约束条件如下给出。

##### (1)进入流域单元的总水量

水资源总量 为反映出海河流域现状水资源衰减的实际情况,水资源总量按1994~1999年6a平均值358.0亿m<sup>3</sup>考虑。  
外调水量 目前海河流域实际平均引黄水量一般在54.3亿m<sup>3</sup>,但实际配水定额只有41.0亿m<sup>3</sup>,因此按41.0亿m<sup>3</sup>计算。  
深层开采量 情景一,仍保持目前深层开采水平,年均深层开采量为62.0亿m<sup>3</sup>。情景二,考虑生态环境保护要求,停止深层地下水超采。目前海河流域深层地下水年均开采量为62.0亿m<sup>3</sup>,但对超采量的认识差别很大。《海河流域水资源规划》提出深层超采14.8亿m<sup>3</sup>,另外此规划认为承压水开采量为25.0亿m<sup>3</sup>;《海河流域环境用水研究》提出深层超采41.0亿m<sup>3</sup>;水文地质研究所海河流域水环境现状评价提出深层地下水补给量仅13.0亿m<sup>3</sup>,则按现状开采量计算超采49多亿m<sup>3</sup>;也有认为深层地下水全部属超采。根据本次研究成果,以超采量占41.0亿m<sup>3</sup>考虑,可以开采但要逐步替代的开采量按22.0亿m<sup>3</sup>考虑,因此

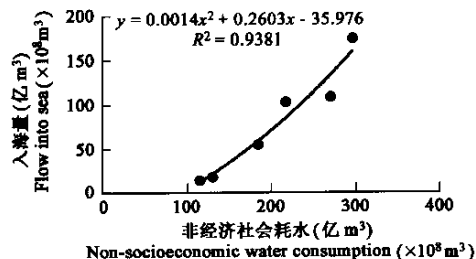


图1 入海水量与非经济社会耗水量关系图

Fig. 1 Relation of flow to sea with non-socioeconomic water consumption

计算中深层开采量以 22.0 亿 m<sup>3</sup> 计。

(2)流域的蓄变量

水库蓄变量 水库蓄变量取为零。

地下水蓄变量 情景一,按近年年平均蓄变量—8.9 亿 m<sup>3</sup> 计算。情景二,考虑生态环境保护要求,停止浅层地下水超采。浅层地下水具有以丰补枯的能力,因此超采与否按多年平均的蓄变量来考虑。从流域平均概念出发,地下水蓄变量为零即可满足不超采。但由于海河流域超采主要集中在海河南系,而其他区域如滦河和徒骇马颊河地下水开采较少,流域片内各区采补平衡必需考虑这种采补地域不均衡现象。全流域实际年均蓄变量仅为—9.0 亿 m<sup>3</sup>,而实际局部地区多年平均超采量为 20.0 亿 m<sup>3</sup>,因此只有全流域在蓄变量为 11.0 亿 m<sup>3</sup>条件下,才能实现海河南系等严重超采区的采补平衡,实现全流域各片均不超采的生态环境目标,因此地下水蓄变量按 11.0 亿 m<sup>3</sup> 考虑。

(3)消耗水量

经济社会耗水量 本次研究当中,单元的经济社会耗水量是按流域片的供水量和耗水率相乘求得。今后供水增长主要用于工业和生活,二者目前的耗水率很低,通过节水耗水率会有提高;而农业用水由于节水措施的实施,耗水率也将有所提高。根据分项分析计算,2010 年总耗水率比现状 0.667 提高至 0.687,2030 年提高到 0.705。

水系生态环境耗水量 情景一,不考虑水系生态环境的改善,耗水量按目前年平均值 2.7 亿 m<sup>3</sup> 计算。情景二,以实现生态环境目标所需的耗水量为标准。根据海河水利委员会的“海河流域环境用水研究”所提出的保护目标,流域片水系生态环境用水目标必需在 2010 年“保证南运河、清凉江等骨干输水河道用水,重点补充京津石等大城市周边和东部地区 1900km 河道用水,恢复水面面积 445km<sup>2</sup>。湿地修复,重点做好白洋淀的保护,改善团泊洼、大浪淀、千顷洼三个湿地的生态环境,4 处湿地面积 471km<sup>2</sup>”。另外兼顾考虑北京、天津、石家庄及河北 11 个省辖市的河湖用水,水面面积 100km<sup>2</sup> 左右。根据以上水面面积、蒸发量、降雨量计算水系生态耗水量。2030 年在 2010 年基础上增加滦沱河、滏阳河、唐河、子牙河干流、大清河干流等河道的水面使恢复水面的河道长度达到 4100km,面积达到 1023km<sup>2</sup>。湿地计划全面恢复,包括宁晋泊、东淀、青甸洼、西七里海、大黄铺洼、思县洼等 6 处湿地,面积 559km<sup>2</sup>,加上 2010 年恢复的白洋淀等 4 处,共计 1023km<sup>2</sup>。城市河湖补水面积达到 373km<sup>2</sup>。3 项总计水系面积达到 2426km<sup>2</sup>。

3.1.2 有南水北调情景 在有南水北调供水时,水量平衡方程式两端各项输入和约束条件如下给出。

(1)进入流域单元的总水量

水资源总量 接近 6a 平均值 358.0 亿 m<sup>3</sup> 考虑。

外调水量 目前海河流域实际平均引黄水量一般在 54.3 亿 m<sup>3</sup>,但实际配水定额只有 41.0 亿 m<sup>3</sup>。按 41.0 亿 m<sup>3</sup> 计算。另外在高方案中需要扣除被置换出去的那部分引黄量。再加上南水北调进入海河流域的水量则外调水量是:情景三,在 2010 年为 99.4 亿 m<sup>3</sup>,2030 年为 134.5 亿 m<sup>3</sup>。情景四,在 2010 年为 108.2 亿 m<sup>3</sup>,2030 年为 142.0 亿 m<sup>3</sup>。

深层开采量 同情景二,考虑生态环境保护要求,停止深层地下水超采,深层开采量以 22.0 亿 m<sup>3</sup> 计算。

(2)流域的蓄变量

水库蓄变量 水库蓄变量取为零。

地下水蓄变量 按情景二,考虑生态环境保护要求,停止浅层地下水超采,地下水蓄变量按 11.0 亿 m<sup>3</sup> 考虑

(3)消耗水量

经济社会耗水量 按流域片的供水量和耗水率相乘求得,2010 年总耗水率比现状 0.667 提高至 0.687,2030 年提高到 0.705。

水系生态环境耗水量 同情景二,以实现生态环境目标所需的耗水量为标准,2010 年达到各类水面面积共 1016 km<sup>2</sup>,2030 年达到各类水面面积 2642 km<sup>2</sup>,以此计算耗水量。

3.2 不同情景下的流域水生态环境预测分析

将以上各情景下的输入变量和总体约束条件代入模型进行计算,得到 2010 年和 2030 年有无南水北调条件下 4 种配置方案的运算结果(表 2)。

根据以上运算结果,2010 年和 2030 年不同方案的水生态环境预测结果分述如下:

(1)情景一,无南水北调工程且延续现有的水资源开发利用方式。在这种情景下,2010 和 2030 年外调水量维持现有的 41.0 亿 m<sup>3</sup>,深层地下水保持年超采 41.0 亿 m<sup>3</sup>,即开采水平 62.0 亿 m<sup>3</sup>,加上多年平均水资源量 358.0 亿 m<sup>3</sup>,进入单元的总水量为 461.0 亿 m<sup>3</sup>,全流域深层地下水超采 22.0 亿 m<sup>3</sup>,水系生态耗水保持目前水平。在这种条件下,2010 年和 2030 年经济社会耗水量分别为 299.5 亿 m<sup>3</sup>和 320.8 亿 m<sup>3</sup>,较 1994~1999 年的平均水平分别增加 16.2 亿 m<sup>3</sup>和 38.2 亿 m<sup>3</sup>,增长幅度为 5.66%和 13.52%。在经济社会耗水增长的同时,2010 年和 2030 年非经济社会耗水较现状平均值分别衰减 31.2 亿 m<sup>3</sup>和 53.2 亿 m<sup>3</sup>,减

幅为 15.4%和 26.3%。在非经济社会耗水子项目当中,水系生态耗水继续维持现有的极低水平,区域陆地生态耗水无明显变化。入海量较现状平均水平进一步下降,2010 年和 2030 年分别衰减 25.3 亿 m<sup>3</sup>和 40.9 亿 m<sup>3</sup>。另外单元年平均水资源蓄变量为~8.9 亿 m<sup>3</sup>,为浅层地下水年均蓄变量,年均深层超采量为 22.0 亿 m<sup>3</sup>。

表 2 2010 年、2030 年海河流域不同方案水循环(亿 m<sup>3</sup>)

Table 2 Water cycles in Haihe River basin under different scenarios in target years 2010 and 2030(×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>)

项目 Item		无南水北调供水时 Without South-to-North Water Transfer Project				有南水北调供水时 With South-to-North Water Transfer Project			
		地下水超 采时 With groundwater overdraft		不超采地 下水 Without groundwater overdraft		基本方案 Low water transfer		高方案 High water transfer	
		2010	2030	2010	2030	2010	2030	2010	2030
进入单元的总水量 InflowInto unit	水资源总量 Local water resources	358.0	358.0	358.0	358.0	358.0	358.0	358.0	358.0
	外调水量 Diversion	41.0	41.0	41.0	41.0	99.4	134.5	108.2	142.0
	深层开采量 Deep groundwater	62.0	62.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0
	小计 Total	461.0	461.0	421.0	421.0	479.4	514.5	488.2	522.0
蓄变量 Change in storage	水库蓄变量 Reservoir	0	0	0	0	0	0	0	0
	地下水蓄变量 Groundwater	-8.9	-8.9	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0
	小计 Total	-8.9	-8.9	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0
总消耗量 Water consu-mption	经济耗水量 Socioeconomic	298.8	320.8	256.9	277.8	290.7	331.5	296.7	336.8
	非经济耗水量								
	水系生态耗水 Water system	2.7	2.7	6.4	6.4	6.4	13.2	6.4	13.2
	Nonsocioeconomic								
	陆地生态耗水 Land	118.9	112.5	110.0	102.9	116.8	108.6	117.5	109.1
	入海量 To sea	49.5	33.9	36.7	22.9	54.5	50.2	56.6	51.9
	小计 Subtotal	171.1	149.1	153.1	132.2	177.7	172.0	180.5	174.2
	合计 Total	469.9	469.9	410.0	410.0	468.4	503.5	477.2	511.0

从以上分析可知,在无南水北调工程条件下,继续采取现有的水资源开发利用方式,2010 年和 2030 年经济社会耗水虽有增长但仍与国民经济发展和人民生活提高的需求相距较大;而水系生态系统继续维持现有的病态,陆地生态系统无明显变化,入海水量进一步有所下降。更为严重的是,按目前开采规模,浅层地下水在 80a 内所有浅层含水层将完全枯竭,深层地下水 10a 左右将会完全疏干,从而必将造成无可挽回的生态环境灾难。

综上所述,本情景分析中模拟的水资源开发利用方式,对于区域水循环过程来说无异于杀鸡取卵。为了经济发展进一步破坏了自然水循环状态,既不能满足国民经济发展和人民生活提高对水的需求,又将直接导致生态环境的全面退化,直至区域生态系统的崩溃,从而造成社会经济发展的不可持续性。

(2)情景二,无南水北调工程但以生态环境保护为中心。在这种情景下,2010 和 2030 年外调水量继续维持现有的 41.0 亿 m<sup>3</sup>,停止深层地下水的开采 41.0 亿 m<sup>3</sup>,加上多年平均水资源量 358.0 亿 m<sup>3</sup>,进入单元的总水量为 449.0 亿 m<sup>3</sup>,较现状平均水平减少 25.2 亿 m<sup>3</sup>。另一方面,为保证浅层地下水不超采,浅层地下水蓄变量必需维持在 11.0 亿 m<sup>3</sup>。根据流域生态环境保护目标,2010 年和 2030 年水系生态耗水量均为 6.4 亿 m<sup>3</sup>,较现状耗水量增加 1.37 倍和 3.89 倍,水系生态系统有很大程度的恢复,到 2030 年基本上可以实现流域提出的水系生态环境保护目标。陆地生态耗水主要受区域气候背景影响,无明显变化。本方案下 2010 年和 2030 年入海水量分别为 36.7 亿 m<sup>3</sup>和 22.9 亿 m<sup>3</sup>,较 1994~1999 年的平均水平低 51.0%和 69.4%,介于 1998 年和 1999 年之间。可以看出,本方案下的入海水量不仅没有改善,反而有较大幅度地衰减,入海口生态环境将进一步恶化。

本方案中 2010 年和 2030 年的经济社会耗水量分别为 256.9 亿 m<sup>3</sup>和 277.8 亿 m<sup>3</sup>,较 1994~1999 年的平均水平低 25.7 亿 m<sup>3</sup>和 4.8 亿 m<sup>3</sup>,这表明在今后的二、三十年中,经济社会耗水不但没有上升,而是在现状水资源短缺的基础上进一步下降,从而转化为经济损失量。以上数据和分析表明,在实施本方案情景下,区域社会经济发展将受到极大制约,甚至出现倒退。

综上所述,本情景中模拟的水资源开发利用方式,虽然对于地下水超采、水系生态环境等问题有较大的改善,基本能够实现既定环境保护目标,但入海水量仍将进一步减少,河口生态环境得不到改善。更为突出的是,将大大限制区域社会经济发展的规模和速度,如果打破原有产业结构,社会经济甚至有可能倒退,人们生活水平将会降低。但如果打破原有产业结构,势必要放弃原有的一些优势,如土地资源等。可以看出,本情景是一种典型的以经济换生态的方案,与区域社会经济发展阶段不符合。

(3)情景三,实施南水北调工程基本调水方案。本情景 2010 年和 2030 年南水北调工程调水规模分别为 147.0 亿  $\text{m}^3$  和 233.0 亿  $\text{m}^3$ ,其中调入海河流域单元的水量分别为 61.0 亿  $\text{m}^3$  和 96.0 亿  $\text{m}^3$ 。在有外调水条件下,水资源开发利用过程中,将停止深层和浅层地下水超采。在满足上述前提条件下,2010 和 2030 年进入流域单元的水资源总量分别为 479.0 亿  $\text{m}^3$  和 515.0 亿  $\text{m}^3$ ,较现状平均水平高出 8.8% 和 13.5%。

在这种调水规模下,2010 年和 2030 年水系生态耗水量分别为 6.4 亿  $\text{m}^3$  和 13.2 亿  $\text{m}^3$ ,水系生态系统有很大程度的恢复,到 2030 年基本上可以实现流域提出的水系生态环境保护目标。同时,2010 年和 2030 年入海水量分别为 54.5 亿  $\text{m}^3$  和 50.2 亿  $\text{m}^3$ ,比 1994~1999 年平均入海量要低 20.3 亿  $\text{m}^3$  和 24.6 亿  $\text{m}^3$ ,可以看出这一规模的调水对于入海水量的增加没有明显效果,河口生态环境状况仍然较差。陆地生态耗水与无南水北调工程时没有明显差别。

本情景中 2010 年和 2030 年的经济社会耗水量分别为 291.0 亿  $\text{m}^3$  和 332.0 亿  $\text{m}^3$ ,较 1994~1999 年的平均水平要高出 7.0 亿  $\text{m}^3$  和 50.0 亿  $\text{m}^3$ ,比情景一高出 0.3 亿  $\text{m}^3$  和 11.0 亿  $\text{m}^3$ ,比情景二高出 33.0 亿  $\text{m}^3$  和 54.0 亿  $\text{m}^3$ 。可以看出,南水北调工程在很大程度上缓解了区域经济社会耗水增长需求与区域水资源形势的矛盾。

综上所述,本情景中模拟的外调水方案,对于深层和浅层地下水超采、水系生态环境等问题都有较大改善,2030 年基本能够实现既定环境保护目标,但对于入海水量的增加无明显效果,河口生态环境不会因为南水北调工程而出现明显改善。另一方面,本方案经济社会耗水量较现状水平有了明显提高,对于区域社会经济发展有巨大的促进作用。

(4)情景四,实施东中线调水高方案。本情景 2010 年和 2030 年南水北调工程调水规模分别为 164.0 亿  $\text{m}^3$  和 249.0 亿  $\text{m}^3$ ,其中调入本流域单元的水量分别为 69.0 亿  $\text{m}^3$  和 103.0 亿  $\text{m}^3$ 。在该调水规模,水资源开发利用过程中将完全停止深层和浅层地下水超采,另外仍需利用引江水置换出相关引黄水退还给黄河流域。基于上述前提条件,2010 和 2030 年进入流域单元的水资源总量分别为 488.0 亿  $\text{m}^3$  和 522.0 亿  $\text{m}^3$ ,比现状平均水平高出 14.0 亿  $\text{m}^3$  和 47 亿  $\text{m}^3$ 。

在这种调水规模下,2010 年和 2030 年水系生态耗水量按水系生态环境保护目标要求,分别达到 6.4 亿  $\text{m}^3$  和 13.2 亿  $\text{m}^3$ ,大大改善了水体生态系统状况,到 2030 年基本上可以实现流域水系生态环境保护目标。另外,2010 年和 2030 年入海水量分别为 56.6 亿  $\text{m}^3$  和 51.9 亿  $\text{m}^3$ ,虽然较情景二和情景三略有增加,但由于经济用水的增加,与 1994~1999 年平均入海量相比仍低 18.2 亿  $\text{m}^3$  和 22.9 亿  $\text{m}^3$ ,可以看出这一规模的调水对于入海水量的增加依旧没有明显效果。陆地生态耗水与无南水北调工程时没有明显差别。

本情景中 2010 年和 2030 年的经济社会耗水量分别为 297.0 亿  $\text{m}^3$  和 337.0 亿  $\text{m}^3$ ,较 1994~1999 年的平均水平要高出 14.0 亿  $\text{m}^3$  和 55.0 亿  $\text{m}^3$ ,2030 年较比情景一高出 17.0 亿  $\text{m}^3$ ,比情景二高出 40.0 亿  $\text{m}^3$  和 60.0 亿  $\text{m}^3$ 。依据前面研究结果显示,在这一规模的调水情况下,海河流域 2010 年和 2030 年缺水率为 6.8% 和 3.4%。可以看出,南水北调工程基本上能够满足区域经济社会耗水增长需求。

综上所述,在高方案调水规模情景下,海河流域单元内深层和浅层地下水超采问题基本得到解决,水系生态环境问题也有较大程度的改善,2030 年基本能够实现既定环境保护目标,但对于入海水量的增加仍然没有太大效果,河口生态环境不会因为南水北调规模的加大而出现明显改善。另一方面,本情景经济社会耗水量较现状水平有了很大程度的提高,基本能够满足经济社会耗水增长的需求,从而保障了区域社会经济可持续发展,但与基本调水规模方案相比无大的差别。

#### 4 结论

海河流域水资源短缺,由于经济发展对水的需求的压力造成水资源开发利用过度。人类大规模的水资源开发利用使得流域天然水循环过程和状态发生了很大变化,与之有关的水生态环境也发生了巨大改变。目前海河流域已经出现了地面沉降、地裂、海水入侵、河道干涸、湖泊湿地萎缩消失、土地干燥沙化、河口生态环境退化、水质污染等一系列与水有关的生态环境问题。如果继续延续现有的水资源开发利用方式,按照情景一的预测结果,海河流域的生态系统将遭受无法逆转的损害,从而并发区域经济发展将不可持续问题。换一个角度来说,如果采取以生态环境保护为中心的水资源开发利用方式,在没有外来水源的条件下,其结果必将如情景二所描述那样,区域社会经济发展因此受到极大制约,甚至有可能产生经济倒退现象,其前景也是不足取的。从情景一、二预测结果分析表明,如果没有外来水源,海河流域今后的发展势必陷入在经济和生态间进行两难选择的困境。

南水北调是构筑我国黄淮海流域乃至整个北方地区社会可持续发展的水资源保障体系的有效途径。工程在给城市供水的同时,由于大量地表水体进入流域以及人为的调控,将会使流域水循环过程发生了较大变化,从而改善与之使相关联的水生态环境。情景三和情景四模拟了基本规模调水方案的情景,结果表明在实施南水北调工程条件下,区域内一些比较突出的生态环境问题,如地面沉降、海水入侵等问题基本能够得以控制,在一般情况下可保持大多数河道的最小基流和湖泊湿地水面面积,生物多样性逐渐得到恢复。然而由于南水北调工程规模和目标限制,入海量仅能维持现状水平,河口生态环境退化的趋势难于抑制。此外海河流域水土流失问题主要集中在山区,与南水北调工程无直接联系,因此流域水土流失在南水北调工程实施后仍沿现有趋势发展。还需要指出的是,情景三和情景四在保障了一部分生态耗水需求条件下,经济社会耗水供需间仍存在一定缺口,



总体缺水率都在 10% 以下,虽然情景四较情景三略好,但无明显差别,社会经济可持续发展既定目标的实现基本上都有相应的保障。

从本次情景分析的模拟结果可以看出,南水北调工程整体上遏制了海河流域水生态环境恶化的趋势,使现状较为突出的地下水位、河道、湖泊湿地等生态环境问题上有所改善,但入海水量不足、水土流失等问题基本没有改善,海河流域的生态环境整体状况仍不容乐观。

References:

[ 1 ] Yao Q N. Discussion on water resources and eco-environment of Haihe River Basin. *Haihe water resources*, 2003, **26**(3): 26~28.

[ 2 ] Haihe river conservancy commission. Haihe river water resources conservancy plan. Tianjin: Haihe river conservancy commission, 2002.

[ 3 ] Xia J. A perspective on hydrological base of water security problem and its application study in north China. *Progress in geography*, 2002, **21**(6): 517~524.

[ 4 ] Xiao J H, Zhang X S. Discussion on water pollution prevention in Haihe river basin. *Water conservancy science and technology and economy*, 2003, **9**(4): 249~252.

[ 5 ] Haihe river conservancy commission. *Haihe river water resources and water environment assessment report*. Tianjin: Haihe river conservancy commission, 2002.

[ 6 ] Chen M S, Zhou K Y. Research on water environment crisis in Haihe river basin and moderate recovery strategy. *Journal of disaster prevention and mitigation engineering*, 2003, **23**(3): 66~69.

[ 7 ] Wang H, et al. *Water resources rational allocation of Huang-Huai-Hai river basin*. Beijing: Science Press, 2003.

参考文献:

[ 1 ] 姚勤农. 海河流域水资源和水生态环境问题刍议. *海河水利*, 2003, **26**(3): 26~28.

[ 2 ] 海河水利委员会. 海河流域水资源保护规划. 天津: 海河水利委员会, 2002.

[ 3 ] 夏军. 华北地区水循环与水资源安全: 问题与挑战. *地理科学进展*, 2002, **21**(6): 517~524.

[ 4 ] 肖俊和, 张希三. 对海河流域水污染防治的浅见. *水利科技与经济*, 2003, **9**(4): 249~252.

[ 5 ] 海河水利委员会. 海河流域水资源与水环境现状评价报告. 天津: 海河水利委员会, 2002.

[ 6 ] 陈茂山, 周魁一. 海河流域水环境危机和适度回复对策的探讨. *防灾减灾工程学报*, 2003, **23**(3): 66~69.

[ 7 ] 王浩, 等. 黄淮海流域水资源合理配置. 北京: 科学出版社, 2003.

