

土地利用对地下水位下降的影响

——以河北平原为例

许月卿

(北京大学环境学院资源环境地理学系, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 本文利用简化的水量平衡模型, 模拟了河北平原 1985~1995 年多年平均降水入渗系数和含水层给水度, 在此基础上计算出各用水部门和各种农作物平均每年引起的地下水位下降幅度。结果表明: 农业用水是引起河北平原地下水位下降的主要因素, 其次是工业用水和生活用水。小麦引起的地下水位下降幅度最大, 谷子最小。生产单位产值的小麦消耗地下水量最大, 引起的地下水位下降幅度也最大, 生产单位产值的蔬菜消耗地下水量最小, 引起的地下水位下降幅度也最小。实现河北平原地下水资源可持续利用, 调整种植业结构当务之急。

关键词: 土地利用; 地下水位下降; 种植结构; 河北平原

文章编号: 1000-0585(2005)02-0222-07

河北平原(指京津以南的河北平原)依地形、地貌及成因不同自西而东可划分为山前平原、冲积平原和滨海平原, 总面积 61852km², 包括 102 个县(图 1)。河北平原多年平均降水量 529.4mm (1956~1997 年), 是我国目前水资源供需矛盾最为尖锐的地区之一。自上世纪 70 年代初河北平原开始大规模开发利用地下水以来, 地下水位持续下降, 并形成区域性地下水位降落漏斗。根据 600 眼浅层地下水观测井资料分析, 地下水位由 1983 年的 7.23m 下降为 1993 年的 11.25m, 平均每年下降 0.43m^[1]。保定、石家庄、邢台、邯郸四市西部山前平原地下水大面积疏干, 并且与北京、天津连成一片, 形成了约 5×10⁴km²影响面积的地下水漏斗区^[2]。地下水位持续下降和生态环境问题已成为影响该区域可持续发展的瓶颈问题。不少学者对此问题进行了大量相关研究, 但在以往探究地下水位持续下降的原因时, 人们多定性地将归结为或自然因素或人类活动造成的, 而没有定量区分各种影响因素对地下水位下降的影响^[3~10]。

鉴于农业是河北平原的用水大户, 农田灌溉地下水开采量占到地下水总开采量的 76~80%^[11], 土地利用可能是造成地下水位持续下降的主要原因。本文即建立在这样的认识基础之上, 试图从土地利用的角度探讨地下水位下降的原因, 定量分析种植业结构对地下水位下降的影响, 为河北平原种植业结构的调整进而实现地下水资源的可持续利用提供科学依据。

1 数据来源

从河北省农业厅得到河北平原各县市 1985~2000 年农作物播种面积, 1985~2000 年

收稿日期: 2004-06-12; 修订日期: 2004-09-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40171004)

作者简介: 许月卿(1972-), 女, 河北定州市人, 博士后。主要从事土地利用与资源环境评价等方面的研究。

E-mail: xuyq@pku.edu.cn.

地下水开采量来自实地农户调查和河北省水利厅, 各县 1958~1997 年降水量数据来自奥地利国际应用系统分析研究所, 各县 1951~1998 年主要作物天然状态下的水分亏缺量来自中国科学院地理科学与资源研究所。从河北省地矿厅收集到河北平原 1975、1980、1985、1990、1995、2000 年 6 年地下水观测井的水位观测资料, 其中浅层地下水观测井 880 眼, 呈均匀分布。采用各观测井年底 12 月份平均地下水位观测数据, 利用 GIS 技术, 采用 KRIGING 插值方法, 得到各县市 6 个时段的地下水位平均埋深。

2 土地利用对地下水位下降的影响

2.1 估计降水入渗系数和含水层给水度

根据河北省多年地下水动态监测资料表明, 经常参与水循环的地下水包括潜水含水层和与其有较密切联系的微承压含水层在内的浅层地下水系统中的水量。因此, 河北省的地下水补给资源, 主要是以浅层地下水系统作为均衡体^[12,13]。根据水均衡原理, 浅层地下水系统的水量平衡模型为:

$$(Q_{\text{降水}} + Q_{\text{河流}} + Q_{\text{渠系}} + Q_{\text{渠灌}} + Q_{\text{井灌}} + Q_{\text{侧入}}) - (Q_{\text{蒸发}} + Q_{\text{开采}} + Q_{\text{越流}}) = \Delta Q \quad (1)$$

模型 (1) 即可综合概括为:

$$\text{补给量} - \text{排泄量} = \text{地下水资源储存量变化} \quad (2)$$

由于资料限制, 补给量中本文只考虑了降水, 排泄量中只考虑了开采量, 水量平衡方程 (1) 可以简化为方程 (3):

$$Q_{\text{降水}} - Q_{\text{开采}} = \Delta Q \quad (3)$$

目前, 大气降水入渗补给是河北平原地下水的的核心补给来源, 多年平均降水入渗量占到地下水总补给量的 68.1~78.5%; 人工开采是河北平原地下水的主要排泄途径, 开采量占排泄总量的 80~86%^[12]。据实验资料分析, 当地下水位埋深达到 2.5m 以上时, 潜水蒸发系数趋向于零。目前, 山前平原大部分地区地下水位埋深大于 10m, 中部~滨海平原浅层淡水区地下水位埋深也达到 7~10m, 已在潜水蒸发极限深度以下, 地表河流常年断流, 地表径流补给地下水量和潜水蒸发越来越少, 降水入渗、地下水开采在地下水补给量和排泄量中所占的比例越来越大, 所以采用方程 (3) 来描述河北平原浅层地下水系统的收入、支出情况是合理的。

对于河北平原每一个县, 水量平衡方程 (3) 可以写为:

$$V_g - \rho P A_c = \Delta H \mu A_c \quad (4)$$

式中, V_g 为多年平均地下水开采量, ρ 为多年平均降水入渗系数, P 为多年平均降水量, A_c 为县域面积, ΔH 为浅层地下水位下降幅度, μ 为给水度。

根据获得的资料情况, 本文的研究阶段确定为 1985~1995 年, 利用线性回归统计方法分别拟和 1985~1990、1990~1995、1985~1995 三个阶段山前平原和中东部低平原的

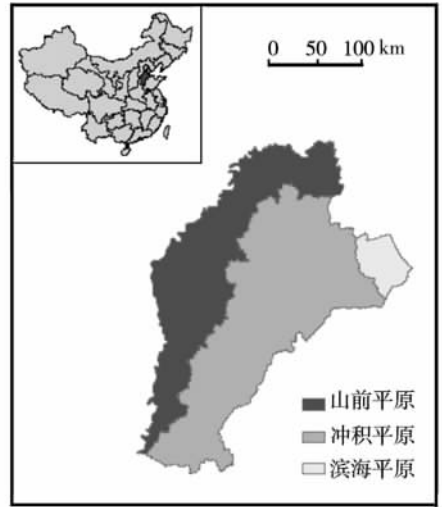


图 1 河北平原地理位置

Fig. 1 Location of the Hebei Plain in China

降水入渗系数和含水层给水度^①，回归结果见表 1 和表 2。

表 1 山前平原降水入渗系数和给水度回归结果

Tab. 1 The regression result of infiltration coefficient of precipitation and specific yield in the piedmont plain

阶段 (年)	样本	ρ	μ	R^2
1985~1990	52	0.346**	0.046	0.857
1990~1995	52	0.303**	0.028*	0.862
1985~1995	104	0.316**	0.032**	0.867

注: ** 显著性水平为 0.01, * 显著性水平为 0.05.

表 2 中东部低平原降水入渗系数和给水度回归结果

Tab. 2 The regression result of infiltration coefficient of precipitation and specific yield in the piedmont plain

阶段 (年)	样本	ρ	μ	R^2
1985~1990	50	0.141**	0.039	0.783
1990~1995	50	0.115**	0.024**	0.856
1985~1995	100	0.121**	0.028**	0.838

注: ** 显著性水平为 0.01, * 显著性水平为 0.05.

由表 1 和表 2 可知, 山前平原和低平原降水入渗系数和含水层给水度高度显著。在山前平原和低平原降水入渗系数从 1985~1990 年阶段到 1990~1995 年阶段都是减小的, 分别减少 0.043 和 0.026。这是因为进入 20 世纪 80 年代后期, 河北平原降水处于相对少雨期, 加之地下水开采量持续增长, 使得地下水位持续下降, 水位埋深小于 4m 的地区减少了近一半, 整个平原地下水位埋深普遍降到垂直入渗最佳水位埋深以下, 因此, 计算出的降水垂直入渗系数比在 80 年代初期地下水位埋深小于 4m 的条件下通过试验得到的降水入渗系数要小。近 10 年来, 地下水位埋深加大及农作物产量提高, 作物蒸腾系数有了明显的提高, 也使降水入渗系数在减小^[12]。

山前平原含水层岩性主要由卵石、砾石、含砾粗砂等组成, 非饱和带有利于接受大气降水入渗补给; 而中部低平原含水层主要由细粉砂、中细砂、粘性土组成, 地下水的天然补给与排泄条件较差。所以, 山前平原的降水入渗系数大于低平原的降水入渗系数。

考虑阶段统一性, 本文采用 1985~1995 年的平均降水入渗系数和含水层给水度来分析土地利用结构对地下水位下降的影响。

2.2 不同用水部门对地下水位下降的影响

根据河北平原 1985~1995 年平均降水量和年均浅层地下水开采量, 利用方程 (4), 可计算出山前平原、中东部低平原浅层地下水位年均下降幅度。期间, 山前平原地下水位年平均下降 0.74m, 中东部低平原年均下降 0.25m。根据年均农业用水量、工业用水量和生活用水量占地下水年总开采量的比例分别计算出不同用水部门平均每年引起的地下水位下降幅度, 结果见表 3。

① 滨海平原只包括黄骅、海兴两县, 水文地质条件和冲积平原相近, 计算时二者合称中东部低平原。

表 3 1985~1995 年不同用水部门平均每年引起的地下水位下降幅度

Tab. 3 Yearly dropping down of groundwater level caused by different water use sectors

山前平原			中东部低平原		
用水部门	消耗地下水 ($\times 10^4 \text{m}^3$)	水位下降幅度 (m/a)	用水部门	消耗地下水 ($\times 10^4 \text{m}^3$)	水位下降幅度 (m/a)
农业	432817	0.63	农业	245907	0.23
工业	53655	0.08	工业	5340	0.005
生活	24528	0.03	生活	15753	0.015

可见，农业用水是引起地下水位下降的主要因素，其次是工业用水。在地下水位年均下降幅度中，农业、工业和生活所占比例山前平原分别为 85.1%、10.8% 和 4.1%，低平原分别为 92.1%、2% 和 5.9%。

在农业用水中，农田灌溉是农业的主要耗水对象。1985~1995 年山前平原、低平原农田灌溉年平均消耗的地下水水量分别为 $411176 \times 10^4 \text{m}^3$ 、 $233612 \times 10^4 \text{m}^3$ ，约占农业所用地下水总量的 95%，依此推算，农田灌溉用水平均每年引起的地下水位下降幅度山前平原和低平原分别为 0.6m 和 0.22m。

2.3 种植业结构对地下水位下降的影响

2.3.1 分解农田灌溉用水 农田灌溉用水是各种农作物用水之和。利用各种作物天然状态下水分亏缺量乘以作物的灌溉面积（播种面积乘以灌溉率）累加就得到农田灌溉亏水量，即农田要求得到灌溉的最大水量，又称其为农田灌溉需水量^[14]。利用各县市逐年作物灌溉播种面积和作物天然状态下的水分亏缺量，计算出河北平原 1985~1995 年逐年农田灌溉需水量。假设对不同作物来说灌溉技术、方法和机率是相同的，只是按照不同作物灌溉需水量的比例大小来进行灌溉，则不同作物所消耗的地下水水量可以由方程（5）得到：

$$V_i = V_{ga} \times \frac{d_i \times A_i}{\sum d_i \times A_i} \quad (5)$$

式中， V_{ga} 为农田灌溉所消耗地下水水量， d_i 为作物天然状态下的亏水量（mm）， A_i 为作物有效灌溉面积， V_i 为作物消耗的地下水水量。

根据作物逐年有效灌溉面积、作物价格计算出山前平原、中东部低平原不同作物 1985~1995 年平均每年消耗的地下水水量及单位灌溉面积、单位产值消耗的地下水水量。计算产值时，以 1980 年为不变价，价格指数采用农产品销售额价格指数（表 4、表 5）。

小麦是河北平原耗水量最大的农作物，1985~1995 年平均每年消耗的地下水水量占农田耗水总量的 50% 以上。其次是玉米。谷子平均每年消耗的地下水水量最少，只占农作物耗水总量的 1~2%。

就农作物单位灌溉面积消耗的地下水水量来看，蔬菜消耗的地下水水量最大，其次是小麦、玉米和棉花。平均每公顷蔬菜灌溉面积消耗的地下水水量在山前平原和低平原分别为 $3668 \text{m}^3/\text{hm}^2$ 和 $2296 \text{m}^3/\text{hm}^2$ ；小麦在山前平原和低平原分别为 $3104 \text{m}^3/\text{hm}^2$ 和 $2017 \text{m}^3/\text{hm}^2$ ；谷子平均每公顷灌溉面积消耗的地下水水量最少，在山前平原和低平原分别为 $719 \text{m}^3/\text{hm}^2$ 和 $438 \text{m}^3/\text{hm}^2$ 。

就单位产值来看，蔬菜消耗的地下水水量是最少的，平均每生产 1 元蔬菜消耗地下水在山前平原为 $0.25 \text{m}^3/\text{元}$ ，低平原为 $0.19 \text{m}^3/\text{元}$ 。小麦单位产值消耗的地下水是最多的，山前平原和低平原分别为 $1.35 \text{m}^3/\text{元}$ 、 $0.91 \text{m}^3/\text{元}$ ，其次是玉米，在山前平原和低平原分

别为 $0.78\text{m}^3/\text{元}$ 、 $0.54\text{m}^3/\text{元}$ 。

表 4 山前平原不同作物 1985~1995 年消耗的地下水量

Tab. 4 Groundwater consumed by different crops during 1985~1995 in the piedmont plain

作物种类	消耗水量 ($\times 10^4\text{m}^3/\text{a}$)	消耗水量 (m^3/hm^2)	消耗水量 ($\text{m}^3/\text{元}$)
小麦	223784	3104	1.35
玉米	91591	1655	0.78
棉花	21803	1597	0.61
谷子	6114	719	0.64
蔬菜	42318	3668	0.25
大豆	6416	981	0.60
其他作物	19149	695	

表 5 中东部低平原不同作物 1985~1995 年消耗的地下水量

Tab. 5 Groundwater consumed by different crops during 1985~1995 in the low plain

作物种类	消耗水量 ($\times 10^4\text{m}^3/\text{a}$)	消耗水量 (m^3/hm^2)	消耗水量 ($\text{m}^3/\text{元}$)
小麦	134646	2017	0.91
玉米	37517	957	0.54
棉花	28955	1035	0.30
谷子	4711	438	0.34
蔬菜	10488	2296	0.19
大豆	7077	479	0.30
其他作物	10217	396	

2.3.2 不同作物对地下水位下降的影响 不同作物平均每年消耗的地下水量已经得到, 根据方程 (6) 可以计算出不同作物种类平均每年引起的地下水位下降幅度。

$$\frac{\Delta H_i}{\Delta H_a} = \frac{V_i}{V_{ga}} \quad (6)$$

式中, ΔH_i 为不同作物引起的地下水位下降幅度, ΔH_a 为农田灌溉引起的地下水位下降幅度, V_i 为不同作物种类所耗地下水量, V_{ga} 为农田灌溉所耗地下水量。

1985~1995 年农田灌溉平均每年引起的地下水位下降幅度山前平原和中东部低平原分别为 0.60m 和 0.22m , 根据作物所消耗的地下水占农田灌溉所耗水量的比例和方程 (6) 得到 1985~1995 年山前平原和中东部低平原不同作物平均每年引起的地下水位下降幅度, 结果见表 6 和表 7。

表 6 山前平原不同作物引起的地下水位下降幅度

Tab. 6 Dropping down of groundwater level caused by different crops in the piedmont plain

作物种类	水位下降幅度 (m/a)	水位下降幅度 ($\text{m}/10^6\text{hm}^2$)	水位下降幅度 ($\text{m}/10^8\text{元}$)
小麦	0.33	0.45	0.020
玉米	0.13	0.24	0.011
棉花	0.03	0.23	0.009
谷子	0.01	0.1	0.009
蔬菜	0.06	0.53	0.004
大豆	0.01	0.14	0.009
其他作物	0.03	0.1	

表 7 中东部低平原作物引起的地下水位下降幅度

Tab. 7 Dropping down of groundwater level caused by different crops in the low plain

作物种类	水位下降幅度 (m/a)	水位下降幅度 ($\text{m}/10^6\text{hm}^2$)	水位下降幅度 ($\text{m}/10^8\text{元}$)
小麦	0.127	0.17	0.008
玉米	0.035	0.08	0.005
棉花	0.027	0.09	0.003
谷子	0.004	0.04	0.003
蔬菜	0.010	0.20	0.002
大豆	0.007	0.04	0.003
其他作物	0.010	0.03	

小麦是引起地下水位下降幅度最大的作物种类, 山前平原和中东部低平原小麦平均每年引起地下水位下降 $0.33\text{m}/\text{a}$ 和 $0.127\text{m}/\text{a}$ 。谷子消耗的地下水量最小, 年平均引起的地下水位下降幅度也最小, 在山前平原和低平原分别为 $0.01\text{m}/\text{a}$ 和 $0.004\text{m}/\text{a}$ 。

就单位灌溉面积引起的地下水位下降幅度看, 蔬菜引起的地下水位下降幅度最大, 其次是小麦, 最小的是谷子。在山前平原和中东部低平原平均每百万公顷蔬菜灌溉面积引起地下水位下降 0.53m 和 0.2m, 每百万公顷小麦灌溉播种面积引起地下水位下降 0.45m 和 0.17m, 每百万公顷谷子灌溉面积引起地下水位下降 0.1m 和 0.04m。

就单位产值引起的地下水位下降幅度看, 小麦最大, 蔬菜最小。山前平原和中东部低平原每生产 1 亿元小麦引起地下水位下降 0.02m 和 0.008m, 生产 1 亿元蔬菜地下水位下降 0.004m 和 0.002m。

3 结论与讨论

1985~1995 年, 河北平原农业用水、工业用水、生活水平平均每年引起的地下水位下降幅度在山前平原分别为 0.63m、0.08m 和 0.03m, 低平原分别为 0.23m、0.005m 和 0.015m。在作物种类中, 小麦平均每年引起的地下水位下降幅度在山前平原和低平原分别为 0.33m/a 和 0.127m/a, 而生产单位产值的小麦消耗的地下水在山前平原和低平原分别为 1.35m³/元、0.91m³/元。可见, 农业用水是引起河北平原地下水位下降的主要因素, 小麦是引起地下水位下降幅度最大的作物种类, 而且水分利用的经济效益低下。据资料分析, 本区井灌区水的有效利用率仅为 60% 左右, 灌溉水的粮食生产效率为 1kg/m³, 远低于世界发达国家 2kg/m³ 以上的水平^[15]。目前, 小麦、玉米是河北平原的主要粮食作物, 二者占粮食播种面积的 80% 以上, 形成典型的小麦、玉米两熟种植制度。所以, 河北平原要实现地下水资源的可持续利用, 实施节水灌溉技术、压缩小麦耗水型作物播种面积、调整种植业结构是当务之急。

致谢: 本文得到导师李秀彬研究员的指导, 谨此表示感谢!

参考文献:

- [1] Changming Liu, Jingjie Yu, Kendy Eloise. Groundwater exploitation and its impacts on the environment in the North China Plain. *Water International*, 2001, 26(2): 265~272.
- [2] 方生, 陈秀玲. 关于黄淮海地区东部平原南水北调受水区水资源优化配置与生态环境综合治理的建议. *地下水*, 2002, 24(3): 131~133.
- [3] 胡春胜, 张喜英, 程一松. 太行山前平原地下水动态及超采原因分析. *农业系统*, 2002, 18(2): 89~95.
- [4] 毛学森, 刘昌明. 太行山山前平原地下水变化趋势与农业持续发展. *水土保持研究*, 2001, 8(1): 147~149.
- [5] 邵爱军, 胡春胜. 环境变化对河北省水资源量的影响. *中国农村水利水电*, 2002, 10: 38~45.
- [6] 张永强, 刘昌明, 沈彦俊. 太行山山前平原浅层地下水动态分析——以河北省栾城县为例. *中国生态农业学报*, 2001, 9(2): 38~40.
- [7] 杨永辉, 郝小华, 曹建生, 张喜英等. 太行山前平原区地下水下降与降水、作物的关系. *生态学杂志*, 2001, 20(6): 4~7.
- [8] Guang-xin Z. Wei D. The groundwater crisis and sustainable agriculture in Northern China. *Water Engineering and Management*, 2002, 149(4): 13~16.
- [9] 何凡能, 王国. 海河流域河流季节变化对地下水及生态环境的影响. *地理科学进展*, 2001, 20(3): 285~294.
- [10] 任鸿遵, 于静洁, 林耀明. 华北平原农业水资源供需状况评价方法. *地理研究*, 1999, 18(1): 39~44.
- [11] 许月卿. 河北南部平原土地利用变化对地下水的影响. 中国科学院地理科学与资源研究所博士论文, 2003.

- [12] 陈望和. 河北地下水. 北京:地震出版社,1999.
- [13] 张宗祜,沈照理,薛禹群,等. 华北平原地下水环境演化. 北京:地质出版社,2000.
- [14] 林耀明,任鸿遵,于静洁,等. 华北平原的水土资源平衡研究. 自然资源学报,2000,15(3):252~258.
- [15] 刘昌明,何希吾. 中国 21 世纪水问题方略. 北京:科学出版社,1998.

Impact analysis of land use on groundwater level drawdown: a case study of the Hebei Plain

XU Yue-qing

(Department of Resource, Environment and Geography, the Center for Land Study, Peking University;
Key Laboratory for Earth Surface Processes, the Ministry of Education, Beijing 100871, China)

Abstract: Adopting the simplified water balance model, the average infiltration coefficient of precipitation and specific yield in the Hebei Plain between 1985~1995 are simulated, and the annual average groundwater level dropping down by water use sectors and crops is calculated on the basis of the above simulations. The results show that the water use in agriculture is the main factor resulting in the decline of groundwater level in the Hebei Plain, and the industrial and domestic factors are the secondary. In the piedmont plain, agriculture has led to a decrease of 0.63 m per year, industry of 0.08 m and domestic of 0.03 m, with the individual ratios being 85.1%, 10.8% and 4.1% respectively. While in the low plain, the order of the decrease is 0.23 m, 0.005 m and 0.015 m per year with the ratios being 92.1%, 2.0%, and 5.9% accordingly. In both areas, as to the major role causing the decline of groundwater level among the crops, wheat is the first, being 0.33 m and 0.127 m per year, while millet is the least, being 0.01m and 0.004 m annually. As for water consumed in producing unit output value, wheat also occupies the first place, being 1.35m³/yuan and 0.91m³/yuan, or resulting in the largest decline of 0.02 m and 0.008 m in producing 100 million yuan of wheat each. While vegetable is the least, being 0.25 m³/yuan and 0.19 m³/yuan, or 0.004 m and 0.002 m decline per 100 million yuan. With the decline of groundwater level, a series ecological and environmental disasters have been caused which have become the key factors restricting the socio-economic sustainable development of the Hebei Plain. Therefore, it is high time to adjust planting structure in order to achieve sustainable use of the groundwater in the Hebei Plain.

Key words: land use; groundwater level decline; planting structure; Hebei Plain