

# 华北平原水资源紧缺情势与因源

张光辉, 连英立, 刘春华, 严明疆, 王金哲

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061)

**摘要:** 基于水资源可持续利用理念, 从水资源承载能力演化周期性、经济社会需用水规模难变性和未来水资源供需关系入手, 介绍近60年以来华北平原水资源情势, 特别是该平原水资源量、实际用水量 and 地下水开采量变化特征, 并结合未来10到30年区域经济社会发展需用水量趋势, 识别和诊断华北平原水资源紧缺因源。结果表明: 由于降水量减少导致华北平原缺水(自然资源性缺水)占该平原总缺水量的15.1%~16.4%; 因管理缺陷导致水资源浪费的缺水(管理性缺水)占22.1%~24.2%; 人口数量和经济社会发展规模过大导致用水量超过区域水资源承载力的缺水(政策性缺水)占59.3%~62.5%。自然资源性、管理性以及政策性缺水的解决对策不同: 自然资源性缺水是不依人的意志为转移的, 惟有从外域适量调水才能解决; 管理性缺水可通过社会文明进步和科技进步不断修正; 政策性缺水宜因势利导进行经济社会布局和产业结构调整, 特别是限制高耗低效用水产业。即使南水北调工程 $70.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 水进入华北平原, 该平原地下水超采情势也难以得到根本性扭转。有新增水源调入或华北平原严控生活和工业用水量, 同时大幅压减农业用水量, 因势利导优化和逐步调整经济社会布局和产业结构, 特别是灌溉农业进行规模化减蒸、降耗、节水的改造, 将是缓解华北平原地下水超采和水资源紧缺的根本所在。

**关键词:** 华北平原; 水资源; 管理性缺水; 政策性缺水; 节水

**中图分类号:** P641.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2011)02-0172-05

## Situation and Origin of Water Resources in Short Supply in North China Plain

ZHANG Guang-hui, LIAN Ying-li, LIU Chun-hua, YAN Ming-jiang, WANG Jin-zhe

(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China)

**Abstract** Based on the idea of water resources sustainable utilization, the evolution cycles of bearing capacity of water resources, water consumption for economic and social development and relation between supply and demand of water resources in the future were analyzed; the situation of water resources in North China Plain over the past 60 years was introduced, especially the characteristic of actual water consumption and the quantity of water resource and exploiting groundwater; origin of water resources in short supply in North China Plain were discussed with the trend of water consumption for regional economic and social development in the coming 10-30 years. The results showed that water scarcity were from 59.3% to 62.5% of the total water scarcity for imperfect policy, from 22.1% to 24.2% for faulty management and from 15.1% to 16.4% for rainfall decrease in North China Plain. The solutions for the above three kinds of water scarcity were different. The groundwater overexploitation could not be substantially restrained even if  $70.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  of water resources transferred into North China Plain by south-to-north water diversion project. The fundamental approach for improving the groundwater overexploitation and water capacity in North China Plain were that new water source was found; domestic water and industrial consumption were strongly controlled; agricultural water decreased sharply; the structures of economic and social distribution and industry were gradually optimized; water use efficiency could be improved for irrigation agriculture.

**Key words:** North China Plain; water resource; water scarcity for faulty management; water scarcity for imperfect policy; water conservation

收稿日期: 2011-01-10

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2009BADA3B05); 河北省科技厅重点基础研究项目(08966711D)。

作者简介: 张光辉(1959-), 男, 辽宁沈阳人, 研究员, 博士研究生导师, 从事区域水循环演化与水资源可持续利用研究。E-mail: huanjing@

1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

## 0 引言

华北平原位于中国东部,东临渤海,西抵太行山,北起燕山,南至黄河,地理位置为东经  $112^{\circ}30'' \sim 119^{\circ}30''$ 、北纬  $34^{\circ}46'' \sim 40^{\circ}25''$  之间,包括北京、天津、河北平原全部和黄河以北的豫北、鲁北平原区,共计 21 个地市、207 个县,面积  $13\,92 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。华北平原是北方经济发展核心区,水资源紧缺日趋严峻。平原区大部分河流长期干涸,地下水超采严重,地下水位降落漏斗、地面沉降和海咸水入侵地下淡水水体等问题频发,对该区经济社会可持续发展产生了一定影响<sup>[1-3]</sup>。如何理性认识华北平原水资源紧缺情势及其成因与根源,对于从根本上解决华北平原水资源问题具有重要意义<sup>[3-6]</sup>。

笔者立足于华北平原水资源可持续利用的理念,从水资源承载能力演化周期性、经济社会需用水规模难变性和未来水资源供需关系入手,通过梳理华北平原近 60 年来水资源紧缺情势及其演变过程,结合未来 10~30 年区域经济社会发展需用水量变化趋势,识别和诊断华北平原水资源紧缺因源。

## 1 基本概念

实现流域内生活、生产和生态用水彼此互不挤占以及用水总量不大于可利用量是区域水资源可持续利用的基点。当一个区域实际用水量长期大于可利用量,生产和生活用水长期挤占生态用水或大量消耗地下水储存资源时,则会出现水资源紧缺。表达水资源紧缺状况的缺水量是一个相对量<sup>[5-11]</sup>,服务于不同目的的缺水量,其内涵存在差异<sup>[8,12-14]</sup>,但与可利用量和需用水量都密切相关<sup>[5]</sup>。

华北平原水资源紧缺和地下水超采的主要原因有:①区域降水量显著减少,造成自然资源性缺水<sup>[15-16]</sup>;②水资源管理方面存在缺陷,包括用水量无效增加以及污染导致水资源无法利用等管理性缺水;③人口膨胀、经济社会发展规模过大,造成对水资源的需求远超过区域水资源承载力等政策性缺水或称为认识性缺水。不同属性的缺水问题,解决对策不同。资源性缺水是不依人的意志为转移的,惟有外域适量调水才能解决;管理性缺水可通过社会文明进步和科技进步不断修正;政策性缺水宜因势利导地进行经济社会布局 and 产业结构调整,特别是限制高耗低效用水产业。自然资源性缺水量等于现状评价均衡期(应为完整水文周期)水资源可利用量减去长系列(30 年以上)可利用量,它表明评价期区

域水资源承载力衰减程度。政策性缺水量等于超过区域水资源承载力的那部分人口、经济、社会所必需的用水量,该用水定额符合现状高效用水评价指标。管理性缺水量等于总缺水量减去政策性缺水量与自然资源性缺水量之和。

## 2 水资源紧缺情势

### 2.1 区域水资源自然特征

华北平原水资源承载能力具有多变性,1956—2009 年多年平均总水资源量  $372 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,最大为 1964 年的  $518 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,其地下水资源量  $376 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ;最小为 1999 年的  $182 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,其地下水资源量  $171 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。偏丰水年(保证率为 20%),总水资源量  $461 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ;枯水年(保证率为 95%),总水资源量  $196 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。1980—2009 年平均水资源量  $325 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,相对 1956—1979 年减少  $94 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

从图 1 可见,1979—1984、1992—1994、1997—2003 年分别出现连续枯水年份。在天津地区,曾出现 5 次连续枯水年,其中 1978—1984 年连续 7 年枯水期<sup>[10-11,14]</sup>。河北平原东部地区发生过连续 9 年的枯水期。相对于 1956—1979 年平均降水量,近 30 年来降水量年均减少 74.9 mm,降水资源量减少  $104.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,累计减少  $3\,128.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,地下水相应减少  $594.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

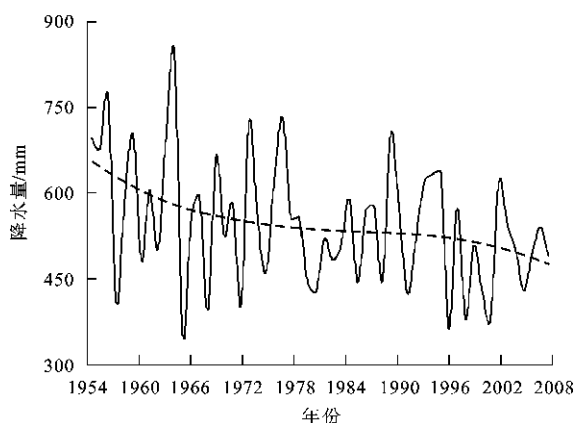


图 1 降水量年际变化及趋势

Fig. 1 Trend and Variation of Precipitation

### 2.2 需用水严峻现实

华北平原人口一直处于增长状态,1952 年人口为  $0.57 \times 10^8$ ,至 1980 年增加到  $0.97 \times 10^8$ ,净增 70.2%;2009 年人口达到  $1.33 \times 10^8$ ,又增 37.1%。2030 年区内人口将达到  $1.51 \times 10^8$ ,城市化率将达到 54%。人均水资源占有量从 1952 年的  $735 \text{ m}^3/\text{a}$

降至现状的  $302\text{ m}^3/\text{a}$ , 2030 年将减少到  $246\text{ m}^3/\text{a}$ , 而中国人均水资源量为  $429\text{ m}^3/\text{a}$ 。

人口的持续增加, 不仅导致人均占有水资源量大幅减少, 而且还造成生活和生产用水量不断增加。其中城市和农村生活用水量由 1952 年的  $7.6\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$  增加到 1980 年的  $23.7\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ , 2000 年的  $51.8\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ , 分别增加 211.8% 和 369.7%。2009 年总用水量达  $410\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ , 其中农业用水量占 64.7%, 工业用水量占 18.2%, 生活用水量占 15.9%, 生态环境用水量不足  $10\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ 。用水量最高可达  $430\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$  (1997 和 1999 年), 2020 年需水量预测为  $462.5\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ 。相对于 1980 年, 2009 年生活用水量增加 143.9%。地下水占总用水量的 65% 以上, 其中河北平原占 80% 以上, 浅、深层地下水超采都比较严重<sup>[1-3]</sup>。

农业用水占地下水开采量的 70% 以上, 是华北平原地下水超采的主导因素 (图 2)。粮食和蔬菜灌溉用水量不断增加, 加之平原区可用地表水资源日趋减少, 直接驱动地下水开采量不断增大。从图 2 可见, 近 50 年来研究区地下水开采量增大与粮食产量之间呈正相关关系。1977 年前, 每增产  $10\,000\text{ t}$  小麦和玉米, 多年平均开采量增加  $0.14\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ ; 1978 年以来, 每增产  $10\,000\text{ t}$  小麦和玉米, 多年平均开采量增加  $0.04\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ <sup>[8-9]</sup>。若以 1977 年的粮食产量和地下水开采量为基数, 1978 年以来多年平均开采量增加  $(35.3\sim 36.4)\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ 。近 20 年来, 华北平原蔬菜生产灌溉用水量呈显著增大趋势。1985 年该平原蔬菜灌溉用水量  $11.57\times 10^8\text{ m}^3$ , 1995 年为  $22.81\times 10^8\text{ m}^3$ , 2005 年为  $46.34\times 10^8\text{ m}^3$ 。其中河北平原 1985—2007 年蔬菜灌溉用水量从  $5.87\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$  增至  $22.89\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ , 净增 289.9%。从图 3 可见, 以 70% 的地下水可利用量

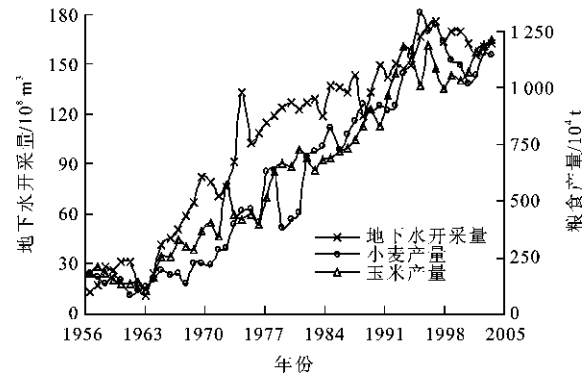


图 2 粮食产量和地下水开采量变化

Fig. 2 Variation of Grain Yield and Groundwater Exploitation

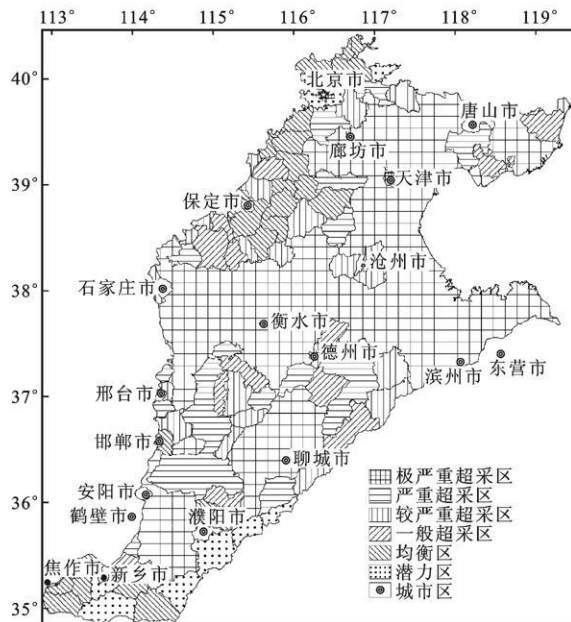


图 3 农业用水超采程度分布

Fig. 3 Situation of Groundwater Overexploitation for Agricultural Water

作为基数, 京津以南的华北平原大部分地区农业用水已处于超采状态, 许多地区处于严重超采状态。

从未来 10~30 年的需水量来看, 基于可供水量  $371.8\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ , 2020 年将缺水  $91.2\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$  (总需水量  $463\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ )。未来 20 年和 30 年 (即 2030、2040 年) 的预测需水量分别为  $483\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$  和  $531\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ , 将分别缺水  $111.8\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$  和  $159.8\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ , 如果考虑社会发展和科技进步的节水潜力, 则分别缺水  $99\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$  和  $140\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$  (图 4)。即使考虑南水北调工程增加供水量  $70.3\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ , 仍分别缺水  $28.7\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$  和  $69.7\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ , 水资源供需之间紧缺矛盾难以缓解。由于华北平原可利用的地表水资源有限, 加之

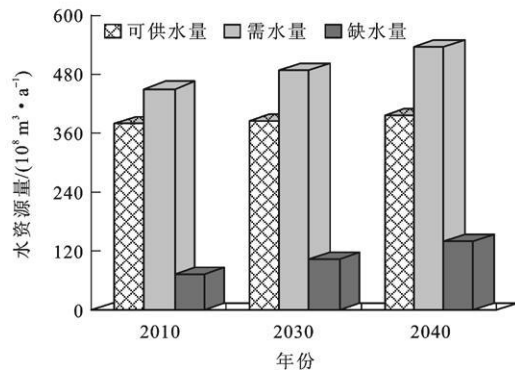


图 4 水资源量供需现状与未来情势

Fig. 4 Situation of Supply and Demand of Water Resources Now and in the Future

地表水质普遍较差, 由此地下水超采情势仍然严峻(图 5)。

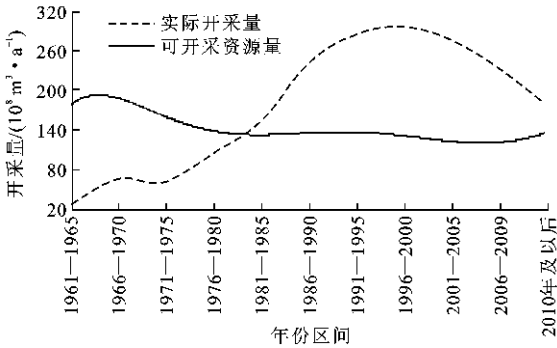


图 5 地下水资源可持续利用情势

Fig. 5 Situation of Groundwater Resources for Sustainable Utilization

20 世纪 80 年代以来, 华北平原地下水持续处于超采状态, 90 年代末期是华北平原地下水超采最为严峻时期(图 5), 不仅太行山前平原浅层地下水大规模超采, 而且中东部地区深层水超采呈加剧态势<sup>[2, 17]</sup>。进入 21 世纪, 控制地下水超采问题受到管理部门的高度重视, 地下水超采加剧态势得到遏止, 出现缓解迹象, 例如沧州深层水漏斗中心区地下水位出现回升。但是华北平原深层水超采仍然比较严重, 甚至一些地区深层水开采量呈现日趋扩大的情况。

3 水资源紧缺因源

3.1 界定依据

从水资源自然承载力、人口增加和生产发展对水的客观需求考虑, 华北平原  $372 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  的水资源量无法满足“三生水”需求, 近 10 年来平均生活、生产用水总量就已经突破  $400 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 大量挤占了生态用水量, 呈现政策性缺水特征。

若基于人均  $1\,000 \text{ m}^3$  水以下为水资源紧缺的国际理念, 华北平原水资源所能承载的人口数量是  $(0.368 \sim 0.419) \times 10^8$ , 实际为  $(0.801 \sim 0.852) \times 10^8$ , 2030 年人口将超标  $258\% \sim 308\%$ 。国际公认流域水资源利用率警戒线为  $30\% \sim 40\%$ <sup>[18]</sup>, 在半干旱区多采用  $22\% \sim 33\%$  作为预警值<sup>[19-21]</sup>。若将该指标作为华北平原的生产、生活合理用水的临界值, 则华北平原生产和生活的可利用水资源量为  $(120 \sim 135) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 目前超标总水量  $(287 \sim 312) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。若面对华北平原 1997—2009 年水资源利用现状的情势, 在未来 10 年和 30 年即使实现低耗高效利用水资源和南水北调工程补给, 仍将分别缺水  $28.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  和  $69.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

3.2 识别与诊断

3.2.1 可变量

从近 30 年来华北平原水资源承载力变化状况分析, 区域多年平均降水量减少  $10.4\%$ , 地下水资源平均减少  $26.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 总水资源量减少  $47 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  (表 1), 占超标总水量  $((287 \sim 312) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a})$  的  $15.1\% \sim 16.4\%$ 。

表 1 1956—1979 年与 1980—2009 年  
降水量和水资源衰减量比较

Tab. 1 Contrast of the Decrement of Precipitation and Water Resources Between 1956-1979 and 1980-2009					
区域范围	滦河及冀东沿海	海河北系	海河南系	徒骇马颊河	华北平原
降水减少率/ %	6.95	8.11	12.01	9.71	10.24
地下水补给减少量/ $(10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	2.13	5.13	15.53	3.03	25.82
地下水资源减少率/ %	7.94	9.22	13.68	11.07	11.78
总水资源减少量/ $(10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	3.59	8.27	31.38	3.78	47.02

从水资源利用水平出发, 若按青岛或深圳工业万元产值耗水量  $12 \sim 13 \text{ m}^3$ , 或美国的  $14.9 \text{ m}^3$ 、日本的  $18.8 \text{ m}^3$  标准和发达国家公共用水、农业节水灌溉水平综合考虑<sup>[2, 18]</sup>, 未来 10~30 华北平原年平均每年节水潜力为  $69.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 占超标总水量的  $22.1\% \sim 24.2\%$ , 其中生活节水潜力  $8.1 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 工业节水潜力  $18.4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 农业节水潜力  $42.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

自然资源性缺水占超标总水量的  $15.1\% \sim 16.4\%$ , 1980—2009 年多年平均自然资源性缺水量  $47.0 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 该缺水量是气候干旱、降水量减少造成的, 人类很难改变。管理性缺水占超标总水量的  $22.1\% \sim 24.2\%$ , 多年平均  $69.1 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  (表 2)。这部分缺水量可以通过提高水资源利用率和水资源管理水平, 在未来 10~30 年中加以解决。

表 2 水资源紧缺属性构成与对策

Tab. 2 Property and Countermeasure of Water Resources in Short Supply			
缺水属性	自然资源性缺水	管理性缺水	政策性缺水
占总缺水量比率/ %	15.1~16.4	22.1~24.2	59.3~62.5
对策	外域调水至少 $47 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$	通过加强水资源合理利用和保护, 不断提高用水水平, 节水 $69 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$	经济社会布局和产业结构调整削减耗水规模, 海水、微咸水利用和外域调水增加供水量, 合计 $185 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$

3.2.2 难变量与对策

若以近 10 年生产和生活用水水平  $(398.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a})$  推算,  $4.19 \times 10^4$  人口的生产和生活总用水量为  $135.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。若以 2030 年水利效益考虑<sup>[22-23]</sup>, 从现状生产和生活用水量中剔除应节约

的管理性缺水量 ( $69.1 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ) 和被挤占的城市生态环境用水量 ( $8.9 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ), 则生活和生产总用水量为  $320.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。因人口膨胀导致经济社会规模过大造成生活和生产所必需用水的超用水量为  $184.6 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , 占总超标水量的  $59.3\% \sim 62.5\%$  (表 3), 其中人口增量所需的生活用水增量为  $33 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。从经济社会稳定发展角度考虑, 这部分缺水量必须供给, 是人类生存和经济社会发展必须消耗的, 而且随着人口继续增加和经济社会发展, 这种增长趋势难以改变<sup>[24-26]</sup>。除了南水北调工程调一定水量进入华北平原之外, 因势利导优化和逐步调整经济社会布局 and 产业结构, 将是抑制或削减耗水规模的重要手段, 是缓解华北平原水资源紧缺的根本所在。

## 4 结语

(1) 华北平原水资源紧缺的主要成因是经济社会用水量远超过区域水资源自然承载力, 不是自然资源性缺水, 是政策性 (或称认识性) 和管理性缺水, 具有较大的可调控性。其中, 由于近 30 年来华北平原降水量持续减少, 造成地表水资源和地下水资源都相应减少, 导致自然资源性缺水占总缺水量的  $15.1\% \sim 16.4\%$ ; 因水资源管理存在缺陷和相应规章不够健全, 以致无效增加用水量以及污染导致水资源无法利用等管理性缺水占  $22.1\% \sim 24.2\%$ ; 由于人口数量和经济社会发展规模过大, 导致实际用水量远超过区域水资源承载力的政策性缺水占  $59.3\% \sim 62.5\%$ 。

(2) 华北平原水资源有限且不断变化是自然水循环演化的必然结果。南水北调工程调水进入华北平原只能缓解该平原地下水超采情势, 难以得到根本性扭转。除非有新增水源调入或华北平原严控生活和工业用水量, 同时大幅压减农业用水量, 因势利导优化和逐步调整经济社会布局 and 产业结构, 特别是灌溉农业进行规模化减蒸、降耗、节水的改造。惟有遵循自然水循环演化规律, 依据水资源承载力确定经济社会需用水规模, 大力发展和应用节水技术, 加之适宜的外调水工程实施, 华北平原水资源紧缺和地下水超采严峻态势可得到有效缓解。

### 参考文献:

- [1] 张宗祜, 施德鸿, 沈照理, 等. 人类活动影响下华北平原地下水环境的演化与发展[J]. 地球学报, 1997, 18(4): 337-344.
- [2] 张兆吉, 费宇红, 赵宗社, 等. 华北平原地下水可持续利用调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- [3] 张光辉, 费宇红, 刘克岩, 等. 海河平原地下水演变与对策[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [4] 张光辉, 聂振龙, 申建梅, 等. 区域地下水功能可持续性评价理论与方法研究[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- [5] 张光辉, 严明疆, 杨丽芝, 等. 地下水可持续开采量与地下水功能评价的关系[J]. 地质通报, 2008, 27(6): 875-881.
- [6] 张光辉, 费宇红, 刘克岩, 等. 华北平原农田区地下水开采量对降水变化响应[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 43-48.
- [7] 张光辉, 费宇红, 陈宗宇, 等. 海河流域平原深层地下水补给特征及其可利用性[J]. 地质论评, 2002, 48(6): 651-658.
- [8] 张光辉, 费宇红, 严明疆, 等. 灌溉农田节水增产对地下水开采量影响研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 350-355.
- [9] 张光辉, 费宇红, 张行南, 等. 滹沱河流域平原区地下水流程异常变化与原因[J]. 水利学报, 2008, 39(6): 747-752.
- [10] 李克让. 华北平原旱涝气候[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [11] 黄荣辉. 华北降水的年代和年际变化及其对经济影响[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [12] 张光辉, 费宇红, 杨丽芝, 等. 地下水补给与开采量对降水变化响应特征: 以京津以南河北平原为例[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2006, 31(6): 879-884.
- [13] 张光辉, 陈宗宇, 费宇红. 华北平原地下水形成与区域水文循环演化的关系[J]. 水科学进展, 2000, 11(4): 415-420.
- [14] 张光辉, 聂振龙, 陈宗宇, 等. 全新世以来华北平原层圈间水循环演化过程与区域地下水演变周期性[J]. 地球学报, 2001, 22(4): 293-297.
- [15] 张光辉, 刘中培, 连英立, 等. 华北平原地下水演化地史特征与时空差异性研究[J]. 地球学报, 2009, 30(6): 848-854.
- [16] 张宗祜, 张光辉. 大陆水循环系统演化及其环境意义[J]. 地球学报, 2001, 22(4): 289-292.
- [17] 费宇红, 张兆吉, 张凤娥, 等. 气候变化和人类活动对华北平原水资源影响分析[J]. 地球学报, 2007, 28(6): 567-571.
- [18] 中国科学院可持续发展战略研究组. 2007 中国可持续发展战略报告: 水、治理与创新[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [19] Biswas A K. Water for Sustainable Development in the 21<sup>st</sup> Century: a Global Perspective[J]. Geojournal 1991, 24(4): 341-345.
- [20] Fei J. Some Views on Water and Sustainability Research in China[C] // Committee of the International Symposium on Groundwater in Environmental Problems. Proceedings of the International Symposium on Groundwater in Environmental Problems. Chiba: Chiba University, 1999: 103-106.
- [21] World Bank. World Development Indicators[R]. Washington DC: World Bank, 1998.
- [22] 袁宝招, 陆桂华, 李原园, 等. 水资源需求驱动因素分析[J]. 水科学进展, 2007, 18(3): 404-409.
- [23] 任宪韶, 卢作亮, 曹寅白, 等. 海河流域水资源评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [24] 王菊翠, 仵彦卿, 党碧玲, 等. 陕西关中地区水资源的可持续发展支持能力[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(2): 177-184.
- [25] 吕博, 倪娟, 王文科, 等. 水资源开发利用引起的环境负效应——以玛纳斯河流域为例[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(3): 53-56.
- [26] 陈梦熊. 西北干旱区水资源的合理开发利用与荒漠化防治[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(4): 1-7.