

弥散尺度效应的试验研究进展及展望

董贵明¹,常大海¹,田娟²,曹恩伟³

(1.中国矿业大学资源与地球科学学院,江苏徐州 221116;2.江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院,
江苏徐州 221116;3.徐州市环境监测中心站,江苏徐州 221116)

摘要:水动力弥散尺度效应问题是地下水中污染物运移研究的重要内容,针对国内外的弥散尺度效应研究,分别从室内和野外两个方面对弥散尺度效应试验研究进行综述。统计了室内试验各影响因素产生弥散尺度效应所占的比例,并根据表格数据分析造成弥散尺度效应的原因。最后,提出弥散尺度效应的试验研究展望:(1)验证弥散尺度效应的存在性;(2)研究弥散尺度效应的产生机理;(3)弥散尺度效应的定量化研究。

关键词:水动力弥散;尺度效应;弥散度;室内试验;野外试验

中图分类号:P641.69 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0852(2017)02-0008-06

地下水科学已有数百年的发展历史,溶质迁移问题是地下水科学研究的一个方面,但其起步相对较晚。溶质迁移问题的研究大致分为5个阶段。20世纪50年代以前,溶质迁移问题的研究较少,主要为海水入侵问题,通常使用对流计算的方法进行分析^[1]。但基于对流计算的分析方法不能充分描述溶质在地下水中的迁移,20世纪50~60年代,许多学者进行了大量的示踪弥散试验并提出了水动力弥散统计理论,即水动力弥散由机械弥散和分子扩散组成,且以机械弥散为主^[2-5]。Bear^[6]结合Fick定律建立了以水动力弥散统计为基础的溶质运移对流-弥散方程,并被广泛应用于60、70年代的室内与野外试验分析中。

20世纪70年代以后,随着弥散试验的增多,越来越多的研究人员发现单一的弥散度不能很好的描述多孔介质中溶质迁移特征,具体表现在两个方面:(1)对于同一多孔介质,野外试验测定的弥散度一般要比室内试验确定的弥散度大2~4个数量级^[7-8]。(2)在同一含水层中,弥散度随着溶质迁移距离的增加而增大^[9-11]。这两种现象被称为水动力弥散尺度效应^[12]。随着问题的出现,不少研究人员通过室内和野外试验专门研究弥散尺度效应。90年代以后,对于弥散尺度效应

的研究逐步由试验方法研究向求解方法研究过度,如考虑弥散尺度效应的溶质运移模型解析解及半解析解方法^[13-18]。

水动力弥散尺度效应是溶质迁移研究中的重要理论问题,由于弥散尺度效应的存在,研究人员不能很好的拟合污染物的运移过程,在预测地下水污染物迁移时,出现污染物超前运移现象;此外,进行溶质运移试验时,会出现污染物提前穿透现象。因此,研究弥散尺度效应至关重要。在一百多年的污染物迁移问题研究过程中,研究人员进行了大量的弥散试验,本文仅针对研究弥散尺度效应的试验进行回顾,并提出研究展望。

1 室内试验

对于弥散尺度效应的室内试验研究,国外开展的时间相对较早,取得了较多的研究成果。而国内的试验研究起步较晚,进行试验的数量也相对较少。但是,无论国外还是国内的试验研究,都主要从砂柱试验与砂盒试验两个方面开展,其中,砂柱试验所占比例偏多。

1.1 国外研究现状

首先对国外砂柱试验的研究现状进行概述。

收稿日期:2016-08-04

基金项目:国家自然科学基金项目(41202179);江苏省高校优势学科建设工程资助项目;江苏省环境监测科研基金项目(1403)

作者简介:董贵明(1979-),男,黑龙江佳木斯人,副教授,主要从事地下水数值模拟和水资源评价等的教学和科研工作。

E-mail:guiming14432@126.com

通讯作者:田娟(1980-),女,山东蓬莱人,讲师,主要从事环境科学的教学和科研工作。E-mail:tianjuan980106@126.com

Klotz^[19]利用取自冰泽含水层的不同粒径的介质进行了弥散试验,研究了各种粒径、均质性、密实度、温度以及含水量对弥散系数的影响,结果表明在分层试验中,弥散系数随着溶质迁移距离的增加而增大,且随着粒度、密实性与温度的增加而增大,随着含水量的减少而增大。Khan 和 Jury^[20]研究了介质均质性、长度以及流速对弥散度的影响。他们使用了三个不同长度且分别由原状土和非原状土装填的土柱,较短的土柱由长土柱截断得到,其长度为长土柱的一半。这些土柱在三种不同流速条件下进行了一系列示踪试验,他们发现对于未扰动的原状土,弥散度随着土柱长度的增加显著增加,但与非原状土的土柱长度之间没有明确的关系。Porro 等^[21]研究了不同介质及示踪剂条件下的弥散尺度效应。他们在两个大土柱中进行了溶质运移试验,其中一个装填壤质细砂,另一个则每隔 20cm 交替填充壤质细砂与粉质粘土,选择氘化水、溴化物以及氯化物作为示踪剂,并在稳定流条件下从砂柱顶端投放示踪剂。研究结果表明,对于任何一个土柱和示踪剂,弥散系数与尺度之间没有确定的关系。在其他的土柱研究中,Zhang 等^[22]使用均质与非均质两种方法装填 12.5m 的土柱进行试验,最终得到了均质与非均质介质均具有尺度效应,弥散度都会随着溶质迁移距离的增加而增大。Pang 等^[23]在研究弥散尺度效应及其求解方法时,设置了一个长 8m、直径 30cm、倾斜度 30°的柱子,柱子上每隔 1m 设一个取样点,并采用粒径为 5~7mm 的砂砾均匀装填压实。试验时采用氘化水作为示踪剂并从柱子底部注入,并采用 CDM(constant dispersion model)与 SDM(scale-dependent dispersion model)两种方法进行求解,结果都表明了弥散度随着迁移距离的增加而线性增长。

室内砂盒试验研究尺度效应的试验实例很少。Sillman 和 Simpson^[24]分别对介质按均质、分层、分层分区以及均匀非均质四种方法装填砂盒,并进行了示踪试验。对于均质装填方法,使用 20 目的砂子均匀装填;在分层装填中,把 90 目的砂嵌入 20 目的砂中间形成分层;在分层分区装填中,90 目与 20 目的砂区在水平层上形成分区,并且均匀分布,90 目的砂在垂直方向上占据 1/3 的空间;在均匀非均质装填中,整个砂盒用最大粒径为 90 目的非均质砂均匀填充。研究发现均质装填的砂盒试验中没有发现明显的弥散尺度效应。对于分层装填和分层分区装填的砂盒试验,通过分析浓度穿透曲线时得到了三段溶质运移过程。分层分区

装填的砂盒试验穿透曲线中部阶段的持续时间依赖于示踪剂从投放源开始的迁移距离,进而证实了弥散尺度效应的存在。此外,分析按均匀非均质装填方法得到的浓度穿透曲线,得到了弥散度随着迁移距离增加而增加的结论。

1.2 国内研究现状

国内弥散尺度效应的室内试验研究相对较少。张明泉等^[25]开展室内二维弥散试验研究时,使用 340cm×90cm×60cm 的较大规格渗流槽。槽中填满砂卵石,并以 NaCl 为示踪剂。试验结果表明无论是横向弥散度还是纵向弥散度都可以通过室内试验获得并且发现弥散度随着观测孔与投放孔距离的增加有增大的趋势。黄冠华等^[26]在研究均质介质的分数微分对流-弥散模拟中,进行了短土柱和长土柱室内弥散试验。其中短土柱弥散试验有两组,一组柱长 42.5cm,直径 15.4cm,装填介质为砂壤土,装填时每隔 5cm 进行捣实,分别在 2、7、17、27、37cm 处埋入陶土头,选用 $\text{CdCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 为示踪剂。另一组试验选用了内径为 12cm,高为 100cm 的土柱,装填介质为粒径小于 2mm 的风干粉壤土,在 2.5、12.5、22.5、32.5cm 处设置取样器,选用 NH_4Cl 为示踪剂。长土柱弥散试验的结果则采用美国怀俄明大学张泽仁教授提供的数据。研究结果表明无论长土柱还是短土柱中,均具有弥散尺度效应,弥散系数都随着迁移距离的增加而增大。陈静等^[27-28]研究均质非均质土柱中溶质运移的分数微分对流模拟时使用了 Huang 等^[29]的水平土柱试验数据,土柱长为 1250cm,横截面积为 10cm×10cm,该试验以氯化钠为示踪剂,其中一个土柱装填均质砂质土壤,另一个土柱装填粗质土壤到细质土壤的非均质土,均质土柱每隔 50cm 设置电导率探头,而非均质土柱每隔 100cm 设置电导率探头。根据分数微分对流-弥散方程求解得到弥散系数随尺度增大而增大的结果,且均质土柱的弥散系数尺度效应小于非均质土柱的弥散系数尺度效应,均质土柱的弥散系数与尺度呈指数关系,而非均质土柱的弥散系数与尺度呈幂函数关系。杨海瑞等^[30]用室内试验研究了榆阳矿区含水介质中污染物迁移规律。虽然没有得到弥散度或弥散系数与时间或距离的变化关系,但指出了室内测得的弥散度值要小于野外弥散试验取得的值,认为存在弥散尺度效应。

根据上述国内外弥散尺度效应的室内试验研究结果,对不同的影响因素进行划分,统计在各影响因素下,产生弥散尺度效应的比例如表 1 所示。

表1 室内试验中各影响因素产生弥散尺度效应统计表
Table1 The statistics of the dispersion scale effect caused by each influencing factor in laboratory test

影响因素	产生尺度效应的比例	无尺度效应比例
均质	4 / 8	4 / 8
非均质	5 / 6	1 / 6
土	5 / 7	2 / 7
砂砾	5 / 8	3 / 8
大规模	7 / 8	1 / 8
小规模	2 / 4	2 / 4

(备注:(1)表中每一种条件是单纯的考虑一个因素,如4/8中8代表所有实验中是均质条件的总数。(2)大规模是指柱体长大于100cm,或砂盒最大截面面积大于10 000cm²)。

由表1统计数据可以得出,在非均质介质,大规模的条件下更易产生弥散尺度效应。相比较而言,非均质介质相对于均质介质产生弥散尺度效应的概率更大,进一步得出了介质的局部非均质性是造成弥散尺度效应的主要原因的结论^[12]。此外,大规模相对于小规模实验也得到了同样的结论。对于介质类型,统计结果没有太大区别。

2 野外试验

对于弥散尺度效应的试验研究,虽然室内试验简单方便,但不能完全刻画野外条件下的多孔介质非均质性随尺度的变化,因此野外弥散试验对于弥散尺度效应的精确研究是不可或缺的。

本文主要从两个方面对弥散尺度效应的野外试验研究进行概述,一方面为研究弥散度或弥散系数与迁移距离的关系,另一方面为研究弥散度或弥散系数与迁移时间的关系。若试验结果表明了弥散尺度效应的存在,则相应的表现为弥散度或弥散系数的距离依赖性和时间依赖性。

2.1 国外研究现状

对国外弥散尺度效应的野外试验研究概述,首先从弥散度或弥散系数与距离的关系进行总结。Sauty^[31]分析了多组现场实验数据,发现弥散度开始时随着迁移距离的增加而增加,在达到一个定值后保持该值不变。Leland 和 Hillel^[32]在非承压含水层中进行了溶质运移现场试验。试验设置了两组线性排列的取样点,通过试验分析,发现两组取样点的结果不同。其中一组显示从投放源到第四个取样点之间的弥散度随着迁移距离的增加而增大,而另一组结果显示了从投放源开始,

弥散度随着迁移距离的增加而减小。Sudicky 等^[33]在天然梯度下以 NaCl 为示踪剂在 Borden 潜水砂层含水层中进行了4个月的弥散示踪试验,结果显示了在距投放源0.75~11m的范围内,纵向弥散度从0.01m增加到0.08m,横向弥散度也增加到了0.03m。表明了弥散度具有明显的尺度效应,且纵向弥散尺度效应要强于横向弥散尺度效应。为了研究弥散度的尺度效应,Taylor 和 Howard^[34]在以砂为介质的非承压含水层中进行了天然梯度下的示踪试验。该研究区域布置了大量的有序排列的观测井,并在试验中随机测定任意一个检测井的弥散度。通过对各个监测井的试验数据分析,发现弥散度随着迁移距离的增加并没有明显的变化趋势,即没有发现弥散尺度效应。Butters^[35]在非饱和土壤中进行了野外弥散试验,以溴化物为示踪剂并研究了它的运移特征。通过分析试验数据,Butters 和 Jury^[36]发现在14.8m以上的深度内含水介质具有弥散尺度效应,即弥散度随着深度的增加呈线性增长。Duff 等^[37]在非均质含水层中,以氯离子和溴离子为示踪剂进行示踪试验,测得弥散度随着迁移距离的增大而减小。此外,Himmelsbach 等^[38]在德国林道市破碎岩石试验场地的高渗透断裂带进行了溶质运移的野外试验。在11.2m的迁移距离内,弥散度的范围在0.17~0.3m之间,在21.4m的迁移距离内,弥散度的值为2.1m。试验中示踪剂迁移距离从11.2m增加到21.4m,相应的弥散度的值由0.17m增加到0.3m,这种弥散度随迁移距离的增加而增加的现象反映了弥散度具有距离依赖性,即具有弥散尺度效应。

除了弥散度或弥散系数与迁移距离存在尺度效应外,研究人员也从时间方面研究弥散度或弥散系数的尺度效应。Warrick^[37]在野外进行入渗冲洗试验,结果表明了弥散系数随着迁移时间的增加而增大。Dieulin^[39]在非均质含水层中进行了示踪试验,并且作出了域内一系列的观测点的穿透曲线,进行了阶段划分,使每个部分单独模拟并且在模拟中赋予不同的弥散度的值。试验结果也显示了弥散度随着时间增加而增大。此外,通过分析来自博登、安大略省以及加拿大的溶质运移数据,Freyberg^[40]发现迁移距离的变化与时间的变化两者之间存在非线性增长关系,这表明了弥散度具有时间依赖性。在试验中他也发现弥散度不会一直增加,而是达到一个渐进值0.49m。

2.2 国内研究现状

国内针对弥散尺度效应开展的野外试验较少,本

文将从弥散度与时间和距离的关系对国内研究现状进行概述。蔡绪贻等^[41]利用有关地下水污染的相关资料估算弥散度,结果表明利用距离污染排放点较远的观测井数据求出的纵向弥散度的值较大,而利用距离污染排放点较近的观测井数据求出的纵向弥散度的值较小,从而说明了弥散度随着污染物迁移距离的增加而增加,即在该地区的弥散试验研究中,存在弥散尺度效应。李国敏等^[42]在瑞士核废料储存试验场研究局部非均质含水介质中的弥散度时,发现局部非均质性使弥散度变大,证明了局部非均质性是造成弥散尺度效应的一个原因。吴耀国等^[43]在本钢郑家屯潜水含水层进行弥散试验研究时,以食盐中的氯离子为示踪剂,采用瞬时投放的方法,通过建立二维溶质运移模型,并且采用标准曲线法对试验数据进行处理。研究结果表明随着距主井距离的增加,利用观测井数据得到的纵向弥散度随之增加,说明了弥散尺度效应的存在。王永森等^[44]在研究溶质运移的弥散尺度效应时,利用长期的试验数据发现了弥散系数随着尺度的增加而增大的现象,且弥散系数与尺度的关系为幂相关关系。蒋振娇^[45]、卞建民^[46]在研究承压含水层古咸水体确定性及时空性模拟时进行了野外试验,试验含水层主要为开采明化镇组含水层。试验采用氯化钠为示踪剂,进行水平和垂向上的示踪实验,并且采用外延内推的方法研究了弥散尺度效应。试验结果证明了弥散尺度效应的存在,并且认为造成弥散尺度效应的原因并不是完全由含水层非均质各向异性造成的,而是由假设局部均衡条件下的费克定律引起的,横向与纵向弥散度与尺度之间呈指数相关关系。

由于野外试验条件较为复杂,影响因素较多,本文对各影响因素下,产生弥散尺度效应的试验情况不做统计。

3 展望

虽然弥散尺度效应的试验研究已经开展了近五十年,但仍然存在以下问题需要进一步解决,对这些问题的研究,弥散试验仍是重要的方法。

(1)弥散尺度效应的存在性。目前,多数研究人员接受存在弥散尺度效应的观点,且研究出一系列针对弥散尺度效应的求解方法。但是,通过对以上国内外试验研究结果总结,仍有研究人员并未发现弥散尺度效应的存在。此外,Domenico 和 Robbin^[47]指出忽略投放源的体积大小以及观测井的完整程度会影响溶质的浓度值,从而产生人为的尺度效应。同时,Sauty^[31]在进行

相应的总结时,说明了 Duff 的观点,Duff^[31]指出使用不同方法确定弥散度可能会造成不同结果,同样会造成人为的尺度效应。因此,需要进一步研究弥散度或弥散系数是否存在以及在什么条件下存在弥散尺度效应,并且设计更加完善的试验方案,选择合适的研究方法,对试验条件进行分析,给出未产生弥散尺度效应的解释。

(2)弥散尺度效应的产生机理。虽然不是所有的试验都表明了弥散尺度效应的存在,但多数研究人员认同弥散度或弥散系数具有尺度效应,且对造成这种现象的原因进行了分析。目前的主流观点认为含水介质的局部非均匀性是造成弥散尺度效应的主要原因。但是,在总结前人的试验研究时发现,在均质介质示踪试验中同样存在弥散尺度效应,这不属于含水介质局部非均匀性的范畴,所以造成弥散尺度效应的因素应该很多,含水介质非均质性可能是其中一个方面,需要我们对弥散尺度效应的成因做进一步探讨。

(3)定量的描述弥散尺度效应。在过去的几十年中,对弥散尺度效应的研究一般停留在定性研究上,虽然部分研究给出了弥散度增长公式,但没有统一的形式。弥散度是描述污染物运移的一个重要特征,由于在描述或预测污染物运移时,一般使用一个恒定弥散度代表整个研究区域的值,使得求解结果存在一定的误差,所以弥散尺度效应的定量化研究尤为重要。对于该方面的研究,可以在研究弥散尺度效应成因的基础上,确定影响弥散尺度效应的因素,并通过试验对各因素进行定量化分析。但确定弥散尺度效应的成因非常困难,目前还没有确切的结果,还需要大量的研究。

4 结论

(1)通过对弥散尺度效应试验研究的总结,可以得出弥散尺度效应是弥散试验研究中发现的一种现象,具体表现为弥散度随着迁移距离或迁移时间增加而增大。国外对弥散尺度效应的研究可以追溯到 20 世纪 70 年代,到 90 年代逐渐减少。国内研究整体比国外研究晚 10 年左右。总之,无论室内试验还是野外试验,国外研究相对较早,研究相对较多。

(2)对于室内试验,虽然有研究者没有发现弥散度或者弥散系数随着时间或距离的增加而增大的现象,但是多数研究人员还是在试验中发现了弥散尺度效应的存在,并且得到了弥散度随着迁移距离或时间的增长方式,分别为线性增长、指数增长以及幂函数

增长。此外,国内外普遍采用的研究方法主要有砂柱与砂盒两种方式,无论国内还是国外,砂柱试验所占比例较多。试验主要从均质与非均质性、介质的装填方法、示踪剂的类型、粒度、密实性、以及砂柱的长度等方面研究产生弥散尺度效应的影响因素。

(3)对于野外研究,研究人员进行了大量的野外弥散试验,多数研究者发现了在野外尺度下,弥散尺度效应的存在,并且得到了弥散度或弥散系数随迁移距离以及迁移时间的变化形式。在这些变化形式下,弥散度的增长方式与室内试验大致相同,分别有线性增长、指数增长、幂函数增长以及渐近线型增长4种方式。

(4)本文总结并给出了室内试验研究中各因素下,产生弥散尺度效应的比例。对数据进行分析得出了介质非均质性是产生弥散尺度效应的主要原因。此外,试验所用的砂柱规模越大越容易产生弥散尺度效应。

(5)通过总结试验结果发现研究中还存在弥散尺度效应的存在性、产生机理以及定量化描述三个问题,在今后的研究中需要进一步解决。

参考文献:

- [1] 郑春苗, Gordon D Bennett. 孙晋玉译. 地下水污染物迁移模拟(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009:3-4. (ZHENG Chunmiao, Gordon D Bennett. Translated by SUN Jinyu. Applied Contaminant Transport Modeling (Second Edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009:3-4. (in Chinese))
- [2] Taylor, G.. Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube [A]. Proceedings of the Royal Society of London [C]. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1953, 219(1137): 186-203.
- [3] Scheidegger, A.E.. Statistical hydrodynamics in porous media [J]. Appl. Phys., 1954, 25: 994-1001.
- [4] De Josselin de Jong. Longitudinal and transverse diffusion in granular deposits [J]. Trans. Am. Geophys. Union., 1958, 39: 67-74.
- [5] Saffman, P.G. A theory of dispersion in a porous medium [J]. J. Fluid Mech., 1959, 6: 321-349.
- [6] Bear, J. Dynamics of Fluids in Porous Media [M]. New York: Elsevier, 1972: 764.
- [7] Fried, J.J. Groundwater Pollution [M]. Amsterdam: Elsevier, 1975: 330.
- [8] Sudicky E.A., Frind E.O. Contaminant transport in fractured porous media: analytical solutions for a system of parallel fractures [J]. Water Resour. Res., 1982, 18(6): 1634-1642.
- [9] Domenico P.A., Robbins, G.A. A dispersion scale effect in model calibration and field tracer experiments [J]. Journal of Hydrology, 1984, 70: 123-132.
- [10] Gelhar L.W., Welty C., Rehfeldt K.R. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers [J]. Water Resour. Res., 1992, 28: 1955-1974.
- [11] Rajaram H., Gelhar L.W. Plume scale-dependent dispersion in heterogeneous aquifers—1. Lagrangian analysis in a stratified aquifer [J]. Water Resour. Res., 1993, 29: 3249-3260.
- [12] 陈崇希, 李国敏. 地下水溶质运移理论及模型 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996: 26-31. (CHEN Chongxi, LI Guomin. Groundwater Solute Transport Theory and Model [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996: 26-31. (in Chinese))
- [13] 高光耀, 冯绍元, 霍再林, 等. 考虑弥散尺度效应的溶质径向运移模型动力学模型及半解析解 [J]. 水动力学研究与进展, 2009, 24(2): 156-163. (GAO Guangyao, FENG Shaoyuan, HUO Zailin, et al. Semi-analytical solution for solute radial transport dynamic model with scale-dependent dispersion [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2009, 24(2): 156-163. (in Chinese))
- [14] 高光耀, 冯绍元, 马英, 等. 考虑弥散尺度效应与不动水体的反应性溶质运移动力学模型及半解析解 [J]. 水动力学研究与进展, 2010, 25(2): 206-216. (GAO Guangyao, FENG Shaoyuan, MA Ying, et al. Semi-analytical solution for reactive solute transport dynamic model with scale-dependent dispersion and immobile water [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2010, 25(2): 206-216. (in Chinese))
- [15] 冯绍元, 高光耀, 霍再林, 等. 考虑弥散尺度效应的抽水井附近溶质运移模型及半解析解 [J]. 水利学报, 2010, 41(9): 1024-1031. (FENG Shaoyuan, GAO Guangyao, HUO Zailin, et al. Semi-analytical solution for reactive solute transport in the convergent flow to an extraction well considering scale-dependent dispersion [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(9): 1024-1031. (in Chinese))
- [16] 高光耀, 冯绍元, 马英, 等. 考虑弥散尺度效应的一维反应性溶质运移两区模型及应用 [J]. 水利学报, 2011, 42(6): 631-640. (GAO Guangyao, FENG Shaoyuan, MA Ying, et al. One-dimensional two-region model for reactive solute transport with scale-dependent dispersion and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(6): 631-640. (in Chinese))
- [17] 魏峰, 王全九, 秦新强. 考虑弥散尺度效应的两点吸附溶质运移模型及半解析解 [J]. 水动力学研究与进展, 2015, 30(5): 580-586. (WEI Feng, WANG Quanjiu, QIN Xinqiang. Semi-analytical solution for two-site adsorption solute transport model with scale-dependent dispersion [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2015, 30(5): 580-586. (in Chinese))
- [18] 魏峰, 王全九, 秦新强, 等. 考虑尺度效应的土壤溶质运移动力学特征分析 [J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 42-46. (WEI Feng, WANG Quanjiu, QIN Xinqiang, et al. An analysis on dynamic characteristics of solute transport through heterogeneous soils with scale-dependent dispersion [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(1): 42-46. (in Chinese))
- [19] Klotz, D., K.-P. Seiler, H. Moser, and F. Neumaier. Dispersivity and velocity relationship from laboratory and field experiments [J]. J. Hydrol., 1980, 45: 169-184. Doi: 10.1016/0022-1694(80)90018-9.
- [20] Khan, A.U.H., W. A. Jury. A laboratory study of the dispersion scale effect in column outflow experiments [J]. J. Contam. Hydrol., 1990, 5: 119-131. Doi: 10.1016/0169-7722(90)90001-W.
- [21] Porro, I.P. J. Wierenga, and R. G. Hills. Solute transport through large uniform and layered soil columns [J]. Water Resour. Res., 1993, 29: 1321-1330.

- [22] Zhang, R. K. Huang, and J. Xiang. Solute movement through homogeneous and heterogeneous soil columns [J]. *Adv. Water Resour.*, 1994, 17: 317–324.
- [23] Pang, L., and B. Hunt. Solutions and verification of a scale-dependent dispersion model [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2001, 53: 21–39. Doi: 10.1016/S0169-7722(01)00134-6.
- [24] Silliman, S. E., and E. S. Simpson. Laboratory evidence of the scale effect in dispersion of solutes in porous media [J]. *Water Resour. Res.*, 1987, 23(8): 1667–1673.
- [25] 张明泉, 曾正中, 高洪宣, 等. 室内二维弥散试验研究[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 1993, 29(4): 274–278. (ZHANG Mingquan, ZENG Zhengzhong, GAO Hongxuan, et al. Two-dimensional dispersion experiment in laboratory [J]. *Journal of Lanzhou University (Nature Science)*, 1993, 29(4): 274–278. (in Chinese))
- [26] 黄冠华, 黄权中, 詹红兵, 等. 均质介质中污染物迁移的分数微分对流-弥散模拟 [J]. *中国科学*, 2005, 35: 249–254. (HUANG Guanhua, HUANG Quanzhong, ZHAN Hongbing, et al. Migration of pollution in homogeneous medium fractional differential convection-diffusion simulation [J]. *China Science*, 2005, 35: 249–254. (in Chinese))
- [27] 陈静. 分数微分对流-弥散方程的有限单元解法及弥散的尺度效应研究 [D]. 北京: 中国农业大学水利与土木工程学院, 2005. (CHEN Jing. Finite Element Method for the Fractional Advection-dispersion Equation and Its Scale-dependent Dispersion [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese))
- [28] 陈静, 黄冠华, 黄权中. 一维均质与非均质土柱中溶质迁移的分数微分对流-弥散模拟[J]. *水科学进展*, 2006, 17(3): 299–304. (CHEN Jing, HUANG Guanhua, HUANG Quanzhong. Simulation of one-dimensional solute transport in homogeneous and heterogeneous soils with scale-dependent fractional advection-dispersion equation [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2006, 17(3): 299–304. (in Chinese))
- [29] Huang K, Toride N, van Genuchten M T. Experimental investigation of solute transport in large homogeneous and heterogeneous soil columns [J]. *Transport in Porous Media*, 1995, 18: 283–302.
- [30] 杨海瑞, 陈静, 陈泉萌, 等. 榆阳矿区含水介质弥散实验研究[J]. *地下水*, 2015, 37(2): 246–248. (YANG Hairui, CHEN Jing, CHEN Xiaomeng, et al. Aquifer medium dispersion experiment of Yuyang [J]. *Ground Water*, 2015, 37(2): 246–248. (in Chinese))
- [31] Sauty J.P. An analysis of hydrodispersive transfer in aquifers [J]. *Water Resour. Res.*, 1980, 16(1): 145–158.
- [32] Leland D. F., Hillel D. A field study of solute dispersion in a shallow, unconfined aquifer [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1982, 46: 905–912.
- [33] E.A. Sudicky, J.A. Chery, E.O. Frind. Migration of contaminants in groundwater at a landfill: a case study 4. A natural-gradient dispersion test [J]. *Journal of Hydrology*, 1983, 63: 81–108.
- [34] Taylor S. R., Howard K. W. F. A field study of scale-dependent dispersion in a sandy aquifer [J]. *Journal of Hydrology*, 1987, 90: 11–17.
- [35] Butters, G. L. Field scale transport of bromide in unsaturated soil [D]. University of California, 1987.
- [36] Butters, G. L., Jury W. A. Field scale transport of Bromide in an unsaturated soil dispersion modeling [J]. *Water Resour. Res.*, 1989, 25: 1583–1589.
- [37] 黄康乐. 多孔介质水动力弥散尺度效应研究—现状与展望[J]. *水文地质工程地质*, 1991, 18(4): 30–33. (HUANG Kangle. Hydrodynamic dispersion porous medium-scale effect the present research situation and prospect [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1991, 18(4): 30–33. (in Chinese))
- [38] Himmelsbach, T., H. Hotzl, P. Maloszewski. Solute transport processes in a highly permeable fault zone of Lindau fractured rock test site (Germany) [J]. *Ground Water*, 1998, 36(5): 792–800.
- [39] Dieulin, A. Propagation de Pollution Dans un Aquifere Alluvial: l'effet de Parcours [D]. University of Sciences and Medicine of Grenoble, 1980.
- [40] Freyberg, D. L. A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer, 2, spatial moments and the advection and dispersion of nonreactive tracers [J]. *Water Resour. Res.*, 1986, 22: 2031–2046.
- [41] 蔡绪贻, 陈明佑, 钟佐桀, 等. 利用地下水污染事件的观测资料估算弥散度 [J]. *成都地质学院学报*, 1993, 20(2): 101–105. (CAI Xuyi, CHEN Mingyou, ZHONG Zuoshen, et al. Use data of groundwater contamination affairs to estimate the dispersivity of the aquifer [J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 1993, 20(2): 101–105. (in Chinese))
- [42] 李国敏, W. Kinzelbach. 局部非均质地质介质中的弥散试验研究[J]. *勘察科学与技术*, 1994 (4): 12–16. (LI Guomin, W. Kinzelbach. Local heterogeneity of geological medium dispersion experiment research [J]. *Investigation of Science and Technology*, 1994(4): 12–16. (in Chinese))
- [43] 吴耀国, 田春生, 李云峰. 本钢郑家屯潜水含水层弥散试验研究[J]. *西安地质学院学报*, 1995, 17(1): 56–60. (WU Yaoguo, TIAN Chunsheng, LI Yunfeng. The study of dispersion test in Zhengjiatun, Bengang [J]. *Journal of Xian College of Geology*, 1995, 17(1): 56–60. (in Chinese))
- [44] 王永森, 陈建生, 陈亮. 考虑弥散系数尺度效应的溶质运移模型研究[J]. *人民黄河*, 2008, 30(11): 60–62. (WANG Yunsen, CHEN Jiansheng, CHEN Liang. Considering the effect of dispersion coefficient scale solute transport model research [J]. *Yellow River*, 2008, 30(11): 60–62. (in Chinese))
- [45] 蒋振娇. 承压含水层中古咸水体迁移过程的不确定性及其随机性模拟 [D]. 吉林: 吉林大学环境与资源学院, 2011. (JIANG Zhenjiao. Determination of Paleo-saltwater Intrusion Processes by Use of Deterministic and Stochastic Models [D]. Jilin: College of Environment and Resources, Jilin University, 2011. (in Chinese))
- [46] 卞建民, 蒋振娇, 张丽妹. 含水层中弥散系数的尺度效应 [J]. *吉林大学学报(地球科学)*, 2012, 42(4): 1159–1165. (BIAN Jianmin, JIANG Zhenjiao, ZHANG Lishu. Scale effect about dispersion coefficient in acquifers [J]. *Journal of Jilin university (Earth Science)*, 2012, 42(4): 1159–1165. (in Chinese))
- [47] Domenico P A, Robbins G. A. A dispersion scale effect in model calibrations and field tracer experiments [J]. *Journal of Hydrology*, 1984, 70: 123–132.

- University(Nature.Science), 2010,38(4):226–233. (in Chinese))
- [7] 陈启慧,夏自强,郝振纯,等. 计算生态需水的 RVA 法及其应用[J]. 水资源保护, 2005,(3):4–7.(CHEN Qihui, XIA Ziqiang, HAO Zhenchun, et al. RVA method for the computation of ecological water requirement and its application [J]. Water Resources Protection, 2005, (3):4–7. (in Chinese))
- [8] Yin X. A., Yang Z. F., Petts G. E. A new method to assess the flow regime alterations in riverine ecosystems [J]. River Research and Applications, 2015,31(4), 497–504.
- [9] 黎云云,畅建霞,涂欢,等. 黄河干流控制性梯级水库联合运行对下游水文情势的影响[J]. 资源科学, 2014,36(6):1183–1190. (LI Yunyun, CHANG Jianxia, TU Huan, et al. Impact of controlling cascade reservoir joint operation on hydrologic regimes in the lower Yellow River [J]. Resources Science, 2014,36(6):1183–1190. (in Chinese))
- [10] Olden J. D., Poff N. L. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes [J]. River Research and Applications, 2003,19(2):101–121.
- [11] Xu Z. X., Zhao F. F., Li J. Y. Response of streamflow to climate change in the headwater catchment of the Yellow River basin [J]. Quaternary International, 2009,208(1):62–75.
- [12] 张建业,章四龙,王金星,等. 近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. 水科学进展, 2007,18(2):230–234.(ZHANG Jianyun, ZHANG Silong, WANG Jinxing, et al. Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years [J]. Advances in Water Science, 2007,18(2):230–234.(in Chinese))
- [13] Diakoulaki D., Mavrotas G., Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: the CRITIC method [J]. Computers & Operations Research, 1995,22(7):763–770.

A New Method to Assess Hydrological Regime Alterations Considering Hydrological Year Types and Correlation Among IHA

ZHOU Yi¹, CUI Tong², GAO Man², ZHENG Xin², YANG Tao², LIU Miao¹

(1. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Range of Variability Approach (RVA) is an important method to evaluate the alteration of river streamflow. However, the traditional range of variability approach (RVA) has the drawback that variabilities of low and medium flow indicators are often ignored. To assess flow regime alterations more comprehensively, an improved RVA method was proposed based on the CRITIC method (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) combined with Euclidean distance. The observed streamflow data of the Tangnaihai station from 1960 to 2009 in the source region of the Yellow River were used to validate the rationality of the new method. Meanwhile, the change trend of hydrology index and the overall degree of hydrological variation in the region were analyzed. The results show that the annual streamflow indicate a decreasing trend after the mutation in 1990. After the disturbance, the overall changing degrees calculated by the improved method is 27.33%, belongs to medium change. Nine IHA indicators, including mean flow in February/March, annual minimum 7/30/90-day flow, annual maximum 90-day flow, mean duration of high flow, decreasing rate and increasing rate of flow, belong to moderate change, while the rest of the indicators belong to low change. Compared with the traditional RVA, the improved RVA method can effectively consider the impact of low and medium indices and make the evaluation results more objective.

Key words: IHA; RVA; Euclidean distance; CRITIC method; source region of Yellow River; hydrological characteristics

(上接第 13 页)

Research Progress and Prospects of Dispersion Scale Effect Test

DONG Guiming¹, CHANG Dahai¹, TIAN Juan², CAO Enwei³

(1. School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 222116, China;

2. School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 222116, China;

3. Environmental Monitor Central Station of Xuzhou, Xuzhou 222116, China)

Abstract: The problem of hydrodynamic scale-dependent dispersion is an important aspect of studying groundwater contaminant transport. Aiming at domestic and international study in scale-dependent dispersion, this paper summarized research progress of scale-dependent dispersion from lab and field. The proportion of causing scale-dependent dispersion was counted under various influence factors in laboratory test, and the reasons for causing scale-dependent dispersion were analyzed according to form data. Finally, study expectation of scale-dependent dispersion were proposed: (1) Testing the existence of scale-dependent dispersion; (2) Studying generation mechanism of scale-dependent dispersion; (3) Quantitative research on scale-dependent dispersion.

Key words: hydrodynamic dispersion; scale effect; dispersivity; laboratory experiment; field experiment.