

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

张光辉, 费宇红, 杨丽芝, 郝明亮, 申建梅

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: 通过对京津以南河北平原年降水量、地下水补给量和农业开采量三者动态规律及其互动关系研究表明, 年降水量增减, 同期地下水补给量与开采量呈互逆变化规律, 即降水量减小, 补给量变少, 开采量增大; 年降水量增大, 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 mm时, 则地下水系统水量减少7.08(增加7.06)mm, 水位下降(上升)5.2~8.7 cm; 在10~320 mm变幅内, 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)%。气候旱化过程中降水变化对引起补给量减少和开采量增加的幅度, 大于气候增雨过程中降水变化对补给量增大和开采量减少的影响程度。因此, 需要重视连续枯水年份降水变化对地下水系统影响的应对举措, 这对于提高我国北方区域地下水资源供给安全保障具有重大意义。

关键词: 降水量; 地下水系统; 补给与开采; 互逆影响; 连续枯水年。

中图分类号: P426.6; P641.8

文章编号: 1000-2383(2006)06-0879-06

收稿日期: 2006-05-28

Responses of Groundwater Recharge and Pumpage to Change in Precipitation in Hebei Plain

ZHANG Guang-hui, FEI Yu-hong, YANG Li-zhi, HAO Ming-liang, SHEN Jian-mei

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

Abstract: The research from 1986 to 2000 into the dynamic processes and interactions among annual precipitation, annual groundwater recharge from rainfall and annual pumpage for agriculture in Hebei plain to the south of Beijing and Tianjin, revealed the negative relationship between the increase or decrease in annual precipitation and the contemporaneous annual groundwater recharge from rainfall and the annual pumpage. In another word, when the annual precipitation decreases, the recharge decreases, but the pumpage increases. However, when the annual precipitation increases, the recharge increases to a relatively great extent, but the pumpage decreases. During the successive years of shortage or abundance of water, if the annual precipitation decreases (or increases) by 10 mm, the water quantity of the regional groundwater system decreases by 7.08 mm (or increases by 7.06 mm) and the corresponding water level falls (rises) by 5.2 cm to 8.7 cm. In the range of the annual precipitation variation from 10 to 320 mm, if the annual precipitation decreases (or increases) by 10%, the water quantity of the regional groundwater system decreases by 7.98% (or increases by 7.67%), the corresponding water level falls (rises) at the same rate. The effect of the precipitation variation both on the decrease in recharge and on the increase in pumpage in the dehumidification season is greater than that on the increase in recharge and on the decrease in pumpage in the increasingly raining season. Therefore, more attention should be paid to some measures that may soften the effect of the precipitation variation on the underground water system in the successive years of shortage of water, which may be of great significance to the stability and security in the underground water supply system in the north of China.

Key words: precipitation; groundwater system; recharge and pumpage; negative relationship; successive years of shortage of water.

0 引言

在我国北方平原区,降水直接或间接补给量和人工开采量是影响区域地下水系统水量均衡状态的关键源汇项,受年降水量多少制约而彼此“互逆”变化.在以地下水作为主要供水源、且农业开采量占主体的地区,深入认识降水量变化通过改变补给量和开采量对地下水系统水量均衡状态影响的这种“互逆”规律(图 1),对于研究如何提高区域地下水供水安全保障能力具有重要意义(孙明等,2001;贾金生和刘昌明,2002;张光辉等,2004).

本文以京津以南河北平原区作为重点研究区,通过揭示近 50 年以来在人口数量和经济规模不断增长条件下降水量、农业开采量和地下水补给量及其水位的动态变化规律,解析年降水量变化对地下水补给量和开采量影响的互逆特征与机制.

京津以南河北平原处于半干旱大陆季风型气候区,位于北纬 $36^{\circ}18' \sim 39^{\circ}30'$ 和东经 $114^{\circ}23' \sim 116^{\circ}42'$ 之间,包括邯郸、邢台和石家庄等 7 个市及 101 个县,面积约 6.1 万 km^2 ,是我国重要的小麦、玉米及大豆等生产基地,也是华北平原水资源紧缺的主要地区(吴凯等,1997;贾金生和刘昌明,2002;刘昌

明,2003).该区地下水开采量占总供水量的 85% 以上,其中农业开采量占总开采量的 77.6%.

1 近 50 年来年降水量及开采量变化特征

1.1 区域年降水量变化

20 世纪 50 年代研究区平均降水量 560 mm/a,60 年代为 557.7 mm/a.相对 50 年代,80、90 年代平均年降水量分别减少 73.1 mm 和 61.3 mm(图 2a).各水资源分区的年降水量也都呈减少趋势(图 2b).气温则呈升高趋势.20 世纪 50 年代年均气温 10.0°C ,80、90 年代分别为 10.6°C 和 11.2°C .降水量减少和气温升高的综合效应是“年降水量—年陆面蒸发量”的差值,由 50 年的 +16.7 mm 衰减为 70、80 年代的 -66.6 mm 和 -113.1 mm(费宇红,2006),这无疑加剧了地下水补给量减少和农业开采量增大的驱动力(吴凯等,1997;杨永辉等,2001;斯蒂芬·福斯特,2002;张光辉等,2004).

从图 2a 可见,近 50 年以来研究区出现连续 3 年以上的枯水期分别为 1965—1968 年、1970—1972 年、1979—1984 年和 1997—2000 年,平均年降

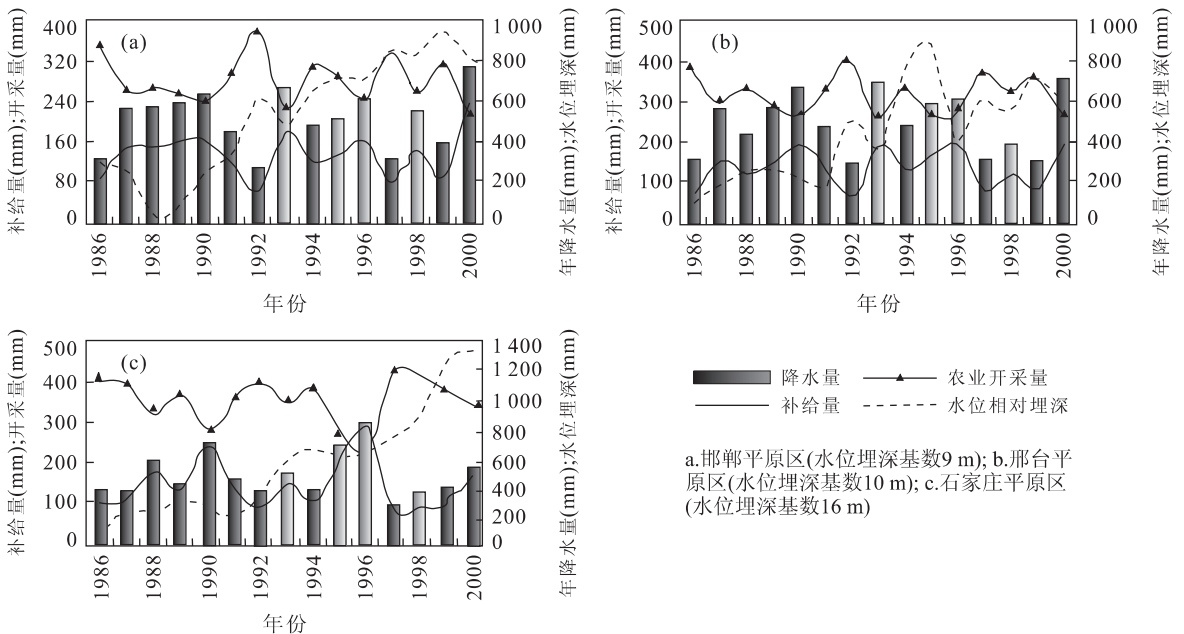


图1 1986—2000年期间年降水量、年农业开采量、地下水年补给量及水位互动的动态变化

Fig.1 Dynamic processes among precipitation, the pumpage for agriculture, groundwater recharge from rainfall and its level in Hebei plain from 1986 to 2000

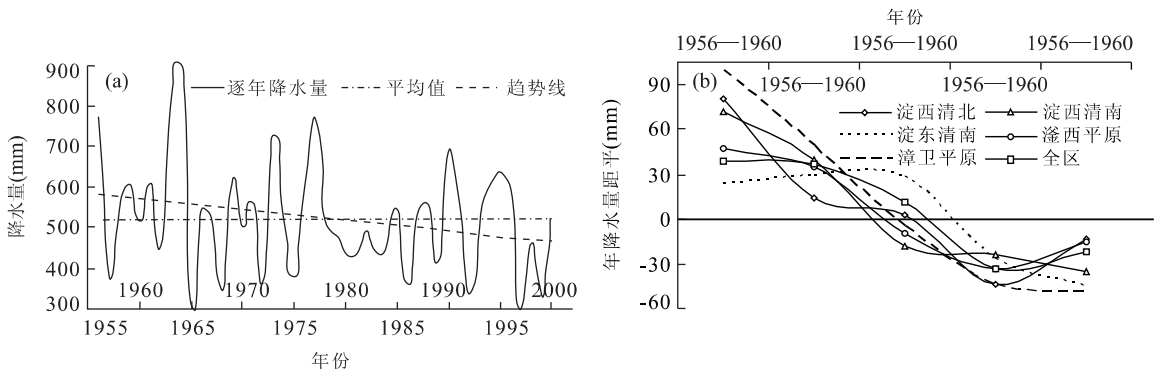


图 2 1956 年以来研究区及分区年降水量动态变化

Fig. 2 Dynamic process of regional annual precipitation in Hebei plain and its subarea since 1956

a. 京津以南北平原逐年降水量变化; b. 分区年降水量距平变化

表 1 1986—2000 年研究区农田灌溉面积(亿 m²/a)

Table 1 Irrigated area of land for growing field crops in the study area since 1986 to 2000

年份	1986	1988	1990	1992	1994	1996	1998	2000
淀西清北平原	11.6	11.6	12.1	12.6	12.8	12.9	13.1	13.2
淀东清北平原	11.2	11.3	11.6	12.2	12.3	12.4	12.6	12.7
淀西清南平原	43.5	43.5	44.9	47.2	47.7	47.9	49.1	49.2
滹滏平原	40.5	40.5	41.7	43.8	44.3	44.5	45.6	45.8
滏西平原	30.0	30.1	30.9	32.5	32.8	33.0	33.8	33.9
黑龙江平原	61.1	61.2	63.0	66.2	67.0	67.3	68.9	69.1
研究区水田	21.4	20.7	22.6	24.7	20.4	21.4	21.7	20.6

部分参考:海河水利委员会,2001.海河流域农业用水与节水研究,7—13.

水量介于 403~476 mm,而连续 3 年以上的丰水期平均年降水量为 572~687 mm. 这种降水丰枯变化,导致研究区雨水资源量存在 103.1~173.2 亿 m³/a 变值(计算面积 6.1 万 km²).

1.2 区域地下水开采量变化过程与特征

在 20 世纪 50 年代,研究区人口数量和经济规模都有限,同时出山地表径流尚未被水库大规模拦蓄,所以那时的地下水开采量仅 20 多亿 m³/a. 进入 20 世纪 70 年代,在人口数量和经济规模不断扩大的影响下,同时受 1965—1968 年和 1970—1972 年两个连续多年枯水期影响,农业抗旱使得机井数量由 50 年代的 2 万眼增至 70 年代的 38.5 万眼,地下水开采量近 70 亿 m³/a. 80 年代的改革开放再度解放农业生产,加之经过 60、70 年代大兴水利,区内出山地表径流基本都被水库拦蓄,又逢 1979—1984 年连续多年的枯水期,以至 80 年代末的机井数量突破 50 万眼,开采量达到 98.6 亿 m³/a. 在 90 年代,又逢 1997—2000 年多年连续枯水期,机井数量增至近 60 万眼,开采量突破 110 亿 m³/a^①.

2 降水量变化对地下水系统互逆双向影响特征

2.1 补给量、开采量和地下水水位的互动响应规律

为了降低人口数量和社会经济规模较大变化对本项研究本底的严重干扰,图 1 中选用 1986 年以来农业开采量及其相应的年降水量、地下水天然补给量及浅层地下水位动态资料系列,这期间研究区农业灌溉面积变化有限(表 1).

在区域性大量开采地下水条件下,年降水量减少,则地下水补给量降低,而农业开采量增大,二者从源、汇两个方向加剧地下水系统水量负均衡态势,导致地下水位下降或下降幅度增大;相反,年降水量增大,则地下水补给量增加,而农业开采量减少,二者从源、汇两个方向加大地下水系统水量正均衡态势,导致地下水位上升或下降幅度减缓.

在邯郸平原,1990—1992 年期间年降水量减少 57.5%,则地下水补给量减少 61.9%,而农业开采量增加 58.6%,同期地下水位累计下降 3.68 m;1994—1996 年期间年降水量增大 29.2%,则地下水补给量

①1998、1999、2000、2001、2002、2003 和 2004 年河北省水资源公报.

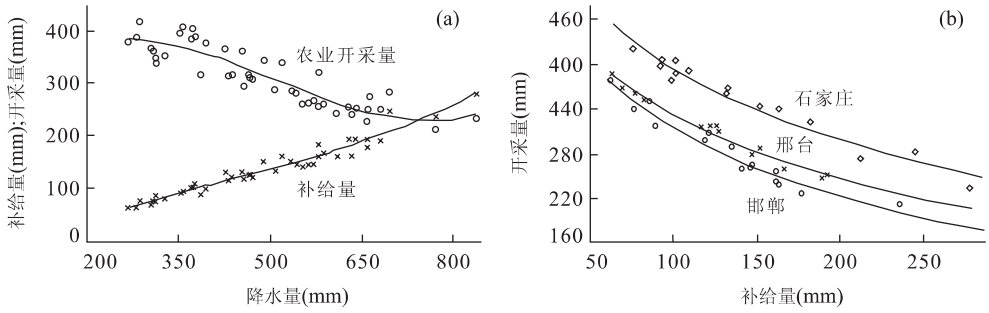


图 3 1986—2000 年以来地下水年补给量、年开采量与年降水量之间关系

Fig. 3 Relationship among the pumpage for agriculture, groundwater recharge from rainfall and the precipitation in Hebei plain since 1986 to 2000

a. 研究区补给量、开采量与降水量的关系; b. 不同分区开采量与补给量的关系

增加 33.9%，而农业开采量下降 20.8%，同期的地下水位下降速率从 1.42 m/a 减缓至 0.32 m/a(图 1a)。

在邢台平原, 1990—1992 年期间年降水量减少 56.1%，则地下水补给量减少 67.2%，而农业开采量增加 54.2%，同期的地下水位累计下降 2.69 m; 1994—1996 年期间年降水量增加 35.2%，则地下水补给量增加 52.4%，而农业开采量减少 20.5%，同期的地下水位上升 4.81 m(图 1b)。

在石家庄平原, 1990—1992 年期间年降水量降低 49.1%，则地下水补给量减少 62.4%，而农业开采量增加 40.6%，同期的地下水位累计下降 1.65 m, 局部地下水位下降 5.86 m; 1994—1996 年期间年降水量增加 125.6%，则地下水补给量增加 175.2%，而农业开采量下降 39.6%，同期的地下水位下降速率从 1.59 m/a 减缓至 0.26 m/a, 局部地下水位上升 5.64 m. 1997—2000 年期间年降水量增加 80.9%，则地下水补给量增加 114.5%，而农业开采量下降 19.1%(图 1c); 这期间的年降水量处于偏枯状态, 加之受上游黄壁庄水库副坝基截渗工程影响, 石家庄平原地下水侧向补给量每年减少 7 300~16 000 万 m³/a, 以致地下水位出现非正常的加速下降。

2.2 补给量、开采量与降水量之间关系

从图 3 可见, 区域地下水年补给量(Q_补)、年农业开采量(Q_开)随着年降水量(P)增减而呈互逆变化: 年降水量增大, 补给量以 Q_补 = 0.068P^{1.23} 模式增加, 农业开采量则以 Q_开 = 547.29e^{-0.0012P} 模式减少(图 3a)。地下水补给量与农业开采量呈 Q_开 = be^{-aQ_补} 模式随着降水量增减而负相关变化(图 3b), 其中 a 是补给变量的系数, 它与降水量变化、水位埋深和包气带岩性(入渗能力)等条件有关; b 是农业开采量与补给变量之间的关系系数, 它与气候变化、

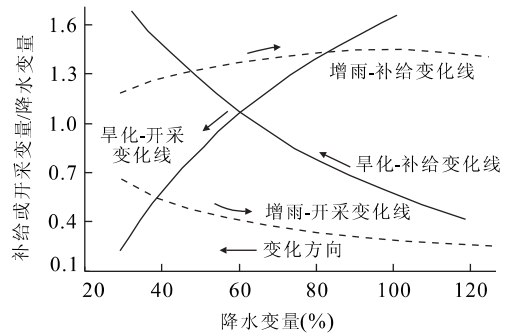


图 4 气候旱化或增雨过程中补给量、开采量与降水量比率变化

Fig. 4 Variation rate between groundwater recharge or pumpage for agriculture and precipitation in Hebei plain

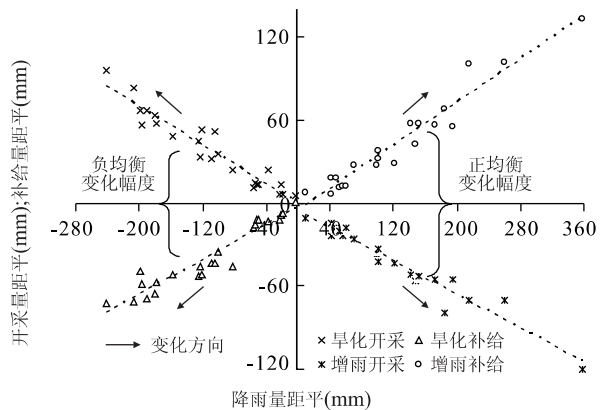


图 5 补给量、开采量距平与降水量距平的关系

Fig. 5 Relationship among the variation values of groundwater recharge, pumpage for agriculture and precipitation in Hebei plain

种植品种等因素有关。

分别对图 1 中降水量增减过程中补给或开采变量与对应降水变量的比率值绘制图 4, 表明在气候

表 2 1986—2000 年降水量变化对地下水系统水量及水位影响程度

Table 2 Influence intensity of annual precipitation variation to regional groundwater quantity and its level in Hebei plain since 1986 to 2000

降水±变化量(mm)		10	30	50	70	90	120	150	210	260	320
水量变化 (mm/a)	增大	7.06	21.09	35.01	48.83	62.56	82.96	103.15	142.92	175.48	213.91
	减少	7.08	21.32	35.67	50.14	64.72	86.81	109.17	154.72	193.53	241.12
水位变化* (cm/a)	上升	5.2~	15.5~	25.7~	35.9~	46.0~	60.9~	75.8~	105.1~	129.0~	157.3~
		8.7	26.1	43.2	60.3	77.2	102.4	127.3	176.3	216.4	263.7
	下降	5.2~	15.7~	26.2~	36.9~	47.6~	63.8~	80.3~	113.8~	142.3~	177.3~
		8.7	26.3	44.1	61.9	79.9	103.2	134.8	191.1	239.0	297.8

* μ 值:0.082~0.136(张光辉等,2004)。

由湿向干(年降水量减少)过程中补给量减少幅度或开采量增加幅度大于气候由干向湿(年降水量增加)过程中补给量增加幅度或开采量减少幅度。就是在相同降水变化量条件下,气候旱化过程对地下水补给或开采影响的强度大于气候湿润过程的强度。

2.3 降水量变化对区域地下水系统水量均衡状态影响机制与程度

在区域性大量开采地下水或出山地表径流被大规模拦蓄条件下,从地下水系统水量均衡角度考虑,有以下关系式:

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

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

式中,ΔQ 为地下水系统水量变化量(mm/a);Q_{补给}为主要受降水量变化影响的年补给量(mm/a);Q_{开采}为农业年开采量(mm/a);E_{蒸发}为地下水蒸发量;±W 为侧向流入一流出变化量及其他源汇变化量之和;±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 为地下水位变量(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(mm²)。

由于研究区地下水已经过长期超采使其水位埋深较大,E_{蒸发}较小,同时出山地表径流已长期被大规模拦蓄和受众多地下水位降落漏斗存在的影响,以致±W 量值有限。为了便于对比分析,本文中拟忽略±W 项的影响,所以式(1)中 ΔQ 或 ΔH 主要受 Q_{补给}和 Q_{开采}影响。当 Q_{补给}和 Q_{开采}随降水量增减而同向(即同增或同减)变化,二者对 ΔQ 或 ΔH 的影响是相互抵消的,但是这种情况存在的可能性小。在多数情况下,Q_{补给}和 Q_{开采}逆向(即增减或减增)变化,二者对 ΔQ 或 ΔH 的影响是表现为强度累加,如图 5 所示。

图 5 表明,相对多年平均值(本文为 1986—2000 年系列),年降水量增幅愈大,地下水补给量增

幅和农业开采量减幅愈大,则对地下水系统水量及水位正均衡的影响强度同时增大;年降水量减幅愈大,地下水补给量减幅和农业开采量增幅愈大,则对地下水系统水量及水位负均衡的影响强度同时增大。在邯郸、邢台和石家庄平原区,年降水量变化对地下水系统水量及水位影响程度如式(2)和式(3)所示,具体结果见表 2。

$$\Delta Q(\Delta Q_{\text{补给}}, \Delta Q_{\text{开采}}) = \pm [(0.068 \Delta P^{1.23})_{\text{补给}} + | (547.29/e^{0.0012\Delta P})_{\text{开采}} |], \quad (2)$$

$$\Delta H(\Delta Q_{\text{补给}}, \Delta Q_{\text{开采}}) = \pm \frac{[(0.068 \times \Delta P^{1.23})_{\text{补给}} + | (547.29/e^{0.0012\Delta P})_{\text{开采}} |]}{\mu F}. \quad (3)$$

式中,ΔP 为年降水量相对多年平均值的变化量(mm);ΔQ_{补给}为因年降水量变化造成的年补给量相对多年平均值的变化量(mm/a);ΔQ_{开采}为因年降水量变化造成的农业年开采量相对多年平均值的变化量(mm/a);其他同前。

基于 1986—2000 年系列多年平均降水量,当年降水量增减 10 mm 时,区域地下水系统的水量增加 7.06 mm 或减少 7.08 mm,区域地下水的平均水位上升或下降 5.2~8.7 cm;当年降水量增减 10%时,地下水系统水量增加 7.67%,或减少 7.98%。在 10~320 mm 变幅内的降水量增大过程中,补给变化量占补给、开采累计变化量的 48.59%~55.81%,开采变化量占补给、开采累计变化量的 44.18%~51.41%;在年降水量减小过程中,补给变化量占 40.96%~49.49%,开采变化量占 50.51%~59.04%。这表明,旱化过程的开采变化幅度大于补给变化,增雨过程的开采变化幅度小于补给变化。

3 结论

在农业用水以开采地下水为主的半干旱平原

区,年降水量变化通过地下水补给量减少与开采量增加、或补给量增加与开采量减少的互逆耦合,其对地下水系统水量均衡状态和水位变化的影响强度累加,而且在相同降水变量条件下旱化过程的影响强度大于雨量增加过程的影响,以致在连续枯水年份情势下这种影响具有较大的潜在灾害性。

因此,需要特别重视连续枯水年份降水量变化对地下水系统水量均衡状态影响的应对举措,包括利用连续丰水年的雨洪人工调蓄增大对地下水入渗补给和调控丰水年份的农业开采量,有效增加应对连续枯水年份可利用地下水储存资源量,这对于提高区域地下水资源供给安全保障能力具有重要意义。

致谢:感谢河北省气象、水文和地质环境监测部门给予帮助和王金哲同志协助完成图件转换清绘。

References

- Fei, Y. H., 2006. Evolution and utilization and conservation of regional groundwater in the Hebei plain to the south of Beijing and Tianjing [Dissertation]. Hehai University, Nanjing, 6—33 (in Chinese with English abstract).
- Jia, J. S., Liu, C. M., 2002. Groundwater dynamic drift and response to different exploitation in the North China plain. *Acta Geographica Sinica*, 57(2): 201—209 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. M., 2003. Ecological effect of water transfer from south to north to restore groundwater in the North China plain. *South to North Water Transfers and Water Science*, 24(1): 17—19 (in Chinese with English abstract).
- Stephen, C. F., 2002. Evaluation of groundwater for irrigation and sustainable utilization in the North China plain. Guidance Group of World Bank and World Water Company, 19—156 (in Chinese).
- Sun, M., Wang, L. Q., Xue, M. X., 2001. Statistic method on the agricultural exploitation. *Groundwater*, 23(2): 71—73 (in Chinese with English abstract).
- Wu, K., Chen, J. Y., Liu, S. P., et al., 1997. Research on water consumption characteristics of crops and water use efficiency in agriculture of Yucheng area, the North China plain. China Meteorological Press, Beijing, 131—137 (in Chinese).
- Yang, Y. H., Hao, X. H., Cao, J. S., et al., 2001. Relationship between precipitation, crop growth and groundwater dropping in the piedmont region of Taihang Mountain. *Chinese Journal of Ecology*, 20(6): 4—7 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. H., Fei, Y. H., Liu, K. Y., et al., 2004. Evolution of groundwater and countermeasures in Haihe plain. Science Press, Beijing, 123—151 (in Chinese).

附中文参考文献

- 费宇红, 2006. 区域地下水演变、利用与涵养研究: 以京津以南河北平原为例(博士学位论文), 南京: 河海大学, 6—33.
- 贾金生, 刘昌明, 2002. 华北平原地下水动态及其对不同农业开采量响应的计算. *地理学报*, 57(2): 201—209.
- 刘昌明, 2003. 发挥南水北调的生态效益、修复华北平原地下水. *南水北调与水利科技*, 24(1): 17—19.
- 斯蒂芬·福斯特, 2002. 华北平原地下水灌溉农业的评估和可持续发展. 世界银行、全球水伙伴地下水管理指导组, 19—156.
- 孙明, 王立琴, 薛明霞, 2001. 农业区地下水开采量统计方法研究. *地下水*, 23(2): 71—73.
- 吴凯, 陈建耀, 刘士平, 等, 1997. 华北平原禹城地区作物耗水特性与农业水利用水率研究. 北京: 气象出版社, 131—137.
- 杨永辉, 郝小华, 曹建生, 等, 2001. 太行山山前平原区地下水下降与降水、作物的关系. *生态学杂志*, 20(6): 4—7.
- 张光辉, 费宇红, 刘克岩, 等, 2004. 海河平原地下水演化与对策. 北京: 科学出版社, 123—151.