

青铜峡银北灌区井灌井排水盐运动数值模拟

尹大凯, 胡和平, 惠士博

(清华大学)

摘要: 为了配合全国大型灌区的节水改造, 给不同优化灌溉模式的推广提供科学依据, 运用 HYDRUS 程序, 对青铜峡银北灌区小麦套种玉米地的灌溉进行了多方案的一维水盐运动数值模拟。针对灌区土壤地下水位高、地下水矿化度高、潜水排泄以蒸发为主等原因, 研究了基本灌溉模式、井渠结合灌溉模式的改变对不同程度盐碱地改良的效果, 提出适合银北灌区不同盐碱地的灌溉制度。

关键词: 水盐运动模拟; 灌溉模式; 中低产田改造; 青铜峡银北灌区

中图分类号: S278; S274

文献标识码: A

文章编号: 100226819(2002)0320001204

青铜峡灌区位于宁夏回族自治区境内, 是我国历史悠久的特大型灌区之一。灌区总灌溉面积已达 33 万 hm^2 , 在宁夏国民经济中有举足轻重的地位。然而, 根据 1990 年水利土壤调查成果以及近 10 年来灌区农业综合开发情况分析测算, 青铜峡灌区现有中低产田面积 14.7 万 hm^2 , 其中盐渍化土壤面积 13.2 万 hm^2 。而银北地区的盐渍化土地有 9.3 万 hm^2 , 占全区的 63.65%, 是灌区盐渍化土壤改良和中低产田改造的重点。

多年来通过对银北灌区土壤盐渍化及其改良的研究分析, 认为形成银北灌区土壤盐渍化的成因主要有: 地下水位高——长期以来青铜峡灌区大引大排, 排引比达 0.62 左右, 而且银北地区地处黄河宁夏断陷地层中心, 地下水侧向排泄不畅, 致使地下水位过高; 地下水矿化度高——银北灌区因侧向排泄微弱, 致使银北地区地下水水质较差; 潜水排泄以蒸发为主, 水平排泄为辅——银北灌区地面坡度小, 地下水径流条件差, 地下水埋深都在 1~2 m 间, 在干旱条件下, 强烈的潜水蒸发是土壤积盐的主要成因, 也是影响青铜峡灌区作物产量提高的主要原因。

所以, 用井灌井排进行盐碱地改良, 并且通过井渠结合达到地面水地下水联合调度运行, 使水资源达到合理利用、优化配置, 是青铜峡灌区续建配套, 节水改造的主要内容。为此, 对银北灌区井灌井排井渠结合模式进行了数学模拟分析, 以探求合理的灌排模式。

1 模拟计算原理

在模拟计算中, 使用了美国盐碱地改良实验室

开发的 HYDRUS 程序, 它可以模拟多孔介质中一维变饱和流和盐分运移。水分模拟中考虑了根系的吸收, 盐分运移方程中也包含了离子和分子的扩散、水动力扩散、线性或非线性吸收平衡以及一级衰减。模拟时可以控制时间步长、收敛条件以及输出格式, 这使计算效率和精度大大提高。

1.1 水分模拟计算

水分运动的基本方程为^[3]

$$C \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} (J \frac{\partial h}{\partial Z} - J) - s(Z, t) \quad (1)$$

式中 h ——水头值; C ——土壤水的比水容量, 定义为 $C = \frac{dH}{dh}$; H ——体积含水率; J ——导水率; $s(Z, t)$ ——根系吸水率; Z ——垂直坐标, 特定向下为正; t ——时间。

初始条件: 用水头值或土壤含水率表示, 暂不考虑土壤水分的滞后作用, 即

$$h(Z, 0) = h_i(Z) \text{ 或 } H(Z, 0) = H(Z) \quad (2)$$

上边界条件: 在土壤表面 $Z = 0$ 处可以用第一类和第二类边界条件表示, 也可用总的地表灌溉水量 Q_0 表示, 它可以由 HYDRUS 程序自动计算出。

下边界条件 $Z = l$ 为

$$h(l, t) = h_l(t) \quad (3a)$$

$$\text{或 } (-J \frac{\partial h}{\partial Z} + J)_{Z=l} = q_l(t) \quad (3b)$$

式中 $h_l(t)$ 和 $q_l(t)$ ——给定的水头值和净排水通量。

1.2 溶质运移模拟

溶质运移的基本方程为

$$\frac{\partial}{\partial Z} (D \frac{\partial C}{\partial Z}) - \frac{\partial qC}{\partial Z} - KHC - KQ_s = \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial t} \quad (4)$$

式中 C ——溶质浓度; s ——被吸附的固相浓度 (单位质量孔隙介质所吸附的溶质的质量); D ——

收稿日期: 2001211201 修订日期: 2002204210

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (1999043607)

作者简介: 尹大凯 (1977-), 硕士研究生, 清华大学水利水电工程系水文水资源研究所, 100084

弥散系数; q ——达西流速; K 和 K_s ——溶质的液相和固相降解系数。

$$\text{上边界条件}(Z = 0): \left(-H \frac{\partial C}{\partial Z} + qC \right)_{z=0} = \begin{cases} q_0 C_0 & q_0 > 0 \\ 0 & q_0 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{下边界条件}(Z = l): \begin{cases} \frac{\partial C}{\partial Z} \Big|_{z=l} = 0 & q_l > 0 \\ C(l, t) = C_l & q_l < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中 C_0 ——灌溉水的浓度; q_0 ——入渗通量; C_l ——地下水浓度; q_l ——下边界处的排水通量。

2 计算方案

2.1 灌溉模式

为了使模拟具有代表性, 计算中选取了种植面积较大的小麦和套种玉米地, 根据 2000 年唐徕渠和惠浓渠的灌溉制度, 模拟采用的灌溉制度见表 1。

表 1 基本灌溉制度

Table 1 The basic irrigation scheduling

灌水时间 6月2日	小麦 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	套种玉米 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$	其它 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$
04225~ 04230	900		
05210~ 05215	750		
06201~ 06210	675		
07203~ 07215	450	600	
08210~ 08215		825	
09201~ 09215			390
生育期小计			4 590
冬灌			975
总灌水量			5 565

2.2 模拟方案说明

为了能定量得出灌区中低产田改造方案的灌溉模式, 针对盐渍地的成因, 我们在基本灌溉制度的基础上, 通过调整灌溉水量、灌溉时间、灌溉方式、蒸发量、盐分浓度、地下水位等因素, 进行了多种灌溉方案的模拟与探讨, 这里只将具有代表性的几个方案列于表 2。考虑到地下水含盐量随毛管上升, 前两个

表 2 计算方案列表

Table 2 The schemes of the calculation

序号	方案	内容	地下水盐分 浓度 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	地下水 埋深 m
1	渠水灌溉	基本灌溉制度, 全部渠灌	1.5	1.5
2	井渠结合	4 月末和冬灌用井灌, 渠灌量比方案 1 加大 20%	1.5	1.5
3	重盐碱地改造	1.5 m 范围内有积盐, 灌水量较方案 1 大 20%, 每年并排两次	5.0	2.5
4	中盐碱地改造	1.5 m 范围内有积盐, 灌水量较方案 1 大 20%, 每年并排两次	3.0	2.5

方案中土壤剖面水分的含盐量与地下水含盐浓度相同, 没有涉及土壤盐分的原有积累。以下所有方案都进行了 3 年的计算, 以观察水盐运动的变化趋势。

3 灌溉模式分析

为了便于方案间的比较, 观察灌溉一年后的效果, 以下的分析数据除未特别说明均取自灌溉年末, 即每年 4 月初春灌前的情况。

3.1 基本灌溉制度

对于基本的灌溉制度, 计算中黄河水的含盐量取 0.4 g/L 。图 1 为经过一年的生长期灌溉和作物蒸腾耗水, 且经过冬灌储水, 到次年 4 月上旬时土壤剖面含水率和土壤水中盐分浓度的变化。由图 1 土壤剖面含水率可见在设定灌溉定额 $5 565 \text{ m}^3$ 条件下, 由于基本满足作物蒸发量的需水要求, 地下水位基本稳定。然而由于没有足够的灌溉水将原土壤中的盐分淋洗入地下深层, 在作物根层下部形成了盐分聚集层^[4]。

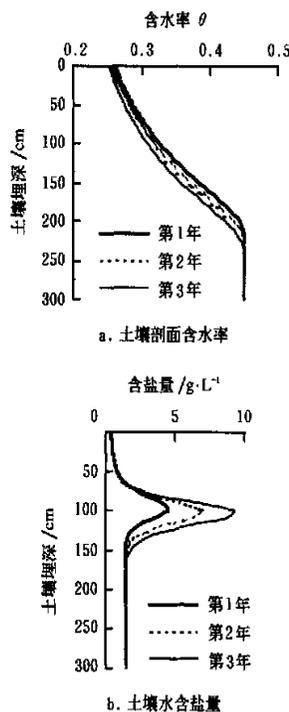


图 1 渠水灌溉计算结果

Fig 1 Results of calculation in irrigation scheme 1

这一结果表明, 在青铜峡银北灌区干旱气候条件下, 当灌溉水有一定盐分, 而灌溉定额满足作物耗水, 即使地下水位下降到一定深度, 潜水蒸发已被抑制, 如无一定的水量将盐分淋洗到下部地下水中, 其盐分仍会积累。在根系层底部, 由于灌溉水使盐分淋洗下移, 作物蒸腾使盐分上移, 水盐运动频繁, 盐分就会在这里聚集, 最终将影响作物的生长。

3.2 井渠结合

从上一方案可以看出, 要改造盐碱地, 必须加大灌水量使盐分得到淋洗。可是如果单纯地加大渠道灌水量, 就会使地下水位上升, 潜水蒸发加剧, 盐分仍然会积累。所以, 还需适当抽排地下水来控制地下水位, 阻止盐分在根系层的积累。所以在本方案中, 渠道灌水量加大了 20%, 每年冬季和 4 月末抽取地下水

两次, 并直接将这部分地下水用于灌溉, 以便充分利用地下水资源。

计算结果为图 2 所示。由图可见, 当地下水位埋深基本控制在 2.5 m 左右。每年春灌前, 地下水位以上土壤剖面中土壤水的盐分浓度虽仍有盐分浓度较大的范围, 达 4~6 g/L, 但较前一方案已有较大改善。

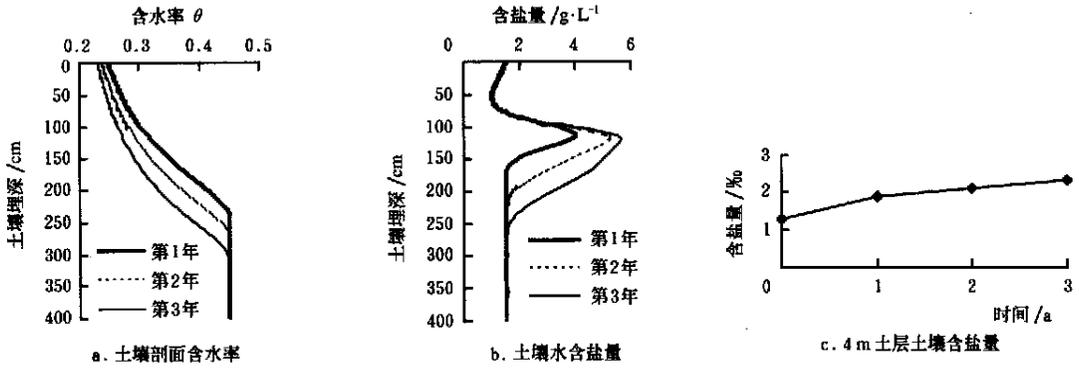


图 2 井渠结合计算结果

Fig 2 Results of calculation in irrigation scheme 2

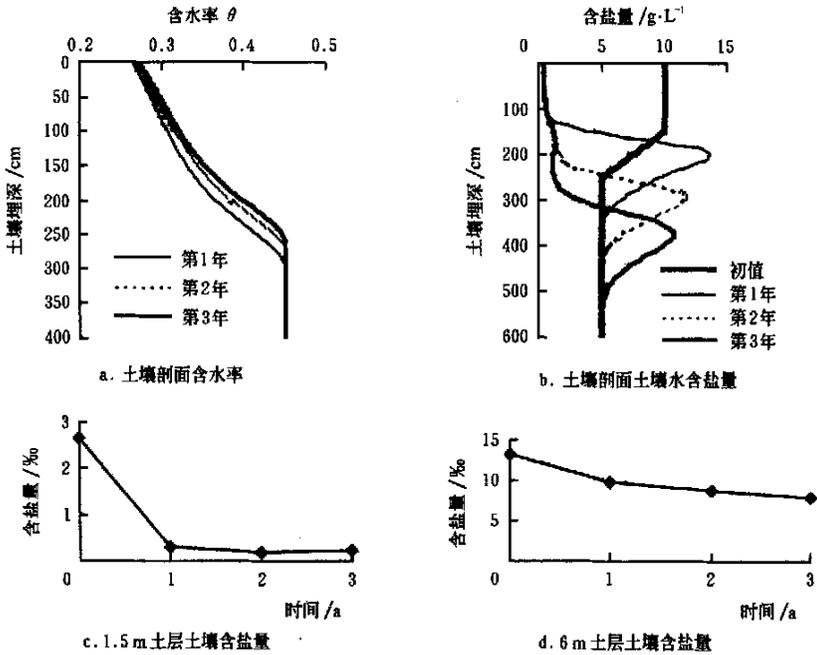


图 3 重盐碱地改造计算结果

Fig 3 Results of calculation in irrigation scheme 3

这里所指的土壤水盐分浓度高值是指土壤水中的浓度, 从 4 m 土层土壤含盐量的变化可以看到, 其值 $H=0.25\sim 0.30$ 。如换算为土壤中盐分的百分数其变化将平缓得多。

由连续 3 年土壤中盐分浓度的变化到第 3 年盐分浓度曲线已逐渐和地下水浓度 1.5 g/L 平缓连接, 说明已有一定量的入渗水量将盐分淋洗入地下水。到第 3 年后其土壤水盐分浓度的最高值达 5.5

g/L , 也渐趋稳定, 且在 1m 土层无盐分积累现象。

3.3 重盐碱地改造

对于重盐碱地, 当地下水的含盐量大到 5.0 g/L 时, 又由于地下水的毛管上升带来的盐分使距地表 1.5 m 的范围内出现了盐分积累(如图 3 中折线所示)。在这种情况下, 本方案也进行了类似井渠结合方案的模拟, 但是考虑到地下水盐分浓度较高, 无法直接用于灌溉, 就全部采用了渠灌, 且并排两

次。由于初始地下水位较低,要使水位保持在 2.5 m 以上,必须进一步加大渠灌水量,所以从图 3 可以看到每年的地下水位略有回升。而且由于水量的加大,淋洗作用更加明显,经过一年的灌溉,地表积盐带就基本消失,根系范围内(1.5 m)的含盐量由 2.7 g/dL 下降到 0.3 g/dL,有利于作物的生长。虽然盐分峰值还在 10 g/dL 以上,但每年减少 1.5 g/dL 左右,而且距地表也越来越远,取得了很好的改良效果。这说明充裕的水分将盐分淋洗到了地下深层,距地表 6.0 m 以内土层中土壤的含盐量也逐渐减小,3 年前后 6 m 土层内含盐量减少了 5.53%,效果十分显著。

所以经过几年的渠灌井排,待积盐带远离地表,浅层地下水得到改良淡化以后,就可以尝试进行井渠结合灌溉,使地表水和地下水联合调度运用,以减少引黄水量。

3.4 中度盐碱地改造

对于地下水盐分浓度为 3.0 g/dL 的中度盐碱地,也会出现表土积盐的现象,为此进行了类似方案 3 的模拟。在相同的灌溉模式下,地下水位和 1.5 m 土层含盐量的变化与方案 3 相同,但是由于地下水含盐量较低,3 年后 6 m 土层的含盐量下降到了 6.7%,比上一方案还小。这说明中盐碱地的改造较重盐碱地要容易一些,而且改良后的土地,可以转而采用井灌渠灌结合的灌溉模式。

4 结 论

通过对影响土壤盐渍化原因的分析可知,青铜峡银北灌区土壤长期盐渍化的原因是地下水位过

高、地下水矿化度高等。针对盐渍化的成因,通过多方案的计算模拟可以看到,对于不同程度的盐碱地,通过改变灌溉模式、灌溉水量,在短期内使土地得到改良还是可以实现的。在地下水盐分浓度不大,表土没有严重积盐的地区,可适当加大灌溉水量,同时用井灌控制地下水位,采用井灌渠灌结合的方式,以有效改良盐碱地。而在重、中盐碱地区,应该尽快消除根系范围内的积盐,提高土地的生产能力,因此加大渠灌水量,使表层积盐得到淋洗,并且适量抽排地下水是比较有效的方法。待表土积盐得到有效控制,浅层地下水得到淡化后,可由渠灌井排的模式转为井渠结合的灌溉模式,使地表水、地下水联合调度运行,以节省引黄用水量。

总体上,本文对不同灌溉模式下的水盐运动进行了分析,指出了不同类型盐碱地采用井渠结合或渠灌井排下水盐动态的变化规律及其可行性。在具体实施中,尚需结合青铜峡银北灌区盐碱地分布实际情况,进行井渠结合改良盐碱地的规划设计和经济分析,以求实效。

[参 考 文 献]

- [1] International Ground Water Modeling Center. Hydrus One Dimensional Variably Saturated Flow and Transport Model: Including Hysteresis and Root Water Uptake, 1992
- [2] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988
- [3] 郭元裕. 农田水利学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1997.

Numerical Simulation of Water-Salt Movement Under Well-Canal Combined Irrigation Scheme in Qingtongxia Yinbei Irrigation District

Yin Daka, Hu Heping, Hui Shibo

(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The well-known ancient Qingtongxia Irrigation District, one of the largest irrigation projects in China, is still suffered from serious salinity problem caused by the high groundwater table, high mineral concentration in ground water, and intense phreatic evaporation. By using the HYDRUS computer program, one-dimensional water-salt movement was simulated under different well-canal combined irrigation schemes with typical irrigation regime for cropping wheat in spring and corn in late summer. It is found that different irrigation conditions, for example, the surface irrigation, well-canal combined irrigation, etc. have different effects on the soil reclamation. Hence, the simulated results will provide a guidance for the reclamation of the salinity soil and rehabilitation of the irrigation district.

Key words: groundwater-salt movement simulation; irrigation schemes; medium and low yield farmland rehabilitation; Qingtongxia Yinbei irrigation district