

农业退水分层利用装置设计与数值模拟

孙志林 李众彻 方诗标 许 丹
(浙江大学港口海岸与近海工程研究所, 杭州 310058)

摘要: 从理论可行性出发,初步设计一种分流装置,再从功能和效率的角度对其进行改进,最后采用计算流体力学软件 Fluent 对农业退水分流过程进行数值模拟,对比分析不同流速下的盐度场和速度场,结果表明该分流装置可为最终设计提供参考。试验工况分3组进行,设定入口流速作为唯一变量,3组试验均假定相同的入口盐度分布函数。截取2个Y轴剖面的流速场云图和4个X轴剖面的盐度场云图进行对比分析。结果表明,分流装置可以对不同盐度的农业退水进行分流。上导流槽得到低盐度农业退水,下导流槽得到较高盐度退水。分流的效率取决于装置尺寸、分层流流速和盐度分布等因素,可根据实际情况进行调整和优化。

关键词: 农业退水; 分流装置; 排碱渠; 数值模拟; 盐碱地

中图分类号: S24; TV93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)06-0203-07

Device Design and Numerical Simulation of Agricultural Wastewater Layered Utilization

SUN Zhilin LI Zhongche FANG Shibiao XU Dan
(Institute of Port, Coastal and Offshore Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The rainfall in the south region of Xinjiang is rare which caused severe problems of soil salinization. The salt leaching of farmland and wastewater draining from irrigating farmland are rich in sodium which indirectly leads to the ecological pollution. To effectively deal with the excessive salinity of agricultural wastewater from alkali draining ditches, a shunting device was invented. Firstly, the feasibility of the theory to design the preliminary device was introduced. Secondly, improvement of the device in its functionality and efficiency was given. Finally, numerical simulation of the streaming process of agricultural wastewater based on the computational fluid dynamics utilizing the software fluent was obtained. The derived results were used for the ultimate design of the shunting device. The test conditions were categorized into three groups. The inlet flow rate was set as the only variable, and the spatial distribution of inlet salinity among three groups was assumed to be identical. Two Y-axis sectional velocity field cloud diagrams and four X-axis sectional salinity field cloud diagrams were selected for detailed comparison. It showed that the shunting device can separate water based on salinity distribution, and agricultural wastewater with low salinity was obtained from the lower diversion trench, vice versa. The efficiency of the shunting device depended on its size, stratification flow velocity and salinity distribution. Adjustment and optimization should be subjected to the actual situation.

Key words: agricultural wastewater; shunting device; alkali draining ditches; numerical simulation; saline land

引言

土地盐碱化严重制约南疆地区的社会发展。农业部门一般采取水利、生物、化学等治理措施改良盐

碱地。水利工程治理措施主要是修建水库、排水渠道网络,建立较为完善的灌溉系统和现代化排水系统^[1-10]。生物治理措施主要是培育耐盐植物,利用生物排水降低地下水位,减少地面蒸发,防止土地表

收稿日期: 2016-09-23 修回日期: 2017-01-20

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(2120101110108)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015XZZX002-01)和水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07424-001)

作者简介: 孙志林(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事水沙动力学、河口海岸数值模拟和水资源利用研究,E-mail: oceansun@zju.edu.cn

面积盐^[11-15]。化学治理措施则是在盐渍化土地中施加石膏、矿渣等改良剂,降低土地中的盐碱含量^[16-19]。迄今为止,新疆大面积改良土地盐渍化的方式仍是以“排水洗盐”为主。然而大面积推广使用“排水洗盐”会使未经处理的盐碱水随意排放,不仅闲置有限的水资源,而且威胁周围生态环境。因此,需要通过更为科学合理的技术措施将盐碱水的矿化度降低,以减轻废弃盐碱水对环境的恶劣影响。

新疆地区的排碱干渠有着多个入水口,各个支排的退水盐度高低不一,且常年处于太阳高温辐射量下,具备形成分层流的条件。关于分层流的数值模拟,国内学者已经进行了初步的探索,并取得一定成果。包芸等^[20]运用三维斜压模型对珠江口伶仃洋区域盐度分层进行了数值模拟,模拟结果与实测资料基本吻合。胡振红等^[21]建立了温度和盐度分层流的 $k-\varepsilon$ 模型,进行了数值模拟计算,计算结果正确地反映了分层及紊动特征,与实测结果吻合较好。

本文设计水体分流装置^[22],该装置可将分层水体以一种纯物理方式分流。在此基础上,进一步改进装置,提高水体分离的精度并实现完全自动化。通过 Fluent 计算流体力学软件对分层流体流经分流装置的过程进行数值模拟,对比分析不同流速下的盐度场和速度场,为装置实际使用提供优化建议。

1 数学模型

1.1 控制方程

控制方程采用雷诺平均方程组(RANS),连续方程与动量方程为笛卡尔坐标系下的张量形式,湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,盐度计算采用组分输运方程^[23]。

连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

式中 ρ ——流体密度 t ——时间
 u_i ——速度分量
 x_i ——笛卡尔坐标系下对应的方向

动量方程为

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \tag{2}$$

式中 p ——压力 u'_i, u'_j ——速度脉动量
 μ ——动力粘性系数
 δ_{ij} ——狄克拉函数 u_j ——速度分量
 x_j, x_l ——笛卡尔坐标系下对应的方向

k 方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \tag{3}$$

其中 $\mu_t = \rho C_\mu k^2 \varepsilon^{-1}$ $C_\mu = 0.09$
式中 k ——湍动能 μ_t ——涡粘性系数
 G_k ——由层流速度梯度而产生的湍流动能
 G_b ——浮力而产生的湍流动能
 Y_M ——扩散产生的波动
 S_k ——用户自定义源项
 σ_k —— k 方程的湍流 Prandtl 数,取 1.0
 ε ——湍流耗散率

ε 方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \tag{4}$$

其中 $C_{1\varepsilon} = 1.44$ $C_{2\varepsilon} = 1.92$ $C_{3\varepsilon} = \tanh |vu^{-1}|$
式中 $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ ——常数项
 v ——沿重力方向速度分量
 u ——平行重力方向速度分量
 S_ε ——用户自定义源项
 σ_ε —— ε 方程的湍流 Prandtl 数,取 1.32

盐度 c 控制方程为

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial u_j c}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_c \frac{\partial u_j c}{\partial x_j} - u_j c \right) + S_c \tag{5}$$

式中 Γ_c ——盐度扩散系数
 S_c ——盐度源项

1.2 边界条件

入口边界设置为速度入口,速度通过用户自定义函数(User defined function,UDF)设置为充分发展流动状态,湍动强度设置为 5%,同时盐度在入口处通过 UDF 按照设计浓度分别加入计算系统。

出口边界为无回流自由出口。

在固体壁面附近的粘性底层内用标准壁面函数来处理^[24]。

1.3 数值方法

在笛卡尔坐标系下,式(1)~(4)可写成统一形式

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial u_j \varphi}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial u_j \varphi}{\partial x_j} - u_j \varphi \right) + S \tag{6}$$

式中 φ —— u_i, k, ε S ——源项
 Γ ——广义扩散系数

采用有限控制体积法来离散计算区域,然后在每个控制体积中对微分方程进行积分,再把积分方程线性化,得到各未知变量的代数方程组,最后求解

方程组即可求出各未知变量。采用 Simple 算法对压力和速度场进行耦合计算。流场迭代稳定后计算盐度场,模拟中采用单向耦合,盐度计算不影响流场计算。

2 模型设计与数值模拟

2.1 装置的原理与改进

初始分流装置如图 1 所示,该装置包括左分流装置和与左分流装置倒置的右分流装置。左分流装置和右分流装置固定连接且相互平行,固定安装在河渠的横截面上。因为浮力作用,左浮力球和右浮力球分别带动左闸门和右闸门上下平移,由于密度和盐度呈正相关关系,盐度低的水从左闸门上方流出,盐度高的水从右闸门下方流出,从而实现排碱渠不同浓度水体的分流。该装置用纯物理方法分流,具有结构简单、造价低廉等特点,目前已获授权。

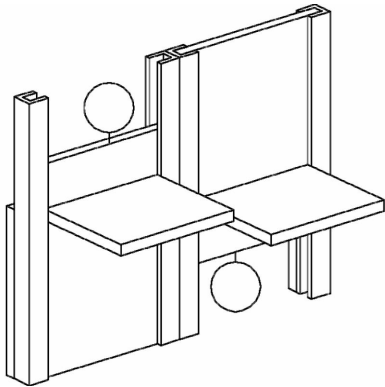


图 1 初始分流装置
Fig. 1 Initial shunting device

初始分流装置虽优点明显,但也存在分离精度不高、无法远程控制等不足,因此在最初的发明专利基础上做了进一步改进,设计了一种带无线收发功能的盐水分流装置^[25]。如图 2 所示,该装置包括左分流装置和右分流装置。左分流装置和右分流装置固定连接且相互平行,固定安装在排碱渠的横截面上。因上、下层水体的盐度不同,导致置于上、下导

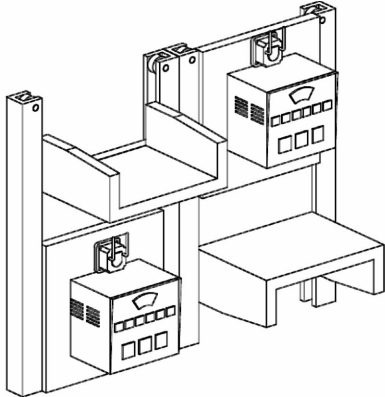


图 2 带无线收发功能的分流装置
Fig. 2 Shunting device with wireless transceiver function

流槽口边缘的传感器产生不同的电信号,进而驱使左右电动机箱中的电动机分别带动左闸门和右闸门进行相应的上下平移,使盐度低的水从左闸门上方流出,盐度高的水从右闸门下方流出,实现不同浓度盐水的分流。其后附带的导流槽可将分离后的液体导流,上层盐度较低的水可以直接投入农业灌溉,下层较高浓度盐水则可以晒盐、提盐,从而达到防止土地盐碱化的目的。装置左右均附带无线收发器,具备实时可监控以及突发情况下可人工干预的功能,能很好地适应环境变化,达到完全自动化。

2.2 研究对象与试验工况

本文的研究对象为置于排碱渠的分流装置,实际模型简化后的计算模型如图 3 所示, X 轴方向是分层流体流动方向, Z 轴方向垂直向上, Y 轴方向和分层流体流动方向垂直。排碱渠宽 4.0 m、深 1.5 m、长 12.0 m,其横截面为矩形,在排碱渠 X 方向 2.0 m 处,垂流体流动方向放置分流装置,分流装置计算模型简化为一块挡板,在挡板的左上方和右下方各开 1 个矩形导流槽口,2 个导流槽口尺寸一致,宽 2.0 m、高 0.4 m,导流槽口后均连接长 10.0 m 的导流槽,上下导流槽底部为平坡。各导流槽末端连接水泵,如有需要,可为导流槽中水体的流动提供持续动力。

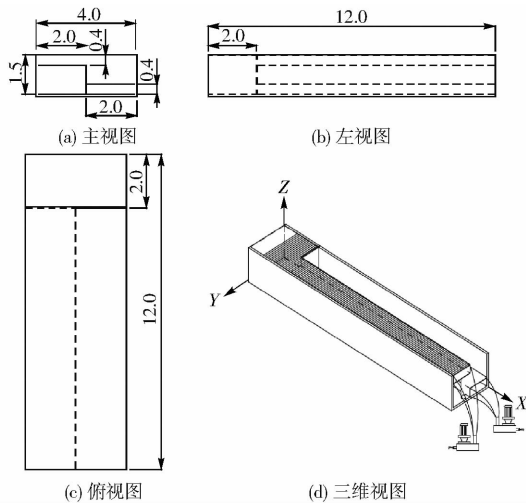


图 3 排碱渠放置分流装置三视图(单位:m)
Fig. 3 Three-view graphs of shunting device in alkali draining ditches

对流体计算域采用六面体网格划分,考虑在壁面附近和挡板水流分离处流场参数变化梯度比较大,因此网格划分时,此部分采用网格加密处理,在边界第 1 层网格设置为 0.005 m,网格扩展比为 1.2,经过验证,设置符合壁面网格符合标准壁面函数使用条件。通过网格无关性验证。

模拟分 3 组试验工况,第 1、2、3 组的入口流速分别为 $u_1 = 0.1 \text{ m/s}$, $u_2 = 0.2 \text{ m/s}$, $u_3 = 0.5 \text{ m/s}$,这

3 个流速为典型试验工况,分别模拟排碱渠中流体在枯水季节、一般季节和旺水季节 3 种情况下的流动。每组试验除流速条件不一样外,其他条件均一致。入口盐度的分布设置采用有关文献的实测结果,取底部盐度是表面盐度的 3 倍^[20]。分层流体盐度变化函数较好地刻画了盐度渐进变化规律,函数曲线如图 4 所示。由函数关系式可知,水表面($X = 0$ m)盐度为 1.0 g/L;水底($X = 1.5$ m)盐度为 3.1 g/L。水底盐度取 3.0 g/L 左右,基于绝大多数植物都不能在此浓度盐水灌溉下存活的考虑,因此当浓度接近 3.0 g/L 时,已经不适合灌溉,而应该分离后作他用。

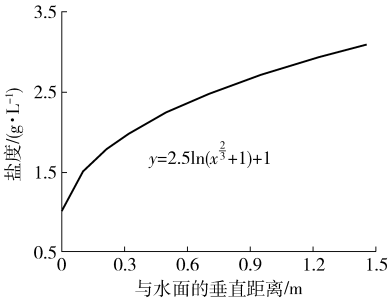


图 4 入口盐度分布函数

Fig. 4 Distribution function of salinity at inlet

3 结果与分析

图 5 ~ 11 是 3 组不同工况下,分层流体达到稳态时,流速和盐度分布图。其中,图 5 ~ 7 为下导流槽($Y = 1.0$ m 剖面)和上导流槽($Y = 3.0$ m 剖面)在 X 轴方向上达到稳态时的流速分布情况。图 8 ~ 11 分别是 X 为 2.1、4.0、6.0、8.0 m 4 个不同剖面下的盐度分布。

由图 5 ~ 7 可看出,无论是 $u_1 = 0.1$ m/s, $u_2 = 0.2$ m/s, $u_3 = 0.5$ m/s 的何种工况,在上、下导流槽入口处(也就是 $X = 2.0$ m 处附近),盐水的流速快速增加,均达到各工况下入口流速的 4 倍左右,但盐水在导流槽的后续流动中,速度基本没有变化。这是由于上、下导流槽横截面变小,且上、下导流槽都是管流,不存在盐碱水溢出的可能。排碱渠的宽 4.0 m、高 1.5 m,横截面积 6.0 m²,而分流装置上、下导流槽宽 2.0 m、高 0.4 m,横截面积之和 1.6 m²,因此根据流体的质量守恒定律和连续性假设,流量不变,面积减小,必然导致流速增加。

在 $X = 2.0$ m 处上部,可以明显看出盐水的流速快速下降为零,这是由于分流装置的右截流板发挥了截流的作用,将分流装置迎水面右边浓度较低的稀盐水截流,因此速度快速降为零。图 5 ~ 7 的 b 图,在 $X = 2.0$ m 处流速快速降为零,原因和 a 图

类似,因为分流装置下部的截流板将分流装置迎水面左边浓度较高的盐水截流。

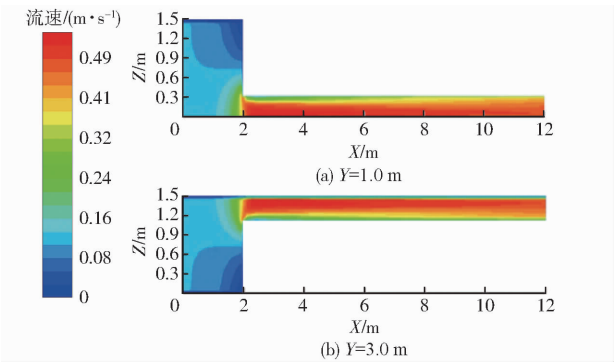


图 5 第 1 组 ($u_1 = 0.1$ m/s) Y 轴剖面的流速场

Fig. 5 Velocity fields of Y -axis transverse section for the first group ($u_1 = 0.1$ m/s)

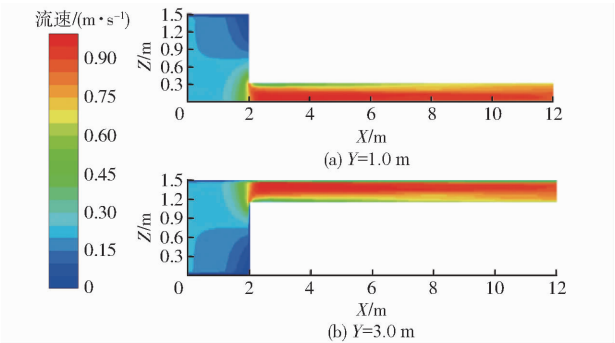


图 6 第 2 组 ($u_2 = 0.2$ m/s) Y 轴剖面的流速场

Fig. 6 Velocity fields of Y -axis transverse section for the second group ($u_2 = 0.2$ m/s)

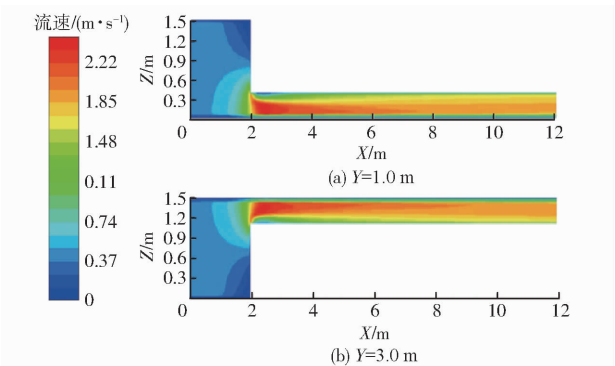


图 7 第 3 组 ($u_3 = 0.5$ m/s) Y 轴剖面的流速场

Fig. 7 Velocity fields of Y -axis transverse section for the third group ($u_3 = 0.5$ m/s)

由图 8 ~ 11 可以看出,分流装置能实现分流的功能:上导流槽的平均盐度低于下导流槽的平均盐度,上导流槽分流出的低盐度的水,下导流槽分流出的较高盐度的水。流速越快的盐水,其 X 剖面的盐度分布趋于稳定的时间也越长。

根据图 4 所示盐度变化函数,当与水面的垂直距离为 0.4 m 时,对应的盐度为 2.08 g/L。3 组工况下,上导流槽 X 轴横截面上盐水的平均盐度约等于上导流槽槽底对应深度的盐度。该现象说明,上导

流槽分流后的盐水盐度分布基本取决于入口处的盐度分布函数和上导流槽槽底对应深度。因此,在排碱渠中使用分流装置时,如果要提取低于某一盐度的分层流体,则应该调高分流装置上导流槽,使上导流槽槽底对应深度的盐度低于该值,否则提取的分层流体容易盐度过高,影响分流效果。

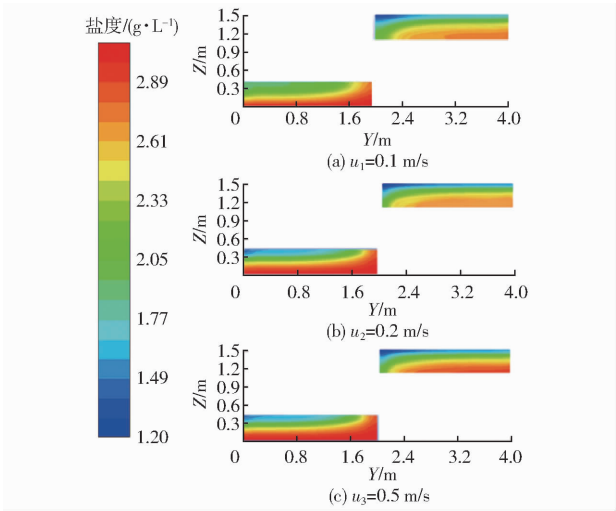


图 8 3 组不同流速下, $X = 2.1$ m 剖面的盐度场

Fig. 8 Salinity fields in transverse section of $X = 2.1$ m under three different velocities

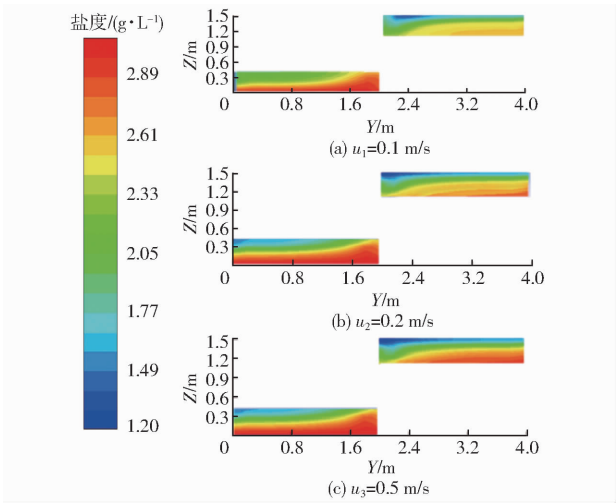


图 9 3 组不同流速下, $X = 4.0$ m 剖面的盐度场

Fig. 9 Salinity fields in transverse section of $X = 4.0$ m under three different velocities

相同的 X 轴截面,不同流速对比可以看出, $u_1 = 0.1$ m/s 工况的分流效果要优于 $u_2 = 0.2$ m/s 和 $u_3 = 0.5$ m/s 工况,进一步观察可以发现 $u_2 = 0.2$ m/s 和 $u_3 = 0.5$ m/s 工况之间的分流效果差别不大。该现象说明,为了使上导流槽尽可能分流浓度较低的盐水,在实际的排碱渠中使用分流装置时,应当适当调低上导流槽的流速,因为流体流速越大越容易从层流向紊流发展,这会导致流体质点的运动极不规则,由于脉动的急剧混掺,流体动量、能量、温度以

及含有物的浓度扩散速率都会增大。这样的流动会破坏原来的盐度分层现象,使得分流装置的分流作用减弱。

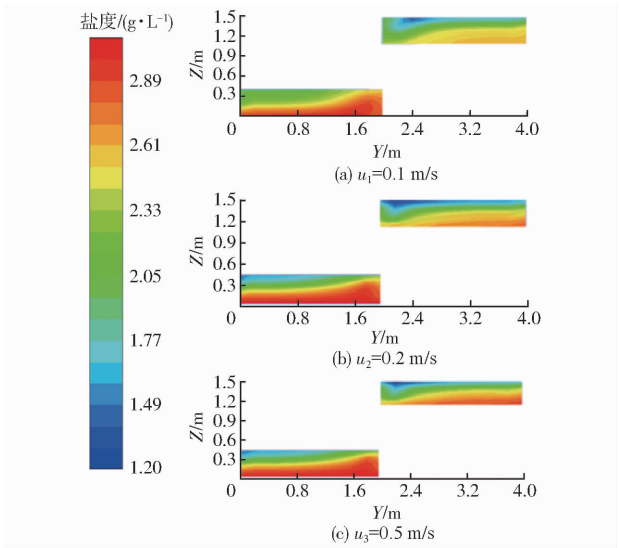


图 10 3 组不同流速下, $X = 6.0$ m 剖面的盐度场

Fig. 10 Salinity fields in transverse section of $X = 6.0$ m under three different velocities

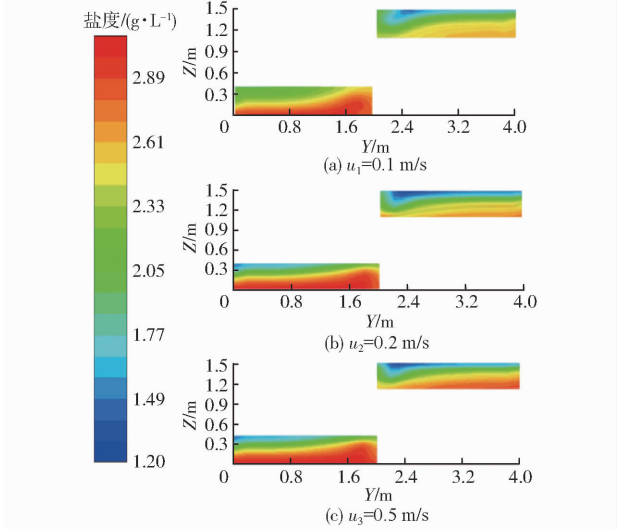


图 11 3 组不同流速下, $X = 8.0$ m 剖面的盐度场

Fig. 11 Salinity fields in transverse section of $X = 8.0$ m under three different velocities

下导流槽的盐水流动速度沿程均比较稳定,变化不明显,但是可以看出,随着盐水的流动,3 个工况下的下导流槽 X 截面的盐度均有所下降。分流装置下导流槽设置的目的是为了分流较高浓度的盐水,若盐水浓度变小,则会与设想的结果背道而驰。进一步深入比较各个工况下导流槽的盐度分布可以看出, $u_1 = 0.1$ m/s 工况的下导流槽盐度分布比 $u_2 = 0.2$ m/s 和 $u_3 = 0.5$ m/s 工况要稳定,沿程流动中,盐水浓度更不易变小。其原因和上导流槽类似,因为流体流速越大,液体质点作不规则运动,互相混掺,轨迹越曲折混乱,下方较高浓度的盐水和上方低

浓度盐水掺混,致使下方导流槽分流出的盐水浓度变低。为了提高下导流槽的分流效率,可以减小下导流槽横截面的宽度。

4 结 论

(1)分流装置上导流槽旨在分流低盐度的水体,上导流槽分流后的退水浓度很大部分取决于入口处盐度分布和上导流槽槽底对应的深度。因此,在排碱渠中使用分流装置时,若想充分降低上导流槽分流出的盐水浓度,在实际工作条件允许的情况下,可以选择抬高上导流槽的槽底。

(2)降低下导流槽槽底可以提高下导流槽的分流效果,使得其分流的盐水浓度得到提高,但是这样会使得下导流槽的横截面积变小,影响截面的流量,降低分流效率,在实际使用中需要综合考虑。

(3)无论对于上导流槽还是下导流槽,降低退水流速都是提高分流效果的有效手段,因此入口处分层盐水流速不应过快,否则退水会在流动中快速掺混,分流装置达不到分流的目的。但是入口处流速过低,则会导致分流的效率降低。故在实际使用过程中,需要在分流效率和分流效果方面做一定的权衡。

参 考 文 献

1 张珂萌,牛文全,汪有科,等. 微咸水微润灌溉下土壤盐运移特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1):175 – 182. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170123&flag=1. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 01. 023.

ZHANG Kemeng, NIU Wenquan, WANG Youke, et al. Characteristics of water and salt movement in soil under moistube-irrigation with brackish water[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 175 – 182. (in Chinese)

2 BAHCECI I, NACAR A S. Subsurface drainage and salt leaching in irrigated land in southeast Turkey[J]. Irrigation and Drainage, 2009, 58(3): 346 – 356.

3 姚宝林,李光永,叶含春,等. 干旱绿洲区膜下滴灌棉田土壤盐分时空变化特征研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 151 – 161. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160120&flag=1. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 01. 020.

YAO Baolin, LI Guangyong, YE Hanchun, et al. Characteristics of spatial and temporal changes in soil salt content in cotton fields under mulched drip irrigation in arid oasis regions[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 151 – 161. (in Chinese)

4 RITZEMA H P, SATYANARAYANA T V, RAMAN S, et al. Subsurface drainage to combat waterlogging and salinity in irrigated lands in India:lessons learned in farmers’ fields[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(3): 179 – 189.

5 NAVARRO J M, GARRIDO C, FLORES P, et al. The effect of salinity on yield and fruit quality of pepper grown in perlite[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2010, 8(1): 142 – 150.

6 郭丽,郑春莲,曹彩云,等. 长期咸水灌溉对小麦光合特性与土壤盐分的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 183 – 190. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170124&flag=1. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 01. 024.

GUO Li, ZHENG Chunlian, CAO Caiyun, et al. Effect of long-term saline water irrigation on photosynthetic characteristics of winter wheat and soil salt content[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 183 – 190. (in Chinese)

7 王振华,裴磊,郑旭荣,等. 盐碱地滴灌春小麦光合特性与耐盐指标研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 65 – 72, 104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160410&flag=1. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 04. 010.

WANG Zhenhua, PEI Lei, ZHENG Xurong, et al. Photosynthetic characteristics and salt-tolerance indexes of spring wheat with drip irrigation in saline-alkali soils[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 65 – 72, 104. (in Chinese)

8 QADIR M, GHAFOR A, MURTAZA G. Amelioration strategies for saline soils: a review[J]. Land Degradation and Development, 2000, 11(6): 501 – 521.

9 KELLENERS T J, CHAUDHRY M R. Drainage water salinity of tubewells and pipe drains;a case study from Pakistan[J]. Agricultural Water Management, 1998, 37(1): 41 – 53.

10 RAO K V G K, LEEDS-HARRISON P B. Desalinization with subsurface drainage[J]. Agricultural Water Management, 1991, 19(4): 303 – 311.

11 AKHTER J, MURRAY R, MAHMOOD K, et al. Improvement of degraded physical of a saline-sodic soil by reclamation with kallarr grass(*Leptochloa fusca*)[J]. Plant and Soil, 2004,258(1): 207 – 216.

12 RAVINDRAN K C, VENKATESAN K, BALAKRISHNAN V, et al. Restoration of saline land by halophytes for Indian soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39(10): 2661 – 2664.

13 REDDY M P, SHAH M T, PATOLIA J S. *Salvadora persica*, a potential species for industrial oil production in semiarid saline and alkali soils[J]. Industrial Crops and Products, 2008, 28(3): 273 – 278.

14 QADIR M, STEFFENS D, YAN F, et al. Sodium removal from a calcareous saline-sodic soil through leaching and plant uptake during phytoremediation[J]. Land Degradation & Development, 2003, 14(3): 301 – 307.

15 MADSEN P A, MULLIGAN D R. Effect of NaCl on emergence and growth of a range of provenances of *Eucalyptus ciriodora*, *Eucalyptus populnea*, *Eucalyptus camaldulensis* and *Acacia salicina*[J]. Forest Ecology Management, 2006, 228(1 – 3): 152 – 159.

16 杨军, 孙兆军, 刘吉利, 等. 脱硫石膏糠醛渣对新垦龟裂碱土的改良洗盐效果[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 128 – 135.
YANG Jun, SUN Zhaojun, LIU Jili, et al. Effects of saline improvement and leaching of desulphurized gypsum combined with furfural residue in newly reclaimed farmland crack alkaline soil[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17): 128 – 135. (in Chinese)

17 吴军虎, 陶汪海, 王海洋, 等. 羧甲基纤维素钠对土壤团粒结构及水分运动特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 117 – 123.
WU Junhu, TAO Wanghai, WANG Haiyang, et al. Influence of sodium carboxyl methyl cellulose on soil aggregate structure and soil water movement[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(2): 117 – 123. (in Chinese)

18 张江辉, 白云岗, 张胜江, 等. 两种化学改良剂对盐渍化土壤作用机制及对棉花生长的影响[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 384 – 388.
ZHANG Jianghui, BAI Yungang, ZHANG Shengjiang, et al. Effect of two kinds of soil ameliorant on saline soil improvement and cotton growth[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3): 384 – 388. (in Chinese)

19 王金满, 杨培岭, 张建国, 等. 脱硫石膏改良碱化土壤过程中的向日葵苗期盐响应研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 33 – 37.
WANG Jinman, YANG Peiling, ZHANG Jianguo, et al. Salinity effect on sunflower at seedling stage during improving sodic soils reclaimed with by-product from flue gas desulphurization (BFGD) [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(9): 33 – 37. (in Chinese)

20 包芸, 任杰. 伶仃洋盐度高度层化现象及盐度锋面的研究[J]. 水动力学研究与进展, 2005, 20(6): 689 – 693.
BAO Yun, REN Jie. Numerical simulation of high resolution on the phenomenon of saline stratification in Lindinyang[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2005, 20(6): 689 – 693. (in Chinese)

21 胡振红, 沈永明, 郑永红, 等. 温度和盐度分层流的数值模拟[J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 439 – 444.
HU Zhenhong, SHEN Yongming, ZHENG Yonghong, et al. Numerical simulation of thermal and saline stratified flow[J]. Advances in Water Science, 2001, 12(4): 439 – 444. (in Chinese)

22 孙志林, 李众彻, 方诗标, 等. 排盐沟咸水分流装置: 中国, 201510392609. 2[P]. 2015 – 07 – 02.

23 CHAN L, CHIN C, SORIA J, et al. Large eddy simulation and Reynolds-averaged Navier – Stokes calculations of supersonic impinging jets at varying nozzle-to-wall distances and impinging angles[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2014, 47(3): 31 – 41.

24 TIAN L, AHMADI G. Particle deposition in turbulent duct flows—comparisons of different model predictions[J]. Journal of Aerosol Science, 2007, 38(4): 377 – 397.

25 孙志林, 李众彻, 方诗标, 等. 带无线收发功能的盐水分流装置: 中国, 201511018244. 3[P]. 2015 – 12 – 30.