

干旱区竖井灌排下盐分运移对地下水质的影响

——以新疆哈密盆地为例

杨鹏年, 董新光

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 利用 MODFLOW 和 MT3DMS 软件对竖井灌排下的地下水量与水质变化趋势进行了模拟。计算结果表明, 尽管这一工程措施在一定时期内可起到控制地下水位与降低表层土壤盐分作用, 但从长远来看, 由于水平排水的缺失, 盐分从土壤表层下移到了中下层而并未被彻底地排出灌区, 仍会在包气带某一层位或地下水中富集。一旦灌区的外部条件发生变化, 盐分上移则会使土壤盐碱化, 下移则使地下水水质恶化。因此, 对于竖井灌排区来说, 有必要建立一套相应的监测系统, 实时调控地下水开采量与水位, 寻求一个即可使耕作层盐分控制在一定范围内, 地下水咸化速率不致过快, 同时又保持一定径流排盐作用的平衡区域, 可能是今后面临的一种选择, 从而将水盐自然运移规律改变后引发的生态与环境危害限制在可控范围。

关键词: 竖井灌排; 盐分运移; MODFLOW; MT3DMS

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008)05-0118-04

中图分类号: P641.2, X705

Impact of Salinity Movement Under Shaft Well Irrigation and Drainage on Groundwater Quality in Arid Area

YANG Peng-nian, DONG Xir-guang

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: The characteristics of groundwater movement and its quality after shaft well irrigation and drainage in Hami basin, Xinjiang Wei Autonomous Region are analyzed by using MODFLOW and MT3DMS. Calculated results show that the shaft wells make groundwater level to decline, but salinity may exist in unsaturated zone without horizontal drainage. Salinity is enriched after a long time and thus may harm the safety of soil and groundwater when the exterior conditions change. Therefore, the monitoring system should be established to guarantee stability of regional hydrogeology and to avoid environmental disasters. Actually, how to find the balance area that can control soil salinity, groundwater salinity, and falling groundwater level is the key to keep sustainable development.

Keywords: shaft well irrigation and drainage; salt transportation; MODFLOW; MT3DMS

水分和盐分是制约干旱区农业生产与生态植被的两大主要因素。随着对干旱区研究的不断深入, 人们已宏观上逐渐认识到了对灌区水盐进行调控的必要性, 且随着各地区经济实力的增强, 调控的手段也越来越强, 逐渐由水平明沟排水过渡到竖井灌排或二者间的有机结合。

产生这一转变的原因主要有两个方面。一是灌区的农业用水量受到了限制, 不能无限制地夺取生态植被的用水权; 二是灌区盐渍化的加剧危害到了农业的可持续发展。应用竖井灌排的区域在短期内就产生了地下水位下降和土壤盐分降低的明显效果, 同时还部分解决了水源不足的矛盾。

农田竖井灌排是继水平明渠排水(盐)之后, 于 20 世纪 70—80 年代伴随着地下水的大量开发, 在西北干旱地区发展起来的一种集灌溉与排盐于一体的灌排工程。其防止土壤次生盐渍化的原理是通过抽取地下水灌溉农田, 进而不断降低地下潜水位, 直至中断盐分经潜水蒸发聚集到土壤表层的过程来实现的。这种方法既减少了潜水蒸发量和排入河流与湖泊的含盐量较高的农田排水, 使水资源得到充分利用, 同时又改良了土壤次生盐渍化, 目前已成为北方干旱地区推崇的一项技术措施而被利用和推广^[1-2]。

然而竖井灌排对盐渍化土壤的改良程度如何确是值得研究的问题。在表层盐渍化程度降低的同时,

收稿日期: 2008-01-25

修回日期: 2008-05-15

资助项目: 教育部科学技术研究重点项目(206164); 新疆维吾尔自治区高等学校科研计划(XJEDU2005111); 973 国家重点基础研究发展计划(2007CB416604); 新疆水利水电工程重点学科

作者简介: 杨鹏年(1966—), 男(汉族), 甘肃省武威市人, 副教授, 研究方向为内陆干旱区水资源利用与环境保护。E-mail: Ypn10@163.com。

那么深层或其它层面上的盐分就会相应地增加。采用竖井灌排后,灌区内地下水位下降很快,水平明渠排水系统将失去作用。这也就意味着盐分的水平运移过程将会中断,而代之以垂向的运移为主。由于盐分等有害物质在土壤中的运移具有复杂性、缓慢性、滞后性、隐蔽性等特点,这些潜在的危害一旦积累到一定程度,将会严重阻碍灌区农业的可持续发展,甚至还可能造成许多不可逆的生态与环境问题,此时再进行治理则需要花费的代价极大。实际上,目前北方一些地下水超采的竖井灌排区,如新疆天山北坡的部分地区已经出现了地下水水质污染的前兆。本文即以此为研究方向,利用三维地下水运移模拟软件 PM 7.0.31 和溶质运移软件 MT3DMS 对长期采用竖井灌排下产生的问题进行定量化的分析与讨论。

1 研究区概况

哈密盆地地处欧亚大陆腹地,位于天山山脉的最东端南坡,是一个封闭的山间盆地。研究区选择在哈密盆地内西戈壁乡的瑞丰农场,属典型的大陆性气候,干旱少雨,年均蒸发量为 3 300~4 300 mm 之间,降水量仅为蒸发量的 1%。盆地内第四系松散沉积(堆积)物较发育,厚度几米至百米不等,是盆地的主要含水地段。地势北高南低,长约 200 km,土地肥沃,是哈密绿洲的主要分布带。盆地内第四系沉积层中的地下水接受山区补给后,基本沿地形坡度方向由盆地外缘向内部汇集,山前倾斜平原是地下水的径流区。含水层岩性主要为砂石、砂砾石,透水性强,径流条件好,循环交替强烈。从山区至盆地,含水层岩性由粗变细,地下水水质由好变差,地下水最终消耗于蒸散发。

该农场在开发前的地下水位在 1 m 左右,野生植被长势良好。1997 年开始种植棉花,全部为机井灌溉。地下水埋深在 2004 年 9 月的水文地质调查中为 3.7 m,植被覆盖度较高;2006 年 12 月时则为 8.0 m,地下水位下降明显,同时植被覆盖度也大幅下降。

2 模型的建立

2.1 MODFLOW 与 MT3D 软件简介

MODFLOW 是由美国地质调查局(USGS)的 McDonald 和 Harbaugh 于 20 世纪 80 年代开发出来的一套专门用于孔隙介质中地下水流数值模拟的三维有限差分程序。一经推出,即将源代码在网上公布并可随意下载。由于其输入数据较为繁琐严格,输出结果不直观等使该软件的推广应用在初期只局限于部分专业人士。后由 Weir Hsing Qian, Wolfgang Kinzelbach 等人以其为内核,嵌入了便于前后数据处

理的人机交互界面,无缝集成了 MT3DMS, PM-PATH, PEST 等多种模块,逐渐升级为目前的 Processing MODFLOW 7.0.31 版。从而在世界范围内的科研、生产、环境保护、水资源利用等许多行业和部门得到了广泛的应用,成为非常普及的地下水运动数值模拟软件^[3-4]。

MT3DMS 是由美国阿拉巴马大学的 C. Zheng 教授于 1990 年开发出的一套用于模拟溶质在地下水中运移的三维有限差分计算程序,目前已经成为溶质运移模拟领域事实上的标准。MT3DMS 包括多种求解算法可供选择,能灵活有效地处理各种源汇项和边界条件适用于承压、无压以及承压—无压含水层中的溶质运移问题。该软件不但能模拟地下水中污染物的对流、弥散,而且能够同时模拟多种污染物组分在地下水中的运移过程以及它们各自的变化反应过程,是目前应用最为广泛的三维地下水溶质运移模拟软件^[5-6]。

2.2 模型区概化及参数选取

根据研究区——哈密瑞丰农场的水文地质条件,确定模拟的范围为 10 km × 10 km,模拟的深度为 100 m,模拟区中心为一个拥有 25 眼机井的集中水源地,面积为 4 km × 4 km。井间距为 1 km,距离边界的垂直距离为 3 km,机井抽出的水则就地用于农业灌溉(图 1)。

由于哈密瑞丰农场周围均为纯井灌区,模拟区与周边机井的相互干扰影响可依据地下水边界映射法的原理,将模拟区的四周确定为不透水边界。因为对本区域来说,均是纯井灌区,可视为是面状井,由抽水引起的地下水位下降是区域性、整体性的。采用这种处理方法可避免将模拟区域定得过大,同时也与实际井群间的干扰抽水等价,从而将研究的注意力集中在井灌区内。研究区的上边界为开放式界面,但由于该区内降水极少且无地表水引入,故仅能接受由灌水产生的回归补给。

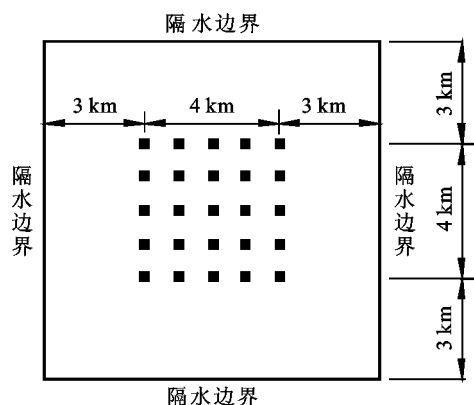


图1 模拟区域概化图

在模拟水流运动的 MODFLOW 中, 差分网格的大小为 50 m^2 的正方形, 共计剖分 40 000 个网格, 其后对初始流场及水文地质参数进行了定义, 调用了 well 和 recharge 程序包并予赋值; 在模拟溶质运动的 MT3DMS 中则对初始浓度场、对流计算及源汇项的补给浓度进行了赋值。考虑到此区域为人工影响下的干扰流场, 地下水运移以对流为主, 故弥散计算中所需的参数依照经验值确定。根据该农场的种植方式, 棉花的灌溉定额为 $350 \times 15 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 机井的抽水时间为每年的 4—9 月份, 其余时间则停采, 相应地面状补给时间也与之相同。灌溉水的利用率为 0.846, 在模型中分别确定灌溉水损失量中的 10%、20% 及 30% 作为地下水的面积状补给量, 具体数值分别为 0.345、0.689 和 1.033 mm/d (即本文后述中的方案 1、2、3)。这 3 种补给量代表了不同的灌溉管理水平, 以此来模拟现状这 3 种灌溉水平下对地下水质的影响程度。

一般来说, 地面平整度越好, 地下水位越低, 土壤渗透性越低, 则对地下水得补给量也越小。由于这部分补给水量溶滤了土壤中的盐分, 故其矿化度根据地排水沟的水质确定为 5 g/L 。地下水的初始矿化度为 0.3 g/L 。模拟的时间长度确定为 30 a, 通过在模型中设置的观测井来显示水位与水质的变化过程, 并以此来预测长期竖井灌排后灌区内地下水的动态变化。

3 模拟的结果

模型首先由 MODFLOW 进行地下水流的计算, 后由 MT3DMS 进行溶质运移的计算。由于模型中心位置处的水量与溶质的交换更为迅速, 故其变化值也更具代表性, 本文选择方案 3 中模拟观测井的水位过程绘成图 2—3, 其余两方案的趋势图与之相似, 为节省篇幅, 故没有全部列出。

3.1 地下水流模拟结果

从水流运动的模拟结果来看, 由于灌区的持续开采, 因此地下水位呈波段式不断下降的趋势。开采期水位下降; 停采期则会出现小幅的回升, 但下降趋势不改。其中以灌区中心处的水位下降幅度最大, 30 a 的累计下降幅度为 27.6 m, 年均下降 0.92 m; 边界处的水位下降幅度为 21.1 m, 年均下降 0.70 m; 按照《超采区评价导则》, 此区域应属于一般超采区。

对于研究区这样的纯井灌区来说, 地下水的可开采量主要是夺取地下水的蒸散量及侧向补排量而转化构成的。由于区域性的开采, 灌区内的水位呈现持续下降的趋势。因此从短期来说, 适当地进行开采是可行的, 但从长远来说, 这是不可持续的。若照此发展下去, 那么将会引发一系列的问题。首先面临的就

是提水成本的提高, 已有机井可能需要更新; 其次是依靠地下水生存的荒漠植被趋向于逆向演替的方向; 再次则是周边劣质水的入侵, 将会污染地下水资源, 导致生态与环境的退化甚至难以逆转。因此, 必须使地下水的实际开采量保持在可开采量允许的范围内才能保证灌区水资源的可持续利用。

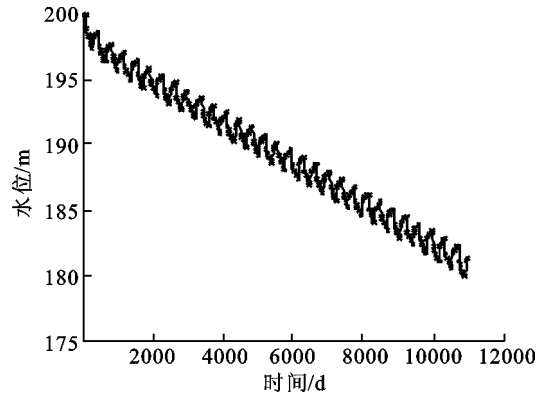


图 2 地下水位动态过程

3.2 盐分运移模拟结果

从图 3 中可以看, 地下水矿化度的变幅较小, 基本呈直线式的上升过程。经过 30 a 的模拟开采, 随着补给量的不同, 地下水水质受到的影响也不相同。地下水中的盐分随时间呈逐渐递增的趋势。方案 1 的地下水回归补给量最小, 它对地下水质的影响也较小, 方案 3 地下水回归补给量最大, 其对地下水质的影响则较大。无论何种方案均表明地下水水质始终处于一种劣变的趋势中, 但恶化的程度不同。回归补给量越大, 则地下水受污染的程度也越高。

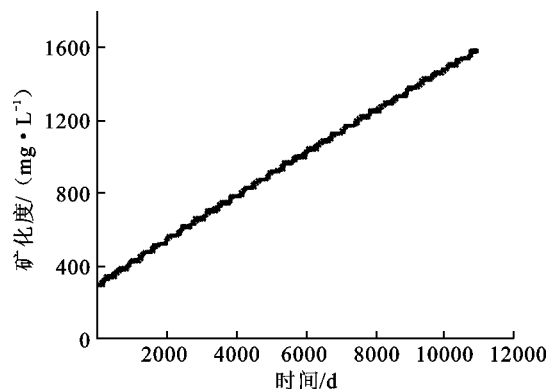


图 3 地下水矿化度变化趋势

对方案 3 来说, 地下水矿化度从初始的 0.3 g/L 上升到了 1.5 g/L , 这已是模拟前的 5 倍, 表明矿化的速率较快。尽管从灌溉水质上来说仍在允许的范围内, 但水质咸化的趋势并未停止, 随着时间的增加, 地下水的盐度仍会继续升高。

图 3 是由 MT3DMS 模拟一个单元上地下水矿化度的演变过程。由于每个单元上的矿化度模拟结果均不相同, 为了更全面地了解整个模拟竖井区内水质的变化趋势, 本文将各典型年井灌区内的单元水质进行了平均, 依此来描述井灌区地下水矿化度的演变趋势, 结果见表 1。表中数据表明, 井灌区内的地下水矿化度基本呈线性趋势增加。

表 1 不同灌溉水平下井灌区矿化度模拟结果 g/L

模拟时间	方案 1	方案 2	方案 3
第 1 a	0.3	0.3	0.3
第 10 a	0.5	0.6	0.7
第 20 a	0.6	0.9	1.2
第 30 a	0.8	1.2	1.5

4 结论

本文联合利用 MODFLOW 和 MT3DMS 软件对竖井灌排下的地下水量与水质变化趋势进行了模拟。从模型计算的结果来看, 灌区内地下水位呈持续下降的趋势, 表明地下水呈超采状态, 这要求要严格控制在开采规模, 同时有可能的话可引入地表水来缓解对地下水的过度开采。否则持续下降的地下水位将引发周边劣质水的回灌及已有机井的提前更新, 增大供水成本, 进而影响到灌区的农业生产。

竖井灌排这一工程措施可在一定的时期内起到控制地下水位与降低表层土壤盐分作用。这对灌区内的土壤盐渍化改良是有利的。但从长远来看, 由于水平排水功能的丧失, 盐分从表层下移到了包气带的中下层而并未彻底地移出灌区, 长此以往, 盐分将会在某一层位上或在地下水中富集。若竖井灌排方式保持不变, 则这一水盐运移的模式也较稳定。然而一旦灌区的外部条件发生变化, 那么这一进程或状态也会相应地随之而变: 若盐分上移会产生土壤的盐渍化, 下移则会使地下水水质恶化。然而使灌区内的各种外部条件长期保持不变又是难以做到的, 竖井灌排区

的盐碱化风险将随着时间的增加而加大。因此对于井灌区有必要建立一套监测系统, 通过实时监测来调控地下水开采量与水位, 保持区域水文地质条件的相对稳定, 从而将水盐自然运移规律改变后引发的生态与环境危害限制在可控范围。

本文的模型是在边界条件相对较单一的情况下进行模拟的, 由于软件自身的局限, 没有模拟包气带盐分在灌排作用下的运移状态。但由上述结果可以合理的推论: 如果考虑到每年秋冬季进行的大水压盐或周边地下咸水的入侵, 那么井灌区内地下水的咸化速率将更为迅速。因此在这种情况下如何找到一个平衡区间, 即可使得耕作层盐分控制在一定范围内, 地下水的咸化速率不致过快(尚在生产、生活可接受的范围), 同时又不使地下水位降幅过大, 保持一定的地下径流排盐作用, 这可能是竖井灌排区可持续发展的一种选择^[7-8]。

[参 考 文 献]

- [1] 张蔚榛, 张瑜芳. 对灌区水盐平衡和控制土壤盐渍化的一些认识[J]. 中国农村水利水电, 2003(8): 13—18.
- [2] 魏守忠. 三工河流域下游灌区竖井灌排效应分析[J]. 水科学与工程技术, 2006(4): 7—8.
- [3] Chiang Wer Hsing, Wolfgang Kinzelbach. 3D Groundwater modelling with PMWIN[M]. Germany. Berlin: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2001: 2—19.
- [4] 丁澈士, 苏惠珍. 三维地下水流模式[M]. 台北: 五南图书出版股份有限公司, 2004: 2—5.
- [5] 周义朋, 孙占学, 马新林, 等. MT3DMS 中混合欧拉—拉格朗日数值解法分析[J]. 水文, 2006(6): 38—41.
- [6] 朱玉水, 段存俊. MT3D: 通用的三维地下水污染物运移数值模型[J]. 东华理工学院学报: 自然科学版, 2005(1): 26—29.
- [7] 李平, 赵鸿斌, 田原, 等. 塔里木河流域土地盐渍化改良与竖井灌排工程[J]. 地质灾害与环境保护, 2002(2): 48—50.
- [8] 刘丰, 董新光, 王水献. 新疆平原灌区综合排水措施与模式[J]. 干旱区研究, 2006(4): 588—591.