

淄博市博山区地下水污染 成因探讨及时空模拟

周念清

朱学愚

(核工业第四勘察院 石家庄 050021) (南京大学地球科学系 南京 210008)

【摘要】博山是山东省淄博市南部的一个工业城市,完全依靠中奥陶系碳酸盐中的裂隙——喀斯特水作为供水水源。城区附近的水源均受到相当程度的污染。本文研究了该区主要的污染源、污染途径及导致地下水污染的机理,地下水中主要污染组分及其在空间的分布特征,并用模糊数学方法进行地下水的水质评价,用地质统计学中趋势面分析和克里金(Kriging)方法模拟地下水中污染组分的空间分布,用灰色系统方法和对流——弥散方程的特征有限元解进行地下水污染的预报,还对各种方法的优缺点进行了比较。最后提出了博山区地下水环境保护的建议。

【关键词】地下水污染 模糊数学 趋势面分析 灰色系统方法 克里金法

【Abstract】 This paper studies the main pollution sources to the groundwater of fracture-karst in Middle Odovician carbonaterockes, which is the unique sources for the urban water supply, and the main contaminants in groundwater, its characteristics of space-distribution, estimates groundwater quality by fuzzy mathematic method. Trend surface analysis and Kriging method in Geostatistical methods are taken to simulate contaminants distribution in space, grey system method and characteristic finite element solution of advantages and disadvantages of these methods are compared. Finally some proposal for protection of groundwater environment in Boshan are suggested.

【Keywords】 Groundwater pollution, Fuzzy mathematics, Trend surface analysis, Grey system method, Kriging method

前言

博山位于淄博市的南部,在地形上处于淄博盆地的南缘,东、南、西三面环山,向北开阔。孝妇河由南向北从中部纵穿博山城区。根据1964~1992年的资料,年平均降水量为677.97mm。

在博山南部鲁山一带分布有前震旦系的花岗片麻岩,其中含有裂隙水,水量不大,但水质优良。在中部及城区一带分布有中奥陶系的灰岩和白云岩,总厚度700多米,可划分为六段,其中 O_2^1 和 O_2^2 为相对隔水层, O_2^3 、 O_1^1 、 O_1^2 和 O_1^3 为本区的主要含水层。 O_1^1 、 O_1^2 和 O_1^3 中的裂隙——喀斯特水是目前城市的

主要供水水源,单井出水量为每日数千立方米。北部地区分布有煤系的砂页岩地层,其中二叠系的奎山组为石英砂岩,厚70~80m,含有裂隙水,单井出水量100~200m³/d,可作农村居民生活用水水源。近年来地区地下水开采量在(100~110)×10³m³/d。

本区地层为一列纵横交错的断裂所切割,形成若干断块,如山头——八陡断块、城区断块、石马断块、福山断块等。每一断块都是一个相对独立的水文地质单元,有自己的补给、径流和排泄条件。本区地下水主要靠大气降水入渗补给,人工开采进行排泄。由于博山区位于淄河和孝妇河上游,补

给面积不大，裂隙喀斯特含水层的导水性大而贮水性小，且地下水的补给区和排泄区比较接近，地下水位年变化幅度较大，一般为40~50m，最大可达100m以上。

1 污染源和污染途径

1.1 博山区的主要污染源

(1) 煤矿排水

本区煤矿较多，煤中硫的含量高达3%。矿坑排水呈酸性，pH值约为5， SO_4^{2-} 和 Fe^{2+} 含量高，矿坑水渗入含水层形成循环，造成地下水的污染。本区煤矿排水量约为 $40 \times 10^3 m^3/d$ ，是导致地下水污染的最主要污染源；

(2) 工业废水

本区工业废水的排放量约为 $21 \times 10^3 m^3/d$ ，其主要污染组分为SS、硫化物、pH、石油类、酚、 CH^- 、As、 Cr^{6+} 、Hg、 F^- 、Al、COD等；

(3) 生活污水

其中“三氮”、微生物、洗涤剂、氯离子的含量较高；

(4) 农药、化肥

(5) 固体废弃物

如生活垃圾、工业废渣、煤矸石等。

1.2 博山区地下水污染的途径

(1) 河水入渗



大量的矿坑排水、工业废水和生活污水排入孝妇河及其支流，被污染的河水通过河床中灰岩裸露的渗漏地段时，补给地下水，致使地下水污染；

(2) 补给区的工厂造成的污染

由于博山区许多工厂直接座落在地下水补给区的石灰岩上，裂隙比较发育，生产过程中各环节排放的废污水直接进入含水层；

(3) 垃圾场和其它固体废料堆的淋滤入渗

本区有好几个垃圾堆建在石灰岩的山谷中，也有工业废料及成品农药堆放在石灰岩上，雨季降水淋滤，将污染物带入地下水中。

2 地下水的主要污染组分、分布及其成因探讨

本区地下水中主要污染组分为 SO_4^{2-} ，其次是 Cl^- 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、石油、农药六六六、 F^- 、挥发酚、 Cr^{6+} 、汞、铅、镉等。

SO_4^{2-} 为主要污染组分。造成地下水中 SO_4^{2-} 含量较高的原因主要是煤矿排水和煤矸石的氧化淋滤入渗，如此循环使硫不断氧化形成 SO_4^{2-} 。图1、图2分别为1992年枯水期和丰水期地下水中 SO_4^{2-} 含量在该区的分布图。

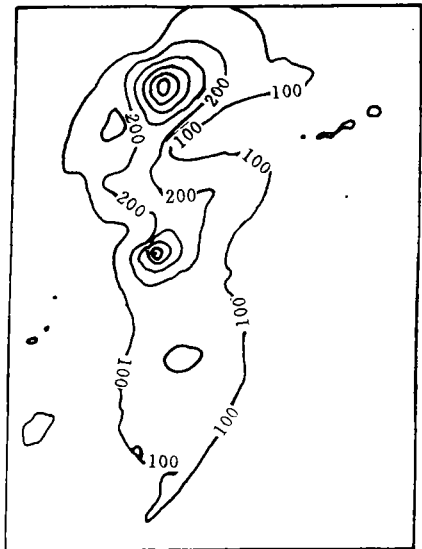


图 1 1992年枯水期地下水中 SO_4^{2-} 含量分布图

图 2 1992年丰水期地下水中 SO_4^{2-} 含量分布图

丰水期和枯水期比较，丰水期地下水中 SO_4^{2-} 含量明显高于枯水期，而且在煤矿附近表现尤为显著。造成这一现象是由于枯水期形成的 SO_4^{2-} 缺乏载体使之不能进入地下水而滞留在包气带中，在丰水期包气带中滞留的 SO_4^{2-} 随降水入渗而进入地下水中，致使地下水中 SO_4^{2-} 含量增高。根据1985~1992年的分析资料，具有上述相似的特征。由于 SO_4^{2-} 含量增高，造成矿化度和硬度的增高。通过对1992年80多个水样的分析资料进行回归分析，其相关关系是很显著的，如图3、图4所示。

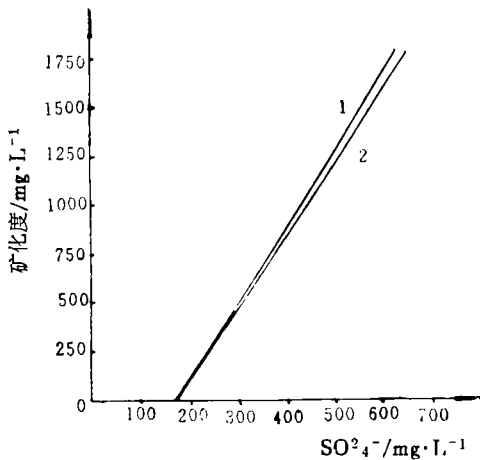


图3 SO_4^{2-} 含量与矿化度的关系

1. 枯水期: 87个水样	2. 丰水期: 84个水样
$Y=1.688X+429.66$	$Y=1.608X+436.63$
$U_{\max}=433.27$	$U_{\max}=433.66$
$U_{\min}=0.34$	$U_{\min}=0.05$
$R=0.904$	$R=0.884$

与孔隙水相比，裂隙——喀斯特水具有导水性大、贮水性小的特点，它易受污染，也易于用抽水消除污染。根据该区建在灰岩上的两个小电镀厂附近地下水的长期监测资料可知，地下水中 Cr^{6+} 含量超标7~8倍。但在1987年底电镀厂搬迁后，1988年6月检测， Cr^{6+} 含量迅速降低，基本上不超标，1989年6月除个别井外，基本上没有分析出。由此可见，只要清除污染源，并辅之以抽水，地下水污染是可以消除的。

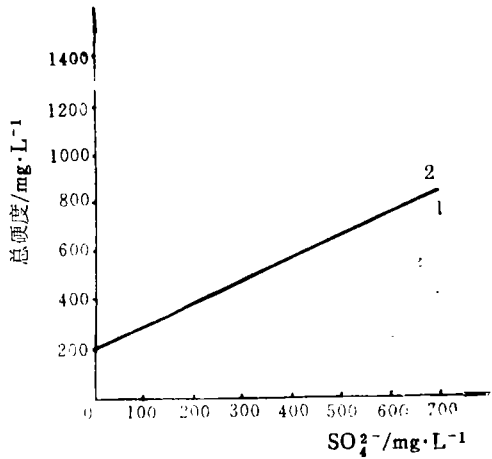


图4 SO_4^{2-} 含量与总硬度的关系

1. 丰水期: 84个水样	2. 枯水期: 87个水样
$Y=1.05X+253.83$	$Y=1.04X+253.78$
$U_{\max}=271.25$	$U_{\max}=248.92$
$U_{\min}=0.25$	$U_{\min}=1.92$
$R=0.84$	$R=0.85$

3 用模糊数学方法进行地下水环境质量评价

3.1 评价因子和评价标准的选择

为了比较全面地反映博山区地下水的水质状况，从实际分析资料出发，在本区选择了9种化学组分作为地下水水质评价的因子，它们分别是 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、矿化度、总硬度、石油类、挥发酚、 Cr^{6+} 。参照有关的国标，除石油类物质的分级依据我国《地面水环境质量标准》(GB3838—88)外，其余8项均采用地矿部《地下水环境质量标准》。按照我国地下水水质现状、工农业及生活用水质量要求，将地下水环境质量分为5级。地下水的环境质量标准见表1。

3.2 评价方法

由于地下水的水质不是由一种因子决定的，表1中各因子的分界线也不是绝对的截然划分的界线，而是一条模糊的界线，故采用模糊数学的方法，用隶属度来刻划这条界线，而隶属度又可用隶属函数来表达。为计算方便，隶属函数取线性的。

(1) 根据评价因子，结合水质分级标准，构造线性隶属函数模型

表 1 地下水环境质量标准

单位: $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项 目 \ 标 准 类 别	I	II	III	IV	V
Cl^-	≤ 50	≤ 150	≤ 250	≤ 350	> 350
SO_4^{2-}	≤ 50	≤ 150	≤ 250	≤ 350	> 350
NO_3^--N	≤ 2	≤ 5	≤ 20	≤ 25	> 25
NO_2^--N	≤ 0.005	≤ 0.010	≤ 0.020	≤ 0.100	> 0.100
矿化度	≤ 300	≤ 500	≤ 1000	≤ 2000	> 2000
总硬度*	≤ 150	≤ 300	≤ 450	≤ 550	> 550
石 油	≤ 0.050	≤ 0.050	≤ 0.050	≤ 0.100	> 0.100
挥发酚	≤ 0.001	≤ 0.001	≤ 0.002	≤ 0.005	> 0.005
Cr^{6+}	≤ 0.005	≤ 0.010	≤ 0.050	≤ 0.100	> 0.100

* 总硬度以每升 CaCO_3 含量 (mg) 计。

$j = 1$ 级水:

$$r_{i,j} = \begin{cases} 1 & 0 \leq d_i \leq C_{i,j} \\ \frac{C_{i,j+1} - d_i}{C_{i,j+1} - C_{i,j}} & C_{i,j} < d_i < C_{i,j+1} \\ 0 & d_i \geq C_{i,j+1} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, 9) \quad (1)$$

$j = 2, 3, 4$ 级水:

$$r_{i,j} = \begin{cases} \frac{C_{i,j+1} - d_i}{C_{i,j+1} - C_{i,j}} & C_{i,j} < d_i < C_{i,j+1} \\ \frac{d_i - C_{i,j-1}}{C_{i,j} - C_{i,j-1}} & C_{i,j-1} < d_i < C_{i,j} \\ 0 & d_i \leq C_{i,j-1} \quad d_i \geq C_{i,j+1} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, 9) \quad (2)$$

$j = 5$ 级水:

$$r_{i,j} = \begin{cases} 1 & d_i \geq C_{i,j} \\ \frac{d_i - C_{i,j-1}}{C_{i,j} - C_{i,j-1}} & C_{i,j-1} < d_i < C_{i,j} \\ 0 & d_i \leq C_{i,j-1} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, 9) \quad (3)$$

式中 $r_{i,j}$ ——单因子隶属度;

$C_{i,j}$ ——水质分级标准;

d_i ——实测浓度。

(2) 组合 $[9 \times 5]$ 模糊矩阵

$$R = [r_{i,j}] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{91} & r_{92} & \dots & r_{95} \end{bmatrix} \quad (4)$$

矩阵的行表示各因子对每级水的隶属度, 矩阵的列表示对某一级别水所有的因子的隶属度, 矩阵 R 表示从 9 个评价因子到水

质等级的一种模糊转化关系。

(3) 计算各因子的模糊权重

由于各评价因子在地下水水质评价中所起的作用不同, 以不同的模糊权重表示各评价因子对水质的影响:

$$W_i = \frac{d_i}{\sum \frac{d_i}{C_{i,j}}} \quad (5)$$

$$W = [W_i] = [W_1, W_2, \dots, W_9] \quad (6)$$

式中 $C_{i,j}$, d_i 的含义同前。

(4) 模糊矩阵的复合运算、综合评判
 在进行单因子评价和配以权重后，得到两个模糊矩阵 R 和 W 进行复合运算得出评价结果。其过程如下： $B = W * R$ (7)

B 的求值公式为： $b_i = V(W_i \wedge r_{i,j})$

$*$ 是评判所取的算子，

$b_i = \max[\min(W_1, r_{1,j}), \min(W_2,$

$r_{2,j}), \dots, \min(W_q, r_{q,j})]$

从 b_i 就可得出每个点对每一级水的最大隶属度，即表示该点的地下水属于哪一级的地下水。

根据1992年丰水期选择87个水井取得的水样分析资料，应用模糊数学方法，最后求得的环境质量分区图如图5所示。

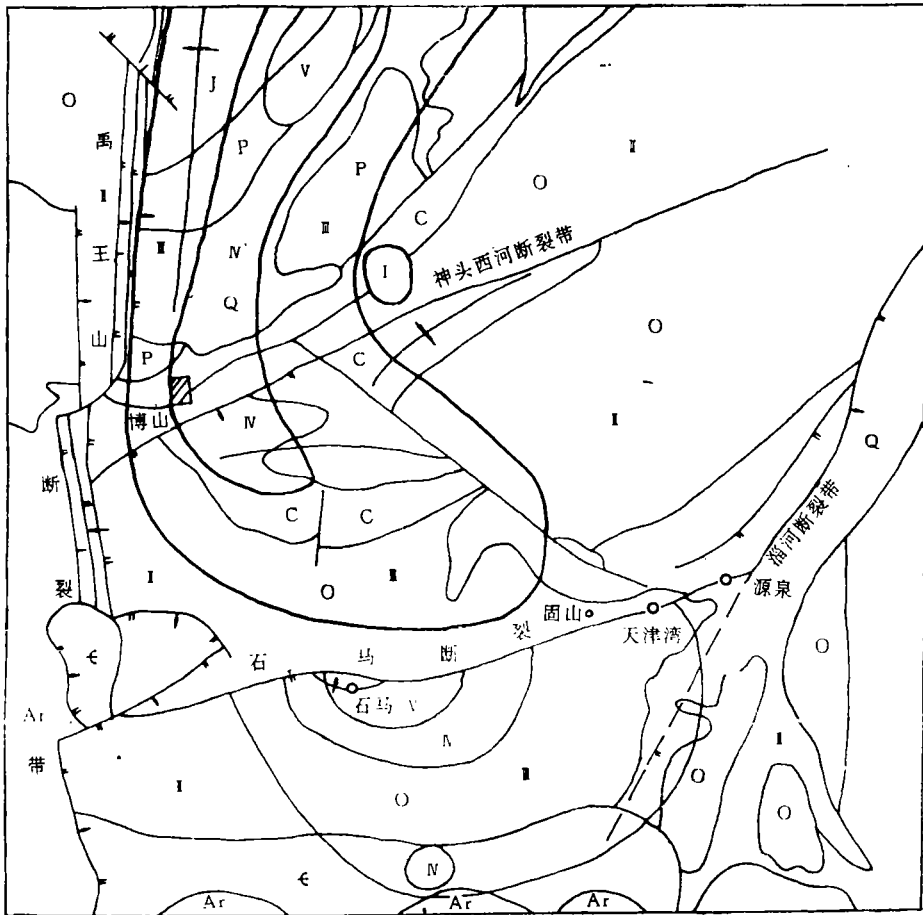


图5 丰水期环境质量分区图

I—水质好 II—水质较好 III—水质一般 IV—水质较差 V—水质差

4 地下水中污染物含量的时空分布模拟及各种方法的优缺点比较

4.1 趋势面分析和克里金方法

趋势面分析就是用趋势面代替区域性因素(背景值)，用统计方法消除随机性因素(干扰值)，以达到突出局部性因素(异常值)之目的。Kriging法是以区域化变量作

为研究对象，以变差函数为基本工具，在二阶平稳假设和本征假设条件下，用估计方差和离散方差等公式进行计算。采用地质统计学中的趋势面分析和克里金方法模拟 SO_4^{2-} 的空间分布，趋势面拟合用离差平方和来表示趋势面和采样分析值的拟合程度，计算结果表明，拟合度为69.43%。用克里

金方法拟合,其拟合度达到84.52%。二者比较,可以发现,用克里金方法拟合效果稍好一些。

4.2 灰色系统和对流——弥散的特征有限元法

灰色系统方法是用小容量的样本值,通过对某一时间序列进行一次或多次累加(或累减)处理,使其随机性弱化,而这些非随机性序列,大多可用指数曲线逼近,从而可建立起含有时间 t 的微分动态拟合模型,以达到预报的目的。用灰色系统方法对具有8年长期观测资料的15个井点进行 SO_4^{2-} 含量的预报,结果发现:预报单个有资料的水

井,其 SO_4^{2-} 的值是单调上升或下降的。用数学模型的特征有限元解预报该区良庄水源地未来污染物组分六六六的分布。由于本区地下水具有统一的流场,地下水中污染物的运移可用对流——弥散方程进行拟合,在求解对流——弥散方程之前,先要求解水流数学模型,用三角形单元、线形插值的有限元法求解。全区剖分为108个单元,69个节点,以求出流速矢量,然后将两个数学模型耦合求解。解题分两步:第一步解逆向问题反求参数,第二步进行污染预报。拟合分为两个区,1区为灰岩裸露区,2区为覆盖区。各区的参数如表2所示。

表2 拟合求得的参数

分区	参数	降水入渗补给系数	渗透系数 $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$	给水度或储水系数	纵向弥散度 m	横向弥散度 m
1区(裸露区)		0.37	50	0.0100(给)	10.65	10.10
2区(覆盖区)		0.00	80	0.0037(储)	10.65	10.10

根据求得的参数即可求出研究区各代表性井点在未来几年中污染物的浓度分布,使用插值方法,从而达到预报整个研究区污染浓度的变化情况。

数学模型的特征有限元解适用的范围更大一些,但要求取得的资料较多。

5 结论

(1) 博山城区一带地下水均已遭受污染,尤其以孝妇河沿岸一带最为严重。但东南部淄河流域的灰岩区和南部的花岗片麻岩区水质优良,没有遭受污染,应作为一级水源保护区,严禁在该区新建有污染的工厂;

(2) 为了保护城区附近的水源地,建议采取以下措施:①对于座落在裂隙——喀斯特水补给区上的工厂,可能造成污染危害的要坚决搬迁。对于一般性工厂,废水污水应达标排放,原料、成品和废料的堆放要实行严格管理;②对于孝妇河及其支流的河床渗漏段,应加防渗铺盖;③位于水源地补给区灰岩上的垃圾堆,必须搬迁到不透水的砂

页岩分布区,并采取相应的措施,使垃圾堆的淋滤水不致于渗漏到地下水的补给区;

(3) 本区新建的天津湾水源地,水质优良,尚未发现污染,应做好水资源的保护工作,植树造林,涵养水源;

(4) 有计划地进行水资源的改造和调整。适当减少井数,统一管水、用水,以发挥水资源的最大效益。对于新建水井,要分层开采,严格止水。对于严重污染的水井,要用粘土或水泥填封,防止成为新的污染源;

(5) 为了加强水资源的管理,政府职能部门、城市规划、环保等部门应重视环境,加强立法,采取强制性的措施,确实使地下水资源得以保护。

参 考 文 献

- 1 朱学愚,钱孝星,刘新仁.地下水资源评价.南京:南京大学出版社,1987

(下转第44页)

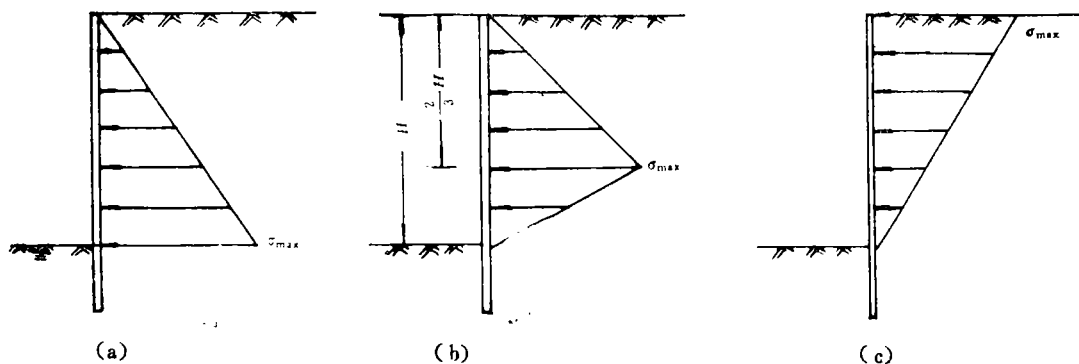


图1 水平冻胀力计算模式图

σ_{max} ——最大水平冻胀力, 细粒土 $\sigma_{max}=100\sim 200kPa$, 粗粒土 $\sigma_{max}=100\sim 200kPa$

段挖至设计标高后, 边坡失稳、桩被折断、锚杆被拔出。不计水平冻胀力, 桩整体稳定系数、抗弯稳定系数、锚杆抗拔安全系数均大于1.2。

根据有关资料介绍, 东北地区水平冻胀力可按图1所示的三种模式计算, 其值可达朗金主动土压力的几倍乃至十几倍。

模式的选择受土层中含水量随深度的变化情况、土质情况、土体变形受限制程度等的影响, 建议水平冻胀力计算采用第二种模式 $\sigma_{max}=100kPa$ 。考虑水平冻胀力, 上述失稳基坑支护结构的安全系数仅为0.52, 可见, 按通常情况设计的支护结构, 难以抵挡冬季巨大水平冻胀力的作用。某基坑深8.0m, 紧邻西壁为一栋5层居民楼, 通常情况下, 可采用悬臂桩支护, 考虑到为跨年度工程, 采用了锚拉桩支护, 计水平冻胀力, 安全系数为0.99, 安全渡过施工期。而在西南角, 出于侥幸, 采用悬臂桩, 终因冬季桩顶水平位移过大, 被迫采取补救措施, 延误了工期。所

以在设计跨年度基坑的支护结构时, 必须考虑水平冻胀力的作用。

3 结论

(1) 放坡开挖时, 基坑边坡安全系数达到0.9, 大多都能满足短期稳定的要求, 但必须重视地面及管线渗水。

(2) 支护开挖, 安全系数为1.0, 可满足稳定要求。

(3) 跨年度支护结构设计时, 必须考虑水平冻胀力的作用。

参 考 文 献

- 1 H.F温特科恩著. 钱鸿缙, 叶书麟译. 基础工程手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983
- 2 [美]YANG.H.HUANG著. 包承钢, 王清友译. 土坡稳定分析. 北京: 清华大学出版社, 1988
- 3 黄运飞, 冯静著. 计算工程地质学——理论·程序·实例. 北京: 兵器工业出版社, 1992

收稿日期: 1996-05-16

(上接第50页)

- 2 朱学愚, 谢春红. 地下水运移模型. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990
- 3 孙纳正. 地下水污染——数学模型和数值方法. 北京: 地质出版社, 1989
- 4 孙洪泉. 地质统计学及其应用. 北京: 中国矿业大学出版社, 1990

- 5 张启锐. 地质趋势面分析. 北京: 科学出版社, 1990
- 6 郦桂芬. 环境质量评价. 北京: 中国环境科学出版社, 1989
- 7 刘锡荟, 王海燕. 网络模糊随机分析. 北京: 电子工业出版社, 1991

收稿日期: 1993-05-08