

渠系节点悬移质淤积分布数值模拟

王延召, 张耀哲*

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:【目的】研究渠系节点区域悬移质淤积对支渠引水分流的影响。【方法】基于中下级渠道中直角分水口区域建立水流计算模型,借助FLUENT求解节点区域水力要素,采用水沙非耦合方法,通过MATLAB编译程序求解悬移质泥沙连续方程和河床变形方程。【结果】若以初始引水流量的90%作为分水支渠供水保证率,在上游给定的来水来沙条件下,最大清淤周期为7.5 a。在淤积末期,分水口区域泥沙淤积形成拦门沙坎,影响主支渠分流流速比 η ,过流能力减小为初始过流量的65.6%,近床面处过流宽度仅为支渠宽的37.5%。【结论】渠系节点淤积对支渠过水能力影响较大。

关键词:渠系;节点;悬移质;淤积分布;过流能力

中图分类号:TV146

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.gggs.2017.0229

王延召,张耀哲.渠系节点悬移质淤积分布数值模拟[J].灌溉排水学报,2018,37(5):81-85.

0 引言

为实现灌区浑水资源的可持续利用,以防淤防堵为目标的灌区浑水安全输移技术研究具有重要意义,渠系节点水沙调控理论与技术是其重要环节之一^[1-4]。渠系节点区域水流结构复杂,主流、回流及副流共同存在,泥沙容易淤积,因此,有必要研究渠系节点泥沙淤积特性以及对引水分流的影响。

现今关于渠系淤积问题的研究多集中在粗颗粒泥沙的沿程淤积问题,而对细颗粒悬移质淤积问题的研究并不多。张小帅等^[5]、李超等^[6]基于灌区实测资料分析渠系水沙输移特征与淤积问题,指出粗颗粒泥沙是引起渠床淤积变形的主要因素;王延贵等^[7]以输沙率与含沙量间的关系为基础对分流淤积理论进行说明,给出了淤积率、增淤率的估算公式以及判断冲淤和增减淤的临界条件。关于平面淤积问题,谢葆玲等^[8]通过模型试验与原型实测资料,分析得到回流区泥沙淤积的物理模式;王兴奎等^[9-10]通过模型试验研究平面回流问题,分析横向引水分流特性与泥沙淤积问题。李琳琳等^[11]采用双方程模型和混相流模型模拟分水口流场特性,指出河道分水口区域的环流强度和悬移质垂向分布关系是影响支渠分沙比的主要因素;张芳芳等^[12]研究了渠系节点闭闸期盲肠回流特性,分析泥沙淤积率的变化特征。余明辉等^[13]、徐国光等^[14]采用平面二维水沙模型,分别模拟了河床冲刷和港区淤积过程。上述研究中,多数成果从模型试验和数值模拟角度探讨了平面二维水沙问题的基本特性以及回流淤积规律,完善了二维水沙理论体系,并对特定问题进行了说明。其中关于渠系节点区域悬移质淤积变化过程的研究相对较少,且大多没有涉及对床面淤积形态和分水过流能力的研究。

兹考虑长历时泥沙淤积对渠床地形影响,基于床面地形改变引起节点区域流场变化,进而影响泥沙落淤条件,采用平面二维水沙非耦合模型对节点区域进行泥沙淤积计算,在此基础上,分析探讨节点区域的泥沙淤积特性、分水过流能力以及维持工程正常运行所需的清淤周期等问题。

1 泥沙基本方程

泥沙连续方程为:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} - \varepsilon \left(\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} \right) = -\frac{\alpha \omega}{h} (s - s^*) \quad (1)$$

收稿日期:2017-04-14

基金项目:水利部公益性行业专项经费项目(201301016-01)

作者简介:王延召,男,江苏徐州人。硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学。E-mail: wangyanzhao_27@163.com

通信作者:张耀哲,男,陕西凤翔人。副教授,主要从事河流动力学和工程泥沙研究。E-mail: zhangyaozhe28@tom.com

河床变形方程为：

$$\gamma' \partial Z / \partial t = \alpha \omega (s - s^*) \quad (2)$$

式中： Z 为河床底高程； h 为水深； u 、 v 为垂线平均流速沿 x 、 y 方向的分量； s 、 s^* 为悬移质垂向平均含沙量及水流挟沙力； ω 为泥沙沉速； ε 为泥沙扩散系数； α 为恢复饱和系数； γ' 为泥沙相对体积质量。

2 水力要素和泥沙模型求解

2.1 水力要素计算

以泾惠渠灌区为例，研究渠系节点泥沙淤积特征，灌区渠系平面图如图1所示。泾惠渠灌区张家山渠首实测引流量 $15.9 \text{ m}^3/\text{s}$ ，断面平均含沙量 $55.17 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。在灌区中下级渠道中，渠系间衔接多是直角形式(5#~6#)，如图1中节点大图所示。令5#测点为主渠，6#测点为分水支渠，将主、支渠过流断面概化为矩形，主渠宽为 3 m ，分水支渠宽 2 m 。渠系节点水力计算基于ANSYS FLUENT软件，计算模型如图2所示(采用六面体网格，网格间距 0.2 m)。采用VOF模型追踪自由水面，运用RNG $k-\varepsilon$ 水流湍动模型，模型壁面采用无滑移边界，对近壁面处采用标准壁面函数处理，速度与压力耦合采用SIMPLE算法。

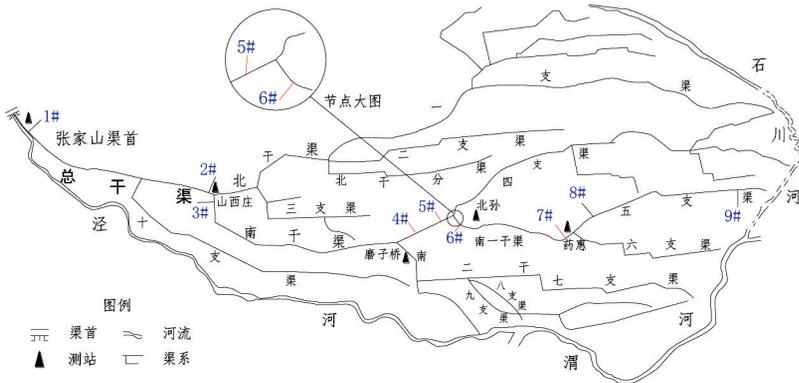


图1 灌区渠系平面图

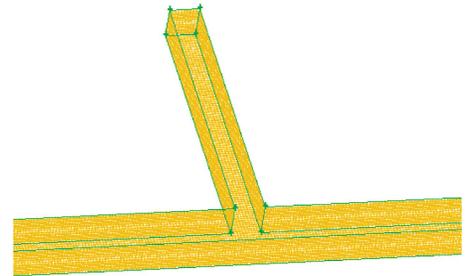


图2 节点模型网格划分

2.2 悬移质不平衡输沙计算

平面二维泥沙连续方程采用有限体积法进行求解，对流项采用迎风格式，扩散项采用中心差分格式，泥沙连续方程离散为：

$$a_p s_p = a_w s_w + a_e s_e + a_s s_s + a_n s_n + b \quad (3)$$

式(3)为全隐式时间积分得到的二维瞬态对流-扩散的离散方程， a_p 、 a_w 、 a_e 、 a_s 、 a_n 均为系数， s_p 、 s_w 、 s_e 、 s_s 、 s_n 为各网格节点平均含沙量， b 为源项， p 、 w 、 e 、 s 、 n 表示网格节点编号及其相邻4个方向的节点编号，其中各系数及源项的具体表达形式可参见文献[15]。求解瞬态泥沙连续方程，得到节点区域垂向瞬态平均含沙量，再通过循环迭代使得含沙量值不随时间变化，即采用通过求解非稳态的过程得到稳态过程的数值结果。

河床变形差分方程为：

$$\Delta Z = \alpha \omega \Delta t (s - s^*) / \gamma' \quad (4)$$

平面二维水流挟沙力公式为：

$$s^* = k \left(\frac{U^3}{gh\omega} \right)^m \quad (5)$$

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (6)$$

式中： k 、 m 为水流挟沙力系数与指数，根据灌区总干渠冲淤平衡资料率定， $k=0.2$ ， $m=0.75$ 。

3 模型计算结果分析

3.1 水力要素

提取计算模型 $2/3$ 水深处的水力要素作为沿水深方向的平均结果，其中分水支渠流速矢量图如图3所示。

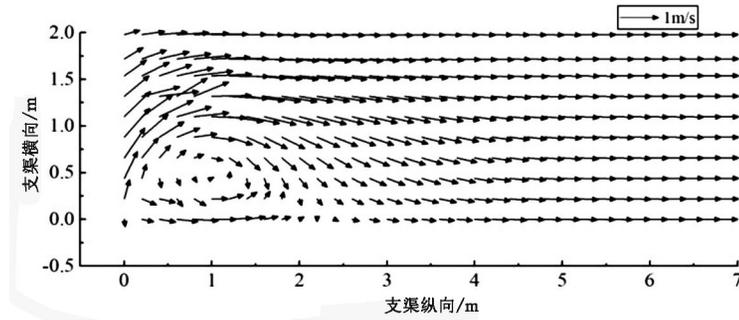


图3 分水支渠流速矢量图

3.2 泥沙淤积特性

渠系实测悬移质泥沙粒径较小,测点5#的泥沙颗粒级配见表1,中值粒径 d_{50} 为0.003 mm。整个渠系水沙输移中,悬移质 d_{50} 在0.003~0.005 mm之间,浑水中泥沙颗粒多属冲泻质范畴,经计算得到的渠系节点淤积特征不明显。基于灌区实测水流条件,为突出节点区域淤积特征,选择代表 d_{50} 为0.0075 mm作为悬移质泥沙特征量,进行节点区域淤积计算。

表1 悬移质颗粒级配

d/mm	0.0008	0.0015	0.0025	0.0035	0.0075	0.015	0.025
$P/\%$	1.05	21.27	22.5	20.3	18.6	15.5	1.03

王延贵等^[16]通过分析典型灌区资料,指出泥沙颗粒起动时流速大于淤积时流速,粒径小于0.015 mm的颗粒起动流速约为0.7~1 m/s,大于支渠分流流速,故未考虑床面底沙对水体含沙量的补给。在分流过程中,分水支渠上边壁侧存在回流区,如图3所示。由图3可知,回流区水流流速减小,挟沙能力减弱,有小范围泥沙淤积。在回流末端及分水支渠下游侧,流速及挟沙能力减小则产生较大范围的淤积。图4给出在不同时期泥沙淤积等值线图,其中淤积初期为2013年现场实测,淤积中期为淤积高度为渠道深度的一半,淤积末期为淤积高度接近水面处时,X轴为分水支渠纵向,Y轴为横向。按淤积位置将节点区域分为3处典型淤积:一区、二区和三区,如图4所示。各区域泥沙淤积范围在不同时期存在着差异,随时间推移,一区纵向尺度减小,横向尺度增加;二区淤积范围逐渐增大;三区淤积范围先增大后趋于稳定。

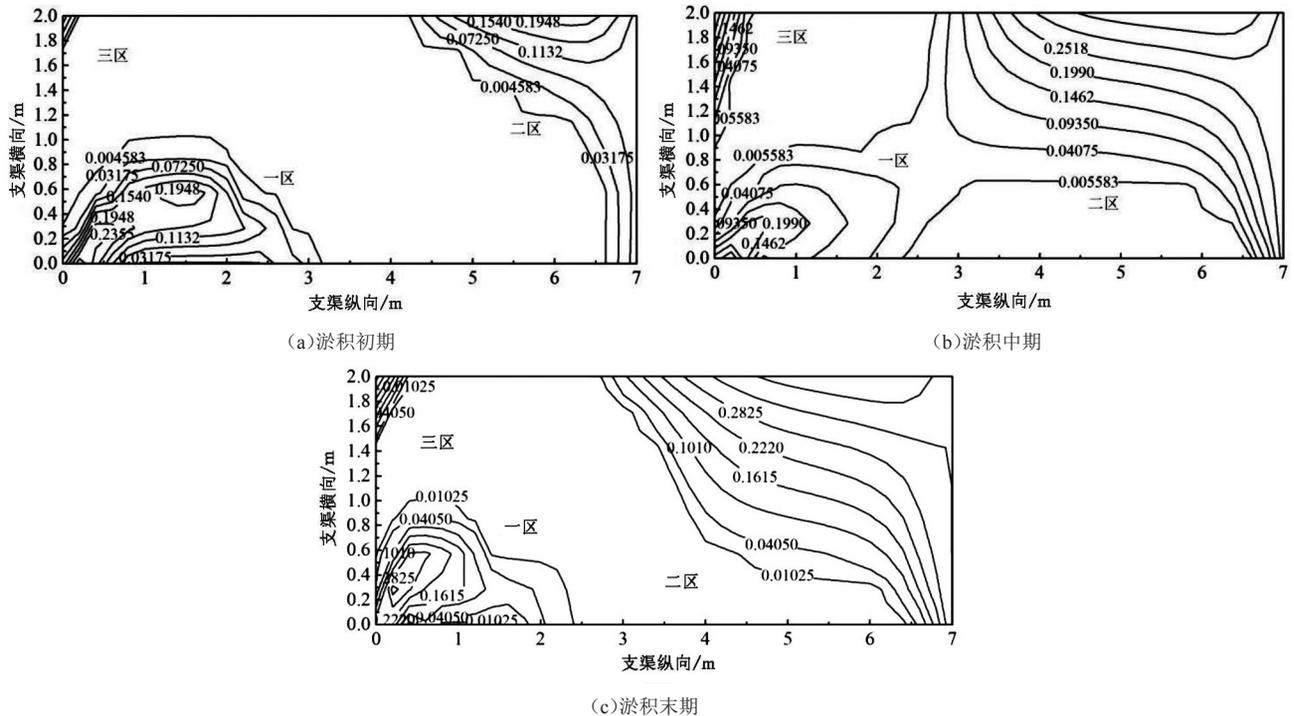


图4 不同时期的淤积等值线图

一区淤积。一区淤积为回流淤积,泥沙淤积特征与该区域流场结构有关。回流区头部比尾部淤得多,中部淤积最多,在横向上,回流中心位置上淤积量最大。由于泥沙淤积具有累积性,回流区泥沙淤积总量随

时期	一区	二区	三区
初期	0.005	0.004 25	0.005 8
中期	0.003 6	0.007 23	0.006 57
末期	0.004 9	0.008 53	0.009

时间逐渐增大。表2给出了内各时期的平均淤积量,其中回流淤积区初期和末期淤积量大,中期相对较小。初期由于支渠入流量大,水体紊动剧烈,扩散进入回流区泥沙较多;末期由于回流区泥沙淤积在口门处形成拦门沙坎^[7],进流能力减小,回流区挟沙能力减弱明显;中期介于之间,淤积量较小。

二区淤积。水流偏转在上边壁侧产生回流,使入渠过流断面收缩,水流在回流区尾部散开,使得下边壁侧水流流速减小,水流挟沙能力减弱,悬移质产生淤积。在淤积发展过程中,泥沙淤积量逐渐增大,同时淤积范围也在增大。分流初期,回流区流线曲率半径较大,淤积集中在下边壁附近;中、后期淤积范围及淤积量都在增大。产生上述特征的原因在于口门区的拦门沙坎使支渠分流能力减弱,分流流速减小,支渠挟沙能力减弱,同时主支渠分流流速比 η (主流平均流速与分流平均流速之比)增大,回流区流线曲率半径减小,水流流束分散区域增大,支渠下边壁侧的流速减小明显,二者共同作用产生较大范围的淤积。

三区淤积。主渠道水流由于边界突然扩大产生水流扩散,在支渠下边壁的作用下分成2股水流,一部分进入分水支渠,另一部分回到主渠。三区附近流场变化急剧,泥沙颗粒在主流紊动扩散作用下在此区域淤积。三区泥沙淤积量和淤积范围都随着时间增加,初期淤积量小,中、后期逐渐增大后趋于稳定。

3.3 分水过流能力

渠系节点支渠内侧回流区使悬移质泥沙产生淤积,床面底高程抬高,长历时泥沙淤积发展会在口门区域形成拦门沙坎。在保证主渠道水位不变的情况下,实际上降低了支渠分流水位,使得分水过流能力降低,同时对口门区域水流结构产生影响。图5给出了支渠分水过流能力随时间的变化关系。由图5可知,支渠过流能力随时间线性递减。若以初始引水流量的90%作为过流保证率,模型主渠道流量 $4.8 m^3/s$,平均含沙量为 $40.15 kg/m^3$,分水支渠能够正常取水的保证年份是7.5 a。如果工程继续发挥作用,需及时清淤,保证年份为最大清淤周期。若无清淤,悬移质持续淤积使部分淤积区沙脊接近水面,此状况下历时30 a,分水过流能力减小为初始过流量的65.6%,近床面过流宽度仅为支渠宽的37.5%。

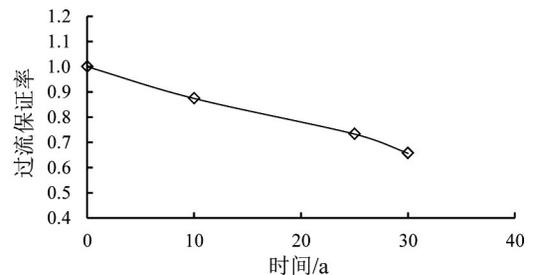


图5 过流能力随时间变化

3.4 渠床淤积地形

在淤积发展过程中,水力要素与渠床地形不断反馈调整,较为明显的判别指标是主支渠分流流速比 η 。淤积初期支渠过流能力大,下边壁区域淤积不明显。随着淤积过程演进,分流流速比增大,支渠过流能力减小,支渠平均流速减小,对一区、二区淤积影响明显,对三区淤积影响较小。图6给出了在淤积末期节点区域床面的淤积地形图。由图6可知,一区淤积范围及淤积量明显小于二区,三区淤积量小,淤积地形呈平滑曲面。泥沙淤积改变了床面底高程,受淤积地形约束,分水支渠主流主要的过流通道为曲线形式,这保证了支渠分水时过流平顺。鉴于水流对分水节点区域床面变形的影响,在口门岸线设计中建议选择曲线形式,预设过渡曲线以减小分水口区域的泥沙淤积。

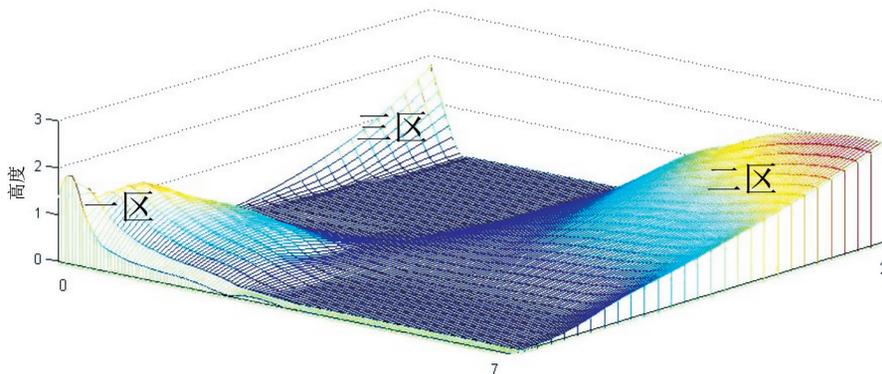


图6 末期淤积地形图

4 结论

1)节点分水口悬移质淤积改变分水支渠过流能力,主要原因在于回流区水流挟沙能力减小,泥沙在口门前形成拦门沙坎,影响支渠进流条件。在上游给定的水沙条件下,若以初始流量的90%为过流保证率,合理的清淤周期应小于7.5 a;若无清淤处理,淤积稳定时过流能力减小为初始流量的65.6%,近床面处过流宽度约为支渠宽的37.5%。

2)节点区域淤积特性与主支渠分流流速比 η 有关,流速比越大,分水支渠与主渠道间的挟沙能力差距越大,对一区淤积与二区淤积影响明显,对三区淤积的影响较小。

由于缺少翔实的水沙资料,兹在现有资料的基础对泾惠渠灌区未来30 a的悬移质淤积过程进行预测分析,期望能为其他灌区节点区域泥沙淤积问题提供参考。存在的不足主要是在淤积发展过程中未对分流入渠含沙量及泥沙颗粒级配作更深入的分析。另外,拦门沙坎抬高了分水支渠床面底高程,影响入渠泥沙条件,关于悬移质颗粒级配垂向分布关系问题的内容研究有待进一步分析。

参考文献:

- [1] 刘焕芳,宗全利,刘贞姬,等. 灌区高含沙输水渠道淤积成因分析[J]. 农业工程学报,2009,25(4):35-40.
- [2] 张小帅,张耀哲,党永仁. 泾惠渠灌区浑水泥沙输移特征[J]. 农业工程学报,2015,31(s1):180-187.
- [3] 许晓华,陈文清,李春涛. 位山灌区泥沙治理中的关键问题[J]. 灌溉排水学报,2007,26(s1):18-19.
- [4] 刘丽丽,姚庆峰,朱岩海,等. 簸箕李引黄灌区沉沙条渠泥沙冲淤特性及机理分析[J]. 灌溉排水学报,2007,26(s1):208-209.
- [5] 张小帅,张耀哲,田智,等. 泾惠渠灌区泥沙淤积成因与减淤对策[J]. 灌溉排水学报,2015,34(z1):152-157.
- [6] 李超,于健,李伟帅,等. 磴口扬水灌区总干渠悬移质泥沙特性研究[J]. 灌溉排水学报,2015,34(8):87-91.
- [7] 王延贵,尹学良. 分流淤积的理论分析及其计算[J]. 泥沙研究,1989(4):60-66.
- [8] 谢葆玲,明宗富,黄金堂,等. 回流附近的水流结构及回流淤积的试验研究[J]. 泥沙研究,1989(3):10-20.
- [9] 王兴奎,张仁,陈稚聪. 宽浅明渠横向取水的试验研究[J]. 水动力学研究与进展,1995,10(4):361-370.
- [10] 王兴奎,ASIM M,王龙,等. 明渠浅水回流区泥沙淤积的试验研究[J]. 水力发电学报,2009,28(4):149-153.
- [11] 李琳琳,余锡平. 分汉河道分沙的三维数值[J]. 清华大学学报(自然科学版). 2009,49(9):1492-1497.
- [12] 张芳芳,张耀哲,粟小玲. 灌渠闭闸期间前段流场特征及泥沙淤积速率分析[J]. 农业工程学报,2016,32(2):111-118.
- [13] 余明辉,杨国录. 平面二维非均匀沙数值模拟方法[J]. 水利学报,2000,31(6):65-69.
- [14] 徐国光,常保平,钱荣. 象山湾港区规划方案泥沙淤积分析[J]. 水道港口,2007,28(1):20-22.
- [15] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.
- [16] 王延贵,李希霞,王冰伟. 典型引黄灌区泥沙运动及泥沙淤积成因[J]. 水利学报,1997(7):13-18.
- [17] 余新明,罗景,蒋伟,等. 引水渠道口门泥沙淤积计算[J]. 中国农村水利水电,2007(12):79-81.

Numerical Simulation of Distribution of Sediment Deposition on the Joints in Canal Systems

WANG Yanzhao, ZHANG Yaozhe*

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: **【Objective】** Understanding how suspended sediments deposit in a canal system is critical to ensure canal service and in this paper, we numerically simulated sediment deposition at joints and diversion in a canal system. **【Method】** We developed a flow model for the rectangular outlet region in a lateral channel and solved water flow through it using the software FLUENT. The sediment transport and deposition, as well as the change in channel bed due to sediment deposition were solved by decoupling the fluid model and the sediment transport model; the associated equations were solved numerically using MATLAB. **【Result】** The results showed that, when upstream conditions remained the same, the maximum dredging cycle is 7.5 years if we took 90% of the design flowing capacity of the canal as minimum capacity that the channel should have after flow-capacity reduction due to sediment deposition. Sediment deposition created a sand barrier at the diversion area, impacting the flow rate ratio between the mainstream and its tributary. This consequently reduced the flow rate to 65.6% of its design value, and the width of the water flow cross-section at the canal bed was reduced to 37.5% of the width of the branch canal. **【Conclusion】** Sediment deposition at irrigation channel joints and diversion has considerable impact on flowing capacity of the main channel and its branches, and the proposed model help improve their management.

Key words: irrigation system; node; suspended load; sedimentation distribution; flow capacity

责任编辑:陆红飞