

山东高青平原区浅层地下水资源 合理开发利用^{*}

吴剑锋 朱学愚 陈余道 刘建立

(南京大学地球科学系, 南京 210093)

提 要 高青平原是山东省重要的农业基地。长期以来,引黄灌溉为其水资源开发重点,而当地地下水则主要消耗于潜水蒸发。这种不合理的取水结构不但导致土地沙化和土壤盐碱化等环境效应,而且由于近年来黄河断流,使其用水供需矛盾日益尖锐。本文在定性分析地下水补、排条件的基础上,提出将无用的潜水蒸发转化为有用的可利用资源作为地下水资源评价的原则。同时根据实际资料选用合理的参数,用有限单元法定量地预测了不同开采方案的地下水位及埋深。同时在保证水量平衡的前提下,着重对开采方案的合理性进行了评价分析。本文对于改良高青平原的土地沙化、土壤盐碱化以及缓解现今用水矛盾具有重要的现实意义。对于我国同类的平原区也有重要的参考价值。

关键词 蒸发排泄 地下水位 地下水资源评价 水量平衡 合理开发利用

1 引言

高青平原(包括高青县全境)是山东省重要的农业县和产棉区,该区的水资源主要用于农业灌溉。据高青县水资办资料,1993 年水资源总利用量为 $2.154 \times 10^8 \text{ m}^3$,用于农业灌溉的为 $1.985 \times 10^8 \text{ m}^3$,占总量的 92%;1994 年总用水量为 $1.893 \times 10^8 \text{ m}^3$,农业灌溉为 $1.519 \times 10^8 \text{ m}^3$,占总量的 83%。而在总的水资源中,地下水的开采量 1993 年为 $0.208 \times 10^8 \text{ m}^3$,占总取水量的 9.7%;1994 年地下水开采 $0.2847 \times 10^8 \text{ m}^3$,占总取水量的 15.6%。由此可见本区主要是利用地表水资源,尤其是引黄灌溉,据统计多年平均引黄量约 $1.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,而对于地下水资源则远未充分开发利用。这种取水方式极为不合理:① 当地浅层地下水资源没有得到充分利用,地下水因埋藏浅大部分消耗于蒸发排泄,导致土壤次生盐碱化,而不合理地大量引黄又导致土地沙化;② 黄河在近几年均出现断流,据报道 1997 年在 2 月 7 日即已断流,也就是说在最需水的季节没有黄河水可供利用。因此,有必要对地下水资源进行准确评价与合理开发,同时合理开发利用地下水资源对于调整本区取水结构和改善地质环境亦具有重要的现实意义。

* 山东淄博市水资源管理办公室的资助课题“山东省淄博市水资源评价”(This project supported by Water Resources Management Office of Zibo City, Shandong Province)。

淄博市水资源办公室及高青县水资源办公室提供大量原始数据资料,在此一并致谢!

来稿日期:1997-09-05;收到修改稿日期:1998-06-02。

2 研究区地理、地质、水文地质概况

高青平原地处黄河与小清河之间,为黄河冲积平原的一部分,面积 846.84 km²,区内总的地势较为平坦,由西北向东南逐渐降低,地面自然坡降约为 1/7 000,地面高程平均 12 m 左右。高青县位于北温带季风气候区,属大陆性气候,多年平均降雨量为 579.5 mm,多集中在 6 月~9 月,约占全年降水量的 74.5%,而多年蒸发量为 1 325.6 mm,是多年降水量的 2.3 倍。这一情况也决定了本区缺少可供利用的当地地表水。

研究区全部为巨厚的第四系及新第三系沉积物覆盖,其中浅层沉积物厚约 60 m,主要为粉、细砂,含有较丰富的孔隙水。因研究区地势平坦,并且地下水埋藏浅,故浅层地下水以垂直运动为主,水平径流缓慢。大气降水为其主要的补给来源,当然还有引黄灌溉入渗、地下水灌溉回渗及黄河侧渗等。由于区内地下水开采量小,水位埋藏浅,一般 1 m~3 m,大部分地区处于蒸发临界深度以内,因此,潜水蒸发为其主要排泄方式。另外,浅层地下水还往南向小清河方向径流排泄,但流量不大。

3 地下水资源评价与合理开发

3.1 数学模型的建立

对于高青区的潜水含水层,根据其补、径、排条件,可用非均质各向同性的多孔介质渗流模型来描述。研究区北部和西北部为黄河,南部边界为小清河(图 1),东部边界为出流边界,均可作为第二类边界,西部边界为县界,而且水平径流量很小,可作为零通量边界,而在西北部近黄河处根据观测资料布设少量第一类边界点,则其数学模型^[1]可表示如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(K(H - B_i) \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K(H - B_i) \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \alpha P + \beta I - CE_0 - Q_u = \mu \frac{\partial H}{\partial t} \\ (x, y) \in D \end{cases} \quad (3-1)$$

$$\begin{cases} H(x, y, 0) = H_0(x, y) \\ (x, y) \in D \end{cases} \quad (3-2)$$

$$\begin{cases} H(x, y, t) = H_1(x, y, t) \\ (x, y) \in \Gamma_1 \end{cases} \quad (3-3)$$

$$\begin{cases} K \frac{\partial H}{\partial n} = q(x, y, t) \\ (x, y) \in \Gamma_{21} \end{cases} \quad (3-4)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \\ (x, y) \in \Gamma_{22} \end{cases} \quad (3-5)$$

式中 K 为含水层的渗透系数,单位为 m/d; H 为地下水水位,单位为 m; B_i 为含水层的底板标高,单位为 m; α 为降水入渗补给系数,无量纲; P 为降水量,单位为 m; β 为灌溉回灌系数,无量纲; I 为灌溉水量,以水层厚度计,单位为 m; C 为潜水蒸发系数,无量纲; E_0 为蒸发量,单位为 m; Q_u 为潜水开采强度,按水层厚度 m 计; μ 为含水层的给水度,无量纲; H_0 为初始水头,单位为 m; H_1 为第一类边界上的已知水头,单位为 m; q 为第二类边界上单位长度的法向流量; n 为边界的外法线方向; D 为计算区域; Γ_1 为第一类边界; Γ_{21} 为已知流量边界; Γ_{22} 为零通量边界。

以上的数学模型 (3-1) ~ (3-5), 如果已知有关参数,则可利用有限单元法逐时段地解出各时刻的水头。

3.2 模型中各参数的确定

山东省地矿工程勘察院于 1991 年~1993 年先后进行了四次浅井多孔抽水试验,并且利用 1986 年~1992 年的汛期长期观测资料,分别计算了 56 个不同地点在不同降水量的降水入渗系数。最后根据这些参数,于 1993 年利用均衡法计算了高青平原地区的地下水资源,均衡时段内的均衡相对误差为 2.0%,表明其选用的参数比较符合实际。据此,我们再结合众多的含水层岩性、地下水水位及动态等资料,将本区划分为 17 个参数区(如图 1),各区的参数见表 1。

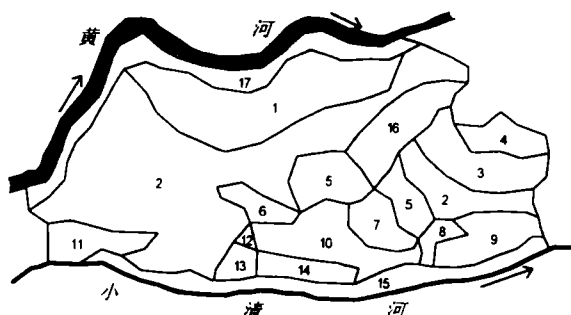


图 1 含水层参数分区图

Fig. 1 The zonation map of parameters

表 1 含水层参数一览表

Tab. 1 The parameters related to the aquifer

分区号	渗透系数 K / $m \cdot d^{-1}$	给水度 μ	降雨入渗系数 α	分区号	渗透系数 K / $m \cdot d^{-1}$	给水度 μ	降雨入渗系数 α
1	6.75	0.05	0.32	10	11.29	0.02	0.25
2	10.91	0.06	0.36	11	8.35	0.05	0.32
3	3.38	0.05	0.32	12	8.00	0.02	0.28
4	7.54	0.05	0.30	13	6.17	0.05	0.32
5	12.94	0.05	0.32	14	7.28	0.05	0.30
6	12.89	0.06	0.35	15	11.66	0.06	0.30
7	9.24	0.02	0.28	16	5.86	0.05	0.15
8	8.23	0.05	0.30	17	3.38	0.05	0.30
9	11.90	0.05	0.32				

据回灌试验,其他参数如引黄灌溉或其他灌溉回渗系数与岩性和水位埋深有关,一般为 0.18~0.35。考虑到本区地下水主要作为农业灌溉,可概化为面状开采,我们取全区的平均回灌系数为 0.24,这是比较保守的。

潜水蒸发是本区现状条件下的主要消耗。据 1986 年~1992 年间 100 个无降水、无引黄时段的潜水蒸发系数试验结果,潜水蒸发系数与地下水的埋深和表层的岩性有关,而其中又以地下水的埋深对其影响最大。考虑到岩性对其影响相对很小,本次评价根据各种岩性的平均情况作出蒸发系数与埋深的关系曲线(图 2)。

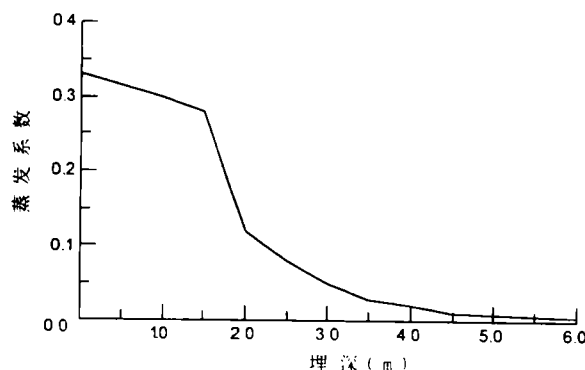


图 2 潜水蒸发系数与埋深关系曲线

Fig. 2 The correlation between evaporation coefficient and buried depth of water table

3.3 合理评价地下水资源

3.3.1 评价地下水资源的原则 针对研究区的实际情况,在确定开采进行地下水资源评价时,我们认为应着重考虑以下原则:

- (1) 首先要考虑总的水量平衡及其变化状况;
- (2) 现状条件下,地下水位埋藏浅,潜水蒸发是最大的消耗项,因此要适当降低地下水位,把无用的潜水蒸发转化为有用的潜水资源,同时又不致使地下水位埋深过大;
- (3) 大气降水为本区重要的补给源,因此,不同的降水系列反映出不同的地下水资源评价结果;
- (4) 农业需水量在总需水量中占有很大比重,同时具有春灌期相对较大、非春灌期需水量相对较小,雨季开采量小、非雨季开采量大的特点;
- (5) 各开采量分区的具体条件,包括开采现状、富水状况等;
- (6) 由于近年来黄河断流时间越来越长,断流日期越来越早,因此还要考虑黄河断流与否分别进行评价。

3.3.2 地下水资源的评价结果 我们将计算区域分为 418 个单元,243 个节点,时间步长为 1 个月,将有关参数代入模型直接进行正演计算。根据本区的远景规划及水文地质条件,同时综合考虑以上原则将地下水开采量的分配划分为 6 个区(图 3)。



图 3 开采量分配分区图

Fig. 3 The zonation map of groundwater exploitation

根据高青县气象局提供的 1956 年~1995 年的降水资料分析,我们先采用 1975 年~1989 年这 15 年的降水系列作为未来 15 年的逐月降水量来预报水位(A 方案),这一系列的年平均降水量 521.39 mm,为多年平均降水量 579.5 mm 的 95%,是一个偏干旱的系列。

经过多次调算比较,在能够象现状条件引黄灌溉(方案 A—I)的前提下,地下水每年的允许开采量为 $1.425 \times 10^8 \text{ m}^3$,其开采量分配见表 2。开采 15 年后地下水的埋深与初始埋深比较见图 4。若黄河断流,即不能引黄灌溉(方案 A—II),此时的回灌量不包括引黄灌溉入渗,回灌系数减小为 0.12 左右,而其他各项补给量则因控制地下水位可基本保持稳定。

表 2 方案 A—I 年开采量逐月分配表 ($1 \times 10^4 \text{ m}^3$)

Tab. 2 The distribution of groundwater exploitation of scheme A—I ($1 \times 10^4 \text{ m}^3$)

分区号	月 份											
	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
1	2.5	2.5	2.5	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	11.0	11.0	11.0	11.0
2	4.0	4.0	4.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	18.0	18.0	18.0	18.0
3	5.0	5.0	5.0	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	24.0	24.0	24.0	24.0
4	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	5.0	5.0	5.0	5.0
5	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	3.0	3.0	3.0	3.0
6	2.0	2.0	2.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	8.0	8.0	8.0	8.0

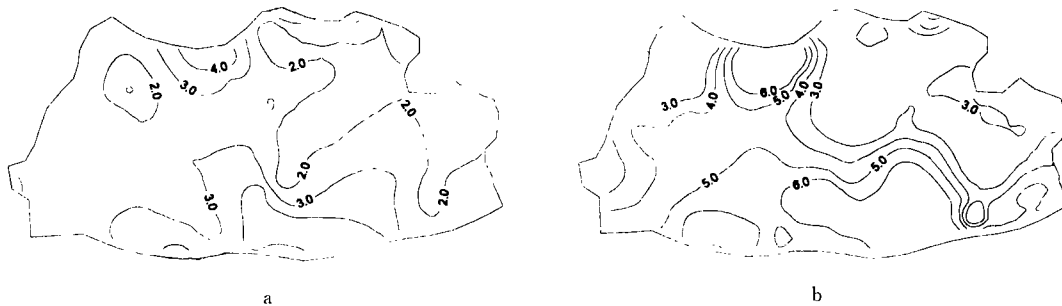


图4 A—I方案开采15年后地下水埋深(b)与现状埋深(a)对比图(雨季前)

Fig. 4 The comparison of buried depths of water table between the current situation (a) and the extracted situation for scheme A—I after 15 years (b) (before the rainy season)

最后得到其全年的允许开采量为 $1.28 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其开采量分配形式类似表2，水位埋深类似图4。

如果降水量系列采用多年平均降水量 579.5 mm 这样一个系列(B方案)，根据调算结果，在保持地下水位与A方案相当的情况下，该区在引黄灌溉(B—I方案)和不能引黄灌溉(B—II方案)时，地下水的全年允许开采量分别为 $1.684 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $1.400 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

3.3.3 地下水资源评价与开发的合理性分析 下面我们主要以A—I方案为例，来分析地下水资源评价与合理开发的合理性：

(1) 首先来分析开采方案的水量分配(表2)。从逐月开采量分配来说，7月~9月降雨量较多，故作物灌溉的需水量相对较小，10月份至次年的2月份为冬灌期，降水量较小，因此开采量相对较大，而3月~6月为旱季，同时又是春灌期，农作物生长不能直接从获得大气降水的补给来满足生长的需要，因此开采量相对最大。从各分区的开采量分配来看，1区主要为黄河的河漫滩，地下水的补给条件较好，其开采强度(单位时间内单位面积上的开采量)较大；4区南临小清河，并且天然状态下小清河排泄地下水，但由于小清河水质已遭污染，为了防止小清河河水补给地下水，本区开采强度相对较小。5区为深层淡水集中开采区，主要为工业开采，虽然每年仅开采约 $228 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右，但其补给条件不好，开采产生的降落漏斗区内已经产生地面沉降，因此为防止产生不良的环境效应，5区的开采强度相对亦较小。

(2) 我们开采本区地下水的总的原则是将无用的潜水蒸发转化为可利用的地下水资源，这亦是本次研究的目的。由图4可以看到，开采前浅层地下水的埋深在雨季前(6月底)大部分2m~4m，雨季过后则更浅，一般1m~3m，经计算多年平均约 $1.581 \times 10^8 \text{ m}^3$ 地下水消耗于潜水蒸发排泄。而开采状态下的地下水大部分埋深为3m~5m，稳定开采后，相对于多年平均降雨量每年约有 $0.481 \times 10^8 \text{ m}^3$ 地下水消耗于蒸发排泄，占开采前的30.4%。由于受浅层含水层的厚度所限，同时要使非雨季腾出的库容能在雨季得到充分补给，因此，不可能完全避免蒸发排泄，否则，将产生诸如地面沉降、地裂缝等不良的环境地质效应。

(3) 最后再从开采方案的水量平衡状况^[2]来分析其合理性。从表3可以看出：前5年地下水量平衡为负均衡，总亏达到 $1.240 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，地下水位降低，年蒸发量由 $1.219 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少到 $0.441 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，从而把无用的潜水蒸发大部分转化为可利用的潜水资源；后10年的

水量平衡前 9 年水量盈余 $0.216 \times 10^8 \text{ m}^3$, 只是最后一年特别干旱, 年降水量仅 278.5 mm, 才使得后 10 年水量平衡表现为负均衡 $0.273 \times 10^8 \text{ m}^3$, 但这一数量并不大。由此说明后 10 年地下水量收支基本平衡, 地下水动水位基本“稳定”, 亦即旱季因开采引起的水位降低可以在雨季得到补给而上升。因此, 如果未来 15 年为偏干旱降水系列, 若能合理分配各分区在各个季节的开采量, 研究区地下水全年的允许开采量 $1.425 \times 10^8 \text{ m}^3$ 是比较合理的。

表 3 方案 A-I 的水量平衡表 ($1 \times 10^4 \text{ m}^3$)Tab. 3 Water balance of scheme A-I ($1 \times 10^4 \text{ m}^3$)

年份 序号	降雨量 (mm)	边界流入 (1)	降雨入渗 (2)	灌溉回渗 (3)	总补给量 (4)= (1+2+3)	边界流出 (5)	蒸发排泄 (6)	开采量 (7)	总排泄量 (8)= (5+6+7)	水量平衡 (9=4-8)
1	570.8	1 620.80	14 473.90	3 420.00	19 514.70	140.00	12 192.04	14 250.00	26 582.04	-7 067.34
2	669.6	1 620.89	17 724.44	3 420.00	22 765.33	140.00	9 607.32	14 250.00	23 997.32	-1 231.99
3	596.4	1 620.96	15 786.83	3 420.00	20 827.79	140.00	7 416.37	14 250.00	21 806.37	-978.58
4	565.9	1 620.99	14 979.49	3 420.00	20 020.48	140.00	6 109.42	14 250.00	20 499.42	-478.94
5	419.9	1 621.05	11 114.84	3 420.00	16 155.89	140.00	4 408.34	14 250.00	18 798.34	-2 642.45
6	658.0	1 620.98	17 417.39	3 420.00	22 458.37	140.00	4 634.18	14 250.00	19 024.18	3 434.19
7	411.9	1 620.91	10 903.08	3 420.00	15 943.99	140.00	4 671.14	14 250.00	19 061.14	-3 117.15
8	395.5	1 621.01	10 468.97	3 420.00	15 509.98	140.00	3 390.46	14 250.00	17 780.46	-2 270.48
9	620.1	1 620.90	16 414.17	3 420.00	21 455.07	140.00	3 682.40	14 250.00	18 072.40	3 382.67
10	680.7	1 620.74	18 018.26	3 420.00	23 059.00	140.00	5 323.92	14 250.00	19 713.92	3 345.08
11	496.3	1 620.74	13 137.16	3 420.00	18 177.90	140.00	4 686.50	14 250.00	19 076.50	-898.60
12	368.7	1 620.83	9 759.56	3 420.00	14 800.39	140.00	3 969.25	14 250.00	18 359.25	-3 558.86
13	639.2	1 620.79	16 919.75	3 420.00	21 960.54	140.00	3 984.81	14 250.00	18 374.81	3 585.73
14	449.4	1 620.73	11 895.71	3 420.00	16 936.44	140.00	4 343.03	14 250.00	18 733.03	-1 796.59
15	278.5	1 620.91	7 371.95	3 420.00	12 412.86	140.00	2 855.85	14 250.00	17 245.85	-4 832.99

以上分析表明, 我们对浅层地下水资源的评价符合本区的客观实际条件, 开发方案也是合理的。

4 结论与建议

(1) 高青平原在水资源利用上, 这种重地表水轻地下水, 重客水(黄河水)轻当地水的现象是产生土地沙化和土壤次生盐碱化的最直接原因。只有改变这种不合理的取水结构, 才能从根本上治理和改良业已造成的土地沙化和土壤盐碱化。

(2) 对本区浅层地下水资源的评价结果表明, 本区的地下水资源较为丰富, 而现在的开采利用量仅占其允许开采量的 1/4 左右, 还具有较大的开发潜力。在保证水量补排均衡的条件下, 充分开发浅层地下水, 将无用的潜水蒸发大部分转化为有用的开采资源, 即发挥地下水调节容量大的特点, 在旱季灌溉期大量开采, 以减少蒸发消耗并且腾出地下贮水空间, 在雨季非灌溉期让地下水获得补给时, 恢复水位。

(3) 由于地下水资源允许开采量的限制与日益增长的用水需要, 因此开采地下水并不

能完全替代引用黄河水。我们建议高青县水资源开发利用近期应逐步增大浅层地下水开采量,适当节制引黄;从长远来说,在当地水资源充分利用的基础上,做到合理利用黄河水,以满足日益增长的用水需要。

(4) 合理的开发地下水资源一方面可以缓解近年来黄河断流所引起的用水供需矛盾,它在整个供、需水过程中起到“滤波”作用,大大提高了水资源的供需协调系数^[3]。另一方面在可引黄期还能相对地增加对淄博市的供水量。更为主要的是,高青平原区水资源的开发利用由引黄为主的策略转变到充分利用当地地下水与合理引黄相结合的策略,有利于治理土地沙化,改良盐碱化土壤,产生良好的生态环境效应^[4]。

参 考 文 献 (References)

- 1 Zhu Xueyu, Qian Xiaoxing, Liu Xinren. Groundwater Resource Evaluation. Nanjing: Nanjing University Press, 1987. (In Chinese) [朱学愚, 钱孝星, 刘新仁. 地下水资源评价. 南京: 南京大学出版社, 1987.]
- 2 Zhu Xueyu, Xu Shaohui, Gao Junhe et al. Evaluation of the Groundwater resource in the leaky aquifer of Xinyi city, Jiangsu province. *Journal of Natural Resources*, 1995, 10 (2): 115~126. (In Chinese) [朱学愚, 徐绍辉, 高俊和等. 江苏新沂市越流含水层的地下水资源评价. 自然资源学报, 1995, 10 (2): 115~126.]
- 3 Gao Yanchun. A preliminary study on coordination appraisal between supply and demand of regional water resources. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52 (2): 163~168. (In Chinese) [高彦春. 区域水资源供、需协调评价的初步研究. 地理学报, 1997, 52 (2): 163~168.]
- 4 Wu Kai, Xu Yuexian. Environment effects and adjustment and control countermeasures of water resource utilization in the Huang-Huai-Hai Plain. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52 (2): 114~122. (In Chinese) [吴凯, 许越先. 黄淮海平原水资源开发的环境效应及其调控对策. 地理学报, 1997, 52 (2): 114~122.]

RATIONAL EXPLOITATION OF THE PHREATIC WATER IN GAOQING PLAIN, SHANDONG PROVINCE

Wu Jianfeng Zhu Xueyu Chen Yudao Liu Jianli

(Dept. of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Key words evaporation discharge, ground water table, ground water resource evaluation, water balance, rational development and utilization

Abstract

On the basis of qualitatively analyzing the recharge, run-off and discharge conditions of ground water in Gaoqing Plain, authors propose that it should be regarded as a principle of ground water resource evaluation to transform useless evaporation of phreatic water into available water resource. Then the mathematical model describing two-dimensional unsteady subsurface flow in the heterogeneous aquifer was established in accordance with the hydrogeological conditions. Also rational parameters were selected in the light of a vast amount of actual materials. Meanwhile finite element method was employed to quantitatively predict the water table and buried depth after different exploitation schemes.

On the premise of guaranteeing the water quantity balance and by comparing the different water table depths after all plans, the conclusions how to rather rationally extract water resources were reached based on the two different hypothetic precipitation series: (1) the precipitation series from 1975 to 1989; and (2) the average precipitation series coming from several decades.

Subject to the hypothesis (1), the allowable exploitation in the phreatic aquifer is about 142.5 millions cubic meters per year in case that the Yellow River keep flowing and can be channeled from it for irrigation, while 128.0 millions cubic meters per year in case that the Yellow River dry up. Similarly, subject to the hypothesis (2), the allowable exploitation is about 168.4 millions cubic meters per year in case the Yellow River keeps flowing, while 140.0 millions cubic meters in case the Yellow River dries up.

The research results manifest that the ground water is rather abundant and the extraction in current situation accounts for about one forth of the allowable exploitation of the phreatic water. As a result the phreatic aquifer has great potentialities for exploitation. At the same time, the water table would become lower and the evaporation discharge become smaller with the exploitation of ground water, which would be bound to produce positive environmental effects.

作 者 简 介

吴剑锋, 男, 1971 年生, 现为南京大学地球科学系博士研究生。已发表“大同矿区口泉沟南岩溶裂隙水源地的环境同位素研究与地下水资源评价”等论文。