

海河南系平原浅层地下水开采耗能 及其空间分布

张士锋¹, 徐立升^{1,2}

(1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 本文针对海河南系平原不同时期地下水水位变化引起的能耗增加问题, 基于开采井与其影响半径区域内的地下水开采耗能等效的假设, 首次推导了浅层地下水耗能计算公式。利用三个不同时期浅层地下水流场的演化特点, 结合 GIS 技术方法, 对典型年份(1964、1984 和 2001 年)春季农业生产季节地下水开采耗能及其变化进行比较分析。研制了海河南系平原农业春产期浅层地下水耗能空间分布图, 分析获得 20 世纪 60 年代以来该地区地下水位下降导致开采耗能大幅度增加的态势和空间分布格局, 结果表明: 从海积平原地区到太行山前平原地区, 开采浅层地下水耗能以及耗能差值都呈递增趋势。研究结果对北方地区水价政策等的制订有重要的参考价值, 为研究区南水北调后地下水水位回升的社会经济效益评价提供参考。

关键词: 海河南系平原; 浅层地下水; GIS 技术; 地下水开采耗能; 空间分布

文章编号: 1000-0585(2007)05-0949-09

水资源紧缺是当前制约我国国民经济发展的一个重大问题, 而建设“节约型社会”是国家发展和科学研究的重要内容^[1, 2]。海河南系平原是我国社会经济发展较快的地区, 地下水的开采利用已占供水水源的 60% 以上^[3], 浅层地下水实际供水量占地下水总供水量的 70% 以上^[4], 是最主要的供水水源。随着社会经济的快速发展, 地下水开采设备和地下水开采量不断增加, 地下水开采耗能也在不断增加。至 2001 年, 海河南系平原用于农田灌溉的地下水机电井数已达 157.1 万眼, 配套机井 67.6 万眼, 有效灌溉面积为 351.2 万公顷, 灌溉抽水耗能达到 16.3 亿千瓦时, 花费资金约 11.4 亿元。因此, 研究如何使开采等量地下水耗能最少, 将对节省能源消耗和减少生产投入具有重要的社会效益。

20 世纪 60 年代以来, 由于不合理开采地下水, 海河南系平原出现了区域性地下水位下降^[5]和地下水降落漏斗^[6], 导致地面塌陷和地面沉降等生态和环境问题。南水北调工程实施后, 地下水水位将逐渐回升, 如何确定合理生态水位^[7, 8]和如何评价工程对地下水生态和环境的影响成为研究的焦点^[9, 10]。然而, 对于地下水水位变化引起开采耗能变化等社会经济问题研究较少, 仍以定性分析为主^[11]。

在已有的地下水开采耗能研究中, 提高地下水开采装置的综合效率是研究的重点, 机井建设施工^[12]和水泵问题^[13]是两个重要方面; 利用不同地下水水位埋深的耗能差异, 来研究不同节水灌溉措施的耗能节能问题^[14, 15]也是研究的焦点; 在地下水回灌工程效益问题上, 涉及计算地下水开采耗能^[16-19], 但采用单井开采耗能计算公式, 难以对区域地下

收稿日期: 2007-02-08; 修订日期: 2007-07-13

基金项目: 科学技术部科研院所社会公益研究专项(2005DIB3J070)支持

作者简介: 张士锋(1965-), 男, 汉, 湖北人, 副研究员。主要从事水文水资源研究。

水开采耗能及其空间分布特征进行规律性探索。

总之，关于地下水开采耗能方面的研究取得一定的进展，主要表现在单井开采设备的使用效率的提高和节水节能灌溉措施等工程或技术方面，对地下水变化引起的开采耗能研究仅仅停留在小区分析和简单计算上，缺乏宏观区域计算地下水开采耗能的理论和计算方法的研究。因此，研究过去四十年来不同代表年份浅层地下水开采耗能空间分布特征，对掌握该地区未来南水北调工程地下水开采耗能变化动态，促进地下水回灌经济效益的探索，具有重要的现实意义和科学价值。

1 研究区及数据资料

1.1 研究区概况

海河南系平原位于我国海河流域中部地区，包括大清河流域和子牙河流域以及黑龙港河东的平原地区，总面积约 6.1 万 km²（图 1）。依照行政区划，海河南系平原为河北省南部的 6 个地级市所属。太行山前平原是人口密集、经济和社会发展最快的地区，形成了以石家庄、邯郸、邢台和保定等大中城市为中心的太行山前经济带；衡水市和沧州市分别位于中部平原区和东部海积平原区，近年来社会经济也有较快发展。

研究区多年平均降水量为 527.9mm，陆面蒸发量大于 500 mm，水面蒸发量在 1200mm 左右，属大陆性季风气候区。流经该区的主要河流有大清河、子牙河（子牙新河）、滏阳河（滏阳新河）、滹沱河和南运河等。近几十年，降水量减少，上游水库蓄水拦截，“有河皆干，有水皆污”，仅在汛期有少量洪水径流，年径流量 12.2 亿 m³。“华北明珠”白洋淀也大幅萎缩，多次出现严重的干淀问题。

海河南系平原西至西南高向渤海方向倾斜，地面标高由 100m 逐渐下降到 2~3m，地面坡度 0.5‰左右。在第四纪古黄河的冲洪积作用下，形成了以亚砂土为主的山前冲洪积平原、以亚黏土和亚砂土相结合的中部冲积湖积平原以及黏土质滨海冲积平原的地貌特征。厚达 300 多米的第四系松散沉积层为含水层系统构造了巨大的储水空间。根据地质和地貌特征，研究区第四系含水系统分为浅、深两个含水子系统。其中，浅层地下水子系统底界一般在 40~60m 之间，在山前平原，由于人为沟通、混合开采，延伸到 120~150m。浅层地下水含水层与地表水循环系统的水力联系密切，是目前研究区地下水利用中最主要的含水层，所以浅层地下水对地表植被分布和工农业生产布局有着重大影响。

1.2 海河南系平原浅层地下水变化数据资料

海河南系平原浅层地下水的治理和利用经历了防洪治涝、打井灌溉和城市集中开采的过程，形成三个不同时期的浅层地下水流场特征：一是 20 世纪 60 年代以前，开采初期的

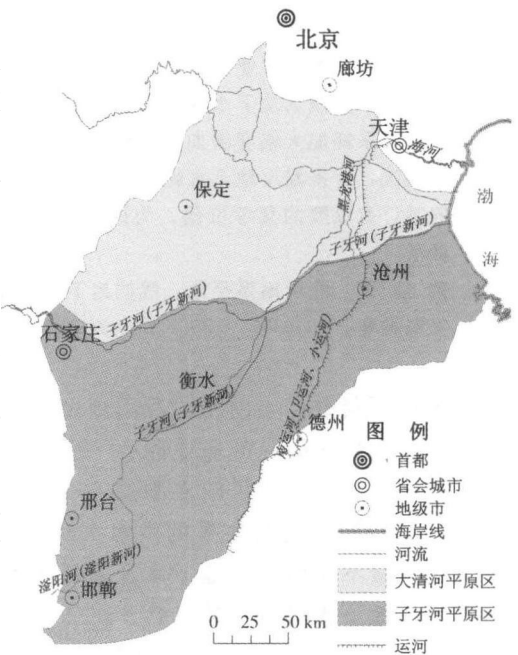


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Map of the study area

浅层地下水流场, 地下水补径排过程强烈, 流向是从太行山前汇流向滨海地区; 二是 20 世纪 60 年代至 80 年代初期, 主要受农田打井影响的地下水流场, 地下水水位普遍下降, 局部出现漏斗但不明显, 地下水流场的汇流方向没有改变; 三是 20 世纪 80 年代中期至 21 世纪初期, 主要受城市发展影响的地下水流场, 地下水水位大幅度下降, 区域性地下水降落漏斗成为最主要的特征并引起地下水流场变异, 地下水汇流方向主要是流向漏斗中心。以 1964 年、1984 年和 2001 年的浅层地下水水位和流场演化数据, 作为三个时期的典型代表, 可以研究海河南系平原浅层地下水开采耗能的时空演化和分布特征。

2 研究方法

2.1 区域浅层地下水开采耗能计算方法推导

对于地下水连通性和渗透性较好的地区, 地下水开采等效于在地下水库中开采。当开采地下水引起水位下降时, 地下水开采井周围存在一个影响半径, 影响半径范围内的地下水流向开采井, 水位也随之下降。因此, 开采井影响半径范围内的地下水开采耗能可以等效于开采井处抽取等量地下水耗能。

地下水开采耗能与地下水初始水位埋深以及地下水开采降深的关系计算公式为:

$$W_{\text{实}} = 10^6 \rho \times \mu A \Delta S \times g \times (H + \Delta S/2) / \eta \quad (1)$$

其中, $W_{\text{实}}$ 为区域实际地下水开采耗能, kJ; ρ 为水的密度; μ 为浅层地下水含水层给水度 (地下水位下降一个单位深度, 从地下水面延伸到地表面, 单位水平面积含水介质中重力释水的体积^[20]), 无量纲; A 为浅层地下水水位下降区面积, km^2 ; ΔS 为浅层地下水开采引起的水位降深, m; g 为重力加速度; H 为浅层地下水开采前的水位埋深, m; η 为地下水抽水设备的综合效率, 无量纲。

ΔS 既反映浅层地下水开采时水位变化, 又反映浅层地下水开采量。在浅层地下水天然补排平衡 (指不包括人为的补给与排泄因素) 的情况下, 浅层地下水开采实际消耗储存量, 地下水水位变化直接反映浅层地下水储存量变化情况。当储存量变化主要因地下水开采引起时, 公式 (1) 中的 ΔS 反映浅层地下水开采量。

在海河南系平原区, 农业用水中的小麦生产用水引起地下水位下降幅度最大^[21]。春旱季节降水较少, 降水入渗补给量、地表水入渗补给量和蒸发量都十分微弱, 天然补排平衡, 自然因素引起的地下水水位变化远远小于人类开采地下水引起的地下水水位变化。在小麦生长季节的 4~5 月份, 降水很少, 农业灌溉用水以浅层地下水开采为主, 实际消耗地下水储存量。因此, 在这一时期的浅层地下水水位变化, 既能够反映浅层地下水水位变动, 也能反映浅层地下水储存量消耗和实际开采量。

以用电量 ($\text{kw} \cdot \text{h}$) 表示地下水开采耗能, 在不考虑地下水开采设备的综合效率问题的条件下, 浅层地下水开采有效耗能计算公式为:

$$W = 2722 \mu \times A \times \Delta S \times (H + \Delta S/2) \quad (2)$$

式中, W 为地下水开采耗能, $\text{kw} \cdot \text{h}$ 其他同式 (1)。

海河南系平原浅层地下水水位的不断下降, 使每年农业开采浅层地下水耗能增加。为便于比较不同时期农业生产期开采浅层地下水耗能增加情况, 可以假设两个不同时期的浅层地下水初始水位分别为 H_1 和 H_2 , 在不同时期开采等量地下水引起水位降深 ΔS 相等时, 其开采耗能之差为:

$$\Delta W = 2722 \mu \times A \times \Delta S \times (H_1 - H_2) \quad (3)$$

为了便于计算地下水开采耗能和分析其空间分布特征,可以采用水位降深为一个单位时单位面积不同时期比较的地下水开采耗能差作为基本单元来表征,公式为:

$$\Delta W_U = 27224(H_1 - H_2) \quad (4)$$

式中, ΔW_U 为地下水开采耗能, $\text{kw} \cdot \text{h}$ 。

2.2 基于 GIS 的地下水开采耗能空间分布处理方法

运用 Arc GIS 软件制图和空间分析功能,对海河南系平原浅层地下水开采耗能进行计算和空间分布处理,效果较好,具体处理方法如下:

对地下水等水位线图进行图像校正,采用高斯—克里格空间投影转换法,通过 3D 分析功能,将矢量化的等水位线图通过三角形不规则网 (TIN) 插值转化为栅格图像,得到研究区不同时期的数字地下水水位图。

对研究区 DEM 与不同时期地下水水位数据运算,得到不同时期地下水埋深,代入耗能计算公式 (2),通过栅格计算,得到开采浅层地下水降深 1m 时耗能空间分布数据;对不同时期地下水水位进行减运算,得到不同时期地下水比较降深,代入耗能计算公式 (4),通过栅格计算,得到开采浅层地下水降深 1m 时耗能空间分布数据。

将各单元格内不同时期浅层地下水开采耗能及其对应面积相乘累加,就可得到整个研究区不同时期开采浅层地下水引起单位降深的总耗能值和耗能差值。

3 浅层地下水开采耗能计算和空间分布

3.1 浅层地下水开采耗能计算结果

在海河南系平原,12月~翌年3月为地下水水位稳定期,研究区几乎无降水和地下水开采;4~5月份为地下水水位剧降期,受农业灌溉用水影响,浅层地下水水位在区域上普遍下降 1m 以上,地下水开采实际消耗地下水储存量。此时,浅层地下水开采引起水位变化 (ΔS) 可以看作区域上为 1m。

在浅层地下水开采耗能计算中,设置单元格大小为 $1\text{km} \times 1\text{km}$,研究区被剖分为 61000 个单元格。相对于整个研究区,每个单元格内部差异可以忽略,同一单元格内的地下水水位、埋深、地表海拔高程和给水度可以认为相等。由公式 (2) 可求每个单元格的地下水开采耗能,则整个研究区的浅层地下水开采总耗能计算公式为:

$$W_{\text{总}} = \sum_{i=1}^n W_n \quad (5)$$

式中, $W_{\text{总}}$ 代表研究区不同时期浅层地下水开采总耗能, $\text{kw} \cdot \text{h}$; W_n 表示每个单元格不同时期浅层地下水开采耗能, $\text{kw} \cdot \text{h}$; n 代表单元格格数。

研究区的大部分地区土壤为亚黏土和亚砂土,结合已有的给水度参考值,可以选取整个研究区的给水度为 0.05。

1964、1984 和 2001 年海河南系平原浅层地下水水位埋深数据代入公式 (2) 和 (5) 计算结果为:1964 年浅层地下水水位降深 1m 时,对应开采耗能为 $0.16 \times 10^8 \text{kw} \cdot \text{h}$;1984 年水位降深 1m 时,对应开采耗能为 $0.65 \times 10^8 \text{kw} \cdot \text{h}$;2001 年水位降深 1m 时,对应开采耗能为 $1.20 \times 10^8 \text{kw} \cdot \text{h}$ 。

计算结果表明,研究区浅层地下水因水位下降引起春季农业生产用水开采耗能增加明显,必然使农业生产成本增加,社会效益和经济效益损失巨大。

3 2 不同时期浅层地下水开采耗能空间分布

利用浅层地下水开采耗能公式和 GIS 技术，得到不同时期水位降深 1m 耗能空间分布图。结合不同耗能范围的面积（见表 1），可以分析获得地下水开采耗能空间分布。

表 1 海河南系平原不同时期浅层地下水开采耗能对应面积表
Tab 1 The area of energy consumption of shallow groundwater mining at different times in the south Haihe River plain

单位面积降深 1m 耗能范围 (kw·h/km ²)	1964 年耗能 面积 (km ²)	1984 年耗能 面积 (km ²)	2001 年耗能 面积 (km ²)
0~ 250	36922	3491	1515
250~ 500	18454	9604	4463
500~ 1000	3080	21210	10768
1000~ 1500	666	12185	12682
1500~ 2000	—	8399	7525
2000~ 3000	—	3542	9766
3000~ 4000	—	866	7995
> 4000	—	899	5858

1964 年开采地下水引起水位下降 1m 时，地下水开采耗能空间分布见图版 4 图 2a。大部分地区单位面积耗能低于 500kw·h/km²，占总面积的 90% 以上。区域平均耗能为 269kw·h/km²。

1984 年浅层地下水水位下降 1m 时地下水开采耗能分布情况见图版 4 图 2b。耗能低于 500 kw·h/km² 的地区主要分布在沧州以东的滨海地区以及白洋淀地区，表明低洼地带的抽水耗能最低；耗能 500~ 2000 kw·h/km² 的地区分布最广泛，主要分布在研究区的中部冲积湖积平原地区；耗能 2000~ 4000 kw·h/km² 的地区主要分布在太行山前地带；耗能大于 4000 kw·h/km² 的地区主要分布在太行山前的邯郸、邢台和石家庄一线，面积仅为 899 km²。总体上，单位面积耗能以东部滨海平原地区为最低，逐渐向中部冲积湖积平原地区增高，至太行山前平原地带则升至最高，而宁晋、柏乡、元氏和晋州一带形成地下水开采耗能最高区。区域平均耗能为 1069 kw·h/km²。

2001 年地下水水位下降 1m 时地下水开采耗能空间分布情况见图版 4 图 2c。耗能低于 500 kw·h/km² 的地区仍主要分布在沧州以东的滨海地区，并且范围缩小，而地下水开采低耗能的白洋淀地区消失；耗能 500~ 2000 kw·h/km² 的地区分布范围明显缩小，仅分布在研究区的中部威县—衡水一线的狭长地带；耗能大于 4000 kw·h/km² 的地区大幅度增加，主要分布在太行山前的滹沱平原和保定地区，面积已达 5858km²，耗能最高值达 8908 kw·h/km²。区域平均耗能为 1781kw·h/km²。

海河南系平原开采初期 20 世纪 60 年代(1964 年)、20 世纪 80 年代(1984 年) 和 21 世纪初(2001 年) 的春季农业生产耗能及其空间分布为：从开采初期至 2001 年，超采地下水导致开采浅层地下水耗能大幅度增加，从开采初期的平均 269kw·h/km² 大幅度增加到近年的平均 1781kw·h/km²；从海积平原地区到太行山前平原地区，开采浅层地下水耗能强度呈递增趋势，从 68 kw·h/km² 到 8908 kw·h/km²。

3 3 浅层地下水开采耗能变化空间分布

利用浅层地下水开采耗能差公式和 GIS 技术方法，得到不同时期比较的水位降深 1m 耗能变化空间分布图。结合不同耗能差值范围的面积（见表 2），可以分析不同时期地下水开采耗能差空间分布。

表 2 海河南系平原浅层地下水开采耗能差值对应面积表

Tab 2 The area of energy consumption difference of shallow groundwater mining
comparing different times in the south Haihe River plain

单位面积降深 1m 时 耗能差值范围 (kw·h/km ²)	1984 年与 1964 年 比较 (km ²)	2001 年与 1984 年 比较 (km ²)	2001 年与 1964 年 比较 (km ²)
≤ 0	4534	11516	1449
0~ 250	4665	6958	2675
250~ 500	14558	9913	6604
500~ 1000	17170	11028	13614
1000~ 1500	12848	7916	9264
1500~ 2000	3511	4089	3812
2000~ 3000	2041	5868	11372
3000~ 4000	501	1712	7658
> 4000	264	490	3600

1984 年与 1964 年比较, 浅层地下水开采水位降深 1m 时耗能差分布情况如图版 4 图 3a。开采浅层地下水耗能增加最大的地区主要分布于太行山前平原的邯郸—邢台—栾城一带以及保定市。最大值为 4760 kw·h/km²; 而耗能减少的地区面积极小, 仅位于黄骅—静海以东的滨海地区, 最大值为 136 kw·h/km²。

2001 年与 1984 年比较, 浅层地下水开采水位降深 1m 时耗能差分布情况见图版 4 图 3b, 耗能增加最大的地区主要分布于石家庄地区、宁柏隆地区、肥乡—成安地区、肃宁地区和雄县等地, 最大值达 5304 kw·h/km²; 部分地区开采地下水耗能减少, 主要分布在邢台、衡水和沧州市周围, 最大值为 952 kw·h/km²。

2001 年与 1964 年比较, 浅层地下水开采水位降深 1m 时耗能差分布见图 3c。耗能增加最大的地区主要分布于馆陶—平乡—宁晋—肃宁霸州以北的太行山前地带, 占研究区面积较大, 最大值达 8568 kw·h/km²。由于极小区域地下水水位回升, 2001 年较 1964 年开采地下水耗能减少, 主要分布于清河县、冀州市和滨海地区, 最大值为 272 kw·h/km²。

海河南系平原开采初期 20 世纪 60 年代(1964 年)、20 世纪 80 年代(1984 年) 和 21 世纪初(2001 年) 的农业春产时节地下水位开采耗能变化及其空间分布特征为: 从海积平原地区到太行山前平原地区, 开采浅层地下水降深 1m 耗能差值呈递增趋势, 最大值从 4760 kw·h/km²增加到 8568 kw·h/km²。

分析原因为, 太行山前平原区浅层地下水资源较滨海地区丰富, 城市用水多以开采浅层地下水为主, 在空间上的相对集中开采产生大范围的浅层地下水降落漏斗, 使农业春产期开采地下水耗能大幅度增加。因此, 控制太行山前平原城市超采浅层地下水是减少农业春产期间地下水开采耗能及其生产成本增加的主要措施。

4 结论

本文采用海河南系平原不同时期地下水水位数据, 利用推导的浅层地下水耗能计算方法, 结合 GIS 技术, 计算得到不同时期农业春产时节开采浅层地下水耗能及变化, 制成耗能空间分布图及耗能差值空间分布图, 得出开采耗能及其时空分布特征, 主要结论如下:

(1) 参照海河南系平原区地下水开采利用背景, 从理论上推导区域地下水开采耗能

公式。进而根据海河南系平原区 20 世纪 60 年代、80 年代和近年的浅层地下水水位数据,求得海河南系平原小麦生产高峰期间(4~5 月份)地下水水位普遍降深 1m 时,三个时期对应开采有效耗能分别为 $0.16 \times 10^8 \text{ kw} \cdot \text{h}$, $0.65 \times 10^8 \text{ kw} \cdot \text{h}$ 和 $1.20 \times 10^8 \text{ kw} \cdot \text{h}$; 1964~1984 年、1984~2001 年和 1964~2001 年不同时期分别比较,开采浅层地下水引起单位降深耗能差值分别为 $0.49 \times 10^8 \text{ kw} \cdot \text{h}$ 、 $0.55 \times 10^8 \text{ kw} \cdot \text{h}$ 和 $1.04 \times 10^8 \text{ kw} \cdot \text{h}$ 。结果表明,自 20 世纪 60 年代以来,浅层地下水水位下降引起开采浅层地下水耗能明显增加,必然使农业生产成本增加,社会效益和经济效益损失巨大,研究结果对北方地区水价政策等的制订有重要的参考价值。

(2) 基于 GIS 的技术方法,制成海河南系平原区春季农业生产引起浅层地下水开采耗能的分布图,对其分析得到开采耗能的分布特征:自 20 世纪 60 年代以来,浅层地下水水位下降导致春季农业生产开采浅层地下水耗能大幅度增加,从平均 $269 \text{ kw} \cdot \text{h}/\text{km}^2$ 增加到平均 $1781 \text{ kw} \cdot \text{h}/\text{km}^2$;从海积平原地区到太行山前平原地区,开采浅层地下水耗能以及耗能差值都呈递增趋势,地下水耗能从 $68 \text{ kw} \cdot \text{h}/\text{km}^2$ 到 $8908 \text{ kw} \cdot \text{h}/\text{km}^2$,而地下水耗能差值最大值从 $4760 \text{ kw} \cdot \text{h}/\text{km}^2$ 增加到 $8568 \text{ kw} \cdot \text{h}/\text{km}^2$ 。城市用水导致的浅层地下水开采空间分布不均是导致海河南系春季农业生产浅层地下水开采耗能空间分布格局的最主要原因。因此,控制太行山前平原城市超采浅层地下水,是减少研究区农业生产地下水开采耗能及其生产成本的最主要措施。

参考文献:

- [1] 崔金星. 节约型社会提出的现实背景、理论前提及其法律内涵. 城市环境与城市生态, 2006, 19(5): 41~43
- [2] 叶蔚, 于忠军, 汤建泉. 浅谈资源节约型社会指标体系的构建. 煤炭经济研究, 2005, (9): 8~9.
- [3] 张光辉, 费宇红, 聂振龙, 等. 海河平原东部地区地面沉降机理与趋势. 中国地质灾害与防治学报, 2005, (1): 13~17.
- [4] 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. 地质评论, 2002, 48(6): 651~658
- [5] 贾金生, 刘昌明. 华北平原地下水动态及其对不同开采量响应的计算——以河北省栾城县为例. 地理学报, 2002, 57(2): 201~209
- [6] 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 36~48
- [7] 盖美, 耿雅冬, 张鑫. 海河流域地下水生态水位研究. 地域研究与开发, 2005, 24(1): 119~124.
- [8] 张长春, 邵景力, 李慈君, 等. 华北平原地下水生态环境水位研究. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(3): 323~330
- [9] 刘昌明. 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, 2003, 1(1): 17~19
- [10] 裴源生, 王建华, 罗琳. 南水北调对海河流域水生态环境影响分析. 生态学报, 2004, 24(10): 2115~2123
- [11] 王浩, 秦大庸, 王建华, 等. 黄淮海流域水资源合理配置. 北京: 科学出版社, 2003 182~183
- [12] 郑宝运. 防治机井涌砂浅议. 地下水, 2006, 28(4): 72~73
- [13] 徐化森. 潜水泵无泵管安装试验研究. 农田水利与小水电, 1990, (6): 34~36
- [14] 王金平, 王玉真. 井灌区不同灌溉方式的耗能分析. 中国农村水利水电, 2001, S1: 10~11.
- [15] 刘柱国. 喷灌能源消耗对比分析. 节水灌溉, 2000, (1): 15~17.
- [16] 李庆朝, 张重阳. 井灌工程优化规划方法的研究. 灌溉排水, 1998, 17(1): 51~55
- [17] 李凤鸣, 何成. 宁阳引汶回灌补给工程效益分析. 地下水, 2004, 26(3): 208~209
- [18] 万亮婷, 刘恩英, 史康立, 等. 地下水人工回灌经济效益分析浅析. 中国农学通报, 2006, 22(9): 479~482
- [19] 倪红珍, 白玉慧, 张惠. 人工补给地下水工程效益计算. 水利水电快报, 2000, 21(23): 14~17.
- [20] 王大纯, 张人权, 史毅红, 等. 水文地质学基础. 北京: 地质出版社, 1995 22~23
- [21] 许月卿. 土地利用对地下水位下降的影响——以河北平原为例. 地理研究, 2005, 24(2): 222~228

Energy consumption and the spatial distribution characteristics of shallow groundwater mining in the south Haihe River plain

ZHANG Shi-feng¹, XU Li-sheng^{1,2}

(1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: This article inferred the formula of accounting energy consumption in mining shallow groundwater, based on the supposition that the energy consumption of groundwater mining is equivalent in the mining well and in its radius of affected area. According to the characteristics of evolution of shallow groundwater seepage field in the south Haihe River plain in the three periods of time, namely, the 1960s, the 1980s and initial period of the 21st century, as well as integrating the GIS technique, we account the energy consumption and their differences in groundwater mining of the three different typical years (1964, 1984 and 2001) of the three periods. The results indicated that, when shallow groundwater table drops deep for 1m in the study area in 1964, 1984 and 2001, the energy consumption of groundwater mining is respectively $0.16 \times 10^8 \text{ kw} \cdot \text{h}$, $0.65 \times 10^8 \text{ kw} \cdot \text{h}$ and $1.2 \times 10^8 \text{ kw} \cdot \text{h}$; when shallow groundwater table drops deep for one unit, in comparison with the three different periods of 1964-1984, 1984-2001 and 1964-2001, the energy consumption difference of shallow groundwater mining is respectively $0.49 \times 10^8 \text{ kw} \cdot \text{h}$, $0.55 \times 10^8 \text{ kw} \cdot \text{h}$ and $1.04 \times 10^8 \text{ kw} \cdot \text{h}$. After analyzing the spatial distribution map of energy consumption of shallow groundwater mining in different periods of time in the south Haihe River plain, it is found out that, since the 1960s, the energy consumption of shallow groundwater mining has increased substantially, from average 269 kwh/km^2 to average 1781 kwh/km^2 , due to groundwater overdraft. The computation of the energy consumptions and their difference of shallow groundwater mining both assume the increasing tendency from the alluvial and coast plain region to the Taihang piedmont plain region, the maximum energy consumption of groundwater mining is from 68 kwh/km^2 to 8908 kwh/km^2 , but the energy consumption difference of shallow groundwater mining increases from 4760 kwh/km^2 to 8568 kwh/km^2 . The research results could be used to provide the reference for the social and economic benefits appraisal of the shallow groundwater table rising after implementation of the South to North Water Transfer Project in the study area, and provide service for the research of the local construction of an “abstemious society”.

Key words: south Haihe River plain; shallow groundwater; GIS technique; energy consumption of groundwater mining; spatial distribution characteristics

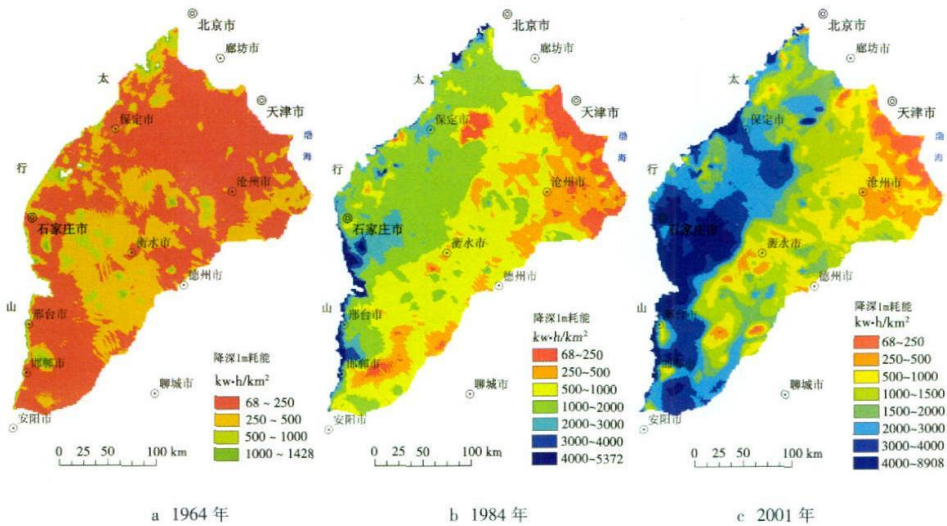


图 2 海河南系平原浅层地下水不同时期降深 1m 耗能空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of energy consumption of the shallow groundwater mining with 1m drawdown at different periods in the south Haihe River plain

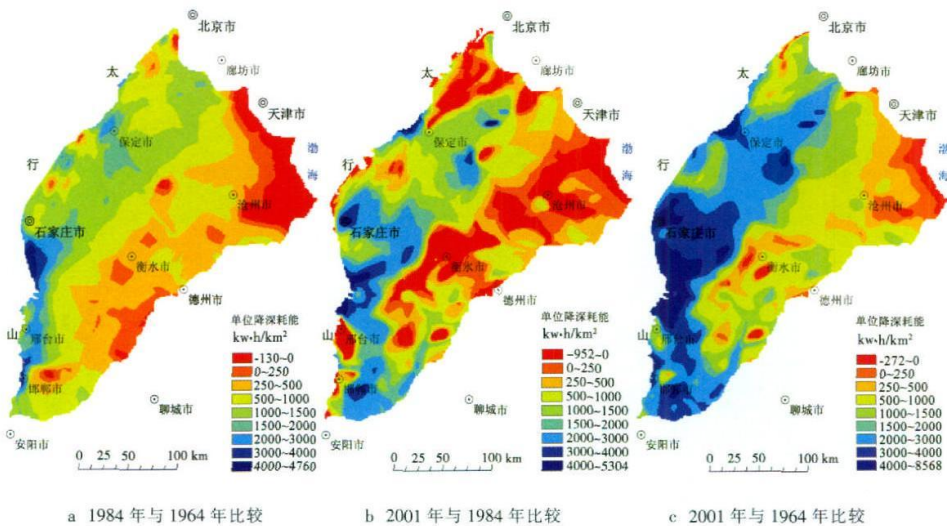


图 3 海河南系平原农业春产期浅层地下水耗能变化空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of energy consumption difference of the shallow groundwater mining in spring of the crop-producing period in the south Haihe River plain