

# 城市地下水污染成因分析

——以山西省太原市为例

蒋方媛<sup>1,2</sup>, 郭清海<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学环境学院地质过程与矿产资源国家重点实验室,湖北 武汉 430074;2. 深圳市勘察研究院有限公司,广东 深圳 518026)

**摘要:**太原市属于我国北方的半干旱地区,地下水资源是区内最重要的供水水源。然而,该地区代表性地下水的水质演化趋势与常规污染物分布特征表明,区内地下水已经遭受污染,在研究区南部,地下水污染问题尤为突出。分析了研究区地下水污染的原因,结果表明人类活动是最主要的因素,包括地下水开采、工业与生活废弃物的排放、农业污灌、化肥及农药的施用、采矿活动等。

**关键词:**地下水;污染;成因;太原市

**中图分类号:**X523 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-3504(2009)01-082-07

我国水资源贫乏,人均水资源量仅为世界的1/4,且地域分布极不均匀(黄文虹等,2006)。地下水资源作为我国水资源的重要组成部分,其可持续利用在我国社会、经济发展战略中占有举足轻重的地位。然而,地下水污染已成为制约其开发利用的瓶颈。在城市地区,随着工农业生产的发展、城市规模的扩大和人口的迅速增加,用水量持续增长,地下淡水成为越来越重要的供水水源。但城市发展也常导致地下水污染的发生。特别是对于地处我国干旱-半干旱地区的发展中城市山西太原市来说,情况更是如此。太原市是山西省最大的能源化工基地,其工业构成以冶金、化工、煤炭、电力、机械为主,为资源密集型,呈污染型结构。同时,太原市人口密集,人类活动频繁,城市建设发展迅速,由此引发的污染非常严重。1997年的监测资料表明,太原市废水日排放量为56万m<sup>3</sup>,工业废渣年排放量近500万t,堆存量占地面积达209km<sup>2</sup>,农业年引污量3500万m<sup>3</sup>,污灌面积达2.13万km<sup>2</sup>(程爱转等,2002)。以上原因造成了太原市是山西

省地下水污染最严重的地区之一。因此,对区内的地下水水质演化趋势、水污染现状及污染成因进行分析,有助于加强地下水资源管理、有目的地控制地下水污染,以确保该区地下水资源的可持续利用。

## 1 研究区概况

太原市地处太原盆地北端,北、东、西三面环山,地形北高南低。盆地东部与西部分别属太行山系和吕梁山系,北部则为棋子山,标高1300~1780m。汾河自兰村峡谷进入盆地后向南形成较为开阔的冲积平原,标高771~810m。整体地形从山区向盆地呈阶梯状下降,但东西两侧不对称。

太原市位于暖温带的半干旱区,属大陆性季风气候。据统计,区内多年平均降水量为443.9mm(1951~1995年),多年平均气温为9.6℃(1951~1995年)。太原市的地表水系比较发育,受地形控制,汾河自西北流入太原市,贯穿整个市区,并将其分为东、西两部分。

研究区内广泛分布第四纪地层,其分布面积广、厚度大、孔隙发育,形成了良好的天然储水构造。第四纪含水层受外围山区岩溶裂隙水的侧向补给以及大气降水与汾河的渗漏补给,水量非常丰富,地下水的主要排泄形式则为人工开采及沿地下径流排泄于下游地区。按照含水层埋藏深度的差异,可将区内的第四系地下水分为浅层孔隙水(埋

收稿日期:2008-07-31

基金项目:国家自然科学基金项目(40702041);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20070491008);湖北省自然科学基金项目(2007ABA312);中国博士后科学基金项目(20080430146);地质过程与矿产资源国家重点实验室开放基金项目(GPMR200714)

作者简介:蒋方媛(1977—),女,博士生,主要从事地下水污染与防治、地质灾害防治等方面的研究。

深小于 50 m)与深层孔隙水(埋深为 50 ~ 200 m)。鉴于后者是区内最主要的供水水源,本文将其作为主要研究对象。

## 2 水样采集与分析

研究采用的地下水样共 25 件,均采自埋藏深度在 50 ~ 200 m 的孔隙含水层内,采样时间为 2002 年 5 月。采样点位置与水化学分析结果分别见图 1 与表 1。

采样瓶为 350 ml 的聚乙烯瓶,在取样前用蒸馏

水清洗,再用所采水样润洗 2 ~ 3 次。采样时,用带 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜的简易过滤装置过滤水样。每个采样点采集 3 个子样,其中之一加入 1:1 的  $\text{HNO}_3$  使 pH 值小于 2。

水样的 pH 值在现场测定,碱度在取样当天用滴定法测定。其他指标在水样采集后 2 周内进行测试,其中  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{F}^-$  等用 Dionex 公司 DX-120 离子色谱仪进行测定,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  用 180-70 原子吸收光谱仪 180-0260 进行测定。

表 1 地下水化学特征

Tab. 1 The hydrogeochemistry of groundwater

水样编号	水样位置	pH 值	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{F}^-$	TDS
S01	镇城	7.6	57.1	21.3	1.00	11.0	14.2	3.8	259.0	20.0	0.40	258.3
S02	上兰造纸厂	7.6	53.1	21.9	1.00	13.0	12.4	8.2	272.0	12.0	0.40	258.0
S03	陈家窑	7.8	56.1	22.5	1.10	46.8	53.2	56.2	262.0	1.0	0.36	368.3
S04	阳曲大队	7.6	47.1	26.1	1.15	89.2	35.4	64.8	342.0	1.0	0.60	436.4
S05	向阳店	7.7	60.1	44.4	0.90	47.8	37.2	31.2	400.0	10.0	0.42	432.0
S06	上兰村东口	7.5	54.1	23.7	1.02	13.5	14.2	2.4	272.0	10.0	0.40	255.4
S07	太钢水源地	7.4	63.1	25.5	1.06	13.8	19.5	14.4	287.0	15.0	0.26	296.1
S08	北下温村	7.4	63.1	57.2	1.90	56.8	51.4	126.0	372.0	1.0	0.44	543.8
S09	后沟供电局	7.7	56.1	21.9	0.90	10.0	10.6	8.6	268.0	10.0	0.34	252.5
S10	太钢一中	7.5	49.1	21.9	0.88	62.2	30.1	76.8	238.0	35.0	0.46	395.5
S11	新村	7.8	63.1	33.4	1.18	27.2	28.4	55.2	336.0	2.0	0.40	378.9
S12	东社	7.8	83.2	31.0	0.95	41.8	42.5	149.0	220.0	15.0	0.80	474.3
S13	省委大院	7.5	65.1	34.0	1.42	93.8	56.7	141.0	308.0	33.0	0.96	580.0
S14	太铁公寓	7.4	81.2	32.2	1.24	15.5	14.2	96.1	281.0	10.0	0.44	391.4
S15	西山机修厂	7.7	147.0	32.8	0.95	31.5	58.5	267.0	253.0	1.0	0.40	665.7
S16	南屯化工厂	7.8	68.1	21.9	0.98	45.0	31.9	57.6	326.0	1.0	0.30	389.8
S17	许坦	7.7	56.1	22.5	1.40	148.0	119.0	132.0	272.0	1.0	0.42	616.5
S18	黄陵	7.8	56.1	32.8	1.00	94.5	67.4	108.0	311.0	38.0	1.16	554.5
S19	武家庄	7.1	468.0	241.0	1.32	144.0	840.0	941.0	421.0	1.0	0.50	2847.3
S20	加节粉房	7.5	68.1	49.9	1.32	87.0	63.8	84.1	510.0	2.0	0.82	612.0
S21	武宿	7.8	37.1	26.1	1.05	208.0	151.0	156.0	302.0	1.0	1.40	732.7
S22	南黑窑	7.7	55.1	53.5	1.00	214.0	238.0	199.0	305.0	2.0	0.90	916.0
S23	下庄	7.7	121.0	46.2	0.90	28.8	26.6	257.0	256.0	60.0	0.40	669.0
S24	太原水泥厂	7.5	184.0	54.7	1.00	44.0	72.7	432.0	268.0	70.0	0.44	992.9
S25	东庄	7.6	348.0	49.2	2.00	66.8	12.4	917.0	299.0	1.0	4.60	1566.5

## 3 地下水水质演化趋势及水污染现状

受工农业生产活动及人类生活排污的影响,太原市近几十年来地下水水质不断恶化。在研究区的北部、中部、南部选择了 4 个代表性水样 S01,

S13, S15, S18(图 1), 对其在 1980 ~ 2000 年的 TDS, 总硬度,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  的变化趋势进行了分析(图 2)。结果表明, 4 个水样的各常规污染指标在近 20 年来均呈上升趋势(水质数据系列来源于山西省地质工程勘察院, 特此注明)。



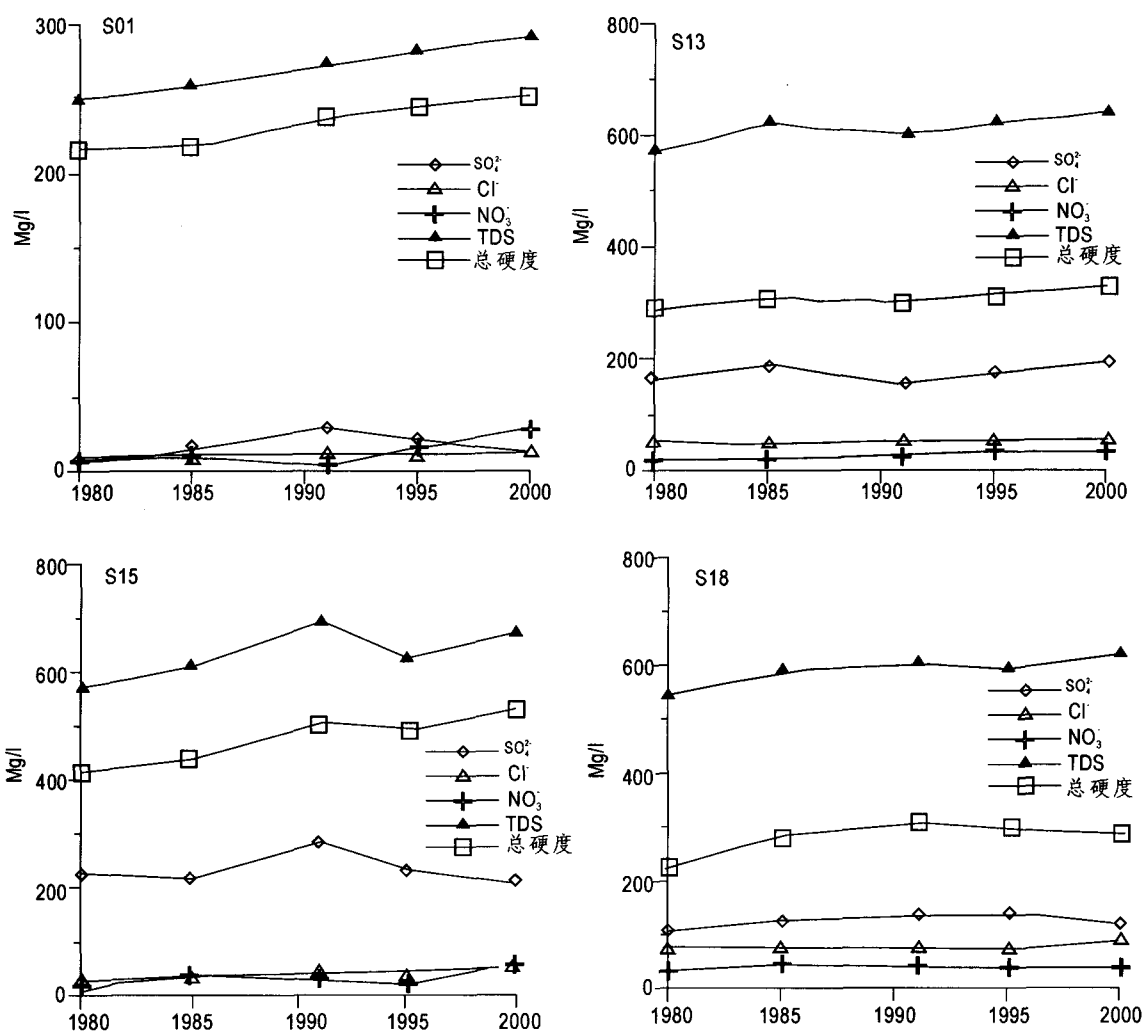


图2 代表性水样的水质演化趋势

Fig. 2 The water quality evolution trend of representative water samples

前者主要来源于太原钢铁集团有限公司、西山煤电集团有限公司、太原第一、二热电厂的尾矿渣、煤矸石、锅炉渣及粉煤灰;后者则主要为人畜粪便与垃圾。据统计,太原市目前的粪便日清运量达 448 t (王俊有,2002)。在大气降水的淋溶作用下,露天堆放的固体废弃物中的硫酸盐、氯化物、硝酸盐、氮、氨、重金属、有机质等污染物将进入地下,经生物降解后,仍可形成含有多种污染物的淋滤液及二氧化碳、甲烷等废气,最终以污水的形式污染地下水,使地下水的 TDS,总硬度,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ , COD, BOD 升高。

与固体废弃物的堆放相同,工业与生活污水的大量排放也是造成地下水污染的重要因素。据统计,太原市 1997 年的污水排放量达 2.3 亿  $m^3$  (吴有志,2001),而在“十一五”期间,太原市的污水排放量将达到每年 2.59 亿  $m^3$  (2006)。工业废水中

污染物种类繁多,生活污水中则富含氮、磷、氯化物、细菌等污染物,由于市政排污管网与污水处理设施的建设相对落后,大量未经处理的污水直接排入汾河或任意漫流。据统计,自上兰至小店即有 13 条排污河渠向汾河汇入污水。当污水通过各种途径进入包气带后,在粘土层较薄或缺失的地段,地下介质阻滞污染物运移的能力极低,浅层潜水就此受到污染;而在承压含水层隔水顶板不稳定的地段或钻孔成井工艺差的地段,已被污染的潜水可进入承压含水层,使中深层承压水也遭受污染。

废气的排放同样可造成对地下水的污染。在太原市,煤炭是最主要的工业和生活燃料,可产生 CO,  $SO_2$ ,  $NO_2$  等废气和烟尘,具体排放量为:CO 37.2 万 t,  $SO_2$  14 万 t,  $NO_2$  6.4 万 t (吴有志,2001)。当降水发生后,空气得到了净化,但雨水将受到污染。据山西省水文水资源勘测局资料,太原市的大

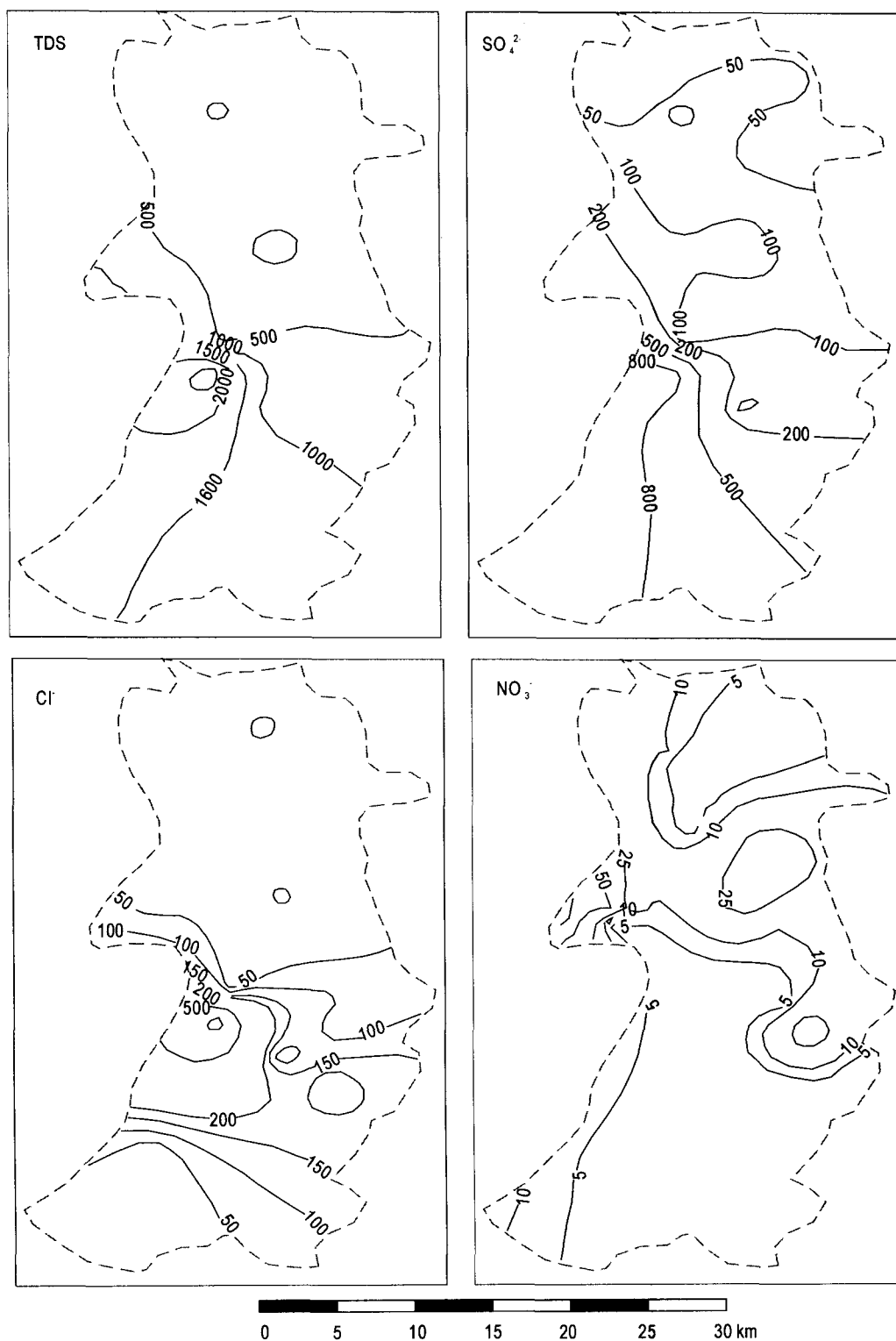


图3 太原市地下水 TDS,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$  等值线图

Fig.3 The TDS,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$  contour map of groundwater in Taiyuan city

气降水偏酸性, 酚含量普遍超标,  $SO_4^{2-}$  含量也偏高。近年来太原市酸雨的 pH 值 4.88 ~ 5.53, 这无疑是空气中酸性气体含量过高所致。这样, 当雨水

渗入地下后, 首先污染土壤, 而后通过包气带进一步污染地下水(徐可文等, 2005)。

### 4.3 农业污灌及化肥、农药的施用

太原市是一个水资源严重短缺的城市,为发展农业,采取污水灌溉已有40多年历史。早在1995年,市内的污灌面积已达39.45万亩,占总灌溉面积的47.3%,污灌区主要集中在南郊区与北郊区,其中南郊区规模最大(冀秉信,1996)。多年的污灌虽然在一定程度上缓解了水资源危机,满足了农田灌溉的需要,但用于灌溉的污水大都未经任何处理,灌区的土壤因此受到了严重污染,并直接或间接地影响了地下水环境质量。

为满足不断增长的人口对粮食日益扩大的需求,太原市在发展农业的过程中大量施用了农药与化肥,这也是造成地下水污染的重要因素。研究表明,农作物平均只能吸收所施氮肥的40%,大量过剩的化肥会因灌溉或降水经土壤渗入含水层,造成地下水中硝酸盐氮等超标。在施用农药时,其过剩部分同样会渗入地下并污染地下水。值得注意的是,在地下水流动缓慢的地区,某些农药在停止使用后还会长期残留在原地。

### 4.4 采矿活动

太原市是山西省采矿业的集中地之一。采矿后堆积的尾矿经雨水淋滤后,极易形成地下水污染,而矿区废弃的坑道与钻孔在雨水或地表水体的影响下,恰好可能成为地下水污染的通道。同时,采矿排出的矿坑水(如采煤排水)通常pH值很低,这种酸性水渗入地下后可导致某些盐类进入含水层,由此产生的盐效应促使土体中方解石、白云石溶解,使钙镁离子溶入水中,地下水的总硬度升高。此外,采煤排水会降低地下水位,先前处于饱水带的矿物与大气接触后,由于氧化还原条件的改变会变得易于溶解,经风化、雨水淋滤后溶入地下水,使地下水的TDS升高。事实上,笔者在2003~2005年的调查中发现,太原市采煤活动(包括采煤排水)对地下水的水质劣化具有不可忽视的影响。例如,太原市古交高升村一带采集的受采煤活动影响的

地下水样的pH值仅为6.41,而 $\text{SO}_4^{2-}$ 和TDS则分别高达1125.8和1781.8 mg/L(郭清海,2005)。

## 5 结论

(1)太原市的地下水水质在近几十年来呈不断恶化状态。研究区不同地带的代表性水样的TDS、总硬度、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 等常规污染指标的含量在1980~2000年期间均呈上升趋势。

(2)在太原市北部,地下水的TDS、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 含量与背景值相近或小于背景值,而在太原市南部,以上指标含量则明显大于背景值。地下水的这种水质分布特征除受到原生地质环境控制外,主要与区内南部人口相对密集、人类活动强烈,而且工农业相对集中、排污量大有关。就 $\text{NO}_3^-$ 而言,其污染范围主要呈块状分布于人类活动频繁的居住区、工业区及附近的农业区,在污染区外围 $\text{NO}_3^-$ 含量均低于背景值。

(3)人类活动,包括地下水开采、工业与生活废弃物的排放、农业污灌、化肥及农药的施用、采矿活动等,是导致研究区地下水污染的最主要的因素。

## 参考文献

- 程爱转,郭晓平. 2002. 太原市地下水污染现状及原因分析[J]. 科技情报开发与经济, 12(3): 110-112.
- 郭清海. 2005. 山西太原盆地孔隙地下水系统演化与相关环境问题成因分析[D]. 中国地质大学博士学位论文.
- 韩颖. 2007. 太原盆地孔隙地下水潜力评价[J]. 水文地质工程地质, 34(6): 14-18.
- 黄文虹,梅丽辉. 2006. 江西省水资源特点及防治[J]. 东华理工学院学报, (S1): 127-131.
- 冀秉信. 1996. 太原市污灌现状分析[J]. 山西水利科技, (51): 92-96.
- 王俊有. 2002. 太原市地下水水质现状及污染防治措施[J]. 环境科学动态, (4): 19-21.
- 吴有志. 2001. 太原市城区地下水污染现状及其成因分析[J]. 山西水利科技, (1): 92-94.
- 徐可文,任璞,王军平. 2005. 太原酸雨特征分析[J]. 山西气象, (4): 11-13.

## Genesis Analysis of Groundwater Contamination in City Areas: A Case Study in Taiyuan City, Shanxi Province

JIANG Fang-yuan<sup>1,2</sup>, GUO Qing-hai<sup>1</sup>

(1. School of Environmental Studies & State Key laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan, HB 430074, China; 2. Shenzhen Investigation & Research Institute CO. LTD, Shenzhen, GD 518026, China )

**Abstract:** Taiyuan city is located in the semiarid region of northern China, groundwater resources being the most important water supply there. However, the analysis of water quality evolution trend of representative water samples and distribution features of common pollutants indicate that groundwater in Taiyuan city has been contaminated and the pollution in the southern study area is the most serious. The genesis analysis of groundwater contamination denotes that human activities, including groundwater exploitation, discharge of industrial and domestic waste, irrigation in agriculture, application of fertilizer and pesticide, and mining, are the most significant factor resulting in the water quality deterioration in the study area.

**Key Words:** groundwater; contamination; genesis; Taiyuan city