

华北平原区域水资源特征与作物布局结构适应性研究

张光辉, 刘中培, 费宇红, 连英立, 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: 据野外调查、遥感和综合研究表明, 近 50 年来华北平原粮食产量持续增加导致农业区地下水开采量不断增大, 同时灌溉节水水平的不断提高有效地缓解了农业开采量增加的速率。在 1977 年之前, 每增产 10000t 小麦和玉米, 多年平均实际开采量增加 $0.14 \times 10^8 \text{ m}^3$; 在 1978 年以来, 每增产 10000t 小麦和玉米, 多年平均实际开采量增加 $0.04 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。以 2001~2005 年平均耗用地下水的开采强度($0.53 \text{ m}^3/\text{kg}$)计算, 粮食增产促使地下水开采量平均每五年递增 $2.45 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 实际平均每五年少增加 $9.45 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。降水量减小, 补给量变少, 开采量增大; 降水量增大, 补给量较多, 开采量减小。在连续枯(丰)水年份, 当年降水量减少(增加)10%时, 地下水系统水量减少 7.98% (增加 7.67%)。因此, 需要大力发展抗旱节水作物及高产节水技术, 合理调控农业种植结构, 对于缓解研究区地下水不断恶化态势具有实质性促进作用。

关键词: 华北平原; 地下水超采; 灌溉耗水; 互动机制; 涵养与调整

中图分类号: P641.76; P641.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-3021(2010)01-017-06

The Relationship between the Distribution of Irrigated Crops and the Supply Capability of Regional Water Resources in North China Plain

ZHANG Guang-hui, LIU Zhong-pei, FEI Yu-hong, LIAN Ying-li, YAN Ming-jiang, WANG Jin-zhe

Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, Hebei 050061

Abstract: Integrated field survey shows that the total yield of foodstuff has been increased continuously in the past fifty years in North China plain, which has caused the increasing exploitation of groundwater; on the other hand, the saving level of the irrigation water in the farmland has also been continuously improved so as to alleviate the rate of increasing groundwater exploitation. The increase of every 10000t of wheat and corn yield had caused the increase of $14 \times 10^6 \text{ m}^3$ groundwater exploitation before 1977, but has resulted in the increase of $4 \times 10^6 \text{ m}^3$ groundwater exploitation since 1978. The exploitation averagely increased $2.45 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ every five years due to foodstuff increase according to the average intensity of exploiting groundwater ($0.53 \text{ m}^3/\text{kg}$) for irrigating farmland from 2001 to 2005; in contrast, the exploitation averagely increased $9.45 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ every five years according to the average intensity of exploiting groundwater ($3.11 \text{ m}^3/\text{kg}$) from 1953 to 1970. The influence of the precipitation variation on regional groundwater is of an interactive mechanism. If the annual precipitation decreases or increases 10%, the water quantity of the regional groundwater system correspondingly decreases 7.98 % or increases 7.67%, and the groundwater level falls or rises correspondingly. Therefore, the important measure for relaxing the status of excessive exploitation of groundwater in the North China plain lies in the energetic development of drought-enduring, and water-saving crops and the regulation of agricultural planting structure in a reasonable way.

Key words: North China plain; groundwater overexploitation; water consumption for irrigation; interactive mechanism; conservation and controlling measures

本文由国家科技支撑计划项目(2007BAD69B02)、(2009BADA3B05)和河北省科技厅重点基础研究项目(08966711D)资助, 获中国地质科学院 2009 年度十大科技进展第五名。

收稿日期: 2009-01-26; 改回日期: 2009-02-22。

第一作者简介: 张光辉, 男, 1959 生。研究员, 博导。长期从事区域水循环演化和水资源可持续利用研究。E-mail: huanjing@heinfo.net。

华北平原水资源紧缺和地下水超采日趋严峻,与灌溉农田耗水密切相关(张光辉等, 2006, 2008, 2009a, 2009b; 费宇红等, 2006, 2007)。该区农业用水占总用水量的 75.2%, 其中京津以南的太行山前农业区和黑龙港农业区的农业用水量分别占当地总用水量的 81.4%和 82.4%(姚治君等, 2000)。京津以南河北平原是我国粮食和蔬菜的主要产区之一, 且地下水开采量占当地灌溉量的 74.5%。在 2000~2008 年期间的总用水量中, 地下水开采量占 80.9%~82.8%。因此, 研究农业灌溉减少地下水开采量对于缓解华北平原地下水超采情势具有十分重要意义。

本研究基于水文地质学的专业优势, 通过野外调查、遥感、单元精细填图和综合研究, 查明了灌溉农田作物布局结构与区域水资源特征、地下水承载力之间适应性状况, 探讨了农业区地下水位持续下降对降水量和灌溉开采量变化的响应机制以及涵养超采区地下水的作物布局结构调整方略。

1 区域地下水超采与灌溉作物布局密切相关

华北平原浅层地下水超采疏干区主要分布在京津以南的太行山前平原, 深层水严重超采区主要分布在天津、衡水、沧州和德州等地区(张宗祜等, 1997; 费宇红等, 2006; 张兆吉等, 2009)。在这些地区, 耗水作物(如小麦、蔬菜等)种植强度明显高于全区平均

水平(图 1), 且农业灌溉以地下水为主(张光辉等, 2008, 2009a)。

粮食生产规模不断扩大, 必然导致农业开采量不断增加(图 2ab), 以至地下水超采疏干加剧(图 2cd)。近 50 年以来河北地区粮食总产量多年平均每年递增 46.2×10^4 t/a。若以每千克作物产量耗水量

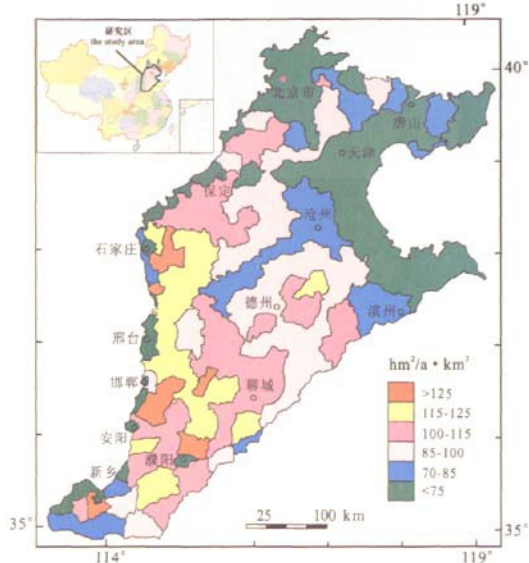


图 1 华北平原耗水作物种植强度分布图

Fig. 1 Planting intensity distribution of irrigated crops in North China plain

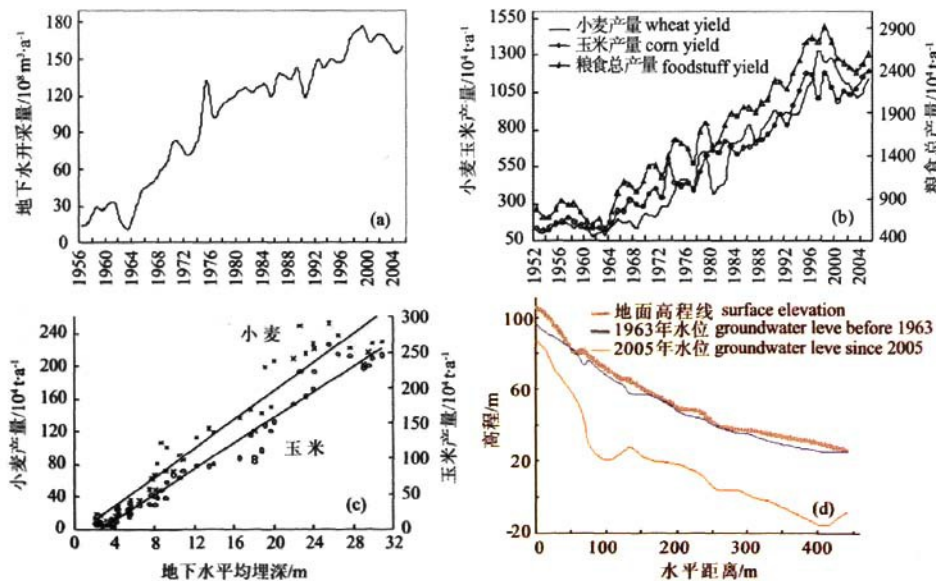


图 2 50 年以来河北平原地下水开采量、粮食产量及地下水位变化状况

Fig. 2 Variation of groundwater exploitation, wheat and corn yield and foodstuff yield, and groundwater drainage in Hebei plain in the past 50 years

a-地下水开采量动态变化过程; b-粮食总产量和小麦、玉米产量动态变化过程;

c-地下水位埋深与粮食增产之间关系; d-1963 年来石家庄—献县地下水水位变化剖面

0.52-0.79 m^3 计算, 仅滦沱河流域平原区 1977 年粮食生产耗水量为 $68.2 \times 10^8 \sim 103.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 至 1998 年粮食生产耗水量达到 $151.7 \times 10^8 \sim 230.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 粮食增产导致耗水量净增 $83.5 \times 10^8 \sim 126.8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。如果考虑蔬菜、瓜类和水果等作物产量大幅增产的实际情况, 1978-2005 年期间仅滦沱河流域平原区粮果蔬增产所需增加的耗水量达到 $450 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 以上。这期间, 降水量不断减少, 无疑加剧了农作物生产需水对灌溉的依赖程度, 而灌溉用水量远超过了当地水资源承载力, 缺水率达 $109 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。 $109 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 缺水量的大部分通过开采地下水来解决(张光辉等, 2009a)。

2 农业区入渗补给与开采强度呈互逆影响地下水变化

随降水量增减变化, 同期地下水补给量与灌溉开采强度呈互逆变化(图 3)。降水量减少, 补给量变小、开采强度增大, 加剧地下水位下降; 降水量增多, 补给量较大、开采强度减小, 减缓地下水位下降或上升。从地下水系统水量均衡角度考虑, 有以下关系式(张光辉等, 2006):

$$\Delta Q = Q_{\text{补给}} - Q_{\text{开采}} - E_{\text{蒸发}} - \pm W_{\text{侧向出入}} = \pm \mu \Delta H F$$

$$\Delta H = \pm \frac{Q_{\text{补给}} - Q_{\text{开采}} - E_{\text{蒸发}} \pm W_{\text{侧向出入}}}{\mu F} \quad (1)$$

式中, ΔQ 为地下水储存变量(mm/a); $Q_{\text{补给}}$ 为主要受降水量变化影响的总补给量(mm/a); $Q_{\text{开采}}$ 为农业开采量(mm/a); $E_{\text{蒸发}}$ 为地下水蒸发量; $\pm W$ 为侧向流入与流出变化量及其它源汇变化量之和; $\pm$ 为增减方向, 负号表示水量减少或水位下降, 正号表示水量增加或水位上升; ΔH 为地下水位变幅(cm/a); μ 为当年地

下水位变动带的综合给水度; F 为均衡区面积, 本文取值为单位面积(mm^2)。

由于区内地下水长期被超采导致水位埋深较大, $E_{\text{蒸发}}$ 较小, 同时出山地表径流长期被大规模拦蓄、河道干涸和受众多地下水位降落漏斗存在的影响, $\pm W$ 变化有限, 以至 $\pm W$ 项影响可忽略。于是, 式(1)中 $Q_{\text{补给}}$ 和 $Q_{\text{开采}}$ 成为影响 ΔQ 或 ΔH 的主要因子。在一般情况下, $Q_{\text{补给}}$ 和 $Q_{\text{开采}}$ 逆向(即增减或减增)变化, 二者呈累加状态对 ΔQ 或 ΔH 产生影响。在连续枯水年份, 降水减少 10%, 则地下水储存量减少 7.98%; 反之, 降水量增加 10%, 则地下水储存量增加 7.67%。由此可见, 气候旱化对地下水的影响强度大于相同降水增量的影响强度, 二者之差占储存变量的 3.96%。

3 灌溉节水水平的不断提高, 有效地减缓了农业开采量增速

1977 年前, 每增产 10^4 t 小麦和玉米, 多年平均地下水开采增量约 $0.14 \times 10^8 \text{ m}^3$; 1978 年以来, 每增产 10^4 t 小麦和玉米, 多年平均地下水开采增量约 $0.04 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。1990 年之后, 由于农业用水量中地下水开采比率增大, 以至每增产 10^4 t 小麦和玉米的多年平均地下水开采增量为 $0.05 \times 10^8 \text{ m}^3$ (图 4)。以 2001-2005 年平均耗用地下水的开采强度($0.53 \text{ m}^3/\text{kg}$)计算, 粮食增产促使地下水开采量平均每五年递增 $2.45 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 实际平均每五年少增加 $9.45 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。以 1952-1970 年平均耗水强度($3.11 \text{ m}^3/\text{kg}$)推算, 仅漳滏平原现状粮食生产规模的灌溉开采量应为 $142.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 平均每五年递增 $11.74 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

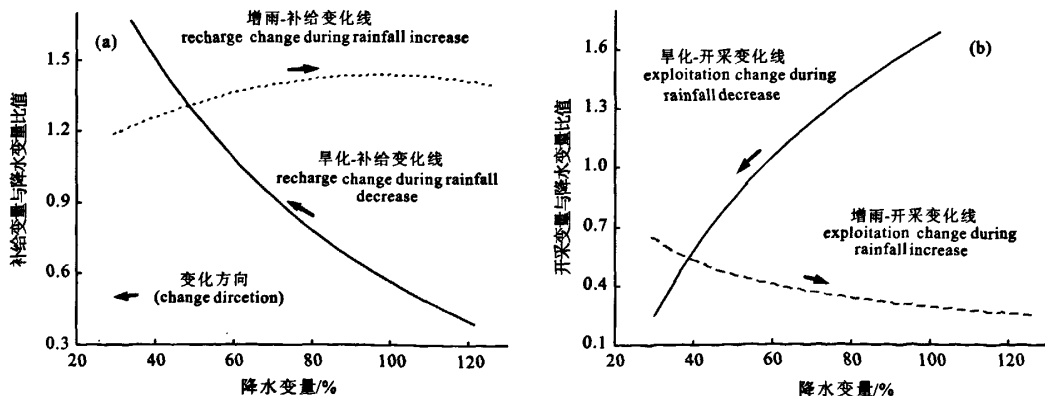


图 3 华北平原地下水补给、农业开采与降水变量之间关系
Fig. 3 Relationship between recharge, groundwater exploitation and rainfall in North China plain
a-补给变量与降水变量比值; b-开采变量与降水变量比值

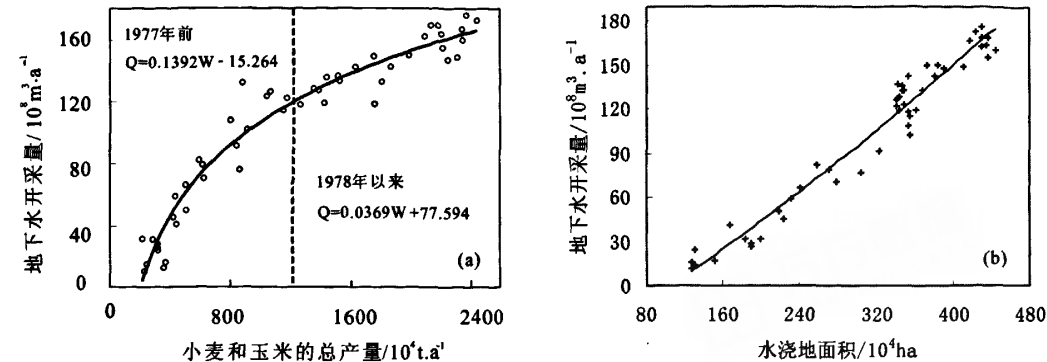


图 4 近 50 年以来河北地区地下水开采量与粮食产量和水浇地面积之间关系
Fig. 4 Relationship between groundwater exploitation, foodstuff yield and irrigation area in Hebei plain in the past 50 years
a-开采量与小麦玉米产量之间关系; b-开采量与水浇地面积之间关系

4 包气带增厚对降水入渗补给地下水存在不同影响模式

从 20 世纪 50 年代至今,华北平原浅层地下水位降幅达到 15~45m,局部达到 60m 以上。区域地下水位持续下降,导致包气带增厚。包气带厚度增大对降水入渗补给地下水存在不同影响模式。当潜水埋深小于蒸发影响极限深度时,包气带增厚使土壤水亏量增大,导致入渗速率和地下水获得的总入渗补给量减小;当潜水埋深大于蒸发影响极限深度时,随包气带厚度增大,入渗速率趋于稳定,无限时间内地下水获得的总入渗补给量不因包气带增厚

而变化,但在有限时间内地下水获取的人渗补给量愈小。降水入渗水分在包气带下渗过程中,存在土壤吸水、过水(即水分通量不变,且不等于零)和脱水三个过程,标志性特征为总水势梯度分别>1.0、=1.0、<1.0 cmH₂O/cm^{*}(表 1)。

5 区域地下水功能可持续性灌溉农业用水安全保障基础

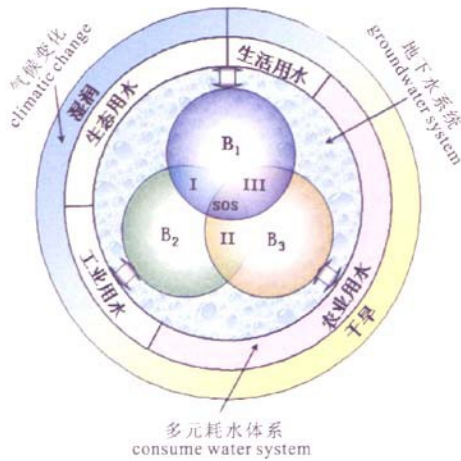
从图 5 可以看出, B₁、B₂ 和 B₃ 区分别是地下水的资源功能、生态功能和地质环境功能可持续利用限域, I、II 和 III 区是两功能彼此制约区,不宜长期规模开发利用,需要根据气候(降水)变化情况适宜

表 1 不同供水量条件下入渗试验过程中土壤水势梯度及土壤水分变化量
Table 1 Variation value of soil moisture content and soil moisture potential gradient in the infiltration process under different water supply conditions

入渗供水量 (mm)	入渗时间(h)	0.3	1.5	2.5	3.5	4.5	6.5	8.5	11.5	15.5	27.5	28.5	29.5	32.5	35.5	40.5	87.5	111.5	147.5	
280	水势梯度(cmH ₂ O/cm)	0.18	6.6	3.1	2.6	2.2	2.1	2.0	1.7	1.03	1.02	0.57	0.51	0.47	0.42	0.42	0.32	0.15	0.05	
	水分量变化(mm)		45.3	20.2	7.8	3.9	0.6	0.7	0.7	0.1	0.1	-1.4	-3.6	-1.9	-2.1	-2.5	-1.6	-2.8	-0.5	
	状态		吸水					过水					脱水							
	入渗时间(h)	0.5	1.5	2.5	3.5	5.5	7.5	8.5	9.5	15.5	25.5	27.5	29.5	37.0	75.0	101.0	112.0	137.0	221.0	
80	水势梯度(cmH ₂ O/cm)	0.33	3.25	3.78	2.84	1.03	0.60	0.53	0.47	0.40	0.37	0.37	0.37	0.33	0.27	0.20	0.17	0.12	0.03	
	水分量变化(mm)	1.3	16.7	12.4	3.4	0.1	-2.3	-1.4	-1.5	-1.2	-0.7	-1.9	-0.7	-0.17	-0.5	-0.1	-0.6	-0.6	-0.9	
	状态		吸水			过水			脱水											
	入渗时间(h)	0.5	1.5	2.5	3.5	5.5	7.5	8.5	9.5	15.5	25.5	27.5	29.5	37.0	75.0	101.0	112.0	137.0	221.0	
60	水势梯度 (cmH ₂ O/cm)	2.77	3.22	2.27	1.77	1.08	0.95	0.86	0.81	0.59	0.59	0.55	0.54	0.45	0.36	0.23	0.23	0.18	0.09	
	水分量变化(mm)	15.1	12.0	2.9	2.5	0.1	-2.3	-0.5	-1.2	-1.6	-1.1	-0.7	-1.6	-1.0	-0.5	-0.3	-0.6	-0.6	-0.8	
	状态		吸水					脱水												
	入渗时间(h)	0.5	1.2	2.5	3.5	5.5	7.5	8.5	9.5	14.0	25.5	27.5	29.5	37.0	75.0	101.0	112.0	137.0	221.0	
20	水势梯度(cmH ₂ O/cm)	2.27	/	2.27	/	2.09	/	1.45	/	0.91	0.73	0.68	0.63	0.45	0.27	0.09	0.09	0.09	0	
	水分量变化(mm)	5.9	1.0	/	1.5	0.6	/	0.5	/	-0.3	-0.4	-0.4	-1.3	-0.8	-1.1	-1.2	-0.7	-0.6	-0.1	
	状态		吸水					脱水												
	入渗时间(h)	0.5	1.2	2.5	3.5	5.5	7.5	8.5	9.5	14.0	25.5	27.5	29.5	37.0	75.0	101.0	112.0	137.0	221.0	

正值--表示增加, 负值--表示减少; /--表示没有数据。该表数据的研究层位深度 25-45 cm。

^{*}cmH₂O/cm 为非饱和带水势能的单位。



B₁、B₂、B₃-is resource-function, ecological function and geological environment function; I, II, III- area of mutual influence; sos- area of three mutually influencing factors

图5 地下水各功能间及其与外部影响因素关系
Fig.5 Relationship between groundwater functions as well as external influencing factors

调控利用，特别是在连年枯水时更需要谨慎对待，应确保后期具有足够的涵养修复能力或条件(张光辉等, 2009c)。图5中SOS区是三个功能相互制约、最为脆弱区，在理论上是不适宜开采、不可持续开发利用限域，必须严格禁止大规模开发利用。

在这一系统中，气候变化是不可调控变量，它不仅影响一个地区地下水补给量，而且还影响灌溉农业等用水强度和规模(图3)。农业灌溉用水能否有保障，在一定程度上取决于区域地下水的资源功能是否可持续(张光辉等, 2009c; 胡克林等, 2006; 徐英等, 2006; 路振广等, 2007)。如果地下水的生态功能或地质环境功能保护不力，出现较严重危机情况，例如超采导致严重地面沉降或依赖地下水生存的生态环境急剧退化等，这种情况下地下水的资源功能是难以可持续利用的，以开采地下水为主的灌溉农业生产用水难有安全保障，特别是在连续枯水年份地表水资源往往极度匮乏，抽取地下水可能成为农田抗旱的重要保障条件。因此，在适宜的评价尺度内，确保区域地下水的资源功能、生态功能和地质环境功能彼此协调，才能使得地下水具有较强的可持续性(张光辉等, 2009c)。

6 结语

总之，在华北平原，灌溉农业离不开地下水可持续性利用的保障，缓解区域地下水超采问题离不开灌溉农业节水降耗。因为，研究结果表明：

1、近50年来华北平原粮食产量持续增加导致农业

区地下水开采量不断增大，同时灌溉节水水平的不断提高有效地缓解了地下水开采量增加的速率。以2001~2005年平均耗用地下水开采量($0.53 \text{ m}^3/\text{kg}$)计算，粮食增产促使地下水开采量平均每五年递增 $2.45 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ，实际平均每五年少增加 $9.45 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

2、农业区入渗补给与开采消耗强度对降水变化响应呈双向互逆影响地下水。降水量减小，补给量变少，开采量增大，地下水位下降加剧；降水量增大，补给量变多，开采量减小，地下水位上升或下降减缓。在连续枯(丰)水年份，当年降水量减少(增加)10%时，则地下水系统水量减少7.98% (增加7.67%)。

3、正确处理区域地下水的资源功能、生态功能和地质环境功能之间关系，合理调控超采区农业种植结构和耗用地下水的强度，尤其是京津以南的华北平原农业区节水降耗是缓解该区域地下水严峻超采态势的重要方面。

本文由刘中培博士执笔完成，河北省水文局刘克岩总工、省气候研究中心刘学锋主任和省农林科学院李志宏所长等参加了有关专题研究，致以诚挚的谢意。

参考文献:

- 费宇红, 张兆吉, 张凤娥, 王昭, 陈宗宇, 陈京生, 钱永, 李亚松. 2007. 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, 28(6): 567-571.
- 胡克林, 肖新华, 李保国. 2006. 不同类型下边界条件对模拟灌溉农田水分渗漏的影响[J]. 水科学进展, 17(5): 665-670.
- 路振广, 路金鑫, 袁宾. 2007. 大田作物非充分灌溉实施效果分析评价[J]. 灌溉排水学报, (5): 30-33.
- 徐英, 陈亚新, 王俊生, 刘全明. 2006. 农田土壤水分和盐分空间分布的指示克立格分析评价[J]. 水科学进展, 17(4): 543-548.
- 姚治君, 林耀明, 高迎春, 唐青蔚. 2000. 华北平原分区适宜性农业节水技术与潜力[J]. 自然资源学报, 15(3): 259-264.
- 张光辉 费宇红 张行南 严明疆. 2008. 滦河流域平原区地下水流场异常变化与原因[J]. 水利学报, 39(6): 747-752.
- 张光辉, 费宇红, 刘克岩. 2006. 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, 17(1): 43-48.
- 张光辉, 费宇红, 严明疆, 刘中培, 王金哲. 2009a. 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, 19(3): 350-355.
- 张光辉, 刘中培, 连英立, 严明疆, 王金哲. 2009b. 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, 30(6): 848-854.
- 张光辉, 聂振龙, 申建梅, 王金哲. 2009c. 区域地下水功能可持续性评价理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 44-58.
- 张兆吉, 费宇红, 陈宗宇, 赵宗壮, 谢振华, 王亚斌. 2009. 华北

平原地下水可持续利用调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 48-249.

张宗祜, 施德鸿, 沈照理, 薛禹群. 1997. 人类活动影响下华北平原地下水环境演化与发展[J]. 地球学报, 18 (4): 291-294.

中国地质科学院. 2006. 华北平原地下水可持续利用调查评价[J]. 地球学报, 27(2): 162.

References:

- Chinese Academy of Geological Sciences. 2006. Investigation and assessment of sustainable utilization of groundwater resources in the North China plain[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 27(2): 162(in Chinese).
- FEI Yu-hong, ZHANG Zhao-ji, ZHANG Feng-'e, WANG Zhao, CHEN Zong-yu, CHEN Jing-sheng, QIAN Yong, LI Ya-song. 2007. Analysis of the Influence of Human Activity and Climate Change on Water Resources of the North China Plain[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 28(6): 567-571(in Chinese with English abstract).
- HU Ke-lin, XIAO Xin-hua, LI Bao-guo. 2006. Numerical analysis of the effect of the different lower boundary conditions on water drainage in irrigated field[J]. *Advances in Water Science*, 17(5): 665-670(in Chinese with English abstract).
- LU Zhen-guang, LU Jin-xiang, YUAN Bin. 2007. Analysis and evaluation of results of implementing deficit Irrigation for field crop[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, (5): 30-33(in Chinese with English abstract).
- XVU Ying, CHEN Ya-xin, WANG Jun-sheng, LIU Quan-ming. 2006. Using indicator Kriging to analyze and evaluate spatial distributions of soil water and salt in field[J]. *Advances in Water Science*, 17(4): 543-548(in Chinese with English abstract).
- YAO Zhi-jun, LIN Yao-ming, GAO Ying-chun, TANG Qing-wei. 2000. The water-saving technologies and potentials for regional suitable agriculture in North China Plain [J]. *Journal of Natural Resources*, 15(3): 259-264(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Guang-hui, FEI Yu-hong, LIU Ke-yan. 2006. Regional groundwater pumpage for agriculture responding to precipitation in North China Plain[J]. *Advances in Water Science*, 17(1): 43-48(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Guang-hui, FEI Yu-hong, YAN Ming-jiang, LIU Zhong-pei, WANG Jin-zhe. 2009a. Impact of irrigating farmland increase production with water save on groundwater exploitation in the plain of Hutuo River basin[J]. *Advances in Water Science*, 19(3): 350-355(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Guang-hui, FEI Yu-hong, ZHANG Xing-nan, YAN Ming-jiang. 2008. Abnormal variation of groundwater flow field in plain area of Hutuo River basin and analysis on its cause[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 39(6): 747-752(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Guang-hui, LIU Zhong-pei, LIAN Ying-li, YAN Ming-jiang, WANG Jin-zhe. 2009b. Geohistory Characteristics and Temporal-Spatial Diversity of Groundwater Evolution in North China Plain in Holocene[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(6): 848-854(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Guang-hui, NIE Zhen-long, SHEN Jian-mei, WANG Jin-zhe. 2009c. Theory and methodology of regional groundwater function sustainable utilization assessment [M]. Beijing :the Geological Publishing House: 44-58(in Chinese).
- ZHANG Zhao-ji, FEI Yu-hong, CHEN Zong-yu. 2009. Investigation and assessment of sustainable utilization of groundwater resources in the North China plain[M]. Beijing:the Geological Publishing House: 48-249(in Chinese).
- ZHANG Zong-hu, SHI De-hong, SHEN Zhao-li. 1997. Evolution and development of groundwater environment in north china plain under human activities[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 18(4): 291-294(in Chinese with English abstract).