

地下水超采区混合井回灌流量计算与效率分析

张学真, 胡安炎, 贺 屹

(长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 以试验数据为基础,对地下水超采区混合井回灌过程中井流量计算的方法进行理论归类,发现混合井回灌过程中的井流计算方法一般可按承压水井流计算方法进行;定量分析混合井单位流量变化过程,发现其回灌效率大于抽水效率;利用 Grapher 系统对不同流量回灌过程进行分析,得出利用混合井在超采区实施回灌其效率开始时虽存在衰减,但最终会趋于稳定。停灌后回灌井水位在数小时恢复到初始水位,说明回灌过程对开采井的滤水结构影响不大,管井水力传导仍然良好。

关键词: 混合井回灌试验;计算方法理论归类;回灌过程分析;回灌效率

中图分类号: TV131 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2006)03-0190-04

作为重要供水水源,地下水居于重要地位。但是,大量的开采地下水常常引起地下水水位大幅度下降、资源枯竭,诱发地沉地裂等环境问题。采用人工补给方法可以充实地下水源,缓解乃至消除地质灾害,实现地下水资源的可持续利用。然而作为主要回灌方式之一的开采井回灌存在的普遍问题一是井的滤水结构易受淤堵,二是回灌井在又抽又灌的情况下,滤水结构易遭破坏,三是利用地下水储冷或储热,由于温度场的变化,可能诱发地下水理化性质变化。鉴于以上原因,人们对利用开采井回灌补给地下水的定量计算能否采用传统的井流计算方法以及回灌效率如何提出质疑,这在一定程度影响了这一事业的顺利开展。因此,在典型的地下水超采区开展地下水回灌试验,对于井流量计算方法的选择和回灌效率变化趋势分析显得十分重要,也可以为将来的推广和应用提供理论指导。

1 回灌试验过程设计

试验用开采井位于关中某大型地下水降落漏斗区。试验回灌水源采用自来水,回灌方式为自流回灌,回灌流量由量水堰与水表联合控制。试验用井为开采井,属多含水层混合井,位于研究区漏斗中心。所谓的混合井是指贯穿两个或两个以上含水层的井孔(其过滤水管可等于或不等于含水层厚度)^[1,2]。

试验井深 305.34 m,井口直径 250 mm,井壁管为钢管,井壁外围用砾石和泥球填封止水。含水层处设有滤水管,滤水管用钢管穿孔缠丝制成外加砾

石滤水层,使用粘土泥球封堵非取水层。顶层承压水已被释水疏干,层位在 92~85 m 之间。目前的静水位埋深 92.80 m。

本次回灌试验分为二个阶段:计划先按流量为 20 m³/h、25 m³/h、35 m³/h 由小到大连续回灌,时间长短由现场井水位变化及研究需要而定。停灌后恢复观测 48 h,再按流量 20 m³/h、30 m³/h 依次连续回灌,待井水位基本稳定后停灌。回灌过程做水位、流量、水质的同步变化观测。回灌试验以前,试验场地由于过量开采地下水,使地下水位形成了以井孔为中心的碟形漏斗下降区。

回灌初期,所发生的入渗首先补给漏斗区,然后再向四周扩散。这种扩散沿地下水流动方向最快,在与水流相反方向渗透较为迟缓。水位的不断升高,使回灌水量在水头压力作用下向四周扩散。从试验数据分析看,试验初期扩展速度较快,而到后期趋于缓慢。水丘的扩散范围与试验井水位、回灌井流量、时间关系密切。回灌试验场观测井水位变化规律表明,实际影响范围半径在 300~1 000 m 左右,混合含水层在不同方向水力传播差异显著。分析回灌水丘的扩散规律,获得试验参数如表 1 所示。

2 混合井回灌井流计算的理论归类

传统的井流理论对开采和补给地下水在定量计算方面大多数没有进行严格的区分^[3~8],有的学者对开采和补给地下水机理也存在一些不同认识^[9]。到目前为止,实践中大多把地下水开采条件下的定量计算方法运用到人工补给过程的相关计算中。

收稿日期:2005-12-15

基金项目:西安市科技局项目(SF200240)

作者简介:张学真(1967—),男,陕西眉县人,讲师,博士,主要从事水文与水资源的教学与研究工作。E-mail:zxz-2000@126.com

表 1 不同流量时段回灌过程混合井水位变化

Table 1 Variety of the well water level in different artificial supplying times

回灌时段 Period	时间 $t(\text{h})$	计划回灌流量 $Q_1(\text{m}^3/\text{h})$	实际回灌流量 $Q_2(\text{m}^3/\text{h})$	井水位最大升高 $h(\text{m})$	单位回灌流量 $q_1=Q/h[\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})]$	回灌效率 $W=q_1/q_0(\%)$
hg1	24	20	18.423	30.127	0.612	14.482
hg2	24	25	25.437	39.897	0.638	15.097
hg3+1	24	35	33.391	64.787	0.515	12.186
hg3+2	275	35	33.391	98.927	0.338	7.998
hg4	24	20	22.582	54.872	0.412	9.749
hg5	24	30	30.126	99.517	0.303	7.170

注: q_0 、 q_1 分别为试验井抽水、灌水条件下单位流量值, $q_0=4.226\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$; 回灌时段按实际回灌过程划分为 6 个独立过程。

本次试验用混合井所处地层的顶层承压水已被超采释水疏干。回灌初期,井水位尚未升至该层,停灌后水位下降至该层以下,又存在上部疏干层释水疏水过程。另外,混合井长期超采,井况十分复杂。将回灌过程的井流计算归于那种类型是一个存在争议的问题,可根据泰斯法求解承压井水位降落时的计算式

$$S=\frac{0.25Q}{4\pi kM}\ln\frac{2.25at}{r^2}\tag{1}$$

式中: S 为井水位升高值(m); Q 为井回灌流量(m^3/h); k 为承压含水层渗透系数(m/d); m 为承压含水层渗透厚度(m); a 为水力传导系数(m^2/d); t 为时间参数(m/d); r 为回灌井半径(m)。

当 r 一定, k 、 a 基本不变时,混合井抽(灌)水后,则 S 与 $Q\ln t$ 存在近似的线性关系。如果将本试验用混合井回灌过程近似看作是抽取地下水的反向过程,是否也有 h 与 $Q\ln t$ 近似的线性关系存在呢?通过分析试验观测数据发现,回灌过程中,混合井水位升高 h (与(1)式中 S 对应)与 $Q\ln t$ 确实存在近似的线性关系。其试验所得数据用 Grapher 系统进行拟合(图 1), h 与 $Q\ln t$ 相关系数 $R=0.995$ 。尽管本次试验用混合井井况十分复杂,但混合井回灌过程中的水文地质参数计算仍可按泰斯井流计算公式近似求解。

由于试验观测数据干扰因素多,在求解水文地质参数时,时段、数据选取常存在较大的系统误差和人为误差。为提高精度,这里采用井流理论公式计算和 Grapher 系统拟合结果相结合求解水文地质参数。由(1)式有

$$\frac{Q}{h}=\frac{4\pi kM}{0.25}\ln\frac{r^2}{2.25at}\tag{2}$$

进一步整理有

$$\frac{Q}{h}=-0.755\pi kM\ln t+0.755(2\ln r-\ln 2.25a)\tag{3}$$

根据回灌过程长系列(275 h)混合井水位 h 与 $Q\ln t$ 的拟合关系(见图 1)有

$$h=0.4761Q\ln t\tag{4}$$

进一步整理有

$$\frac{Q}{h}=-1.757\ln t\tag{5}$$

联解(3)(5)式,得混合井导水系数 $kM=17.780\text{ m}^2/\text{d}$,水力传导系数 $a=0.667\text{ m}^2/\text{d}$ 。而试验混合井原抽水条件下, $kM=481.374\text{ m}^2/\text{d}$, $a=25346.13\text{ m}^2/\text{d}$ 。

3 回灌效率分析

根据井流理论^[1,2,4]和研究经验^[5,8,11],单位流量能反映混合井对水量的吞吐能力。一般由松散到个别颗粒相当大含水层,单井单位回灌流量是单位出水量的 $1/3\sim 2/3$ ^[12]。回灌过程中混合井单位流量 Q/h 与其原抽水条件下的单位流量的比值代表混合井的回灌效率。不同时段回灌效率计算结果列于表 1 中。

从小时间尺度分析,如图 2、3 所示,在混合井回灌初期和末期 50 h 内, $Q/h\sim t$ 曲线变化呈波浪式。前者的变幅为 $0.582\sim 0.701\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$,但整体走势水平;后者的变幅 $0.312\sim 0.333\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$,曲线整体上平稳,幅度小于前者。

从整个回灌过程来看,随着回灌水量的增加,混合井单位流量逐渐减少,回灌效率也逐渐减小。200 h 后,混合井单位流量与回灌效率基本稳定在一定范围。图 4 是利用 Grapher 系统对混合井回灌过程中单位流量历时过程的拟合。可以看出,大约 200 h 以后,混合井回灌流量稳定在 $0.334\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ 。从某种角度反映了混合井回灌效率的变化趋势。

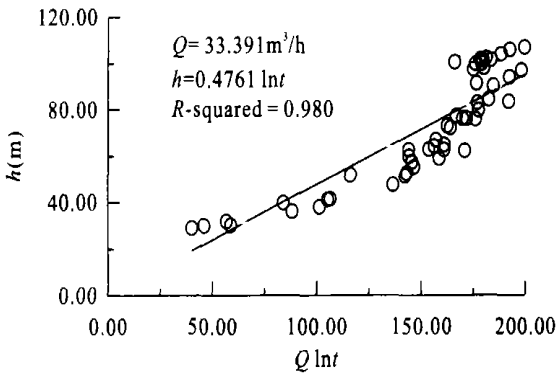


图 1 回灌过程 275 h 混合井水位 h 与 $Q \ln t$ 关系
Fig. 1 Relation between the well water level h and $Q \ln t$

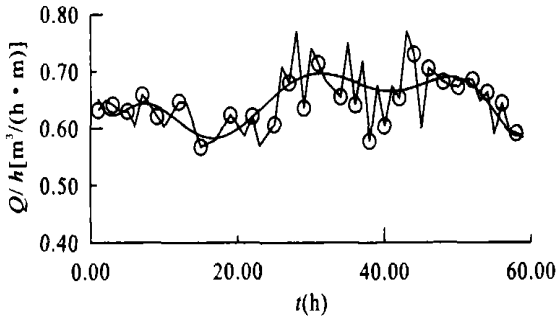


图 2 回灌初期 60 h 混合井单位流量历时过程
Fig. 2 Per unit well artificial supply process in the first 60 hours

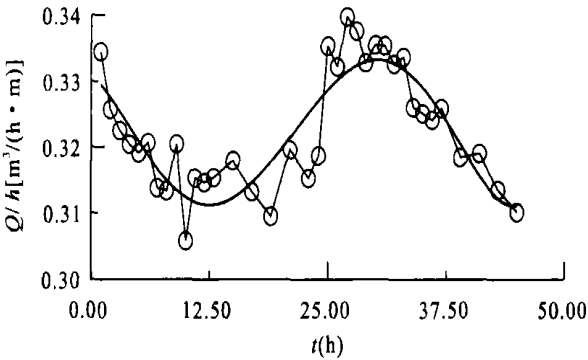


图 3 回灌后期 50 h 混合井单位流量历时过程
Fig. 3 Per unit well artificial supply process in the last

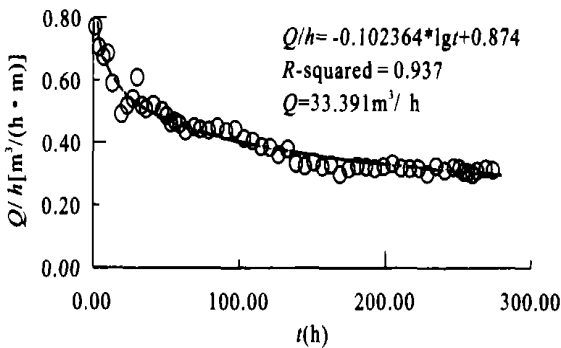


图 4 定流量回灌 275 h 混合井单位流量历时过程
Fig. 4 Per unit well artificial supply process

4 结论与建议

通过对回灌井的试验研究,得出如下结论:

- 1) 对于类似条件下的混合井回灌过程的井流计算一般可按承压水井流计算公式实现。利用开采井进行地下水回灌在技术上是可行的。
- 2) 利用 Grapher 系统对不同流量回灌过程变化进行分析,得出利用混合井在超采区实施回灌,其效率存在衰减,并会趋于稳定。
- 3) 本试验中混合井按定流量 $Q=33.391 \text{ m}^3/\text{h}$ 持续回灌,井水位可以稳定在 100 m 左右,单位流量基本稳定在 $0.334 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$,远远大于该混合井原来设计开采量 $Q=25 \text{ m}^3/\text{h}$ 。说明对于开采井出水能力而言,试验确定的补给能力较大,因而实际工作中具有推广价值。
- 4) 利用自来水作为回灌水源,试验过程仍然存在暂时性淤塞问题,可能是含水层中细粒移动堵塞部份孔隙所致。
- 5) 试验观测发现,停灌后注水井和观测井的水位在数小时就可以恢复到接近初始水位,说明回灌过程对开采井的滤水结构影响不大,管井水力传导

仍然良好。

由于地下水井流计算问题本身存在的复杂性,本研究还需要进一步进行,建议从以下几方面做起:① 由于地质条件和水文地质条件的差异性较大,在可能的条件下,应进一步扩大试验场地和试验规模,进行地下水回灌试验的综合效应研究。② 在利用开采井进行地下水回灌的同时,应扩大不同方式的回灌试验,也可考虑开展地面水(含雨水)一潜层地下水一深层地下水的系统回灌试验研究。③ 在上述试验的基础上,应对利用地表水进行大规模试验的经济性和合理性进行必要的论证,以探索回补地下水的最佳模式,确定经济合理的地下水回灌的水源。

参考文献:

[1] 葛亮涛,顾谦隆,高洪烈. 多含水层混合井流理论及流量测井法[M]. 北京:地质出版社,1984. 1—5.
[2] 陈崇希,林 敏,叶善士,等. 地下水混合井流的理论及应用[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1998. 1—3.
[3] 赵抱力,穆仲义,吴金祥. 人工补给地下水[M]. 北京:水利出版社,1980. 2—7.
[4] 陈雨孙. 地下水运动与资源评价[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1994.

版社,1986.2—3.

[5] 李佩成. 地下水非稳定渗流解析法[M]. 北京:科学出版社,1990.116—144.

[6] 魏小妹,李佩成. 利用“割离井法”确定水文地质参数的图解法[J]. 地下水,1993(4):141—143.

[7] 常安定. 级数的截断误差和割离井法的计算机实现[M]. 西安:西安地图出版社,2003.159—180.

[8] 李佩成. 测算潜水含水层渗透系数的“割离井法”[J]. 西北农学院学报,1981(4):57—70.

[9] 张莲花. 基坑降水引起的沉降变形时空规律及降水控制研究[D]. 成都:成都理工学院,2001.23—25.

[10] 吕保华,王保云. 长治市地下水人工补给方法浅析[J]. 山西水利,2000.(5):10—12.

[11] 李云峰,郑书彦,田春声,等. 引黄回灌研究[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1996.1—10.

Analysis on artificial supply discharge and efficiency of mix-well in excessively pumping area

ZHANG Xue-zhen, Hu An-yan, He Yi
(Faculty of Environment Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: based on the test, the mix-well flow calculation is classified during artificial supply to the over pumping area. The mix-well flow variational process is quantitatively analyzed,including the artificial supply efficiency. The artificial supply process is analyzed using Grapher sysytem. It is found that it existed an attenuation during artificial supply process by using mix-well in the over pumping area, which finally tended to stabilization. There was also silt by using eau douce to artificial supply. The research experience can be extended to solve the same problem occurring in cities and irrigation areas.

Keywords: Mix-well flow artificial supply test; well-flow calculation classifying; artificial supply process analyze; artificial supply efficiency

(上接第 169 页)

Ecological risk assessment and management in farming-pastoral area in Tibet plateau

——Case study in Zhanang County Lhoka Prefecture

ZHOU Wei^{1,2}, ZHONG Xiang-hao¹, ZENG Yun-ying³

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chendu 610041; 2. Graduated School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039; 3. Department of Civil Engineering, Jiujiang College, Jiangxi Jiujiang 332005)

Abstract: In the frame of plotting study area—risk sources analysis—risk suffer analysis—risk exposure analysis—risk imperil analysis—risk integrated analysis, the ecological risk in Zhanang County Lhoka Prefecture in Tibet was appraised, and risk management was carried out by risk tolerance analysis—risk decision making—implementing the measures of reducing risk. The results showed that: ①the integrated ecological risk was presented symmetrically along Brahmaputra, and was mitigated from valley farming area to mountain pastoral area; ②the hazards of main risk sources to risk suffer in each sub-region was differently, drought was the common risk source and imperils farming and stock raising severely; ③aimed at enhancing the ability of fighting drought, controlling flood and stabilizing sand engineering measures should be taken steps to prevent those hazards; mountain hazards must be controlled in resident area and along arterial traffic; manual work should be done to void hail in those area where hails attacked heavily; there is need to promulgated risk knowledge to herdsmen for strengthening their risk consciousness and improve the ability of preventing risk and self-help after hazards happened in the pasturing area.

Keywords: ecological risk; appraisal; management; Tibet plateau; Zhanang County Lhoka Prefecture