

文章编号:1009-0258(2002)02-0024-05

泰安市地下水污染现状与成因分析

马振民¹,石冰²,高宗军³

(1. 济南大学,山东 济南 250022;2. 山东省地质科学实验研究院,山东 济南 250013;3. 山东省第一地质矿产勘查院,山东 济南 250014)

摘要:采用参数分级评分叠加型指数法对泰安市地下水污染现状进行的评价结果显示,泰安地下水已遭受严重污染。地下水污染以地下水中宏量组分、 NO_3^- 、硬度、TDS的迅速升高以及地下水遭受人为环境物质的污染为主要标志;地下水污染主要受地下水系统水文地质结构、纳污河流、污水灌溉及地下水开采控制和影响,地下水污染是人类活动影响的结果。

关键词:地下水;污染现状;成因分析;山东泰安

中图分类号: X523; X824 **文献标识码:** A

地下水是一种有限的宝贵的自然资源,又是生态环境体系中的活跃因素^[1]。地下水环境是人类环境的一个重要组成部分,与人类生存密切相关。由于人类活动的长期影响,在整个世界范围内,地下水环境均表现出不断恶化的趋势,其中最为突出的是地下水水量衰竭和地下水水质污染^[2]。不断恶化的地下水环境又反作用于人类本身,不仅严重制约着经济的发展,甚至危及人类的健康和生命。研究地下水污染现状,探讨控制和影响地下水污染的主要因素,揭示地下水污染的环境效应,对于维持自然资源与生态环境的和谐,实现地下水资源可持续利用具有重要意义。

1 地下水系统环境特征

泰安市位于山东省中部。研究区北倚泰山,西部为低缓丘陵,南部为徂徕山,东部为汶河冲洪积平原。汶河为研究区主要河流,属季节性河流。

研究区出露地层岩石依次为新太古代泰山岩群变质岩石,寒武系和奥陶系碳酸盐岩、页岩,古近系含盐、膏粘土岩、砂岩,第四系冲洪积、坡积松散岩类^[3]。

研究区岩溶水系统为严格受断裂构造控制的独

立岩溶地块。系统北部为泰山断裂,构成隔水边界;西部以洪沟断裂为界,为隔水边界;南部由奥陶系、寒武系灰岩与泰山岩群变质岩系和早前寒武纪变质变形侵入岩的接触带及徂徕山断裂为界,组成相对透水边界;东部以岱道庵断裂为界,构成隔水及透水边界。储存岩溶水地层为寒武系、奥陶系,岩性为石灰岩、白云质灰岩;储水空隙以溶孔、溶洞、溶蚀裂隙为主;含水层厚度70.0~80.0m,富水性强,单井涌水量为1000~5000 m^3/d 。大气降水入渗补给、地表水渗漏补给及第四系孔隙水越流补给为岩溶水系统补给来源。岩溶径流路径短,具有就地补给、就地排泄特点。岩溶水化学类型为 $\text{HCO}_3^- \text{Cl}^- \text{Ca}$ 型水。

2 地下水资源开发利用中存在的问题

20世纪50年代中期以前,泰安市以第四系孔隙水作为主要供水水源。50年代末开始开发利用城区岩溶水,平均开采量仅 $0.65 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$,70年代中期城区岩溶水开采量已达 $1.3 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$,并形成岩溶水水位降落漏斗,首次改变了岩溶水顶托向第四系孔隙水排泄的水动力条件,而转变为第四系孔隙水垂向补给下伏岩溶水。70年代中期以后城区岩溶水开采量大增,至80年代初岩溶水的平均开采

收稿日期:2002-01-28;修订日期:2002-04-15;编辑:张天祯

基金项目:国家自然科学基金重点项目(NO.49832005)

作者简介:马振民(1962-),男,高级工程师,现为中国矿业大学(北京)博士后,主要从事水资源与水环境教学及科研工作。

量超过 $5.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 最大开采量达 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 大大超出了地下水环境的承受能力。随着开采量的加大, 泰安城区岩溶水水位下降的幅度逐渐增大, 降落漏斗面积也随之逐年扩大, 岩溶水由承压状态转化为无压状态, 地下水动力环境发生了根本性的改变, 脆弱的环境地质条件亦随之恶化, 地面塌陷和地裂缝频繁发生, 目前城区地面塌陷面积已达 8 km^2 。

地表水及地下水污染是泰安地区的一个严重环境问题。流经泰安城区的滂河及其支流奈河、双龙河已成为泰安市的纳污河流, 地表水体受到严重污染, 有毒有害成分、化学需氧量及生化需氧量严重超标, 水体已不具有使用功能。由于地表水污染及城市工业废水、生活废水的排放, 第四系孔隙水遭受严重污染, 20 世纪 80 年代中期以来孔隙水常量组分中 TDS、硬度、 NO_3^- 、 Cr^{6+} 等含量有增无减, 1995 年枯水期检测值分别为 1191.3 mg/L , 610.4 mg/L , 100.0 mg/L , 0.1 mg/L , 城区孔隙水严重污染面积已逾 30 km^2 。地表水及第四系孔隙水污染严重, 致使岩溶水亦受到严重污染, 岩溶水中硬度、 NO_3^- 超标, TDS 接近或超过生活饮用水标准, 有害有毒元素酚、氰、Pb、As 及 Cr^{6+} 时有检出或超标, Cr^{6+} 超标率达 100%。1999 年丰水期 TDS、硬度、 Cl^- 及 NO_3^- 含量分别为 968.1 mg/L , 508.4 mg/L , 120.9 mg/L , 78.1 mg/L ,

L, 城区岩溶水污染面积逾 20 km^2 。总之, 泰安市由于长期超量开采地下水, 泰安市地下水环境已严重恶化, 地下水系统已不能实现水资源可持续利用。

3 地下水污染现状评价

3.1 地下水污染对照值选择

凡是在人类活动影响下, 地下水水质朝着恶化方向发展的现象, 统称为地下水污染^[4]。因此, 地下水污染的判断是通过与判断标准的对比, 判明地下水水质是否在人类活动影响下朝着恶化的方向发展。采用地下水对照值作为判定地下水污染的依据, 地下水对照值是指某一个时期(最接近天然状态的时期)研究区的水质参数或研究区外水文地质条件相同(或类似)地区的水质参数。

研究采用的地下水对照值是通过 1962 年泰安地区的 396 组地下水水质参数计算取得。对照值(Y)计算采用下式(泰安市地下水污染物对照值计算结果见表 1):

$$Y = X \pm S \quad (1)$$

式中: X—地下水组分浓度算术平均值; S—地下水组分浓度标准偏差。

表 1 泰安市地下水污染对照值(mg/L)

Table 1 Contrast value of underground water pollution in Tai an city(mg/L)

类 型	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	硬度	TDS
岩溶水	17.90 ± 2.94	13.12 ± 5.66	19.53 ± 6.77	160.30 ± 17.63	300.20 ± 42.11
孔隙水	18.12 ± 7.74	9.50 ± 5.22	4.74 ± 3.72	124.20 ± 32.00	227.70 ± 56.56

3.2 地下水污染单因子指数确定

研究区地下水的主要污染物为无机化学污染物。判别污染程度的标准采用单因子污染指数(), 即:

$$= C_i / C_o \quad (2)$$

式中: C_i —地下水中某组分的实测浓度, 单位 mg/L;

C_o —地下水中某组分的对照值, 单位 mg/L。

将单因子污染指数 > 1 的地下水组分作为污染物。研究区地下水污染因子指数为: 污染物 Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , 硬度和可溶性总固体(TDS), 其它组分因无早期的对照值, 故不做评价。

3.3 污染现状评价因子及其标准

根据研究区水质动态资料分析, 地下水组分浓度变化最明显且监测系列较长的为 Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , 硬度和 TDS, 采用上述组分作为评价因子, 采用 1962 年检查所取得的对照值(水质参数)作为污染现状的评价标准。

3.4 地下水污染现状评价

地下水污染评价方法选择应满足以下 3 个要求: 简便, 不失真, 污染指数具有明确的物理意义。本次地下水污染现状评价采用参数分级评分叠加型指数法。

参数分级评分叠加型指数法的基本步骤是:按 $= C_i / C_o$ 计算单因子污染指标,然后根据 值评分。参数分级评分标准如下:

1	$F = 0$
1 < 2	$F = 10$
2 < 3	$F = 100$
3 < 4	$F = 1000$
.....	
n	

$$PI = \sum_{i=1}^n Fi \quad (3)$$

式中: Fi —地下水污染因子 i 组分的评分,无量纲;
 n —评价因子数。

参数分级评分叠加型指数 PI 的物理意义为:如 PI 为 0,说明地下水没有污染;如 PI 值为 1001,表明有两个组分污染地下水,一个为背景值的 1~2 倍,另一个为背景的 3~4 倍,地下水的污染程度严重。

利用研究区现状分析资料,依据参数分级评分叠加型指数法 PI ,对孔隙水及岩溶水污染程度进行分级,分级标准如下:

A 地下水未污染 (): $PI = 0$,表明地下水化学环境受人类活动的影响较小或基本没有受人类活动的影响,地下水没有任何组分超过其对照值。

B 地下水轻污染 (): $1 < PI < 10$,表明在人类活动影响下,地下水中至少有 1 种评价因子的浓度超过其对照值的 1 倍,并且任何一种因子的浓度都没有达到其对照值的 2 倍。

C 地下水重污染 (): $10 < PI < 100$,表明地下水中至少有 1 种评价因子的浓度超过其对照值的 2 倍,并且任何一种因子的浓度都没有达到其对照值的 3 倍。

D 地下水严重污染 (): $PI > 100$,表明人类活动对地下水影响显著,地下水中至少有 1 种评价因子的浓度超过其对照值的 3 倍。

3.5 地下水污染现状评价结果

依据以上污染对照值和所确定的污染评价方法,对研究区 2000 年所有取得的 100 余件水样进行了污染评价。结果显示,所有地下水的 PI 值都在 10000 以上,表明研究区地下水均已遭受严重污染。为了进一步区分研究区地下水严重污染的程度,取参数分级评分叠加型指数 PI 值的常用对数,即地下水评价因子对于其对照值的增长倍数的最大值,进行二次评价,并将评价结果做成等值线图(图 1 和图 2)。由此表征相对 20 世纪 60 年代对照值,地下水主要组分含量的增长倍数的分布状况。

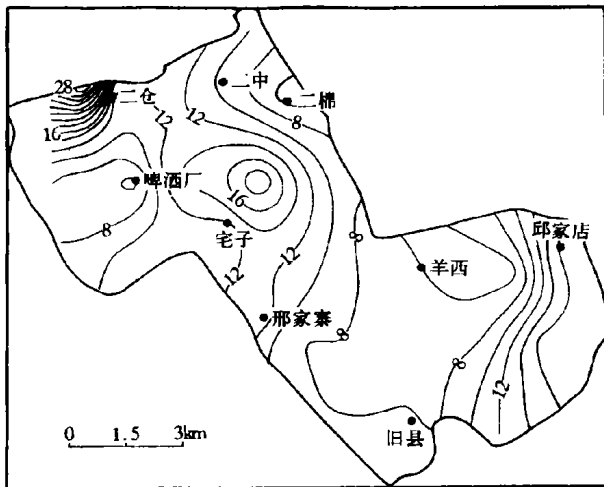


图 1 泰安第四系孔隙水污染指数对数等值线图
 Fig. 1 Choropleth showing pollution indices and logs of Quaternary pore - space water in Tai'an city

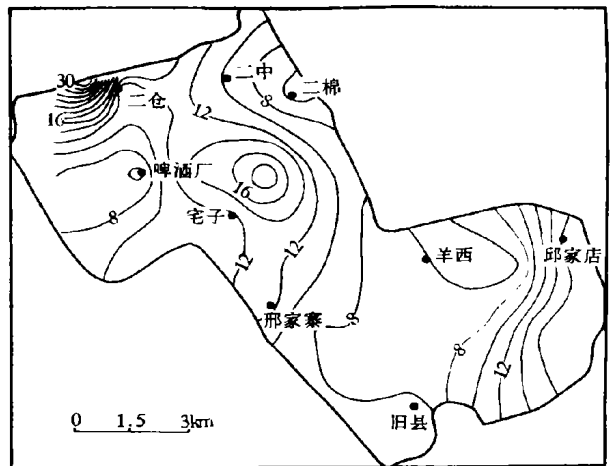


图 2 泰安岩溶水污染指数对数等值线图
 Fig. 2 Choropleth showing pollution indices and logs of karstic water in Tai'an city

4 地下水污染成因分析

研究表明,40 年来研究区地下水已遭受严重污

染,尤其是近 10 年来,地下水污染程度日趋严重。地下水宏量组分升高, NO_3^- 污染以及 TDS,硬度的迅速上升是地下水污染的主要标志。泰安地区地下水化学背景值基本相同,但由于水文地质结构及人

类活动影响程度不同,因而表现为地下水污染的速率和趋势具有差异性。

4.1 水文地质结构和物质组成对地下水污染的控制作用

研究区地下水虽已遭受严重污染,但地下水污染的程度存在着明显差异(图 1、图 2),城区第四系孔隙水污染状况明显受水文地质结构和物质组成的控制和影响。

城区污染最严重地段其第四系水文地质结构为三元结构(隔水层—含水层—隔水层),物质组成为:包气带为粉质粘土,构成相对隔水层;含水层为粗砂,强富水性;底板为含砾粘土及粉质粘土,构成相对隔水层。根据钻孔水质分析中 TDS,硬度(H)及 Cl^- 试验数据对包气带厚度与污染等标指数(污染组分实测值与对照值之比)及污染物绝对增量(污染组分实测值与对照值之差)相关性进行分析可得:

等标指数:

TDS = 3.91 ~ 0.61M 相关系数 $R = 0.84$

H = 3.35 ~ 0.59M 相关系数 $R = 0.84$

Cl = 4.26 ~ 0.86M 相关系数 $R = 0.79$

绝对增量:

TDS = 1149.51 ~ 166.60M 相关系数 $R = 0.60$

H = 733.67 ~ 193.11M 相关系数 $R = 0.85$

Cl = 215.69 ~ 57.33M 相关系数 $R = 0.79$

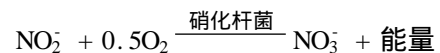
经相关系数检验,对于给定显著性水平 $\alpha = 0.05$ 时, $R = 0.58$;显著性水平 $\alpha = 0.01$ 时, $R = 0.71$ 。通过检验可知污染物等标指数及污染物绝对增量与包气带厚度存在显著相关性。其原因是:在地表环境条件及水文地质结构、物质组成相同条件下,包气带薄,其吸附、溶解、沉淀等水文地球化学作用过程短,包气带对污水的净化程度低,地下水水质差;反之,包气带对污水的净化程度高,地下水水质好。因此,包气带厚度控制地下水污染程度,TDS,硬度及 Cl^- 的污染物等标指数与污染物绝对增量和包气带厚度呈负相关。

4.2 纳污河流对地下水污染的影响

根据纳污河流——滂河对第四系孔隙水的污染监测试验结果(图 3、图 4、图 5)可得以下结论:第四系孔隙水中 NH_4^+ 含量随距河流的距离增大而减小,而 NO_3^- 随距河流距离增大而增大,并伴随有 NO_2^- 产生;孔隙水中 BOD_5 、 COD_{Cr} 含量随距河流的距离增

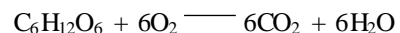
大而减小;孔隙水中 HCO_3^- 硬度及 TDS 随距河流的距离增大而减少。其原因是:

(1)河水及近岸一定范围内 NH_4^+ 的浓度高,但随距河流的距离增大 NH_4^+ 的浓度快速降低, NO_3^- 的浓度而增加,其原因为第四系孔隙水含水层中发生的硝化所致。在自养型微生物的参与下,硝化作用将 NH_4^+ 转化为 NO_3^- ,而地下水中 NO_3^- 的浓度升高,其作用过程为:



由于试验区包气带岩性为粉土,含水层为中粗砂,颗粒粗,透水性好,有利于硝化作用进行。因此,远离河岸一定距离后 NH_4^+ 转换为 NO_3^- 。

(2)第四系孔隙水中 BOD_5 、 COD_{Cr} 含量随距河流的距离增大而减小的原因是:当含 COD_{Cr} 、 BOD_5 浓度较高的纳污河水进入中、粗砂含水层后,含水层系统对 COD_{Cr} 、 BOD_5 去除率比较高,在纳污河流对孔隙水含水层的影响范围内, COD_{Cr} 去除率为 73%, BOD_5 去除率为 64%,在距河岸一定距离后 COD_{Cr} 、 BOD_5 趋于稳定,达到含水层正常含量。其原因是在微生物作用下有机污染物被降解,产生 CO_2 和 H_2O ,由于含水层中 CO_2 升高,而导致 HCO_3^- 升高。其生物降解作用过程为:



综上所述,纳污河流污染了地下水,地表水的污染加速了地下水污染的速率。在地下水超量开采条件下,随着地下水水位的持续降低,地下水水力坡度增大,纳污河流对地下水的污染程度亦越来越重。

4.3 污水灌溉对地下水污染的影响

研究区污水灌溉区段位于泰安市南郊滂河、奈河及西双龙河两岸,污水成分为工业及生活废水。通过对水文地质结构与物质组成相同的污灌区及非污灌区十余年第四系孔隙水水质系列监测分析对比可知:污水灌溉区 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等宏量组分是非污水灌溉区的 1.5 ~ 2.5 倍,污水灌溉区 NO_3^- 硬度及 TDS 是非污水灌溉区的 2 ~ 3 倍,污水灌溉直接污染了第四系孔隙水。污水灌溉引起地下水污染,其污染组分主要来自污水本身;同时污水灌溉时污水把包气带中的可溶盐溶解并带入孔隙水含

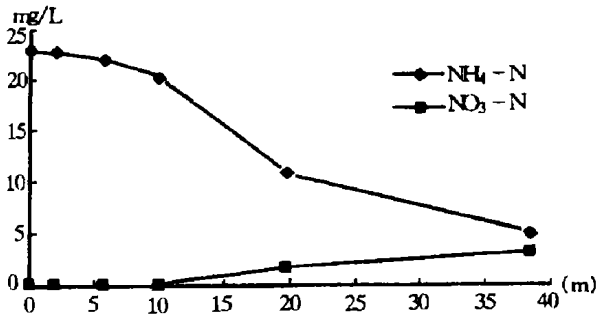


图3 滂河剖面 NH_4^+ 及 NO_3^- 与河距离关系曲线图

Fig.3 Curve showing relation between NH_4^+ , NO_3^- and the distance to river in Panghe profile

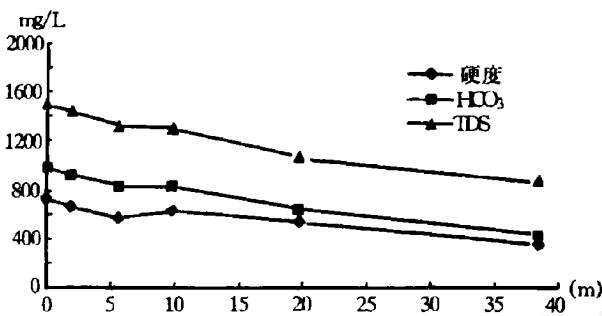


图4 滂河剖面 HCO_3^- 、硬度及 TDS 与河距离关系曲线图

Fig.4 Curve showing relation between HCO_3^- , degree of hardness, TDS and distance to river in Panghe profile

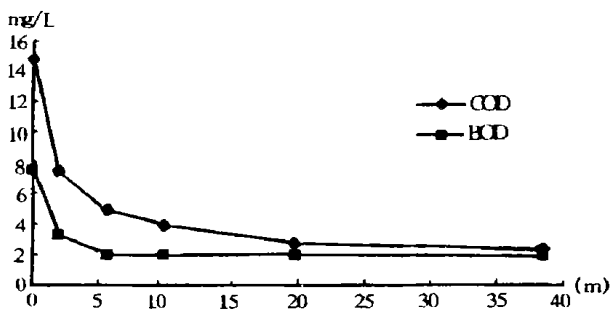


图5 滂河剖面 COD 及 BOD 与河距离关系曲线图

Fig.5 Curve showing relation between COD, BOD and distance to river in Panghe profile

水层,使得污灌区孔隙水中 $\text{K}^+ + \text{Na}^+$, Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , 硬度及 TDS 明显高于非污灌区。因此,污水灌溉加速了第四系孔隙水污染的速率。

4.4 地下水开采对地下水污染的影响

泰安岩溶水长期超量开采的结果,导致岩溶水水位大幅度下降,形成城区及旧县两大岩溶水水位降落漏斗,并造成城区面积 8km^2 及旧县面积 15km^2

两大岩溶塌陷区。地下水由承压状态转化为无压状态,改变了地下水的补给、径流及排泄特征,加大了孔隙水及岩溶水的水力梯度,增加了第四系孔隙水对下伏岩溶水的越流补给强度,而岩溶塌陷及地裂缝沟通了地表污染物与第四系孔隙水含水层以及第四系孔隙水含水层与岩溶水含水层的联系,使得地表污水及污染的第四系孔隙水通过岩溶塌陷形成的“天窗”直接注入岩溶含水层,加速污染物进入含水层的速率。地下水超量开采是促使岩溶水快速污染的重要因素之一。

5 结论

(1) 研究区由于长期超量开采地下水,地下水已遭受严重污染,地下水环境已严重恶化,地下水系统已不能实现水资源可持续利用。地下水污染以地下水中宏量组分、 NO_3^- 含量、硬度、TDS 的迅速升高以及地下水已遭受 Cr^{6+} , 酚、CN, As, Hg 等人为环境物质的污染为主要标志。

(2) 研究区地下水污染主要受地下水系统水文地质结构和物质组成等内在因素以及纳污河流、污水灌溉及地下水大规模开采等外在因素控制和影响。孔隙水中 TDS, 硬度及 Cl^- 的污染物等标指数与污染物绝对增量和包气带厚度呈负相关,包气带厚度控制地下水污染程度;地表水的污染及污水灌溉加速了地下水污染的速率,地下水持续超量开采是促使岩溶水快速污染的主要因素。

(3) 研究区地下水污染现状评价与成因分析结果表明,地下水环境已受到人类经济技术活动的干扰和影响,地下水污染是人类活动影响的结果。

参考文献:

- [1] 曲焕林,程莉蓉. 人类生存的地质环境问题[M]. 北京:地质出版社,1998.
- [2] Kent. S. Murray, and Daniel T. Rogers, Groundwater Vulnerability, Brownfield Redevelopment and Land Use Planning, Journal of Environmental Planning and Management, Vol. 42, No. 6, 801 - 810, 1999.
- [3] 马振民,陈鸿汉,刘立才. 泰安市第四系水文地质结构对浅层地下水系统污染敏感性控制作用研究[J]. 地球科学, 2000, 25(5): 427 - 475.
- [4] 沈照理,朱宛华,钟佐荣. 水文地球化学基础[M]. 北京:地质出版社,1993.

(下转第 41 页)

和重晶石的形成主要在低温阶段。该矿床属于低温热液裂隙充填脉型矿床,前人研究成果认为^[1],该区此类矿床形成的温度范围在 240~110 之间,成矿的主要温度区间为 140~120。其成矿时代可能为晚白垩世晚期至古近纪始新世。

在野外工作期间,得到了招远市青龙矿业集团徐振军总经理、青龙萤石矿李志希矿长的支持和帮助,成文过程中得到山东地勘局张天祯教授级高级工程师的悉心指导,在此表示诚挚的谢意。

参考文献:

[1] 张天祯,石玉臣,王鹤立,等. 山东非金属矿地质[M]. 济南:山东科学技术出版社,1998,200~212.

Geological characteristics of Qinglong fluorite deposit in Zhaoyuan city of Shandong Province

LI Ai - min¹, ZHANG Qiao - lian², XU Zhen - min³

(1. Weihai Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Shandong Weihai 264209, China; 2. Shandong Institute of Geo - mapping, Shandong Jinan 250013, China; 3. Qinglong Mineralic Industry Group Company, Shandong Zhaoyuan 265400, China)

Abstract: Qinglong fluorite deposit in Jiaodong area is a typical epithermal crack - filling type deposit which developed in Neoproterozoic Cuizhao unit of Linglong superunit. It has a simple style and component, continuous mineralization and a high grade. Fault with EW trend and “ ” word shape host rock crack are major ore - controlling elements.

Key words: Fluorite deposit; “ ” word shape structure; crack - filling vein type; Zhaoyuan in Shandong Province.

(上接第 28 页)

Present Condition and Origin Analysis of Underground Water Pollution in Tai an City

MA Zhen - min¹, SHI Bing², GAO Zong - jun³

(1. Jinan University, Shandong Jinan 250022, China; 2. Shandong Institute and Laboratory of Geological Sciences, Shandong Jinan 250013, China; 3. No. 1 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Shandong Jinan 250014, China)

Abstract: As showed by the evaluation result by using superimposing index method with a parameter of giving a mark, present condition of underground water pollution in Tai an city has been polluted badly. Rapid rising of macrocompositions, NO₃ -, degree of hardness and TDS, and underground water pollution caused by environmental matters are major symbols of underground water pollution. It is controlled and effected by hydro - geological structures, rivers holding dirty matters, useless water irrigation and underground water exploitation. Underground water pollution is the result of human being s activities.

Key words: Underground water; present condition of pollution; origin analysis; Tai an in Shandong province