水　利　学　报
2020年4月　SHUILI　XUEBAO　第51卷　第4期

文章编号:0559-9350(2020)04-0458-10

基于SHAW模型的河套灌区秋浇渠系优化配水模型研究

沈来银[1,3]，胡铁松[1]，周　姗[1]，付国义[2]，黄介生[1]

（1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室，湖北 武汉　430072；
2. 内蒙古河套灌区管理总局，内蒙古 巴彦淖尔　015000；
3. 湖北省水利水电科学研究院 湖北省国际灌排研究培训中心，湖北 武汉　430070）

摘要：河套秋浇是为满足来年春播作物水盐需求而进行的保墒淋盐灌溉。针对传统基于作物需水预测成果进行渠系配水存在的预报依赖性强和中长期预报精度低问题，本文提出了一种不需要作物需水预测成果的渠系优化配水模型框架，该框架依据春播初期作物水盐要求，将SHAW模型嵌入优化配水模型，确定秋浇配水计划。河套灌区永济灌域2016年秋浇配水计划编制实例研究表明：与传统基于需水预测的配水方法相比，新方法得到的配水计划可以在不增加渠首引水量及渠道输水损失总量基础上显著提升淋盐效果，使春播初期0～40 cm土层水盐状态更加适宜于作物播种，春播初期土壤0～40 cm土层平均盐分超标由60%以上降低至5%以下，同时配水公平性也得到提升。

关键词：秋浇灌溉；渠系优化配水；水盐运移过程；输水损失

中图分类号：TV93　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.13243/j.cnki.slxb.20190630

1　研究背景

秋浇灌溉是河套灌区引黄灌溉中一种特殊的灌溉模式，主要目的是调节墒情和淋洗盐分，为来年作物春播提供良好的土壤水盐条件。河套灌区具有渠道长、层级多、用水量大的特点，渠系优化配水可以显著降低输水损失[1]。随着黄河流域最严格水资源管理制度实施，灌区水资源配额减少，灌区管理单位在秋浇配水过程中要兼顾流域管理机构用水总量控制要求和农业灌溉的用水需求，使有限的水资源发挥最大效益，因此迫切需要一种科学合理的灌溉渠系配水计划编制方法。

合理的渠系输配水可以为灌区生产带来良好的经济与生态环境效益，国内外专家学者对渠系优化配水理论方法开展了广泛深入的研究，建立了大量的渠系优化配水模型。这些优化配水模型目标函数主要分为两类：一类关注灌区效益，主要是提高灌区作物产量[2-3]或灌区经济效益[4-6]，该类优化配水模型以保证作物生长发育需水要求为目的，通常结合Jensen模型等作物产量模型[7-8]进行水量的时空分配；另一类主要关注水量损失，使渠道输水损失量最小[9-11]，提高配水效率[12-13]，研究重点侧重于渠道的高效运行，降低水资源浪费。但无论哪一类，这些渠系优化配水模型往往将各级渠道的预测需水过程作为模型输入。河套灌区秋浇属于非生育期灌溉，存在配水时间跨度长、中长期作物需水预测成果精度低、最优需水过程不唯一等问题，传统基于需水预测的配水理论方法难以直接运用到河套灌区秋浇配水决策中。

鉴于此，本文结合河套灌区秋浇配水特点，以渠系输水损失量最小为目标，兼顾水盐需求满足

收稿日期：2019-09-04；网络首发时间：2020-04-07
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200407.1611.001.html
基金项目：国家重点研发计划项目(2016YFC0400203)；湖北省水利重点科研项目(HBSLKY201817，HBSLKY201707)；青年科学基金项目(51709098)
作者简介：沈来银(1995-)，硕士生，主要从事水资源最优化管理研究。E-mail：shenlaiyin@whu.edu.cn
通讯作者：胡铁松(1964-)，教授，博士生导师，主要从事水库调度及旱涝灾害治理研究。E-mail：tshu@whu.edu.cn

程度，建立了面向春播期水盐要求的河套灌区秋浇配水优化模型，有效避免了因为需水预测误差可能带来的配水偏差，并应用该模型在永济灌域开展实例研究。

2　渠系优化配水模型的构建

2.1　基于需水过程的渠系优化配水模型构建　河套灌区管理体系复杂，管理体制上呈现显著的垂向领导关系，自上而下分为河套总局、灌域管理局、管理所、管理段、支(斗)委。渠系输配水计划的制定一般要经历自上而下——自下而上——再自上而下三个编审程序，即河套总局编报灌区用水计划，审批灌域用水计划；灌域局编报灌域用水计划，审批所辖干(分干)渠系用水计划；管理所(段)编报所辖干(分干)渠系用水计划，审批单位用水计划；支(斗)委编报单位用水计划，经过上下级不同管理者反复协调形成最终的渠系输配水计划。下级用水户在长期实践中掌握了一定的灌溉经验，会依据当年气象条件及田间土壤水盐情况，结合上级管理者下发的灌溉输水计划，大致推算最佳灌水时间，依据经验制定符合自身利益的用水计划。该过程缺乏不同灌溉区域间实时协调沟通，会导致上级渠道出现超负荷运行或者供不应求的情况，上级管理者需要根据下级用水户的需求协调不同用水户间的用水矛盾，尽量减少灌溉缺水量，同时降低渠系输水损失。

(1)目标函数。

假设上级渠道共连接有N条下级渠道，供水时段总数为T，其中第i条渠道第j时段的需水量为W_{ij}^{*}，为尽量满足下级用户取水需求并提升渠系输水效率，将目标函数设置为下级用水户缺水量与渠系输水损失量最小，即：

$$\min Z = W_s + W_i \tag{1}$$

式中：W_s为各下级灌溉区域各时段缺水总量，m^3；W_i为上下两级渠道输水损失总量，m^3。计算方法如下：

$$W_s = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{T}\max\left(W_{ij} - W_{ij}^{*},\ 0\right) \tag{2}$$

$$W_l = V_u + V_d \tag{3}$$

$$V_u = \sum_{j=1}^{T} f\left(A_u,\ m_u,\ Q_j^{u},\ l_u,\ \Delta t\right) \tag{4}$$

$$V_d = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{T} f\left(A_j,\ m_j,\ Q_{ij}^{d},\ l_j,\ \Delta t\right) \tag{5}$$

式中：V_u、V_d分别为上级和下级渠道输水损失总量，m^3；Q_j^{u}、Q_{ij}^{d}为上级渠道和第i条下级渠道第j时段输水流量，m^3/s；A_u、A_j、m_u、m_j分别为上、下级渠道渠床透水系数和透水指数；l_u、l_j分别为上、下级渠道长度；Δt为时段长度。渠道输水损失量采用经验公式计算[14]，形式如下：

$$V = f\left(A,\ m,\ Q,\ L,\ t\right) = \frac{A \cdot L \cdot Q^{(1-m)} \cdot t}{100} \tag{6}$$

(2)约束条件。

①渠道配水流量约束：为保证渠道运行安全，所有渠道任意时段均不得超设计流量运行：

$$Q_j^{u} \leqslant Qs_u \tag{7}$$

$$Q_{ij}^{d} \leqslant Qs_i \tag{8}$$

式中：Qs_u、Qs_i分别为上级渠道和下级第i条渠道设计流量，m^3/s。

②总水量约束：上级干渠渠首引水总量不得超过上级水资源管理部门分配的总引水量指标：

$$\sum_{j=1}^{T} W_j^{u} \leqslant W_{avail} \tag{9}$$

式中：W_j^{u}为上级渠道第j时段毛引水量，m^3；W_{avail}为秋浇期上级渠首可引水总量指标，m^3。

③来水流量约束：受黄河来水量及其他灌溉区域分水影响，上级渠道各时段引水流量不得超过最大可引水流量：

$$Q_j^{u} \leqslant Q_j^{avail} \tag{10}$$

式中：Q_j^{avail} 为上级渠道第j时段最大可引水流量，m^3/s。

④公平性约束：受上级渠道设计流量及最大可引水量影响，各下级渠道灌溉区域缺水比例应控制在合理的范围内，保证不同灌溉片区间的公平性：

$$W_s^{\max} - W_s^{\min} \leqslant \alpha \tag{11}$$

式中：$W_s^{\max}$、$W_s^{\min}$分别为各灌溉区域最大缺水比例和最小缺水比例；α 为允许缺水比例差值上限。

⑤渠道流量过程完整性约束：各条渠道在输配水时段内只包含一次完整的输水过程，期间不间断输水，且在稳定输水阶段无大幅的流量波动：

$$\begin{cases} Q_j - Q_{j-1} \leqslant \beta Q s & j \leqslant p \\ Q_{j+1} - Q_j \leqslant \beta Q s & j > p \end{cases} \tag{12}$$

式中：p为渠道最大流量时段序数；β为最大允许变幅比率。

2.2 基于最终水盐要求的渠系优化配水模型 基于需水过程的渠系优化配水模型中，下级管理部门上报用水计划由上级部门统一协调，仅考虑渠道安全运行和水资源管理的要求，无法提前预测渠系配水计划调整对于田间灌溉效果的影响，可能导致灌水后部分区域田间土壤水盐含量在春播初期无法满足作物生长发育的要求，难以充分保证下级用水户间的公平性。为了在协调配水过程中掌握田间条件，有必要对基于预测需水过程的优化配水模型进行一定的改进，改进后的优化配水模型具体形式如下：

(1)目标函数。在此条件下，上级管理者统一制定渠系配水计划，兼顾下级农户的灌水利益，尽可能实现渠系输水损失的最小化以及田间水盐条件满足程度的最大化，目标函数形式如下：

$$\min Z = \left(V_u + V_d\right) \cdot (1 + \lambda) \tag{13}$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^{N} \frac{\max\left(\theta_i - \theta_{\max},\ 0\right)}{\theta_{\max}} + \sum_{i=1}^{N} \frac{\max\left(S_i - S_{\max},\ 0\right)}{\theta_{\max}} \tag{14}$$

式中：λ 为水分盐分相对超标量之和；θ_i 为春播初期第i条渠道灌溉区域耕作层水分含量，%；$\theta_{\max}$为作物适宜含水率上限，%；S_i 为春播初期第i条渠道灌溉区域耕作层盐分含量，mg/L；$S_{\max}$为作物适宜含盐量上限，mg/L；其中耕作层深度依据各下级渠道灌溉区域水盐交互作用综合确定。其余物理量与上文相同，渠道输水损失量采用式(6)进行计算。

(2)约束条件。满足上级水资源管理部门总量控制及渠道输水运行安全要求是输配水计划具有可行性的必要条件，本模型直接考虑灌水后田间水盐含量变化过程，总水量投入不再作为衡量区域公平性的关键性指标，忽略约束条件④，保留约束①、②、③和⑤。

2.3 冻融条件下水盐运移模型 综合考虑目前主要水盐模型的特点，本文选用SHAW(Simultaneous Heat and Water)模型进行模拟，该模型用于模拟温度变化作用下土壤经历冻结和融化过程中水量、热量、溶质的传输运移过程[15-16]，模型主要输入参数：初始值及边界值、气象数据、模拟点(地理地质)数据、水力特性参数，模型的输出数据主要有模拟期始至模拟期末土壤中各节点土水势、含水(冰)率、温度和含盐量等数据。SHAW模型主要控制方程如下：

(1)能量通量控制方程。以土壤冻融条件下各节点能量平衡为求解依据，即土层中的能量增量与土壤温度变化量或者物质相变相等，方程为：

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(k_s \frac{\partial T}{\partial z}\right) - \rho_1 c_1 \frac{\partial\left(q_1 T\right)}{\partial z} + S = C_s \frac{\partial T}{\partial t} - \rho_i L_f \frac{\partial \theta_i}{\partial t} + L_v \left(\frac{\partial q_v}{\partial z} + \frac{\partial \rho_v}{\partial t}\right) \tag{15}$$

式中：z为土层深度，m；k_s为土壤热导率，W/(m·K)；T为土壤温度，℃；ρ_1为液态水密度，1000 kg/m^3；c_1为液态水比热容，4200 J/(kg·K)；q_1为液态水通量，$kg/(m^2 \cdot s)$；C_s为土壤体积热容，W/(m·K)；

t为时间，s；ρ_i为土壤中冰的密度，920 kg/m^3；L_f为融化潜热，3350 kJ/kg；θ_i为土壤体积含冰率，%；q_v为气态水通量，kg/(m^2·s)；ρ_v为土壤空隙中的水汽密度，kg/m^3。

(2)水量通量控制方程。假定土壤中的冰为刚体，在土壤中不运动，土壤中的水分交流主要以液态和气态的形式进行，垂向上土壤水分运移方程为：

$$\frac{\partial\theta_1}{\partial t}+\frac{\rho_i}{\rho_1}\frac{\partial\theta_i}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[K\left(\frac{\partial\psi}{\partial z}+1\right)\right]+\frac{1}{\rho_1}\frac{\partial q_v}{\partial z}+U \tag{16}$$

式中：K为非饱和导水率，m/s；ψ为土壤基质势，m；$\frac{\partial\theta_i}{\partial t}$为液态水体积含水量，%；$U$为源汇项，1/s。

(3)溶质通量控制方程。土壤中溶质迁移主要包括三个过程：分子扩散、对流和动力弥散，控制方程为：

$$\rho_b\frac{\partial S}{\partial t}=\rho_1\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(D_H+D_m\right)\frac{\partial c}{\partial z}\right]-\rho_1\frac{\partial\left(q_1c\right)}{\partial z}-\rho_bV \tag{17}$$

式中：ρ_b为土壤体积质量，kg/m^3；S为单位质量土壤中溶质的物质的量，mol/kg；D_H为水动力弥散系数，m^2/s；D_m为分子扩散系数，m^2/s；c为土壤溶液的溶质浓度，mol/kg；V为土壤降解和根吸收项。

SHAW模型自提出以来经历了大量学者的改进和试验检验，在实际运用中取得了良好的模拟效果。在我国华北、西北等存在冻融现象的区域内，多位学者利用SHAW模型进行了土壤水盐模拟运用研究，证明SHAW模型具有良好的适用性[17-18]。

3 研究实例

3.1 河套灌区永济灌域概况 永济干渠开口于河套总干二闸，全长49.4 km，控制面积13.15万hm^2，实际灌溉面积8.60万hm^2，承担临河区、五原县、乌拉特中旗等15个乡镇及3个农场的灌溉任务，干渠上有3座分水枢纽，5座分干渠进水闸，口部设计流量85 m^3/s，最大运行流量93 m^3/s。下级有6条分干渠，永兰、永刚分干渠开口于第一分水枢纽，西乐、新华分干渠开口于第二分水枢纽，正稍、大退水分干渠开口于第三分水枢纽，渠道详细参数见表1。

表1 永济灌域分干渠参数

	永兰	永刚	西乐	新华	正稍	大退水
设计流量/(m^3/s)	18.0	18.0	23.0	23.0	19.7	15.0
渠道长度/km	23.8	28.9	34.92	32.28	33.17	18
桩号	14+900	14+900	29+200	29+200	49+300	49+300

永济灌域控制面积广，空间变异性大，土质种类多，为了表征各灌溉区域的土壤特点，在各分干渠灌溉区域内选取其土壤组份及土壤水力特性参数的平均值输入模型中进行水盐运移模拟。

综合分析永济灌域近五年来秋浇期间渠道运行情况，秋浇配水优化时段确定为9月15日至11月23日，以每5日为一个时段，秋浇期共分为14个时段，模拟土层深度为3 m，自土壤表层起每隔20 cm设置一个节点，总共设置16个节点。0～40 cm根系分布层是盐碱地农业生产的重要影响区域[19-21]，本文将0～40 cm土层作为主要控制区域。

河套灌区春季播种一般在3月中旬至4月上旬开始，大部分区域3月底前完成春小麦播种工作。随着气温升高，冻结在土壤中的水分逐渐融化，蒸发变强，形成土壤返盐现象。本文选择以来年3月31日作为控制时间节点，保证3月底前土壤0～40 cm土层的含盐量尽可能处于适宜的含量以下。

3.2 SHAW模型的率定与验证 河套灌区由于作物收获后地表裸露，故模型忽略冠层、残留物及积雪影响，模拟土壤深度1 m，共分为5层，将秋浇期间的气象、土壤初始水盐含量、土壤物理参数输入SHAW模型，模拟土壤水盐含量变化过程。

利用2000年9月20日至2001年4月15日永联试验田冻融期土壤水盐动态观测资料对SHAW模型进行率定，利用2001—2002年的水盐动态观测资料对SHAW模型进行验证。SHAW模型率定结果如图1所示，验证结果如图2所示。

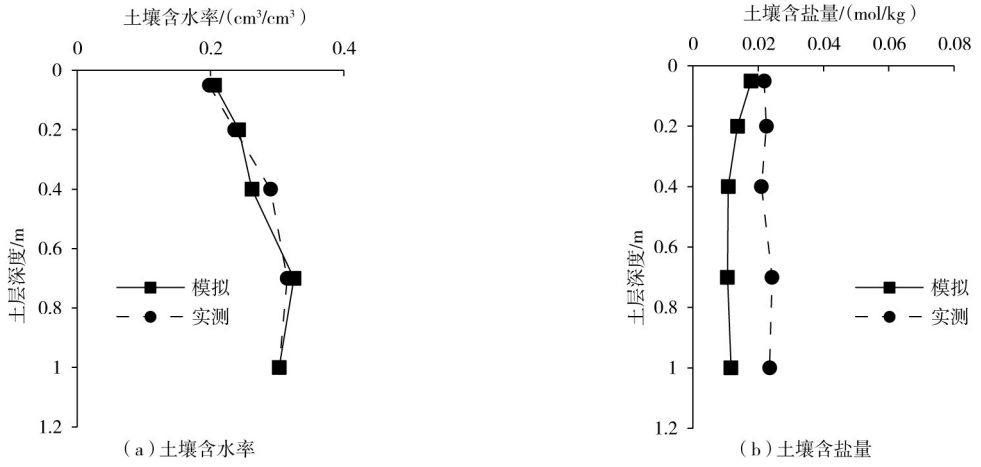


图1　SHAW模型率定结果对比(4月15日)

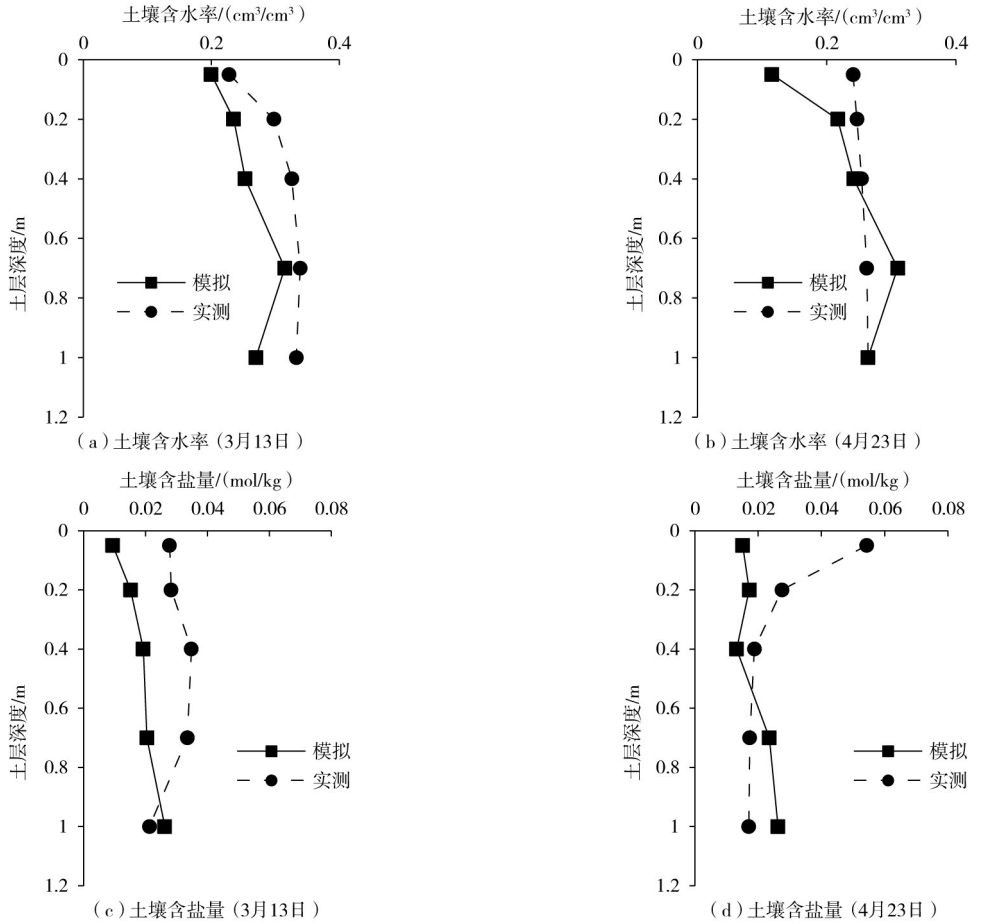


图2　SHAW验证结果对比

SHAW模型验证结果表明：土壤含水率模拟值与实测值具有良好的一致性，2002年3月13日和4月23日二者均方根误差*RMSE*分别为0.054和0.062 cm^3/cm^3，模拟值与实测值相差不大，除土壤表层以外，相对误差均小于30%；土壤含盐量的模拟结果相对稍差一些，3月13日和4月23日模拟值与实测值的均方根误差*RMSE*分别为0.014和0.019 mol/kg，特别是表层误差最大。但模拟结果能够反映盐分的变化趋势，造成含盐量误差较大的原因主要是土壤冻结融化过程中水分和盐分之间具有强烈

的耦合作用，并且盐分的时空变异性远远大于水分的时空变异性。

3.3　配水进度对比　利用前文所建立优化模型进行求解，计算得到2016年各渠道优化配水过程，结果见表2。

表2　基于最终水盐要求的永济灌域秋浇渠系优化配水结果　（单位：m^3/s）

时段	9/15–9/19	9/20–9/24	9/25–9/29	9/30–10/4	10/5–10/9	10/10–10/14	10/15–10/19	10/20–10/24	10/25–10/29	10/30–11/3	11/4–11/8	11/9–11/13	11/14–11/18	11/19–11/23
永济渠	0	0	22.4	44.2	48.53	72.86	72.51	75.01	71	72.39	42.69	41.45	31.62	0
永兰渠	0	0	0	16.94	17.62	9.88	9.75	9.69	7.47	7.46	0	0	0	0
永刚渠	0	0	0	0	0	6.99	6.99	7.01	7.09	7.59	12.17	17.75	7.98	0
西乐渠	0	0	0	0	0	8.17	13.39	14.52	20.13	21.81	21.82	23	23	0
新华渠	0	0	11.86	14.31	16.68	17.82	19.74	22.81	18.4	17.93	0	0	0	0
正梢渠	0	0	0	0	0	17.08	10.02	9.38	7.93	7.62	0	0	0	0
大退水	0	0	9.74	11.94	13.16	11.42	11.19	10.15	8.61	8.6	7.74	0	0	0

将基于最终水盐要求的优化模型所得渠道流量过程与基于预测需水过程的优化模型计算结果进行对比，永济干渠流量过程对比如图3所示，下级各分干渠流量过程对比如图4所示。

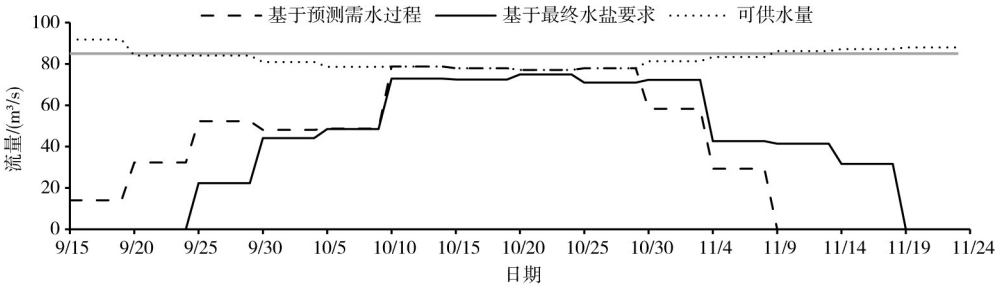


图3　两种配水情景下永济干渠流量过程对比

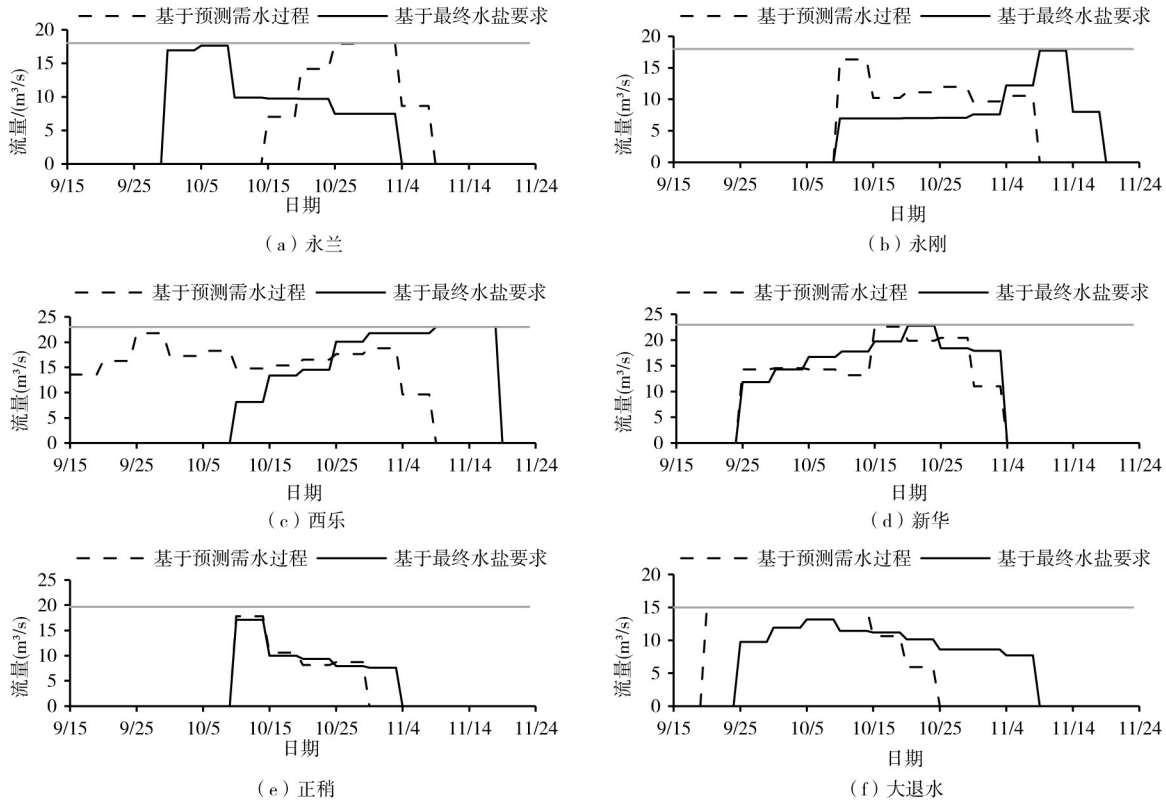


图4　两种配水情景下各分干渠流量过程对比

由图3可以看出，增加0～40 cm土层土壤水盐含量约束后，永济干渠的引水开闸时间为9月25日，向后推迟10天；关闸时间为11月18日，向后推迟10天。稳定输水阶段受来水条件影响，引水流量过程与基于需水过程优化配水模型所得结果基本相同，干渠口引水流量尽可能贴近最大可引水流量，以减少渠道输水损失量，提高渠道输水效率。干渠引水过程在时间上有一定后移，开闸后及关闸前干渠流量过程变化平稳，未出现短时间大幅度的流量波动。

下级分干渠配水时间与上级干渠配水时间相适应，开关闸门时间有一定调整，其中仅永兰渠提前15日开闸，关闸时间提前5日。新华渠和正稍渠变化不大，永刚渠、西乐渠和大退水渠配水时间有明显后移，一方面是由于这部分渠道灌溉区域需水量较大，且土壤中砂土含量占比较高，土壤保水性差，过早灌溉不利于土壤表层保水，易出现土壤表层返盐现象[22]，另一方面是为了协调各下级渠道输水总量调整后渠道的流量过程，保证上下级渠道输配水过程的平稳性。所有渠道均在11月18日前完成配水工作，早于当年土壤开始冻结时间(11月20日)，灌溉水可以在土壤冻结前入渗至土壤中。

3.4　灌溉水量分配对比　两种配水情景下永济干渠及下级分干渠毛引水量如图5所示。基于最终水盐要求情景下永济干渠口毛引水总量2.57亿 m^3，与基于预测需水过程优化配水模型结果相等，未超过上级水资源管理部门规定的2.80亿 m^3最大毛引水量指标，符合引水总量要求。下级分干渠毛引水总量存在一定的差异，基于预测需水过程的配水方式下西乐渠总引水量相对基于最终水盐要求的配水方式多引水1478.3万 m^3，其余分干渠引水量均不同程度减少，永兰渠、永刚渠、新华渠、正稍渠、大退水渠分别少引水564.4、162.0、400.1、292.6和42.5万 m^3，该部分水量全部由西乐渠引取，分干渠间存在一定的灌溉引水不平衡现象。

两种配水模型所得渠道输水流量过程的差异主要在错峰时间上，输水流量大小区别不大，两配水方案损失总量差别较小，上下两级渠道输水损失总量分别为0.127亿 m^3和0.128亿 m^3，渠道输水效率分别为95.2%和95.1%。相对于春播期田间土壤表层水盐含量分布的改善程度，渠道输水损失量的变化幅度非常微小。

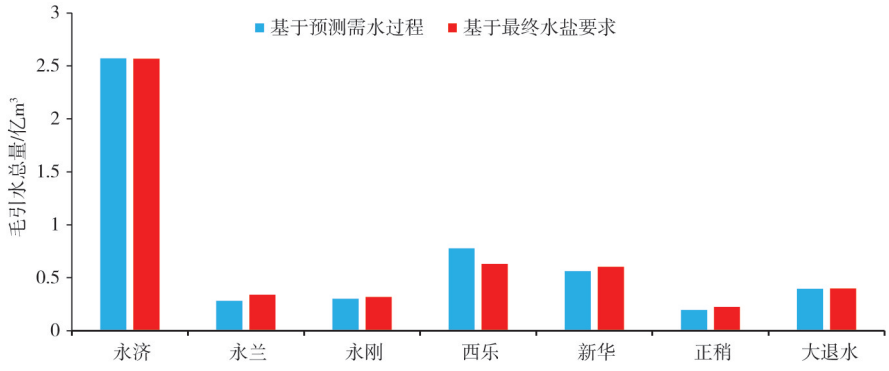


图5　两种配水情景下各渠道毛引水量对比图

3.5　水盐满足程度对比　秋浇开始前，田间作物相继成熟，农户忙于从事秋收作业，灌区自秋灌后经历一段停水过程，在强烈的土壤蒸发作用下，土壤含水率较低，土壤表面盐碱化问题严重。由图6可以看出，永济灌域下级分干渠灌溉区域内土壤表层盐分含量明显超标，盐分含量剖面线呈现上下凸出，中部凹陷的形式。其中西乐渠、新华渠及大退水渠超标量相对较大，表层盐分含量在600 mg/L以上，是适宜含盐量的2~3倍，永兰渠超标量最小，表层含盐量为337.8 mg/L，超标1倍左右。

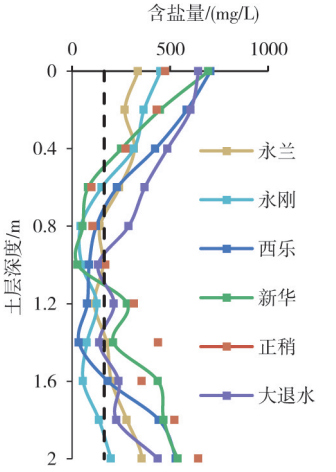
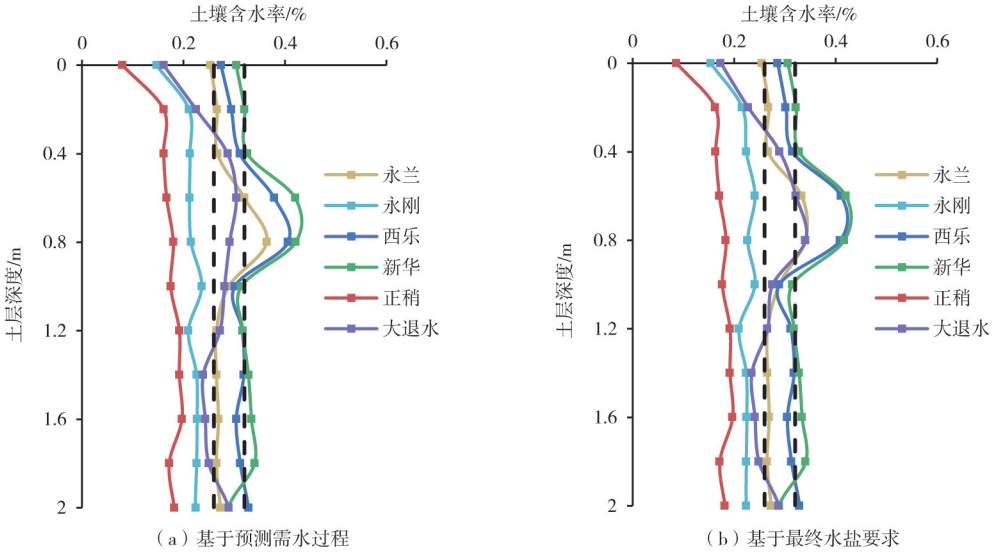


图6　2016年秋浇前土壤含盐量剖面图

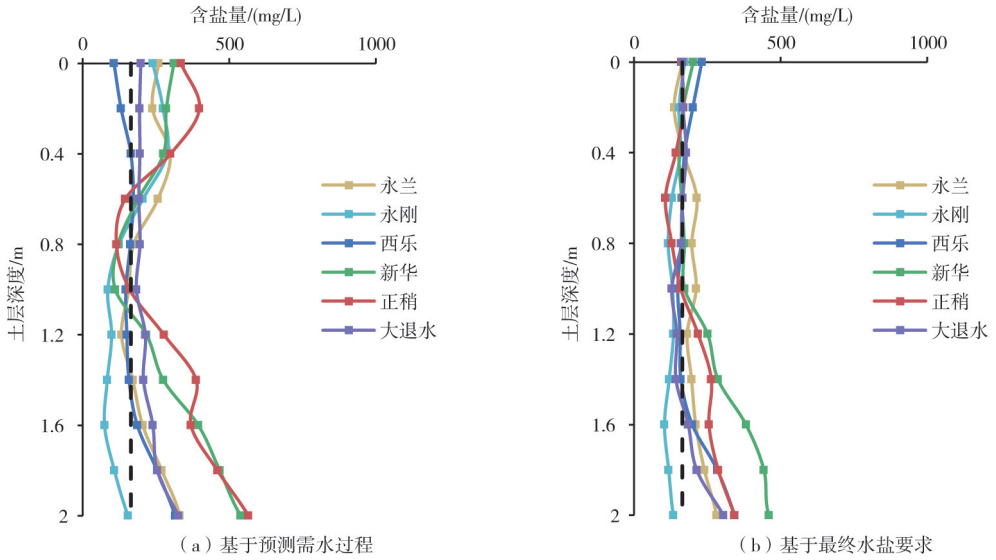
由图7可以看出，春播初期各灌溉区域0～40 cm土层土壤含水率均低于适宜含水率上限，不存在土壤“潮塌”现象。灌溉水进入田间后，自土壤表面向土壤下层运动，表层土壤最先达到饱和，土层含水率自上而下依次达到土壤饱和含水率，直至灌水结束。在蒸发

及入渗作用下，土壤含水率自上而下逐渐开始降低，因此永兰、西乐、新华分干渠土壤含水率呈现表层低，中间高的形态，永刚、正稍、大退水分干渠灌溉区域内由于土壤中砂性土占比较高，保水性相对较差，春播初期表层土壤含水率低于其他分干渠灌溉区域。



（a）基于预测需水过程　　（b）基于最终水盐要求

图 7　两种配水情景下土壤含水率（3 月 31 日）



（a）基于预测需水过程　　（b）基于最终水盐要求

图 8　两种配水情景下土壤含盐量（3 月 31 日）

表 3　基于不同方法配水后 0 ~ 40 cm 土层含盐量对比　　（单位：mg/L）

土层深度/m	秋浇前			基于预测需水过程			基于最终水盐含量要求		
	0	0.2	0.4	0	0.2	0.4	0	0.2	0.4
永兰	337.86	269.51	318.58	258.54	237.91	298.20	164.16	136.64	167.89
永刚	452.53	366.99	315.41	239.16	273.92	287.76	172.39	153.20	157.70
西乐	707.62	585.86	425.72	106.54	130.70	164.10	230.62	200.25	172.15
新华	697.14	450.16	252.78	310.47	285.13	275.09	201.24	167.74	152.89
正稍	477.08	433.70	275.68	334.84	397.76	299.37	160.52	168.68	142.05
大退水	646.12	606.03	487.32	197.75	193.79	194.80	165.28	166.82	177.60

灌水量的大小直接影响秋浇期田间土壤压盐效果，由图 8 可以看出，田间 0 ~ 40 cm 土层含盐量相对秋浇前均有显著降低，在水分带动下，大量盐分由土壤表层向土壤深层运动。按照基于预测需水过程优化模型得到的配水方案进行灌水后，各灌溉区域 0 ~ 40 cm 土层盐分淋洗效果差异性大，由

表3可以看出，西乐渠存在一定过量灌溉的现象，0～40 cm土层中的平均盐分含量较适宜含盐量上限低18%，其他分干渠灌溉区域0～40 cm土层土壤平均含盐量均高于适宜含盐量上限，永兰、永刚、新华、正稍分干渠灌溉区域0～40 cm土层平均含盐量较适宜含盐量高60%以上，大退水分干渠高于适宜含盐量上限19%。增加田间水分盐分模型后，各分干渠灌溉区域内土壤表层含盐量均接近于适宜含盐量上限，表层土壤含盐量剖面线相对集中，差异性小，各灌溉区域内平均盐分超标量均不超过5%，有利于促进配水方案的实施，保证输配水计划在空间上的公平性。

4 结论

本文建立了不需要作物需水预测，而面向作物春播期水盐要求的新型渠系优化配水模型，并在永济灌域秋浇灌溉过程中开展了实例研究。研究表明：新模型对来水情况及气象条件具有更好的适应能力，可以有效地避免因需水预测误差可能带来的配水偏差，提前掌握不同配水计划实施后田间土壤水盐分布的响应规律，在协调下级用水户用水冲突时充分考虑上下级管理者的引水利益，满足渠道安全运行及水资源总量控制要求的同时，保证各灌溉片区间的公平性，使春播初期0~40cm土层土壤平均盐分超标量由60%以上降低至5%以下，在此条件下，实现渠系输水损失量的最小化。

采用本文所建立优化模型得到的渠系优化配水过程更加符合秋浇配水的实际要求，在实际操作中具有良好的运用价值。此模型可以应用于作物生育期灌溉时的渠系优化配水以及我国北方其它地区盐碱土壤的灌溉配水问题。

参 考 文 献：

[1] 赵瑞珏，王修贵，韩旭东，等．基于渗漏损失的渠系水利用系数分析[J]．节水灌溉，2019(6)：72-76．

[2] LINKER R，SYLAIOS G，IOSLOVICH I．Optimization of irrigation scheduling using genetic algorithms and AquaCrop：a case study for cotton in northern Greece[C]//Proceedings of 2013 International Conference on Materials，Architecture and Engineering Technology，Beijing，2013．

[3] GUO S，WANG J，ZHANG F，et al．An integrated water-saving and quality-guarantee uncertain programming approach for the optimal irrigation scheduling of seed maize in arid regions[J]．Water，2018，10(7)：908-923．

[4] 王斌，张展羽，张国华，等．基于自由搜索的灌区优化配水模型研究[J]．水利学报，2008，39(11)：1239-1243．

[5] GARG N K，DADHICH S M．Integrated non-linear model for optimal cropping pattern and irrigation scheduling under deficit irrigation[J]．Agricultural Water Management，2014，140：1-13．

[6] SADATI S，SPEELMAN S，SABOUHI M，et al．Optimal irrigation water allocation using a genetic algorithm under various weather conditions[J]．Water，2014，6(10)：3068-3084．

[7] 沈荣开，张瑜芳．作物水分生产函数与农田非充分灌溉研究述评[J]．水科学进展，1995(3)：248-254．

[8] 彭世彰，边立明，朱成立．作物水分生产函数的研究与发展[J]．水利水电科技进展，2000(1)：17-20．

[9] 刘照，程帅，李华朋，等．基于双层粒子群算法的下级渠道流量不等时渠系优化配水[J]．干旱地区农业研究，2017，35(03)：88-93．

[10] 郭珊珊，郭萍，李茉．基于多目标遗传算法的渠系配水优化模型[J]．中国农业大学学报，2017，22(7)：71-77．

[11] GHUMMAN A R，KHAN M Z，KHAN M J．Use of numerical modelling for management of canal irrigation water[J]．Irrigation and Drainage，2006，55(4)：445-458．

[12] 张国华，张展羽，邵光成，等．基于粒子群优化算法的灌溉渠道配水优化模型研究[J]．水利学报，2006，37(8)：1004-1008．

[13] CARRIÓN F，SANCHEZ V J，CORCOLES J I，et al．Optimization of groundwater abstraction system and distribution pipe in pressurized irrigation systems for minimum cost[J]．Irrigation Science，2016，34(2)：145-159．

[14] 郭元裕．农田水利学[M]．北京：中国水利水电出版社，1997．

[15] FLERCHINGER G N, SAXTON K E. Simultaneous heat and water model of a freezing snow-residue-soil system. I. Theory and development[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1989, 32(2): 565-571.
[16] FLERCHINGER G N, SAXTON K E. Simultaneous heat and water model of a freezing snow-residue-soil system. II. Field verification[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1989, 32(2): 573-576.
[17] 李瑞平. 冻融土壤水热盐运移规律及其SHAW模型模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
[18] HUANG M, GALLICHAND J. Use of the SHAW model to assess soil water recovery after apple trees in the gully region of the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(1/2): 67-76.
[19] ZHAO Y G, LI Y Y, WANG J, et al. Buried straw layer plus plastic mulching reduces soil salinity and increases sunflower yield in saline soils[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155(1): 363-370.
[20] 卢闯, 逄焕成, 张宏媛, 等. 春灌结合秸秆隔层促进土壤脱盐增加微生物多样性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 87-94.
[21] 遭晋松, 童文杰, 王玉浩, 等. 河套灌区小麦耐盐性指标筛选与评价[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(6): 54-60.
[22] 李瑞平, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 基于水热耦合模型的干旱寒冷地区冻融土壤水热盐运移规律研究[J]. 水利学报, 2009, 40(4): 22-31.

Study on optimal water distribution model of canal system for autumn irrigation in Hetao Irrigation Area based on SHAW model

SHEN Laiyin[1, 3], HU Tiesong[1], ZHOU Shan[1], FU Guoyi[2], HUANG Jiesheng[1]

(1. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan* 430072, *China*;
2. *Inner Mongolia Hetao Irrigation District General Administration, Bayannaoer* 015000, *China*;
3. *Hubei International Irrigation and Drainage Research and Training Center, Hubei Water Resources Research Institute, Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: Autumn irrigation for soil moisture conservation and salt leaching in Hetao irrigation area is to meet the demands of water and salt for the next spring sowing crops. In view of the problems of strong dependence and low accuracy of medium and long-term prediction in traditional water distribution of canal system based on crop water demand prediction, a framework of optimal water delivery scheduling model without crop water requirement prediction is proposed in this paper. According to the demands of soil water and salt in early spring sowing stage, the SHAW model is embedded into optimal water distribution to determine the autumn water distribution plan. A case study on the water distribution plan of autumn irrigation in Yongji of Hetao irrigation area in 2016 shows that: comparing the traditional water distribution method based on water demand prediction, the water distribution plan obtained by new method can significantly improve the salt leaching effect without increasing amount of water diversion at the head of the canal and total water loss, so that the soil layer condition of 0~40cm gets more suitable for crops at the beginning of spring sowing. The superscalar of average salinity is reduced from more than 60% to less than 5%, and the fairness of water distribution is also improved.

Keywords: autumn irrigation; optimal water distribution of canal system; water and salt transport process; water transport loss

(责任编辑: 祁 伟)