

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2019.0142

敦宇,武超,杨帆,等.基于随机模拟的地下水铬污染健康风险动态评价[J].南水北调与水利科技,2019,17(6):121-126,137.
DUN Y, WU C, YANG F, et al. Dynamic health risk assessment of chromium pollution in groundwater based on the stochastic simulation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(6): 121-126, 137. (in Chinese)

基于随机模拟的地下水铬污染健康风险动态评价

敦宇¹, 武超¹, 杨帆², 靳潇锐², 吴国庆¹, 张兆吉¹, 费宇红¹

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061; 2. 河北省地质环境监测院, 石家庄 050021)

摘要:在考虑污染场地水文地质参数的空间变异性以及浓度随时间变化的基础上,构建了污染场地健康风险动态评价模型。通过灵敏度分析选取空间变异对数值模拟影响较大的随机参数,运用地下水模拟系统(groundwater modeling system, GMS)中的蒙特卡罗随机模拟得到敏感点污染物任意时刻的概率浓度分布特征,进而选取50%和95%分位点分别代表正常情况和最不利情况,预测敏感点健康风险历时变化特征。以石家庄市藁城区某铬化工污染场地为案例进行分析,结果表明,敏感点初始时健康风险值为0.81,在可以接受的风险范围内,污染羽运移1 a后,在正常情况和最不利情况下,风险值分别为1.28、1.52,均大于1,即存在非致癌风险,随后逐渐增大,正常情况下,直到第13年才达到风险可接受水平,说明敏感点未来一段时间都存在较大的健康风险,因此需要对污染场地地下水进行修复。

关键词:随机理论;灵敏度分析;地下水铬污染;健康风险

中图分类号:X523 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Dynamic health risk assessment of chromium pollution in groundwater based on the stochastic simulation

DUN Yu¹, WU Chao¹, YANG Fan², JIN Xiaorui², WU Guoqing¹, ZHANG Zhaoji¹, FEI Yuhong¹

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China; 2. Hebei Province Institute of Geological Environment Monitoring, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Based on the spatial variability of hydrogeological parameters of a contaminated site and the change of concentration with time, a dynamic evaluation model of health risk assessment was constructed. Through a sensitivity analysis, stochastic parameters that had great influence on numerical simulations by spatial variability were selected. Two percentiles (50% and 95%) were selected to represent normal and most unfavorable condition, respectively, to predict the variation in duration of the health risk at the sensitive spot. A chromium-contaminated site in Gaocheng City, China, was selected as a case study. The results showed that the initial health risk value of sensitive spot was 0.81, while removing the contaminant plume after one year, under the normal and the most unfavorable conditions the risk values were 1.28 and 1.52, respectively. Accordingly, there was a gradually increasing non-carcinogenic risk. Under normal conditions, the risk value was not reach to acceptable level until 13th year, indicating the sensitive point.

Key words: stochastic theory; sensitivity analysis; groundwater pollution of chromium; health risk assessment

收稿日期:2019-03-25 修回日期:2019-09-20 网络出版时间:2019-10-08

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191008.1141.002.html>

基金项目:国家自然科学基金(41701368);中国地质科学院基本业务科研经费(JYYWF20181303);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07109-001-004)

作者简介:敦宇(1982—),男,河北石家庄人,助理研究员,博士,主要从事环境地质方面研究。E-mail: dunyu2014@163.com

通信作者:武超(1984—),男,河北石家庄人,助理研究员,博士,主要从事环境地质方面研究。E-mail: 59214645@qq.com

铬广泛存在于自然界,其自然来源主要是岩石风化,大多呈三价;工业废水中主要是六价铬的化合物,常以铬酸根离子(CrO_4^{2-})存在^[1]。水体中的三价铬主要被吸附在固体物质上而存在于沉积物中;六价铬则多溶于水中。三价铬和六价铬对人体健康都有害,但是三价铬的迁移能力弱,并且毒性低,六价铬具有高迁移能力、毒性强,更易为人体吸收,而且可在体内蓄积,毒性比三价铬高出 100 倍,进入环境后会对人体健康和周围生态环境造成持续的伤害^[2]。六价铬对人主要是慢性毒害,它可以通过消化道、呼吸道、皮肤和粘膜侵入人体,在体内主要积聚在肝、肾和内分泌腺中,通过呼吸道进入的则易积存在肺部^[3]。临床医学证明,长期暴露于六价铬与肺癌发生率有一定的相关性^[4]。因此对于地下水受到铬污染所产生的健康风险值得关注。

地下水污染健康风险评估是基于保护人类健康,根据污染物的致毒机理并分析有毒物质的暴露途径,从而科学地量化评估污染物对人体的健康的致癌风险或危害水平^[5]。最初,国内外很多学者进行地下水污染的健康风险评价时,都是从参数的确定性角度出发进行评价,并没有考虑模型参数的不确定性因素,而随着随机理论的广泛应用,已有学者在健康风险评价中应用蒙特卡罗方法考虑到了参数的不确定性。Batchelor 对某危废污染场地的相关参数运用概率密度分布函数进行描述,建立污染场地健康风险评价的随机模型^[6];徐敏通过建立随机微分方程获得各种参数的概率密度分布函数,实现了水环境风险的初步研究^[7];美国 EPA 的 EPACMTP 模型充分考虑污染物在包气带和饱水带运移过程中各种参数的不确定性,获得了暴露点浓度的概率分布^[8]。但是应用地下水模拟系统(Groundwater Modeling Systems)进行地下水污染物运移随机模拟的研究还较为少见。由于场地水文地质参数的复杂性以及不同参数的不确定性对于地下水溶质运移预测结果的影响不同,一些参数的变动对运移结果影响很小,忽略了污染场地地下水中溶质运移过程中水文地质参数的空间异质性影响程度的大小。因此,大多数健康风险评价都是基于水质指标检测或者暴露点最大预测浓度的静态评价,没有考虑健康风险值随时间的动态变化。

不确定性分析方法提供了对空间变异进行估计和对不确定性进行预测的手段,已经成为当今水质分析模拟中对预期值进行估计的一个重要部分^[9]。文章以石家庄市藁城区某铬化工厂含铬废水通过渗井直排含水层造成地下水铬污染为例,提出基于随

机理论的地下水污染健康风险动态评价,该评价模型综合考虑了污染物在地下水中随时间的运移以及含水层参数的空间变异性,首先通过参数灵敏度分析确定对地下水溶质运移影响较大的参数,从时间和空间维度上拓展了健康风险评价理论,对场地的地下水铬污染进行了动态的健康风险评价。

1 健康风险动态评价技术方法

据研究,含水层参数的空间变异性 and 不确定性对于预测污染物的运移扩散具有重要的影响^[10],本次模型在参数敏感性分析的基础上,选取空间变异对数值模拟影响较大的随机参数,基于随机理论中的蒙特卡罗模拟通过 GMS 模拟污染物在含水层中的运移,得出在未来不同时间段敏感点的污染物概率浓度值,实现了暴露剂量的动态预测,对人体健康风险进行动态评价。

1.1 随机模型的建立

随机模型的建立是以已知的信息为基础,以随机函数为理论基础,应用随机模拟方法,产生等概率、高精度的地质参数模型^[11]。其中“等概率”是指模型参数的统计特征与现有样品的统计特征或者参数的理论分布是一致的;“高精度”是指所合成的模型能够反映参数的细微变化^[12]。

蒙特卡罗法是目前地下水水文地质参数随机模拟的一种有效方法^[13]。它假定参数如渗透系数、给水度、降雨入渗强度等这些随机变量的概率密度分布函数为已知的,渗透系数、降雨入渗强度被认为符合对数正态分布,给水度符合均匀分布,并且已知这些随机变量之间的协方差函数。在各个参数的概率密度分布设置好的情况下,指定该分布的统计特征(均值、标准差、最大值、最小值)^[14]。抽样产生每一随机变量的一个样本值,在每一样本值的基础上运行 MODFLOW,重复运行 N 次后得到一系列的水头分布,由此获得区内任意点的水位的随机特征^[15],然后在水流模型的基础上运行溶质运移模型(MT3D),从而获得区内目标污染物任意时刻的概率浓度分布。

1.2 参数灵敏度分析

参数的灵敏度是度量一种因子的变化对另一种因子的影响程度,可以量化地下水流模拟中随机变量对水头模拟结果的影响程度^[16]。灵敏度分析不仅可以确定参数不确定性对地下水数值模型产生的影响,还能判断因参数变化造成的模型结果的变化趋势^[17]。这样在参数识别时,可重点考虑对结果影

响较大的参数。

本次模型灵敏度分析采用因子变化法,即针对一个参数,在其它参数保持变化的情况下,将待分析的参数增加或减少一个幅度,分析地下水模拟结果在该参数发生变化的变化情况。

某一模型因变量对模型输入参数的灵敏度可用该因变量对该输入参数的偏导数^[18]表示,即

$$X_{i,k} = \frac{\partial H_i}{\partial \alpha_k} \quad (1)$$

式中: $X_{i,k}$ 为因变量水位 H 对在第 i 个观测点第 k 个参数上的灵敏度系数; H_i 为 i 点的水位; α_k 为第 k 个参数的初值。

为便于随机参数灵敏度的比较,采用灵敏度系数的标准化无量纲模式

$$X_{i,k}^* = \frac{\frac{\partial H_i}{\partial \alpha_k}}{\frac{H_i}{\alpha_k}} \quad (2)$$

式中: $X_{i,k}^*$ 为 $X_{i,k}$ 的无量纲值。

1.3 健康风险评价模型

采用美国环保局(USEPA)提出的健康风险评价模型进行评价。具体步骤是毒性评估、暴露评估、风险表征^[19]。

毒性评估是指污染物暴露产生的危害或疾病的类型,相关的剂量-效应关系。化学物质的危害类型分为致癌物质和非致癌物质。

暴露评估基于随机模拟得到的敏感点评价时段污染物暴露浓度,并调查污染场地周边的暴露人群分布、暴露途径、暴露频率等参数,确定敏感点污染物评价时段的暴露量,即

$$CDI = \frac{CW \times IR \times EF \times ED}{AT \times BW} \quad (3)$$

式中:CDI 为单位时间单位体重污染物的暴露剂量($\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$);CW 为污染物暴露点的质量浓度(mg/L);IR 为摄取速率(L/d);EF 为暴露频率(d/a);ED 为暴露期(a);AT 为人体平均体重(kg);BW 为平均暴露时间(d)。

风险表征是指暴露人群受污染物毒性影响的可能性。

致癌物质的风险评价公式为

$$R = CDI \times SF \quad (4)$$

式中:SF 为污染组分的致癌斜率因子($\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$)。

非致癌物质的风险评价公式为

$$HI = CDI / RfD \quad (5)$$

式中:RfD 为污染组分的非致癌参考剂量($\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$)。

2 案例分析

2.1 污染场地概况

2.1.1 污染场地水文地质状况

铬酸酐化工污染场地位于河北省石家庄市藁城梅花镇西南 500 m,地处太行山中段山前倾斜平原,滹沱河冲洪积扇的中上部,地势西高东低,地下水主要赋存于第四系松散岩层孔隙中,场地位于石家庄凹陷区内,第四系松散层厚度为 300~320 m。根据钻孔资料,场地地下 100 m 范围内共有 2 层含水层,第一层为 38~45 m 处中砂,厚度 3~6 m,该层含水层由于常年过量抽取地下水已经近疏干的状态,水量很小,不作为当地主要供水含水层,第二层埋深 70 m 左右,主要岩性为中砂,厚度 1~4 m,查明上层孔隙潜水(微承压水)与下层孔隙局部承压含水层之间的黏土层不连续,两含水层之间没有连续的隔水层,地下水位近似一致,水力联系密切,可以概化为一层浅水层。由于长期开采的影响,研究区地下水流向由北向南。

2.1.2 污染场地地下水污染现状

污染场地占地 500 m^2 ,于 2007 年停产,据调查,化工厂在运行期间有一眼 70 m 左右深的渗井,含铬废水通过该渗井直接排入到含水层中。

本次研究根据地下水流向、现有渗井污染物浓度检出情况以及污染物在地下水中扩散趋势,布设 5 口监测井,形成了 1 个横向监测断面和 1 个纵向监测断面组成的监测网。2018 年春季对场地下游监测井及附近民井的进行地下水样品采集及检测,通过 GIS 的 Kriging 空间插值分析功能得到六价铬浓度等值线分布图(见图 1)。污染羽已经运移到下游 200 m,六价铬最大检出质量浓度为 0.232 mg/L ,最小值为 0.030 mg/L ,敏感点质量浓度为 0.034 mg/L 。

2.2 随机模型的建立及数值模拟

2.2.1 模型概化

根据研究区水文地质条件,本研究将第四系孔隙潜水含水层与孔隙承压含水层系统概化为一层,地下水流可概化为非均质各向同性的潜水平面二维流。模拟区北侧地下水位变化不大,可定义为定水头边界,东西两侧以流线为边界定为隔水边界,南侧定位排泄边界。含水层上部主要接受大气降水补给,为当地含水层主要的源汇项。溶质运移以六价铬作为模拟对象,以现有监测数据中六价铬质量浓度的最高值作为初始质量浓度。

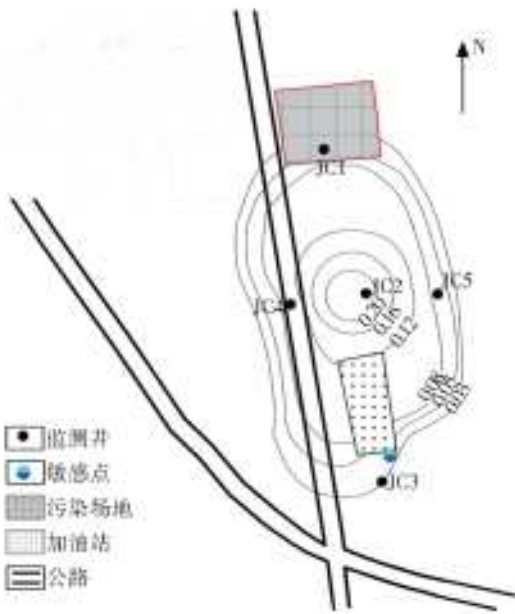


图 1 污染场地六价铬质量浓度分布

Fig. 1 Layout of Cr(VI) concentration at mass contaminated site

2.2.2 参数灵敏度分析

本次模型选用渗透系数(K)、降雨补给强度(R)、给水度(μ)三个随机参数进行灵敏度分析,根据现场抽水实验结果确定渗透系数的初值为 16.0 m/d,降雨入渗强度的初值为 130 mm/a、给水度的初值为 0.15。各个参数的变化幅度为 $\pm 30\%$,即在保持其它参数不变的情况下,将待分析参数分别增大、减小 10%、20%和 30%。每次参数值的改变,相应的得到一个水位值,与变化前的水位及参数值相比,根据式(2)计算灵敏度系数,可以得到各个参数灵敏度的计算结果,调整随机参数后的水位变动幅度值见表 1,对各个参数灵敏度计算结果进行对比(图 2),可以看出:对于地下水水位变动的影

表 1 调整随机参数下的水位变动幅度
Tab. 1 Variation of water level under adjusting stochastic parameters

$\partial\alpha_k$ 变化幅度/%	调整 K 后水位变动值/m	调整 μ 后水位变动值/m	调整 R 后水位变动值/m
-30	0.652	0.436	0.105
-20	0.482	0.365	0.088
-10	0.213	0.187	0.061
0	0	0	0
10	0.230	0.195	0.064
20	0.456	0.337	0.085
30	0.634	0.421	0.098

2.2.3 随机模型的建立及运行

模拟区面积约 2.8 km²,采用矩形网格剖分,共

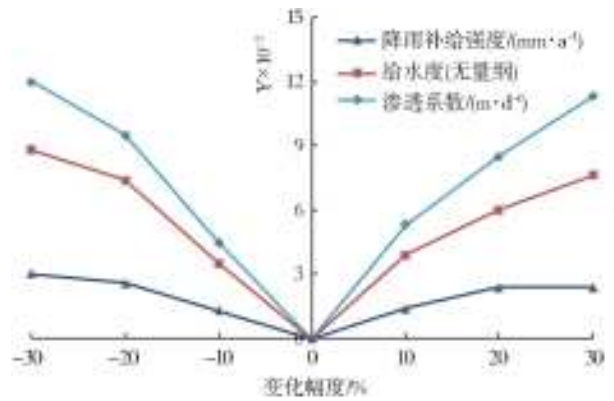


图 2 随机参数灵敏度分析结果

Fig. 2 Sensitivity analysis of the random parameters

剖分为 1 652 个单元。基于灵敏度分析结果,本研究主要考虑渗透系数、给水度这两个水文地质参数的空间变异性,其它水文地质参数、降水补给强度、开采井抽水量、边界条件等仍作为确定性参数输入。

由于区内含水层岩性以中砂为主,渗透系数一般介于 10~25 m/d,给水度 μ 一般介于 0.15~0.32。根据实测水位数据以及抽水试验结果对模型进行反复调参后,得到这两个水文地质参数的均值,渗透系数为 16 m/d,给水度为 0.15,以此作为随机参数的初始值,渗透系数变化范围为初始值的 $\pm 25\%$,给水度变化范围为初始值 $\pm 20\%$,标准差取值大小反映参数空间变异性,本次取值为区间长度的 30%,见表 2。

表 2 随机参数的输入
Tab. 2 Stochastic parameter input

参数	初值	最大值	最小值	标准差
渗透系数/(m·d ⁻¹)	16.00	20.00	12.00	2.400
给水度	0.15	0.12	0.18	0.018

设定模型随机模拟次数为 200 次,相应得到 200 组随机参数值,模型预测初始期为 2018 年 9 月,预测敏感点处未来 20 a 内污染物浓度变化,在此基础上运行可得到任意时刻 200 组地下水随机流场以及溶质运移解。同时利用 GMS 的数据处理工具对输出结果进行统计分析。

2.2.4 模拟结果分析

利用蒙特卡罗模拟得到的随机参数组合,可以得到敏感点目标污染物六价铬任意时刻的质量浓度累积概率分布,分别取 95%与 50%分位值代表最不利与正常条件下敏感点污染物的质量浓度^[13](图 3)。

从图 3 可以看出,敏感点处六价铬初始质量浓度为 0.034 mg/L,随后逐渐增大,至第 5 年达到最大值,95%、50%分位下敏感点处质量浓度最大值分

别达到 0.164、0.142 mg/L(图 4),随后逐渐降低。

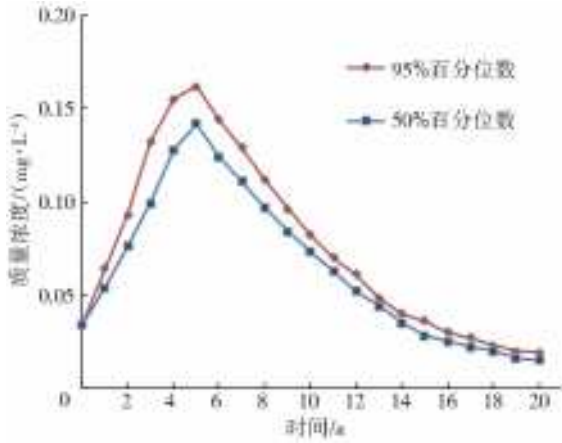


图 3 敏感点处六价铬质量浓度历时变化
Fig. 3 Duration change chart of Cr (VI) mass concentration at sensitive spot

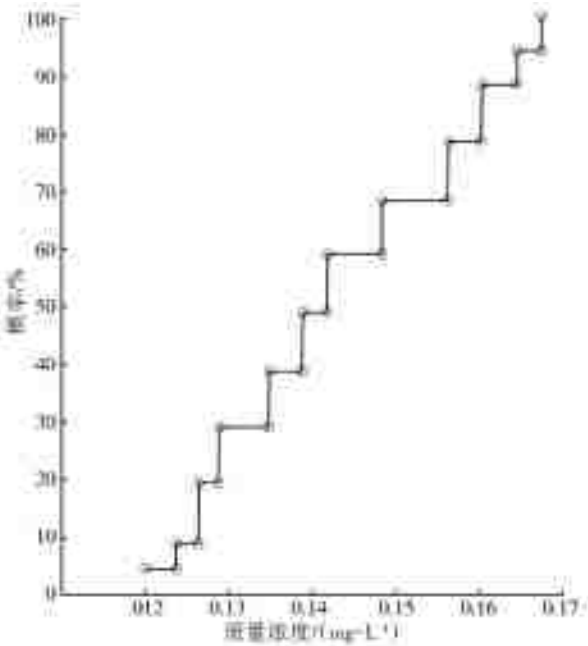


图 4 第 5 年敏感点六价铬质量浓度累积概率分布
Fig. 4 The cumulative probability chart of Cr (VI) mass concentration at sensitive spot in the fifth year

2.3 健康风险评价

根据场地周边居民的生活习惯,地下水中六价铬暴露途径主要通过皮肤接触,查阅相关资料,六价铬通过皮肤接触暴露只对人有非致癌影响。RfD 和皮肤接触摄取速率(IR)参照 USEPA 给定值,RfD 值为 0.003 mg/(kg·d),皮肤接触摄取速率(IR)为人均 5 L/d^[20]。暴露频率、暴露期、人体平均体重等与生活习惯相关的参数根据当地居民生活习惯给定估计值,暴露频率为 365 d/a,暴露期为 30 a,人体平均体重 70 kg,平均暴露时间 10 950 d。

根据式(3)和(5)计算敏感点处最不利和正常条件下六价铬的危害指数。非致癌危害指数大于 1,

即为不可接受风险水平,由表 4 可以看出:初始时风险值为 0.81,在可以接受的风险范围内;污染羽运移 1 a 后,在正常情况和最不利情况下;风险值分别为 1.28、1.52,均大于 1,即存在非致癌风险,在第 5 年分别达到最大值,即 3.86、3.39;随后逐渐降低,在正常情况下,直到污染羽运移 13 a 后,风险值为 0.98,才达到可接受水平;最不利情况下,污染羽需运移 15 a 后,风险值为 0.86,达到可接受水平(图 5)。

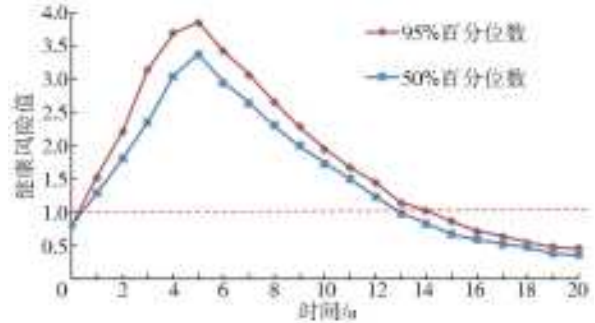


图 5 敏感点处六价铬健康风险值历时曲线
Fig. 5 Duration curve of Cr (VI) health risk value at sensitive spot

3 结论

在参数灵敏度分析的基础上,选取灵敏度较大的渗透系数和给水度作为随机参数,运用 GMS 中的蒙特卡罗模拟得到敏感点处任意时刻的概率浓度分布及不同情况下的健康风险值。评价结果表明:敏感点初始时健康风险值为 0.81,在可以接受的风险范围内;污染羽运移 1 a 后,在正常情况和最不利情况下,风险值分别为 1.28、1.52,均大于 1,即存在非致癌风险;随后逐渐增大,正常情况下,直到第 13 年才达到风险可接受水平,说明敏感点未来一段时间都存在较大的健康风险,因此需要对污染场地的地下水进行修复。评价结果较好地反映了污染场地的健康风险特征,为污染场地的下一步治理提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] SAMUEL J, PULIMI M, PAUL M L, et al. Batch and continuous flow studies of adsorptive removal of Cr (VI) by adapted bacterial consortia immobilized in alginate beads[J]. Bioresour Technol, 2013, 128: 423-430. DOI:10.1016/j.biortech.2012.10.116.
- [2] ZENG Y, WANG L, JIANG L, et al. Joint toxicity of lead, chromium, cobalt and nickel to photobacterium phosphoreum: no observed effect concentration[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2015, 95 (2): 260-264. DOI: 10.1007/

s00128-015-1568-7

- [3] BROADWAY A, CAVE M, WRAGG J, et al. Determination of the bioaccessibility of chromium in Glasgow soil and the implications for human health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 409(2): 267-277. DOI:10.1016/j.scitotenv.2010.09.007.
- [4] 颜湘华, 王兴润, 李丽, 等. 铬污染场地调查数据评估与暴露浓度估计[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(1): 103-108. (YAN X H, WANG X R, LI L, et al. Estimating exposure point concentrations and evaluating survey data for a chromium-contaminated site[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(1): 103-108. (in Chinese)) DOI:10.13198/j.res.2013.01.107.yanxh.015.
- [5] EVA L, MARTA S, JOSE L, et al. Human health risks of petroleum contaminated groundwater[J]. *Environment Environmental Science and Pollution Research*, 2008, 15(3): 278-288. DOI:10.1065/espr2007.02.390.
- [6] BATCHELOR B, VALDE'S J, ARAGANSE V. Stochastic risk assessment of sites contaminated by hazardous wastes[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1998, 124(4): 380-388. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9372(1998)124:4(380).
- [7] 徐敏, 曾光明, 黄国和, 等. 非线性随机水环境风险模型[J]. *水利学报*, 2005, 36(1): 56-61. (XU M, ZENG G M, HUANG G H, et al. Nonlinear and stochastic risk model of water environmental[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(1): 56-61. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:0559-9350.2005.01.009.
- [8] U. S. EPA (Environmental Protection Agency). EPA's composite model for leachate migration with transformation products (EPACMTP). Background document [S]. Washington DC: Office of Solid Waste, 1996.
- [9] 顾文龙, 卢文喜, 马洪云, 等. 地下水数值模拟分析中降水入渗补给强度及渗透系数不确定性评价[J]. *水电能源科学*, 2015(11): 45-48. (GU W L, LU W X, MA H Y, et al. Uncertainty evaluation of precipitation infiltration rate and hydraulic conductivity in groundwater numerical simulation analysis[J]. *Water Resources & Power*, 2015(11): 45-48. (in Chinese)) DOI:1000-7709(2015)11-0045-04.
- [10] 刘玉珍, 王本德, 姜英震. 基于可变水文地质参数的地下水系统数学模型[J]. *水科学进展*, 2009, 20(3): 398-402. (LIU Y Z, WANG B D, JIANG Y X. Mathematical model for groundwater system based on the variable hydro-geological parameters[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(3): 398-402 (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1001-6791.2009.03.015.
- [11] 吴吉春, 陆乐. 地下水模拟不确定性分析[J]. *南京大学学报: 自然科学*, 2011, 41(3): 227-334. (WU J C, LU L. Uncertainty analysis for groundwater modeling [J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 2011, 41(3): 227-334. (in Chinese)) DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2011.03.009.
- [12] PASETTO D, PUTTI M, YEH W. A reduced-order model for groundwater flow equation with random hydraulic conductivity: Application to Monte Carlo methods[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(6): 3215-3228. DOI:10.1002/wrcr.20136.
- [13] 徐亚, 刘景财, 刘玉强, 等. 基于 Monte Carlo 方法的污染场地风险评价及不确定性研究[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(6): 1579-1584. (XU Y, LIU J C, LIU Y Q, et al. Quantification of uncertainty in evaluating the health risk of a contaminated site based on Monte Carlo method [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(6): 1579-1584. (in Chinese)) DOI:10.13671/j.hjkxxb.2014.0219.
- [14] 吴晓艳, 熊正为, 彭小勇, 等. 参数随机模拟在地下水溶质运移数值模拟中的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2012, 23(6): 58-61. (WU X Y, XIONG Z W, PENG X Y, et al. Application of stochastic parameter simulation to groundwater numerical simulation of solute transport [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2012, 23(6): 58-61. (in Chinese)) DOI:1672-643X(2012)06-0058-04.
- [15] 苏小四, 杜守营, 杜尚海, 等. 基于随机模拟的浑河冲洪积扇地区地下水压采风险预报[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(3): 986-994. (SU X S, DU S Y, DU S H, et al. Risks forecast under groundwater compressive exploitation based on random simulation in Hun River's alluvial fan[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* 2014, 44(3): 986-994 (in Chinese)) DOI:10.13278/j.cnki.jjuese.201403209.
- [16] 李木子, 翟远征, 左锐, 等. 地下水溶质迁移数值模型中的参数敏感性分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(3): 133-137. (LI M Z, ZHAI Y Z, ZUO R, et al. Sensitivity analysis of parameters in numerical simulation of solute transport in groundwater[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12(3): 133-137. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2014.03.029.
- [17] 束龙仓, 王茂枚, 刘瑞国, 等. 地下水数值模拟中的参数灵敏度分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(5): 491-495. (SHU L C, WANG M M, LIU R G, et al. Sensitivity analysis of parameter in numerical simulation of groundwater [J]. *Journal of Hehai University (Natural Sciences)* 2007, 35(5): 491-495. (in Chinese)) DOI:1000-1980(2007)05-0491-05.

(下转第 137 页)

- [24] GALEK, MONIKA, HACHAJ, et al. Application of the RMA2/RMA4 models to simulate pollution transport in a retention reservoir [J]. *Geo Planet-Earth and Planetary Sciences*, 2013, (11): 301-313. DOI: 10.1007/978-3-64-30209-1_21.
- [25] CHEN K L, ZHU X D, WANG J K, et al. water pollution load in coastal zone of Xiamen; Estimation and forecast[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(9): 2091-2096.
- [26] DENG Y, WANG S, LI Z C. Application of a water quality model in pollution load estimation in Dongguan [J]. *Acta Scientiae Circumstantiate*, 2009, 29 (11): 2458-2464.
- [27] 郑辉军, 马玉香, 赵奎, 等. 石河子垦区人口增长预测与可持续发展研究[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(21): 9110-9113. (ZHEN H J, MA Y X, ZHAO K, et al. On prediction of population growth and sustainable development in Shihezi[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41 (21): 9110-9113. (in Chinese)) DOI: 10.13989/j. cnki. 0517-6611. 2013. 21. 063.
- [28] 刘畅. 玛纳斯河流域水污染控制规划研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005. (LIU C. Research on water pollution control programming of Manasi River drainage basin [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese))
- [29] 陈茹, 王兵, 卢金勇. 环境管制与工业生产率增长: 东部地区的实证研究[J]. *产经评论*, 2010 (2): 74-83. (CHEN R, WANG B, LU J Y. Environmental regulation and industry productivity growth: An empirical study of the eastern region[J]. *Industrial Economic Review*, 2010(2): 74-83. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j. issn. 1674-8298. 2010. 02. 009.
- [30] 翟家瑞. 流域单位线的推求方法——分析试错法[J]. *水文*, 1982 (5): 35-36. (ZHAI J R, Watershed unit hydrograph derived method of trial and error [J]. *Journal of China Hydrology*, 1982 (5): 35-36 (in Chinese))

.....

(上接第 126 页)

- [18] 杜守营, 鹿帅, 杜尚海. 基于 GMS 的地下水流数值模拟及参数敏感性分析[J]. *中国农村水利水电*, 2013 (8): 77-80. (DU S Y, LU S, DU S H. Numerical simulation of groundwater and sensitivity analysis of parameters based on GMS[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2013(8): 77-80. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j. issn. 1007-2284. 2013. 08. 020.
- [19] 张会兴, 张征, 宋莹. 地下水污染健康风险评价理论体系研究 [J]. *环境保护科学*, 2013, 39 (3): 59-63. (ZHANG H X, ZHANG Z, SONG Y. Research on theoretical system of groundwater pollution health risk assessment[J]. *Environmental Protection Science*, 2013, 39(3): 59-63. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j. issn. 1004-6216. 2013. 03. 015.
- [20] U. S. EPA (Environmental Protection Agency). Health effects assessment summary tables. FY 1997 Update EPA-540-R-97-036[S].