土柱变密度溶质运移试验 推求水平及垂直方向弥散度研究

程勤波^{1,2},陈 喜^{1,2},张志才^{1,2},张润润^{1,2},高 满^{1,2},丘 宁^{1,2},黄日超^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;

2. 河海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘 要:基于溶质运移对流弥散理论的变密度海水入侵模型广泛用于海水入侵研究,而水动力弥散 系数是影响模型模拟效果的关键性参量之一。利用传统土柱溶质运移试验结合旁侧抽水,采用数值 反演法成功获取了水平及垂直两方向弥散度。相对于传统方法,在不增加试验复杂度的前提下,同 时推求了不同方向的弥散度,提高了试验效率,节约了试验成本,可广泛用于测定水动力弥散系数 等参数。

关键词: 变密度; 海水入侵; 弥散度; 各向异性; 数值反演 中图分类号: TV11 文献标识码: A 文章编号: 1000-0852(2018)06-0001-06

1 引言

海水入侵规律分析以及数学模型研究始于 19 世 纪末。早期,学者将突变界面模型用于海水入侵研究, 如 Herzberg^[1]和 Hubbert^[2]分别采用静水压强分布和压力 平衡求解突变界面; Josselin 等³³对突变界面数值模拟进 行了系统的研究。然而咸水与淡水为混溶流体,两者间 存在突变界面假设明显不合理,于是 20 世纪 60 年代 中期有学者提出了以混溶流体溶质运移弥散理论为基 础,采用对流弥散方程研究海水入侵的过渡带模型,如 Henry[®]首次采用对流弥散方程,获得了与海岸线正交的 垂直断面上盐分浓度的解析解。进入 20 世纪 70 年代 Bear 等学者研究发现,地下水密度差是地下水运动的 又一重要驱动力:Hanssanizadeh^[5-6]首次提出采用修正 的达西方程描述水流运动、并建立了变密度海水入侵 的数学模型。在变密度海水入侵模型中水流运动方程 和溶质运移方程相互依赖,具有高度非线性,至今未能 找到其解析解。Huyakom^[7]首次采用有限元离散方法,建 立了滨海多层含水层三维变密度海水入侵数值模型。

目前基于溶质运移对流弥散理论的变密度海水 入侵模型广泛用于海水入侵研究,如薛禹群®建立了 三维变密度特征有限元海水入侵数值模型,并研究了 山东龙口滨海含水层中的海水入侵:美国 USGS 利用 其开发的变密度海水入侵模拟软件 SUTRA 研究 Floridan 地区海水入侵问题¹⁹。在变密度海水入侵模型 中,水动力弥散系数是影响模型模拟效果的关键性参 量之一,国内外学者在水动力弥散系数的测定方面做 了许多探索和研究,如 De Smedt 等¹⁰将玻璃球填充入 垂直土柱,研究饱和含水层中溶质运移,得出弥散系 数与平均孔隙流速呈线性关系;Yamaguchi 等凹首次 采用溶质运移的穿透曲线(breakthrough curve)估计水 动力弥散系数;Toride 等[12]开发了根据穿透曲线利用 对流弥散方程的解析解采用反演法推求水动力弥散 系数的软件 CXTFI,该软件广泛用于室内外试验推求 水动力弥散系数。在国内,郑西来等[13]根据惰性溶质的 穿透曲线为高斯函数的特点提出了两点法推求水动 力弥散系数;郭建青等[14]指出两点法的精度差,提出了 反函数法;邵爱军等159推导出了垂直土柱吸湿试验推

收稿日期:2017-09-28

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20150809);国家自然科学基金青年基金项目(41601013);国家自然科学基金重大项目(41571130071); 国家自然科学基金面上项目(41771025)

作者简介:程勤波 (1984-),男,湖南岳阳人,讲师,研究方向为水文及水资源。E-mail:Chengqinbo@gmail.com

求水动力弥散系数方法;马建良等^[16]建立了一维垂直 土柱变密度溶质运移数值模型,利用数值反演法推 求水动力弥散系数。然而上述方法只能推求一维纵 向弥散度,无法同时推求水平及垂直方向弥散度,为 此本文设计了垂直土柱溶质运移旁侧抽水试验,建 立了该实验的径向坐标数学模型,利用 SUTRA 软件^[17] 求解,并根据实测结果利用数值反演法采用Levenberg- Marquardt 优化方法推求试验砂土的水平及垂 直方向弥散度;将所得参数用于其他条件土柱溶质运 移试验的数值模拟,并与实测值对比用以检验该方法 的合理性。

2 土柱试验设计

土柱试验高浓度咸水中氯离子浓度约为 18 g/L, 采用纯度 99.5 %的分析纯 NaCl 药品配置而成。

试验主要仪器为圆柱形土柱(见图 1):高度 为 70.0cm,内径为 28.0cm,采用有机玻璃材料制成;底 部安装法兰式双层底板,用于底部汇水,并在底板中心 开一个直径为 1.0cm 的出水孔;侧壁开三孔,孔间距 为 20.0cm,水平插入吸液玻璃管,用于抽取土柱中轴 线附近溶液;距底板 69.1cm 处设有溢流孔。本试验选 取的试验土为长江河砂。河砂粒径级配为:大于 2.0mm 占 4.43%;0.5~2.0mm 占 23.65%;0.25~0.5mm 占 52.52%; 0.075~0.25mm 占 19.12%;小于 0.075mm 占 0.28%。河 砂先用 2mm 筛除去粗粒杂质,然后采用分层填充法均 匀填充入土柱,填充高度为 67.5cm。

实验步骤大体为:(1)用供水瓶自下而上饱和砂柱, 确保空气完全排出;(2)待土柱饱和后,用马里奥特瓶 自上而下定水头供清水或高密度咸水,打开土柱底部 出流孔;(3)定期在土柱旁侧抽水口抽水取样,在土柱 底部接流取样。

为了测定砂柱水平/垂向渗透率,率定水平/垂向 弥散度,检验参数率定结果,本文设计了四次试验:第 一次试验用马氏瓶定水头供入清水(无溶质),测定土 柱底部稳定出流率及旁侧抽水孔自由稳定出流速率; 第二次试验用马氏瓶供入高浓度咸水,定期在抽水孔 及底板出流孔处接流取样;第三次试验先用清水将砂 柱中第二次试验注入的咸水冲刷干净,再用马氏瓶供 入高浓度咸水,定期在土柱底部出流孔处取样,获取砂 柱的氯离子穿透曲线;第四次保留第三次试验后砂柱 中蓄积的咸水,用马氏瓶供入清水,并定期在土柱旁侧 抽水取样,在底部接流取样。



图 1 圆柱形土柱示意图及数值模型网格剖分 Fig.1 The schematic diagram of cylindrical soil column and numerical model mesh

3 变密度溶质运移模型原理及参数推求方法

3.1 数学模型及数值计算方法

描述饱和层压地下水流运动的径向坐标方程为:

$$\rho S_{op} \frac{\partial p}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{k_r \rho}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right)$$

$$\frac{k_r \rho}{\mu} \frac{\partial p}{r \partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_z \rho}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + Q + \gamma_p (p_{BC} - p)$$
(1)

式中:p 为水压力; ρ 为水密度; ε 为孔隙度; S_{op} 为贮水 率, $S_{op}=(1-\varepsilon) \alpha+\varepsilon \beta, \alpha$ 为固体介质压缩系数(根据试验 砂土的特性取为 $1.0\times10^{-8} (\text{m}\cdot\text{s}^2)/\text{kg}$), β 为水压缩系数 ($\approx 4.47\times10^{-10}(\text{m}\cdot\text{s}^2)/\text{kg}$);C 为溶质浓度; k_r 为水平渗透率; k_z 为垂向渗透率; μ 为动力粘度(≈ 0.001036 kg/(m·s)); Q 为源/汇项; γ_p 为水力传导系数; p_{BC} 为定水头边界处 水压力;t 为时间;r 为径向半径;z 为垂向坐标,取向上 为正。

式(1)表明溶质浓度通过水密度影响水流运动, 而据 Reilly 等^[18]试验结果表明:咸水浓度与密度呈线 性关系:

$$\rho = 1369.53C + 998.12$$
 (2)

式中:C为氯离子浓度,无量纲; ρ 的单位为 kg/m³。

Nielson 等在 20 世纪 60 年代建立的土壤溶质运 移的对流-弥散方程(Convection Dispersion Equation, CDE),已成为土壤溶质运移研究的基本方程,被广泛 应用。然而,近来一些学者研究表明将孔隙分布及孔 隙水流速不均匀性对土壤溶质运移的影响归结为机 械弥散作用的假定有局限,如 Khan 等发现弥散度是 随着实验土柱长度增加而变化,并非一个常数;Van Genuchten 等发现对流弥散方程所描述惰性化学物质 在多孔介质中滞留时间比实测滞留时间短。为此 Coats 等发展了二区模型,即将多孔介质的水分为动水 与不动水^[19]。但二区模型又增加了不动水与动水的比 例系数和质量交换系数等参数;增加了模型结构的复 杂度,再者河砂中不动水区较小,因此本文吸收二区模 型中有关动水与不动水观点,但假设不动水完全不参 与水流运动及溶质运移,引入有效孔隙度,得如下径向 坐标系下对流弥散方程:

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho C)}{\partial t} = -\frac{\partial(\varepsilon\rho vC)}{\partial r} + \frac{\varepsilon\rho vC}{r} - \frac{\partial(\varepsilon\rho vC)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\varepsilon\rho (D_m + D_r) \frac{\partial C}{\partial r} \right) - \varepsilon\rho (D_m + D_r) \frac{\partial C}{r\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\varepsilon\rho (D_m + D_z) \frac{\partial C}{\partial z} \right) + QC^*$$
(3)

式中: ε 为有效孔隙度; C^* 为源/汇项液体浓度; D_m 为分 子弥散系数,在20°C下,氯离子分子弥系数为10⁻⁹m²/s; D_r 为水平机械弥散系数; D_z 为垂向机械弥散系数,一 般认为 $D=\alpha \cdot v, v$ 为实际水流速度,其表达式为:

$$v = \left(\frac{k\rho}{\varepsilon\mu}\right) \cdot \left(\underline{\nabla}p - \rho g\right) \tag{4}$$

式中:g为重力加速度,取 9.79484m/s²。

α为弥散度,由两部分构成:纵向和横向弥散度。 纵向弥散度与水流速度方向相同,横向弥散度垂直于 水流速度。横向弥散度远小于纵向弥散度,甚至达两个 数量级^[20],因此多数情形下忽略横向弥散度。本文研究 的弥散度即为纵向弥散度。

方程(1)、(3)、(4)耦合构成了径向坐标系下的变 密度溶质运移数学模型。该模型的上边界为定水头边 界,下边界为自由出流边界,两侧为不透水边界。

目前较流行的地下数值模拟软件有很多,而 SU-TRA 以其代码开源、程序健壮等优点倍受关注^[21]。 SUTRA 采用 Galerkin 有限元法求解方程(1)、(3)、(4), 可研究笛卡尔坐标系中二维、三维及径向坐标系下的 地下水运动、溶质和热量运移问题,在二维模型中,网 格单元采用四边形,三维模型中,采用六面体。在表征 水文地质参量空间非均质上,SUTRA 采用了三种分布 方式^[17]:

节点方式,假设参量在空间上连续变化,如:

$$p(x,y,z,t) \approx \sum_{j=1}^{NN} p_j(t) \phi_j(x,y,z)$$
(5)

式中:*p*(*x*,*y*,*z*,*t*)为空间任意位置处*t*时刻的水压力; *p*_j(*t*)为第*j*个节点*t*时刻的水压力;*φ*_j为基函数。

单元方式,假设参量在单元格/体中保持不变,如:

$$k(x,y,z) \approx \sum_{L=1}^{NN} k_L(x,y,z) \tag{6}$$

3

式中:k(x,y,z)为空间任意位置处的渗透系数; $k_L(x, y,z)$ 为第 *L* 个单元体内的渗透系数。

节点中心单元方式,假设在节点周围参量保持不 变,如:

$$S_{op}(x,y,z) \approx \sum_{i=1}^{NN} S_i(x,y,z)$$
(7)

式中: $S_{\varphi}(x,y,z)$ 为空间任意位置处贮水率; $S_i(x,y,z)$ 为第*i*个结点周围的贮水率。

在描述水文地质参量空间各向异性上,SUTRA 假 设参量的平方根在空间上呈椭圆/椭球分布(见图 2)。 在规定了参量最大及最小值后,其它方向的值等于以 最大、最小值为半轴的椭圆/椭球上的径长。

SUTRA 对方程(1)、(3)、(4)的具体离散求解方法 及形式与常规有限元法无异,这里不再赘述。



图 2 SUTRA 中渗透率、弥散度值的平方根在空间上椭圆分布形式图 Fig.2 The distribution of the effective permeability (k) and flow-direction-dependent dispersivity (α) in SUTRA

3.2 数值模型构建及参数推求方法

模型概化及参数设置:据圆柱型土柱的对称性选 取径向坐标系模型;由于砂柱均匀填充,所以模型中 设置各节点参数相同,但受重力等因素影响,参数可 能仍存在各向异性,所以模型需同时率定水平与垂向 渗透率及弥散度;法兰式双层底板主要用于汇水,可 采用大渗透率模拟;土柱顶部用马里奥特瓶定水头供 水可概化为定水头边界,底部出水孔与大气相通,可 采用压强为0的定水头边界表征;抽水点概化为源汇 点,模型具体概化及网格剖分见图1。

反演法的原理为:通过某种优化方法选取一组参数使得数值模拟结果与试验实测解最接近。反演法推求参数的一般数学模型为:

min
$$O(b) = \| W_i \times (q_i^*(t) - q_i(t, \beta)) \|$$

 $s.t \quad \beta_{\min} \leq \beta_i \leq \beta_{\max}$
(8)

式中: β 为模型参数; β_{min} , β_{max} 为模型参数的上下界; q_i^* 为仪器实测值; q_i 为数值模型计算值; W_i 为观测值的权 重系数,一般取仪器标准误差的倒数^[22]。

式(8)属运筹学中的非线性优化问题,可采用牛顿 梯度法,脊搜索法,遗传算法等方法求解,而 Levenberg-Marquardt 方法将牛顿梯度法与极速下降法结合 起来,能高效地求解非线性优化问题,已成为土壤科学 及水文学参数优化的标准方法^[22]。LEVMAR^[23]是一 套利用 Levenberg-Marquardt 方法求解非线性优化 问题的程序,该程序具有较强鲁棒性与通用性。本 文通过松散耦合的方式将改进 SUTRA 程序与 LEVMAR 程序相耦合,用于推求 SUTRA 模型中的 相关参数。

4 参数推求结果及检验

利用 SUTRA 构建试验土柱的数值模型, 该模型 需要确定的参数有:渗透率,纵向弥散度,横向弥散度, 分子弥散系数,有效孔隙度,贮水率。据马建良等^[16]研 究表明贮水率不敏感,可采用经验值;Shukla等^[24]认为



图 3 数值反演法拟合的土柱底部溶质出流过程 Fig.3 Comparison of simulated and observed solute concentration at the bottom by inversion model

理想;但如果调整参数中的有效孔隙度可以取得较好 结果,见图4,此时有效孔隙度 *ε*=0.392。这是由于:弥 散度主要影响土柱底部溶质出流过程即穿透曲线的 形状,而有效孔隙度主要影响溶质实际流速进而影响 溶质运移时间,由于该参量受其它参量影响较大,如 边界水头,土柱内部孔隙变化,所以每次试验中该参 量不相同。

第二、三、四次试验中有效孔隙度依次减小 (0.392、0.327、0.304),而弥散度不变,表明水流改变了 砂柱结构,压实了土柱,增大了土柱水流实际速度,但 v>0.1 cm/h 时分子弥散度对溶质运移影响非常小,可 采用经验值估计。由此本文建立的数值模型最终需要 推求的参数有:土柱水平及垂向渗透率,水平及垂直 方向(纵向)弥散度,有效孔隙度。渗透率与溶质浓度 无关可通过第一次试验的底部出水孔及侧壁抽水孔 的稳定流数据运用数值反演法推出: k_{i} =5.692×10⁻¹⁰m², k_{r} = 4.097×10⁻¹¹m², k_{h}/k_{r} =13.90。而第三次试验中垂向 渗透系数是主导因子,第四次试验中强抽水致使水平 弥散度影响突出,因此将第三、四次试验结合运用反 演法可推求水平及垂直方向弥散度。由于数值模型较 难模拟强抽水过程,因此将旁侧抽水资料作为已知条 件,将土柱底部出流孔溶质出流过程作为拟合目标,采 用反演法推求参数,参数推求结果为: $\alpha_{i}=4.184\times10^{-2}$ m, $\alpha_{v}=2.334\times10^{-3}$ m, $\alpha_{h}/\alpha_{v}=17.93$,第三次试验有效孔隙度 ε =0.327,第四次试验有效孔隙度 ε =0.304。本研究所得 有效孔隙度、垂向渗透系数及垂向弥散度的值与马 建良等16研究结果接近。本研究拟合效果见图 3。

直接利用反演法得到的参数模拟第二次试验土 柱底部溶质出流过程,模拟结果如图4所示,效果不



对弥散度影响不大。

本研究将旁侧抽水作为模型的外应力,即已知抽 水量及抽取的溶质量,利用 SUTRA 模拟的第四(a)、 二(b)次土柱实验中溶质运移过程见图 5。该图表明: 短时段抽水会引发溶质空间分布的改变,尤其是抽水 量较大时(a),抽水会使溶质场产生较大扭曲。换而言 之,仅利用抽水量去正确估计抽取的溶质量的思路难 以实现,因为抽水产生的水动力过程过于复杂,而描 述复杂的动力过程需要精细的观测 (如瞬时抽水速 率)和精密的模型(如非常密的网格剖分和非常短的 模拟时段),但这些在普通的实验条件下难以满足。综 上原因本研究没有将旁侧抽水作为模拟目标,而是利 用其产生的扰动来估计砂柱中渗透系数、弥散度的空 间各向异性。





5 结论

大量事实表明室内试验结果并不能直接用于海水 入侵研究,水动力弥散度受尺度影响显著^[23],但室内试 验对于探讨溶质运移规律具有重要价值。本文研究表明 在传统的土柱穿透试验中增加旁侧抽水,运用数值反演 法可获得土壤水平及垂直方向弥散度;同时用所得参数 做数值模拟,模拟结果与实测值接近,表明反演所得参 数合理可靠。本研究同时发现:利用同一沙柱不同穿透 实验反演的有效孔隙度会有差异,其原因可能有:(1)有 效孔隙度受外界因素影响较大,较难保证每次试验一 致;(2)简化二区模型有局限,具体表现为水流运动会改 变砂柱结构,压实砂柱,增大溶质运移速度,因此在以后 的溶质运移模型构建时应考虑水流对土壤结构的影响。 参考文献:

- Herzberg A. Die Wasserversorgung Einiger Nordseebder (The Water Supply of Parts of the North Sea Coast in Germany) [M]. Z. Gasbeleucht Wasserveersorg, 1901, 44: 815–819, and 45: 842–844.
- [2] Hubbert MK. The theory of groundwater motion [J]. Journal of Geology, 1940,48(8):785-944.
- [3] Josselin G E, Jong G E, Van Dayk C J. Transverse dispersion from

an originally sharp fresh salt interface caused by shearflow [J]. Journal of Hydrology, 1986,84:55-79.

- [4] Henry, H. R. Effects of Dispersion on Salt Encroachment in Coastal Aquifers [R]. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 1613-C, 1964.
- [5] Hassanizadeh, S.M. Derivation of basic equations of mass transport in porous media, Part 1. Macroscopic balance laws[J]. Advances in Water Resources, 1986,9(4):196–206.
- [6] Hassanizadeh, S. M. Derivation of basic equations of mass transport in porous media, Part 2. Generalized Darcy's and Fick's laws[J]. Advances in Water Resources, 1986,9(4):207–222.
- [7] Huyakorn P S, Aderson P F, Mercer J W, et al. Salt water intrusion in aquifer development and testing of a three-dimensional finite element model[J]. Water Resour. Res., 1987,23(2):293–312.
- [8] 薛禹群,谢春红,吴吉春,等. 海水入侵咸淡水界面运移规律研究[M]. 南京:南京大学出版社, 1991.(XUE Yuqun, XIE Chunhong, WU Jichun, et al. Study of the Movement of Salt and Fresh Water Interface During Seawater Intrusion[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1991. (in Chinese))
- [9] Provost, A.M., Payne, D.F., Voss, C.I. Simulation of saltwater movement in the Upper Floridan aquifer in the Savannah, Georgia– Hilton Head Island, South Carolina, area, predevelopment –2004, and projected movement for 2000 pumping conditions [R]. U.S. Geological Survey SIR 2006–5058, 2006.
- [10] De Smedt F, Wierenga P J. Solute transfer through columns of glass beads[J]. Water Resour. Res., 1984, 20(2): 225–233.
- [11] Yamaguchi, T., Yokosi, S., Moldrup, P. Using breakthrough curves for parameter estimation in the convection-dispersion model of solute transport[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(6): 1635-1641.
- [12] Toride N., Leij F. J., Van Genuchten M. The CXTFIT code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer experiments, Version 2.0 [R]. Riverside, California: U.S. Salinity laboratory, USDA, ARS, 1995, Research Report No 137.
- [13] 郑西来,钱会,杨喜成. 地下水含水介质的弥散度测定[J]. 西安工程 学院学报, 1998,20(4): 33-36. (ZHENG Xilai, QIAN Hui. YANG Xicheng. Measurement on the dispersivity of porous medium in groundwater [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 1998,20(4):33-36. (in Chinese))
- [14] 郭建青,钱会. 分析一维砂柱弥散试验数据的反函数法[J]. 水利学报, 1999,2:43-48. (GUO Jianqing, QIAN Hui. The inverse function method for analyzing the data of one-dimension sand column dispersive test[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999,2:43-48. (in Chinese))
- [15] 邵爱军,刘广明,杨劲松. 土壤水动力弥散系数的室内测定[J]. 土壤学报, 2002,39(2):184-189. (SHAO Aijun, LIU Guangming, YANG Jinsong. In-lab determination of soil hydrodynamic dispersion coefficient[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002,39(2):184-189. (in Chinese))
- [16] 马建良,陈喜,程勤波,等.一维变密度溶质运移实验及参数推求[J]. 水资源保护, 2008,24(3):8-11. (MA Jianliang, CHEN Xi, CHENG

Qinbo, et al. Identification of hydrodynamic parameters based on one-dimensional variable density and solute transport numerical model[J]. Water Resources Protection, 2008,24(3):8-11. (in Chinese))

- [17] Voss, C.I., Provost A.M. SUTRA, a model for saturated unsaturated, variable –density ground –wa ter flow with solute or energy transport [R]. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Water–Resources Investigations Report, 02–4231, 2002.
- [18] Reilly T. E., Goodman A. S. Quantitative analysis of saltwaterfreshwater relationships in groundwater systems—a historical perspective[J]. Journal of Hydrology, 1985,80:125–160.
- [19] 王全九. 土壤溶质迁移理论研究进展 [J]. 灌溉排水学报, 2005,24
 (3):77-80.(WANG Quanjiu. Review of the advances in soil solute transport theory [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005,24(3): 77-80. (in Chinese))
- [20] 吴吉春,薛禹群,黄海,等.山西柳林泉局部区域溶质运移二维数值 模拟 [J]. 水利学报, 2001,8:38-43. (WU Jichun, XUE Yuqun, HUANG Hai, et al. Two dimensional numerical simulation of solute transport in liulin spring local area[J]. Journal of Hydraulic

Engineering, 2001,8:38–43. (in Chinese))

- [21] Bear J.A., Cheng H.D., Sorek S., et al. Seawater Intrusion in Coastal Aquifers-Concepts, Methods and Practices[M]. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [22] Šimúnek J., Van Genuchten M. T., Šejna M. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media [R]. California: University of California-Riverside Research Reports, 2005.
- [23] Lourakis M. Levenberg –Marquardt nonlinear least squares algorithms in C/C ++[EB/OL]. http://www.ics.forth.gr/~lourakis/ levmar/, May 9, 2008.
- [24] Shukla M. K., Ellsworth T. R., Hudson R. J., et al. Effect of water flux on solute velocity and dispersion [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003,67(2): 449–457.
- [25] 成建梅. 考虑可信度的弥散度尺度效应分析[J]. 水利学报, 2002,2
 (2):90-94. (CHENG Jianmei. Analysis on field scale effect of dispersivity in consideration of relative reliability level of data[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002,2(2):90-94. (in Chinese))

Estimation of Horizontal and Vertical Dispersivity Based on Soil Column Solute Transport Experiment CHENG Qinbo^{1,2}, CHEN Xi^{1,2}, ZHANG Zhicai^{1,2}, ZHANG Runrun^{1,2}, GAO Man^{1,2}, QIU Ning^{1,2}, HUANG Richao^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The variable-density solute transport model based on the Advection-Dispersion Equation is widely used to study the seawater intrusion. And the hydraulic dispersion coefficient significantly affects the model simulation performance. This paper added side pumping tests into traditional soil column solute transport experiment, and utilized numerical inversion method to estimate the horizontal and vertical dispersivity. The estimated result was verified by applying other solute transport test. Compared with traditional method, this method can estimate the dispersivity in different directions on the premise that we do not increase the experimental complexity, which improves the efficiency and saves the cost of experiment. The approach provided by this study can be widely used to estimate the anisotropy of hydraulic parameters, such as conductivity and dispersion coefficient. **Key words:** variable-density; seawater intrusion; dispersivity; anisotropy; numerical inversion

《水文》第八届编委会工作会议在北京召开

2018 年 11 月 23 日,水利部信息中心在北京组织召开了《水文》第八届编委会工作会议,总结近年来杂志工作,分析水文 面临的新形势,研讨《水文》定位和发展目标,进一步提高杂志办刊质量。《水文》编委会主任委员、水利部副部长叶建春出席会议 并讲话。会议由《水文》主编、水利部信息中心主任蔡阳主持。

叶建春充分肯定了《水文》办刊 60 多年来所取得的成绩,对《水文》今后发展提出新的要求。他指出《水文》多年来一直保 持在"全国中文核心期刊"、"中国科技核心期刊"。按照"水利工程补短板、水利行业强监管"水利改革发展总思路要求《水文》要 抓准杂志定位,找准发展目标,围绕当前水利工作与科技发展的热点难点,立足水文水资源领域科技进步需求和专业业务发展, 在解决重大水问题、推进学科新发展上起到引领和核心作用,进一步提高杂志影响力,要整合其他科技力量和资源,借助学术交 流与研讨等活动,刊登引领学科发展和分享技术的高质量文章,展示水文水资源领域最新科研成果,提高杂志学术水平。会上, 叶建春向编委会委员颁发了聘书。

水利部水文司副司长杨燕山代表《水文》副主任委员、水文司司长蔡建元出席会议并宣读了《水文》第八届编委会委员名单。 蔡阳在总结中感谢编委们为杂志发展献计献策,对今后在工作中如何落实委员们的意见、进一步发挥编委会的指导作用、 加强编辑部能力建设方面提出了明确要求,希望杂志在原有特色基础上越办越好。

《水文》第八届编委会委员和《水文》编辑部全体成员 40 余人出席了本次会议《水文》编辑部作了工作报告。

6