

文章编号: 1007-6301 (2003) 05-0490-09

京津以南河北平原地下水位下降 驱动因子的定量评估

许月卿

(北京大学环境学院资源环境地理学系, 北京 100087)

摘 要: 自 1970 年代以来, 在自然因素和人为活动的交互影响下, 京津以南河北平原地下水位持续下降并产生了一系列地质环境问题, 严重影响了该区域社会经济的可持续发展。本文从降水、地表径流、气温等自然因素及地下水超采、水利工程修建、农作物产量水平提高、耗水型作物面积扩大等人为因素初步分析了京津以南河北平原地下水位下降的主要原因; 通过建立投影寻踪回归模型, 定量评价了各因素对地下水位下降的影响, 确定了各影响因素对地下水位下降的相对贡献率。结果表明: 地下水开采是引起地下水位下降的最主要因素, 对地下水位下降的相对贡献率为 54.7%, 其中工业、农业、生活用水对地下水位下降的相对贡献率分别为 6.6%、43.7% 和 4.4%; 其次是降水和地表径流, 其相对贡献率分别为 25.6% 和 19.7%。

关 键 词: 京津以南河北平原; 地下水位下降; 驱动因子; 投影寻踪回归

中图分类号: P344; P333.1

京津以南河北平原(以下简称河北平原)处于河北平原的中南部, 自西而东由山前平原、中部平原和滨海平原组成, 面积 61852km^2 (图 1)。该区属于大陆性季风气候, 多年平均降水量 529.4mm , 是我国目前水资源供需矛盾最为尖锐的地区之一。由于地表水资源极度匮乏, 地下水资源是本区的主要供水水源。自 1970 年代以来, 在自然因素和人为活动的交互影响下, 河北平原地下水位持续下降, 并伴生了地面沉降、地裂缝、咸水入侵等一系列地质灾害。据 880 眼观测井分析, 1975 年河北平原地下水位为 5.4m , 2000 年下降到 15.6m , 年均下降速率为 0.41m/a , 保定、石家庄、邢台、邯郸四市西部山前平原地下含水层大面积疏干, 并且与北京、天津连成一片, 形成了约 $5 \times 10^4\text{km}^2$ “地下水漏斗区”^[1]。地下水位持续下降和地质环境问题已成为影响该区域可持续发展的瓶颈问题。

本文试图从降水、地表径流、气温等自然因素以及地下水超采、水利工程的修建、农田产量水平的提高、作物结构的变化等人为因素两方面初步揭示河北平原地下水位下降的主要原因, 分离自然因素和人为因素对地下水位下降的影响; 利用投影寻踪回归模型确定各影响因素对地下水位下降的相对贡献率, 为实现区域地下水资源的可持续利用提供科学

收稿日期: 2003-06; 修订日期: 2003-07

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX2-310-01-05) 资助

作者简介: 许月卿 (1972-), 女, 河北定州市人, 博士, 主要从事土地利用/土地覆被变化与区域可持续发展方面的研究。Email: xmoonq@sina.com

依据。

1 自然因素

1.1 降水

河北平原地下水的补给来源主要是降水入渗补给, 多年平均降水入渗补给量占补给总量的 75% 左右, 所以降水量的大小与时程分配对本区地下水的补给量影响很大, 进而引起地下水位的变化。

据 1999 年《河北省水资源及开发利用分析报告》在 1956~ 1997 年 42 年降水系列中, 河北平原多年平均降水量为 529. 4mm。1950 年代平均降水量为 577mm, 比 42 年均值偏大 9%; 1960 年代平均降水量为 566. 5mm, 比 42 年均值偏大 7%; 1970 年代平均降水量为 540mm, 比 42 年均值偏大 2%; 1980 年代平均降水量为 471mm, 比 42 年均值偏小 11%; 1990 年代降水量接近多年平均值。可见, 1950 年代至 1990 年代河北平原降水呈减少趋势(图 2)。河北平原地下水位和降水量变化的趋势对比见图 3, 可见, 二者在 40 年间都呈递减的变化趋势。

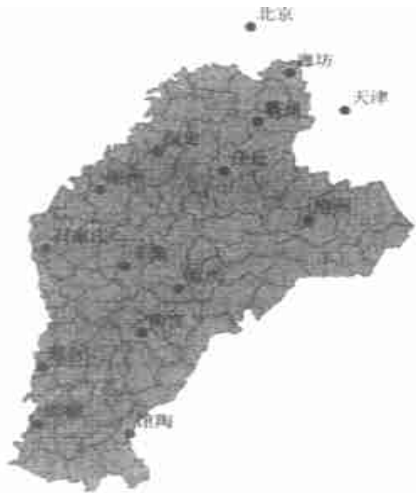


图 1 京津以南河北平原位置示意图
Fig. 1 Location of the Hebei Plain to the south of Beijing and Tianjin

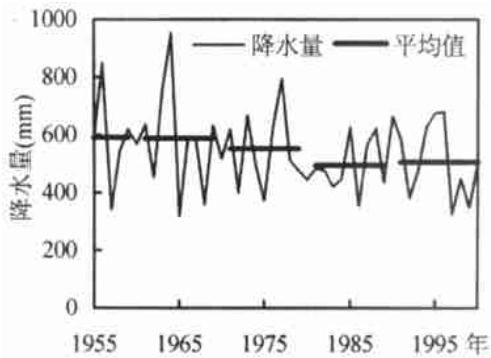


图 2 河北平原各年代平均降水量变化趋势
Fig. 2 The change trend of precipitation in different years in the Hebei Plain

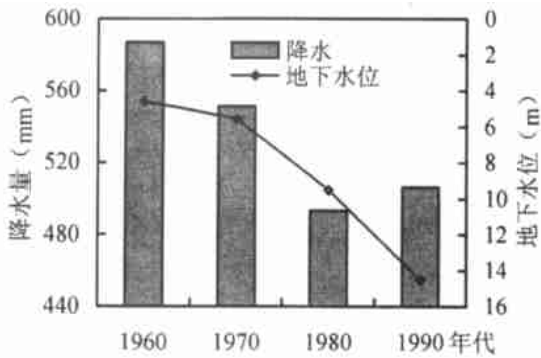


图 3 河北平原降水量和地下水位变化趋势对比
Fig. 3 The change trend of precipitation and groundwater level in the Hebei Plain

1.2 地表径流

地表径流是河北平原地下水的主要补给来源之一, 占地下水总补给量的 7% 左右。随着山区水库的大量兴建和上游省份人口增加以及国民经济的迅速发展, 工农业用水量增加, 使

本文中的地下水位均指浅层地下水位。

流入平原区的地表径流大幅度削减, 河道带的入渗功能无法发挥。河北平原 1950 年代平均入境水量为 $83.3 \times 10^8 \text{m}^3$, 到 1990 年代减小为 $22.8 \times 10^8 \text{m}^3$, 衰减幅度达 72.6%, 1980 年代年平均入境水量比 1970 年代以前的年平均值少 $34.2 \times 10^8 \text{m}^3$ [2]。

同时, 由于降水量的减少及人类活动影响加剧, 流域下垫面条件等因素发生了很大变化, 地表自产水量也在减少。如山前平原 1960 年代降雨 250mm 就开始产流, 到 1970 年代降雨超过 500mm 开始产流, 1988 年降雨 832mm 产流只有 3.5mm。根据 1956~ 1997 年系列地表水资源评价结果, 河北平原现状条件下自产地表水资源量比 1950 年代、1960 年代减少了 $19.3 \times 10^8 \text{m}^3$, 减少 27.6% [2]。

入境水量和自产水量的减少使河北平原地表水资源总量也相应减少。据 1999 年《河北省水资源及开发利用分析报告》, 全区地表水资源量 1960 年代均值比 1956~ 1997 年长系列均值多 44%, 为最丰年代; 1980 年代减少 54%, 为最枯年代 (表 1), 1950 年代至 1990 年代地表径流呈减少趋势。

表 1 不同年代地表水资源量平均值对比 单位 ($\times 10^8 \text{m}^3$)
Tab. 1 The average surface water in different years ($\times 10^8 \text{m}^3$)

年 代	1956~ 1997	1956~ 1959	1960~ 1969	1970~ 1979	1980~ 1989	1990~ 1997
降水量 (mm)	529.4	578.6	565.4	541.4	469.7	519.5
地表水资源量	12.7	12.1	18.3	14.1	5.8	14.2

由于地表水资源大幅度削减, 对地下水资源的补给量也相应减少。据计算, 在 1956~ 1997 年系列地下水资源比 1956~ 1984 年系列地下水资源的减少量中, 本区因地表水体入渗补给量减少 $2.32 \times 10^8 \text{m}^3$, 减少幅度 23.3%, 占地下水资源减少量的 14.5% [2]。地表水资源量和地下水位变化的趋势对比见图 4。

1.3 气温

伴随着全球气温升高, 河北平原出现干旱化趋势。气温变化对水资源的影响主要表现为温度升高使水体蒸发量加大, 蒸发强度提高, 从而使水的消耗量增加, 可利用的水资源量减少。据河北省 42 个气象台站资料统计, 近 50 年河北省各地气温上升了 $0.2 \sim 2.1$, 全省平均气温上升了 1 [3]。高温加剧了旱情, 使农田需水量增加; 高温也使城市生活用水量增加, 加大城市供水负担。Frederick 根据水土侵蚀模型分析了美国密苏里- 依阿华- 内布拉斯加州- 堪萨斯州 1930~ 1940 年平均气温较 1951~ 1980 年高 1 , 同时降水减少了

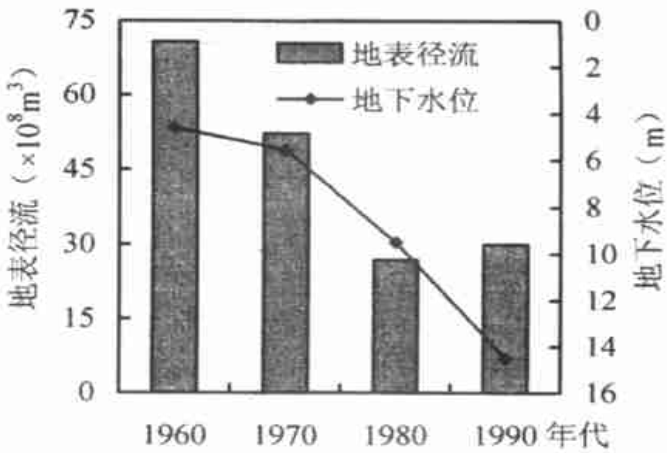


图 4 地表径流和地下水位变化趋势对比
Fig. 4 The change trend of surface water and groundwater level

101.6mm, 堪萨斯州的玉米和小麦灌溉用水增加了 14%, 内布拉斯加州玉米灌溉用水量增加了 39%^[4]。

河北平原 8 个气象站年代平均气温见表 2, 从 1960 年代至 1990 年代各气象站平均气温呈升高趋势, 1960 年代气温最低, 1990 年代气温达到最高。河北平原气温与地下水位变化的趋势对比见图 5。

表 2 河北平原各气象站年代平均气温 单位 ()

Tab. 2 The average temperature of weather station in different years in the Hebei Plain ()

	1960 年代	1970 年代	1980 年代	1990 年代
石家庄	12.76	12.79	13	13.97
保定	12.08	12.27	12.57	13.17
邢台	12.82	13.17	13.54	14.23
黄骅	11.88	11.94	12.15	12.34
沧州	12.37	12.44	12.79	13.38
霸州	11.3	11.4	11.8	12.9
饶阳	12.06	12.06	12.21	13
南宫	12.75	12.83	12.92	13.51
平均	12.25	12.36	12.62	13.31

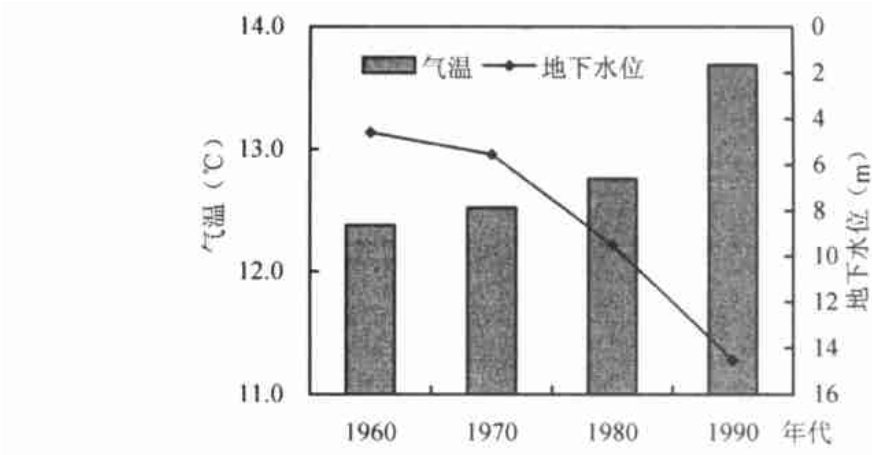


图 5 河北平原气温与地下水位变化趋势对比

Fig. 5 The change trend of temperature and groundwater level

2 人为因素

2.1 地下水超采

自 1970 年代以来, 随着城市用水量的增加, 井灌的发展及入境水量的减少, 加之河北平原先天性缺水, 地表水资源十分匮乏, 为了满足工农业生产发展和人民生活日益增长的需求, 不得不靠长期过量开采地下水来维持, 造成区域地下水位连年下降。据估算, 1980 ~ 1997 年河北平原浅层地下水平均每年超采 $26.92 \times 10^8 \text{m}^3$, 是浅层地下水开采量的 30.5%。干旱年份降水量偏少, 地下水超采更为严重, 开采量的 50% 以上为超采量^[2]。太

行山前平原自 1970 年代后期大规模超采地下水以来, 平均每年以 0.5~0.6m 的速率迅速下降, 其中辛集、晋州、赵县、高邑、柏乡、宁晋等地累计下降幅度超过 15m。石家庄地区水位埋深由 1980 年代以前的 5m 左右, 下降到目前的 30m 左右, 第 I 含水层组已基本疏干, 第 II 含水层组也部分被疏干。山前平原全淡水区的地下水位持续下降, 使得土壤包气带变厚, 减缓了地下水资源的补给周期, 减少了补给量。中东部平原有咸水分布区, 由于地下淡水资源更加缺乏, 被迫动用了大量不可更新(或难以更新)的地下水资源量。据估算, 从 1970 年代初到 1997 年, 已累计开采深层水 $386.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。由于深层水补给缓慢, 致使水位急剧下降, 滨海地区原有自流水区消失, 出现全国闻名的冀枣衡漏斗、沧州漏斗等, 而且诱发了诸如地面沉降、海水倒灌、咸水入侵等地质环境问题。

2.2 上游水利设施的兴建

1950 年代末和 1960 年代初, 随着水利工程的兴建和“根治海河”工程的实施, 使河北平原建成了分流入海和统一入海两套并存的水利系统。目前, 河北省山区已建成大型水库 18 座, 中型水库 38 座, 小型水库 1086 座, 总库容 $112.9 \times 10^8 \text{ m}^3$, 控制山区面积达 85%, 控制山区来水量的 90%^[2]。这些水利工程的兴建, 控制了山洪的爆发, 确保了当地与下游人民生命财产和社会经济的发展。但由于上蓄作用, 从山区进入平原的水量大为减少, 切断了河流对下游地区的供水作用。尤其是 1980 年代以来, 由于水利工程(如水库)在河流上游拦洪蓄水, 极大地改变了地表水体在自然条件下的时空分布规律, 许多常年性河流仅在洪水季节有水, 有的甚至全年断流, 原来地下水沿河可常年获得地表水的补给, 现在仅在较短的洪水季节内有补给, 甚至无补给。因此, 目前河北平原的地下水, 除山前侧向径流补给外, 主要为大气降水补给, 地表径流补给地下水量已微乎其微。

2.3 农作物产量水平提高

作物产量的提高除与作物品种、技术改良、施肥等因素有关外, 还与作物需水量有着密切关系^[5]。在一定范围内, 作物产量越高, 农田蒸散发量就越大, 消耗的土壤水分就越多, 作物产量的提高是以消耗更多的土壤水为前提的。河北平原年内降水集中, 年际变化强度大, 粮食生产对灌溉表现出很大的依赖性。在自然降水不能满足作物生长发育的需水时, 灌溉就成为粮食稳产、高产的重要手段。由于地表水资源缺乏, 地下水就成为本区农业灌溉的主要供水水源。在 1980 年代以前, 河北平原粮食单产低于 $2500 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 地下水位在 5.5m 左右。随着农田水利设施的完善和耕地灌溉率的提高, 目前粮食单产已达到 $6000 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 左右, 而地下水位下降到 15m 左右。

以太行山前平原的栾城县为例, 1975~2000 年, 全县粮食产量与地下水位的关系可以看作是“X”型(图 6), 粮食产量由 1975 年的 146605t 增长到 2000 年的 275836t, 而地下水位由 1975 年的 10.69m 下降到 2000 年的 26.07m, 25 年水位下降 15.38m, 平均每年下降 0.62m。可见, 在粮食产量增长的背后, 却是地下水位大幅度下降的严重局面, 二者呈显著的负相关关系(图 7)。粮食产量的增长, 使作物消耗了大量土壤水分, 造成补给地下水的入渗量大大减少, 也是地下水位连年下降的重要原因。

2.4 耗水型作物面积的扩大

在河北平原, 冬小麦整个生长发育期内自然降水远远不能满足其需要, 亏缺量高达 67%~70%, 整个生育期的需水量和降水量的耦合度只有 0.25, 属于耗水型作物^[6]。自 1970 年代以来, 随着水利设施的完善和耕地灌溉率的提高, 河北平原冬小麦等耗水型作物面积

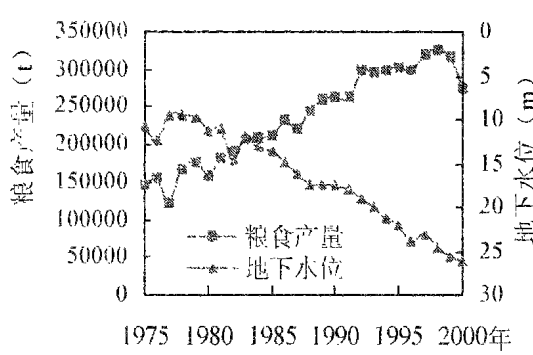


图 6 栾城县粮食产量与地下水位变化趋势
Fig. 6 The change trend of grain yield and groundwater level in Luancheng county

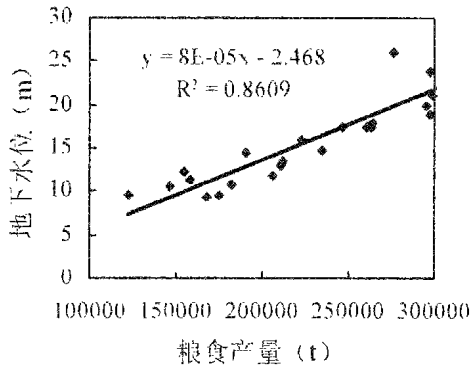


图 7 栾城县粮食产量与地下水位的关系
Fig. 7 The relation of grain yield and groundwater level in Luancheng county

不断扩大，而耐旱的谷子等杂粮作物播种面积大幅度减少。以山前平原的栾城县为例，建国 50 年来，冬小麦播种面积呈波浪型上升趋势，由 1949 年的 8126hm² 上升到 2000 年的 18333hm²，占夏粮作物播种面积的 85% 以上。从地下水位年内下降过程线来看，地下水位的下降主要发生在冬小麦生育后期和雨季来临之前的 3~6 月，玉米生长前期也是地下水位下降的时期，但玉米主要生长季节进入雨季，地下水得到一定的补充，从 11 月至次年 2 月，由于灌溉用水减少，地下水位出现回升（图 8）。栾城县地下水位多年平均 4 月份下降 0.93m，5 月份下降 0.6m，6 月份下降 0.61m（图 9）。可见，冬小麦生长季节是地下水位下降的主要时期，冬小麦面积的增加导致地下水位年均下降幅度增大，并引起 4~6 月地下水位的月下降幅度增大。

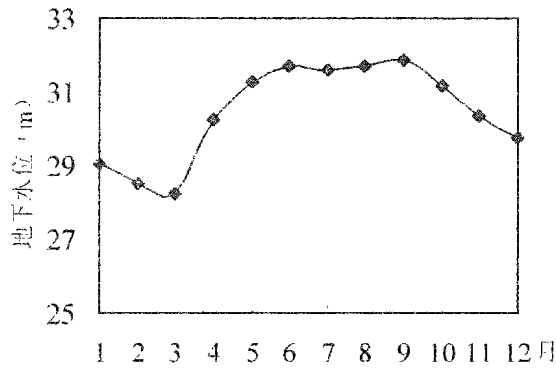


图 8 栾城县地下水位年内变化过程线
Fig. 8 The change process of groundwater level in a year in Luancheng county

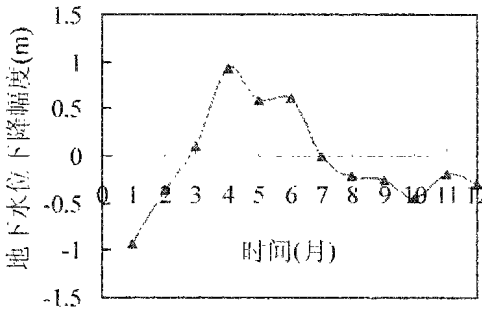


图 9 栾城县多年平均各月地下水位下降幅度
Fig. 9 The average extent of groundwater level dropdown of months in Luancheng county

3 地下水位下降驱动因子的定量评估

上面对引起地下水位下降的各种自然因素和人为因素进行了定性综合分析，但不能确

定各因素对地下水位下降贡献率的大小。为计算各主要影响因子在地下水位下降中所起作用的大小, 根据上述讨论的结果, 利用投影寻踪回归技术 (Projection Pursuit Regression, 简称 PPR) 来定量评价各影响因素对地下水位下降的影响。

3.1 投影寻踪回归技术的基本思想及计算模型

PPR 基本思想是: 将高维数据投影到低维空间上, 并通过计算机不断地寻找有意义的投影方向, 使在这些投影方向上的数据能显示出原数据的结构特征, 从而可以在低维空间上对数据结构进行分析, 以达到研究和分析高维数据的目的^[7~ 9]。

PPR 的模型: 设 $\bar{X} = (x_1, x_2, x_p)$ 是 P 维随机变量, $y = f(x)$ 是一维随机变量。为克服线性回归不能反映非线性情况的矛盾, PPR 回归模型采取一系列岭函数 $G_m(Z)$ 的“和”来逼近回归函数。即:

$$f(x) \sim \sum_{m=1}^M \beta_m G_m(Z) = \sum_{m=1}^M \beta_m G_m(\bar{\alpha} \times \bar{x}) = \sum_{m=1}^M \beta_m G_m(\sum_{j=1}^P \alpha_{mj} \times x_j) \tag{1}$$

式中 $G_m(Z)$ 表示第 m 个岭函数 (数值函数), $Z = (\bar{\alpha} \times \bar{x})$ 为岭函数的自变量, 它是 P 维随机向量 \bar{x} 在 \bar{a} 方向上的投影, M 为岭函数的个数。

该模型可以用增大 M 的办法来减少模型误差。由于采用逐段线性函数在各投影方向上不断对数据平滑逼近得到的数值函数 $G_m(Z)$, 因此该模型能客观反映数据本身的内在结构, 增强了模型预测结果的稳定性。

3.2 地下水位下降与其影响因子的 PPR 关系模型

PPR 数据结构和特征无任何假定和条件限制, 通过分析和处理高维观测数据 y 和 x 的相互关系, 建立相应回归模型。本文中 y 为因变量, x 为自变量。

因子的选择:

因变量因子: 地下水位

自变量因子: 降水、气温、地表径流、工业、农业和生活地下水开采量 (即自然因素和人为因素)

其时序为 1975 年、1980 年、1985 年、1990 年、1995 年、2000 年 6 个时段。地下水位根据河北平原 800 多眼观测井经 Kriging 插值计算得到, 降水、气温数据采用河北平原 8 个气象站的平均值, 地表径流量来自河北省水文水资源勘测局, 工业、农业和生活浅层地下水开采量来自河北省水利厅。

3.3 地下水位下降影响因子的贡献度与权重系数

将因子时序资料输进 PPR 计算软件包, 模型进行运算时, 只需要调整光滑系数 S 、样本容量 N 、岭函数个数 M 和最优个数 M_u 。通过计算, 获得自变量因子对因变量的相对贡献度, 对相对贡献度进行归一化处理得出影响因子的权重系数, 结果见表 3 和表 4。

表 3 河北平原地下水位下降影响因子的贡献度及权重系数

Tab. 3 Contribution of factors to groundwater level dropdown in the Hebei Plain

变量名称	工农业、生活开采量	降 水	地表径流	气 温
相对贡献度	1	0.4678	0.35909	0.0002
权重系数	0.547318	0.256036	0.196537	0.000109
投影操作指标	光滑系数 $S=0.1$, 样本容量 $N=6$, 投影次数 $M=6$, $M_u=5$, 拟和误差 $=0$			

表 4 河北平原 PPR 回归结果检验

Tab. 4 Test of PPR result in the Hebei Plain

实测值	预报值	绝对误差	相对误差
5.40	5.40	0.000	0.0
5.71	5.711	0.001	0.0
9.19	9.19	0.000	0.0
9.81	9.81	0.000	0.0
13.50	13.50	0.000	0.0
15.59	15.59	0.000	0.0
合格项数	6	合格率%	100

由以上结果可见, 在影响地下水位下降的诸因素中, 工农业、生活地下水开采量对地下水位下降的相对贡献度最大, 也即人为因素对地下水的开采量是导致地下水位下降的主要因素。工农业、生活开采量的权重系数为 0.547, 即工农业、生活开采量对地下水位下降的相对贡献率为 54.7%。

在自然因素中, 降水对地下水位下降的相对贡献率最大, 地表径流次之。降水对地下水位下降的相对贡献率为 25.6%, 地表径流为 19.7%。气温对地下水位下降的相对贡献率影响最小, 可以忽略不计。

在河北平原, 农业是用水大户, 农业多年平均地下水用量占工农业、生活地下水开采总量的 80% 左右, 工业用水和生活用水分别占 12% 和 8% [2]。按此比例推算, 农业、工业、生活用水对地下水位下降的相对贡献率分别为 43.7%、6.6% 和 4.4%。可见, 农业用水是引起地下水位下降的主要因素。而在农业用水中, 农田灌溉用水占到农业用水的 95% 左右, 依此可以推算, 农田灌溉即种植业对地下水位下降的相对贡献率为 41.5%, 是引起地下水位下降的最主要因素 (图 10)。

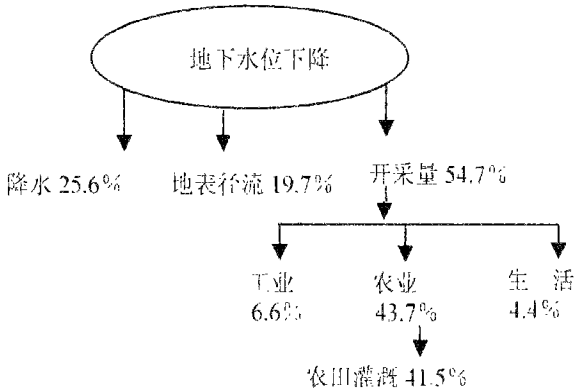


图 10 河北平原影响因素对地下水位下降的相对贡献率

Fig. 10 The relative contribution of factors to groundwater level draw down in the Hebei Plain

参考文献

[1] 方生, 陈秀玲. 地下水开发引起的环境问题与治理. 地下水, 2001, 23 (1): 8~ 11.

[2] 河北省水文水资源勘测局. 河北省水资源及开发利用分析报告. 1999.

[3] 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.

- [4] 邓慧平. 气候与土地利用变化对水文水资源的影响研究. 地球科学进展, 2001, 16(3): 436~ 441.
- [5] 陈玉民, 郭国双, 王广兴等. 中国主要作物需水量与灌溉. 北京: 水利电力出版社, 1995, 33~ 39.
- [6] 刘昌明, 王会肖. 土壤-作物-大气界面水分过程与节水调控. 北京: 科学出版社, 1999, 7~ 9.
- [7] 李祚泳, 邓新民, 桑华民. 投影寻踪回归模型及其在降水预测中的应用. 新疆气象, 1998, 21(3): 9~ 11.
- [8] 李祚泳. 污染物浓度预测的 PPR 模型. 环境科学, 1997, 18(4): 38~ 44.
- [9] 高玲, 王淑英. 投影寻踪回归模型在水文预报中的应用. 黑龙江水专学报, 2000, 27(2): 16~ 17.
- [10] 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.
- [11] 马金珠, 李吉均, 高前兆. 气候变化与人类活动干扰下塔里木盆地南缘地下水的变化及其生态环境效应. 干旱区地理, 2002, 21(1): 17~ 23.
- [12] 毛任钊, 刘小京, 姜华君. 华北平原缺水盐渍区浅层地下水位动态分析. 地理科学进展, 2002, 21(6): 565~ 572.

Evaluation of Groundwater Level Drawdown Driving Forces in the Hebei Plain to the South of Beijing and Tianjin

XU Yueqing

(Department of Resources Environment and Geography, College of Environmental Sciences,
Peking University, Beijing 100087)

Abstract: From the 1970s, under the impact of natural and human factors, the groundwater table in the Hebei Plain has been declining, causing a range of geological and environmental disasters. These disasters include subsidence, seawater intrusion, salinization, desertification and so on, which have seriously threatened the ecological environment and become the key factors of restricting the socio-economic sustainable development of the Hebei Plain. This paper analyzed the causes of groundwater withdrawal from such natural factors as precipitation, surface water and temperature, and from such human aspects as over-exploitation of groundwater, building of water conservancy, improvement of crop production and enlargement of water-consuming crops. The contribution of driving forces to groundwater table drawdown was assessed through building Projection Pursuit Regression model. The result indicates that the exploitation of groundwater is the first factor, which accounts for 54.7% of groundwater withdrawal. According to the proportion of groundwater consumed by industry, agriculture and domestic, the percent of groundwater table drawdown caused by the three sectors were 6.6%, 43.7% and 4.4% respectively. The second is precipitation, with 25.6%, and the third is surface water, with 19.7%. This paper provides scientific basis for groundwater sustainable use.

Key words: the Hebei Plain to the south of Beijing and Tianjin; groundwater level drawdown; driving forces; projection pursuit regression