

文章编号:1001-4810(2004)03-0219-06

山西岩溶泉域水污染现状、趋势与防治对策研究^①

时 坚¹, 王 晶¹, 刘德深², 韩行瑞¹

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004; 2. 桂林工学院资源与环境工程系, 广西 桂林 541004)

摘 要:山西岩溶泉域环境脆弱,水煤资源共存,加上工业和生活“三废”的不合理排放,造成了岩溶泉域局部地段出现点状和面状污染,主要表现为岩溶水的总硬度、硫酸盐、溶解性总固体、铁和 COD 等污染物含量普遍增高,而且污染还有逐年加重的趋势。为了有效遏制泉域岩溶水的污染,提出了严格控制地表污染源、提高资源再生利用水平、减少污染物排放量,以及建立岩溶水水源地环境保护区等综合治理措施。

关键词:岩溶泉域; 水污染; 防治对策; 山西省

中图分类号:X523 **文献标识码:**A

0 引 言

山西省是我国重要的能源重化工基地,也是我国北方岩溶分布最广的省份,裸露岩溶区面积为 $2.6 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全省面积的 17.5%, 如果加上隐伏岩溶区, 总面积为 $11.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全省面积的 75.2%。山西作为半干旱岩溶区, 其一个显著特征是形成了众多的流量相对稳定的岩溶泉及相应的泉域, 每个岩溶泉域都是一个完整的岩溶水系统。据统计, 全省流量大于 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 的岩溶泉共有 86 处, 其中流量大于 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 的岩溶大泉 19 处^[1], 是城市及能源基地最重要的供水水源^[2~4]。

山西大部分地区年降水量不足 600mm, 水资源严重缺乏。随着能源基地的建设和开发, 由于岩溶环境的脆弱性和水、煤资源共存, 工业和生活“三废”(废气、废水、废渣)排放及局部地区原生地球化学条件不良, 造成岩溶水系统的局部地段出现点状或较大范围的面状污染, 岩溶区的环境问题变得日益严重。这些问题与水资源短缺问题相互影响, 形成恶性循环, 对能源基地的建设和长远发展构成了现实和潜在的威胁。

1 环境水文地质条件

1.1 岩溶泉域系统及岩溶水补、径、排基本特征

区内广泛分布的寒武、奥陶系碳酸盐岩是最主要的岩溶发育层和岩溶含水层。随着岩溶水系统的发育演化, 形成了多个水流传输相对独立的岩溶泉域系统(图 1)。

岩溶地下水的补给主要为裸露岩溶区降水入渗补给, 其补给量一般占天然资源量的 70%, 降水入渗系数 $0.2 \sim 0.3$ ^[5]; 其次为半裸露、覆盖岩溶区的降水间接入渗补给, 其入渗系数一般小于 0.1。部分岩溶水系统存在河流渗漏补给。岩溶水的贮存、运移空间以岩溶裂隙、孔隙为主, 在裸露岩溶区水流循环较浅、交替较快, 在覆盖岩溶区循环深度较大、速度较慢, 局部存在水流交替极弱的滞流区。多数岩溶水系统的径流排泄区存在强径流带^[6], 在自然条件下, 各岩溶水系统的排泄, 都以大泉(或泉群)相对集中的形式排泄。强径流带和排泄区的物质交换快而集中, 岩溶化一般较强, 易受地表环境污染的影响。

1.2 岩溶泉域系统中煤系地层的分布特征

岩溶泉域系统都有煤系地层分布, 主要为石炭二

^① 基金项目:“八五”国家重点科技攻关项目(85-926-05-03)资助
第一作者时方数据(1955-), 男, 副研究员, 长期从事水资源、岩溶水文地质工作。
收稿日期:2004-04-29

叠系煤层。其中在补给径流区大面积连续分布的有兰村—晋祠泉、龙子祠泉、延河泉、三姑泉；分布于径流区的有洪山泉、广胜寺泉；分布于径流排泄区的有柳林泉；郭庄泉泉域系统内分布较广，补、径、排区均有，而老牛湾泉和天桥泉泉域分布较少，仅在径流排泄区局部范围分布。

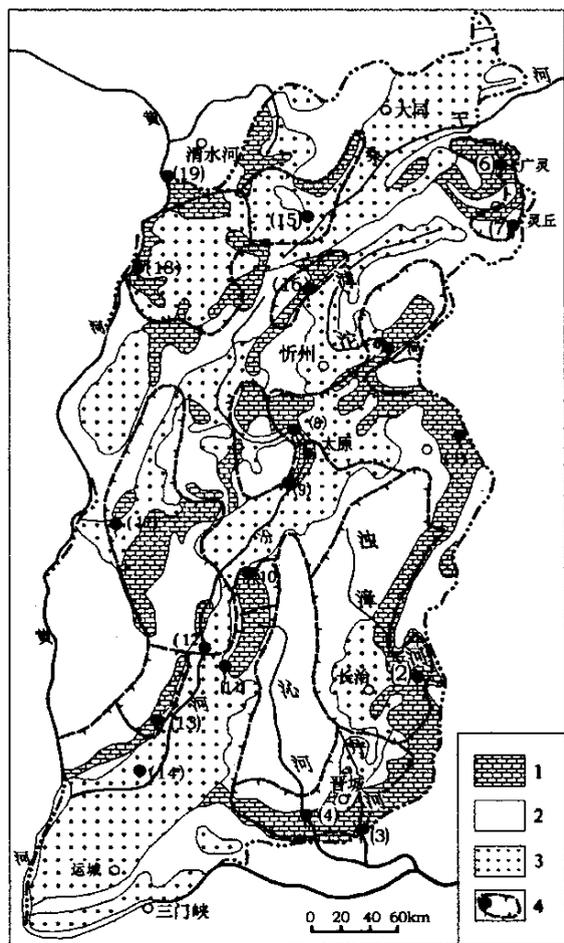


图1 山西省岩溶大泉分布图(据韩行瑞)^[1]

Fig.1 The distribution of big karst spring in Shangxi province

1. 可溶岩区; 2. 非可溶岩区; 3. 第四系松散层; 4. 岩溶大泉及其泉域范围; (1). 娘子关泉; (2). 辛安村泉; (3). 三姑泉; (4). 延河泉; (5). 坪上泉; (6). 广灵泉; (7). 红石楞泉; (8). 兰村泉; (9). 晋祠泉; (10). 洪山泉; (11). 广胜寺泉; (12). 郭庄泉; (13). 龙子祠泉; (14). 古堆泉; (15). 神头泉; (16). 下马圈泉; (17). 柳林泉; (18). 天桥泉; (19). 老牛湾泉

在垂向上, 岩溶含水层位于煤系地层之下, 底部可采煤层与中奥陶统岩溶含水层之间相距不大, 存在以砂、页岩及泥岩为主的隔水层, 其厚度不稳定(图2)。在太原盆地一般厚40~60m, 往南、往西变薄, 多

为15~30m^[7]。

1.3 地表环境状况

岩溶地下水主要来源于大气降水和地面水入渗, 地表环境质量状况直接影响到岩溶水水质。烟尘、CO、SO₂ 以及少量硫化氢、氟化物、碳氢化合物等, 造成大气降水不同程度的污染, 局部地区出现酸雨, 溶解物含量增高, 溶解性总固体达24~90mg/l, 出现氟化物、挥发酚超标污染。地面河流, 如丹河、沁河等均不同程度受到污染, 并成为区内最大的次生污染源。废渣排放, 尤其是煤矸石堆放对环境的影响很严重。煤矸石堆不仅因雨水淋滤使得其中的有害物进入土壤及地下水中, 而且还自然释放出大量SO₂和烟尘污染大气。如西山矿区有八座煤矸石堆自燃, 致使该区大气污染物含量超标, 污染严重。

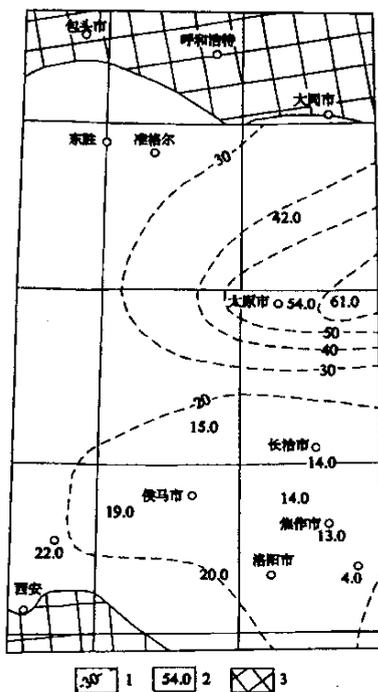


图2 二叠、石炭系煤层与奥灰含水层距离等值线图

Fig.2 The distance isogram between the coal of Permian-Carboniferous system and the aquifer of Ordovician system
1. 等值线与距离(m); 2. 二叠、石炭系煤层与奥灰含水层距离(m); 3. 隆起区

2 岩溶水污染现状特征

2.1 污染区分布及特征

据水质监测结果综合分析, 在郭庄泉、龙子祠泉、天桥泉、柳林泉的径流排泄区和兰村—晋祠泉、三姑泉的径流区及延河泉的煤炭集中采区的局部地段多

形成轻—重度污染(图3)。岩溶水超标污染主要分布在汾西矿区和霍县矿区一带,水的总硬度达453~976.04mg/l,溶解性总固体达1.06~1.31g/l, SO_4^{2-} 达319.3~636.4mg/l,COD达3.17~3.26mg/l,超标0.06~1.55倍。

在工业区和城镇附近以及污染河水渗漏地带,部分岩溶水系统如兰村—晋祠泉、三姑泉、郭庄泉等,出现较大范围的污染晕。在其它岩溶泉域系统则出现一些小范围的点状污染。引起水质恶化的污染物中,来自于工业和生活废弃物的污染物如挥发酚、氟化物、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、氟化物、COD、Fe、Pb、 Cr_6 、Hg等的检出率与检出含量较高。部分污染严重地段和水点,其污染物含量超标严重。例如兰村—晋祠泉泉域系统在古交下游兰村泉一带和东山岩溶区出现面状污染^[8],挥发酚、氟化物、COD、铁、锰和 NO_2^- 分别超标4.5~12.5倍,0.51~1.39倍、1.63~1.75倍、1.83倍、0.08倍和2.05倍。

在柳林泉、兰村—晋祠泉、龙子祠泉泉域系统的覆盖埋藏岩溶区和水流循环较深而与区域深大断裂导水有关的泉水及其径流带,岩溶水具有较高的溶解性总固体、总硬度、氟化物、氯化物和硫酸盐含量,形成范围较大的污染区,一般超标1~3倍。

2.2 主要污染物及污染原因

引起岩溶水水质恶化的污染物主要为:总硬度、氟化物、挥发酚、硫酸盐、溶解性总固体、铁、 NO_2^- 、COD、Cl、锰,极少数水点检出有Pb、Hg、As、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、Cu等组分的超标污染。根据岩溶水水质形成环境和污染特征分析,其主要污染物的来源与成因简析如下:

总硬度、硫酸盐和溶解性总固体:此三种污染物为污染岩溶水中普遍出现的超标污染组分,主要成因有①煤系地层中的硫化物在自然条件下氧化、水解,或因采煤使煤层及其围岩处于更氧化的环境,加速硫化物的转化迁移,形成硫酸盐含量较高、酸性较强的下渗补给水,使岩溶水中硫酸盐含量增高,并使含水介质中的钙、镁大量转入水体;②岩溶介质中的石膏溶解;③大气污染使降水中硫酸、碳酸组分浓度和酸度增大,入渗补给岩溶水,加速含水介质溶解,使水中钙、镁、重碳酸根和硫酸盐含量增高;④岩溶区内大量堆放的固体废弃物、特别是在煤矸石堆,灰渣场和炉渣场,废物经长期氧化、淋溶,形成高浓度或酸性的下渗水,污染岩溶含水层并使碳酸盐矿物溶蚀量增大;⑤排放的工业和生活有机废弃物,经生物降解产生大量 CO_2 ,经入渗水淋溶并带入岩溶含水层,增大碳酸

盐矿物的溶解;⑥岩溶水开采量或开采深度增大,使上覆浅层高矿化度、高硬度水越流补给或深部咸水向上循环与岩溶水混合,使水中总硬度、溶解性总固体、硫酸盐以及氯化物含量增高。

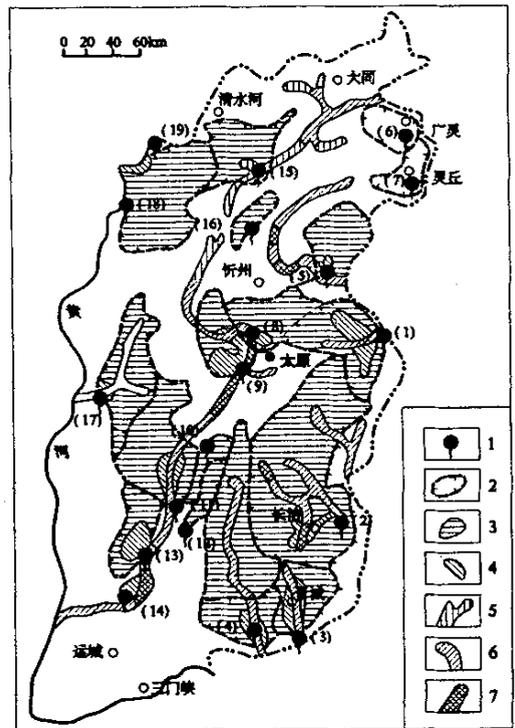


图3 山西岩溶大泉污染现状图(据韩行瑞)^[1]

Fig. 3 The pollution status of karst springs in Shangxi

1. 岩溶大泉; 2. 泉域范围; 3. 清洁、尚清洁岩溶水; 4. 轻—中—重度污染岩溶水; 5. 清洁的地表水; 6. 轻—中—重度污染地表水; 7. 严重污染的地表水; (1) 娘子关泉; (2) 辛安村泉; (3) 三姑泉; (4) 延河泉; (5) 坪上泉; (6) 广灵泉; (7) 红石楞泉; (8) 兰村泉; (9) 晋祠泉; (10) 洪山泉; (11) 广胜寺泉; (12) 郭庄泉; (13) 龙子祠泉; (14) 古堆泉; (15) 神头泉; (16) 下马圈泉; (17) 柳林泉; (18) 天桥泉; (19) 老牛湾泉

氟化物: 干旱、半干旱气候条件下, 氟化物在上覆第四系松散层富集, 随下渗水或浅层潜水越流进入岩溶含水层。此外, 来自于电力、冶炼、焦化和建材等工业“三废”的排放, 如污染的汾河水中氟化物含量达0.61~5.0mg/l。

挥发酚类: 区内岩溶水的挥发酚超标, 主要是由于电力、钢铁冶炼、石化、焦化等工业中燃煤和炼焦的废气、废水排放对岩溶水环境造成污染所致。如汾河太原段河水酚含量达0.19~1.24mg/l。因污染河水渗漏影响, 兰村小海子泉酚超标11.5倍。

铁: 其来源主要是煤系地层中的黄铁矿和奥陶系上覆的山西式铁矿层。由于采矿活动加速含铁硫化物

氧化,形成硫酸亚铁转入水体,含铁下渗水补给使岩溶水铁含量升高。其次是工矿区排放的含铁废水、废渣,如酸性矿坑水和矿渣等,铁质随水下渗,污染岩溶水。

亚硝酸盐、氨氮、硝酸盐;主要是生活和工业有机废弃物排放所致,且以废污水的入渗污染为主,因此,多出现在污染河水渗漏带和污灌区。

3 岩溶水污染趋势

近年岩溶泉域水质状况与 20 世纪 80 年代中期相比,岩溶水污染的范围与程度均有明显发展,尤其在煤炭开采影响较强和“三废”排放量较大的岩溶泉域水质恶化更为显著。以三姑泉泉域为例,1986 年岩溶水的溶解性总固体和总硬度最高为 492.36mg/l 和 411.91mg/l;1990 年分别达 620mg/l 和 485mg/l,至 1995 年则高达 1024mg/l 和 740mg/l。其超标污染岩溶水的分布,1986 年仅出现在晋城市区和白水河渗漏带及个别矿区的局部地段,1990 年扩大成连片分布,污染面积约 40~50km²;1995 年污染区进一步扩展约达 100km²,以致下游排泄区郭壁泉水检出铁、锰超标污染。超标污染物由早期的 2 项(铁、铅)增多到 4 项(NH₃-N、铁、COD、总硬度),至 1995 年增加到 7 项(总硬度、溶解性总固体、硫酸盐、NO₃-N、锰、铁、氟化物)。

根据对岩溶泉域水质与环境状况的变化及环保措施的实施情况综合分析,岩溶水污染趋势的主要特征如下:

3.1 采煤区及其下游岩溶水中,总硬度、溶解性总固体和硫酸盐、铁等污染物的含量逐年增高,污染范围不断扩大

由于采煤空间的扩展与加深,矿坑水下渗和煤层、围岩中的污染物迁移增强,同时煤矸石排放量与堆存量逐年增多,经长时期的暴露堆放,矿物的氧化、淋滤作用更强,而且外排矿坑水的处理回用率长期处于较低水平,采煤区及其下游岩溶水的污染呈逐年加重的趋势^[9]。

20 世纪 80 年代中期,采煤区岩溶水检出溶解性总固体、总硬度、硫酸盐和铁等污染物均有超标的岩溶泉域为柳林泉、兰村—晋祠泉两个泉域。近年来增多到包括三姑泉、龙子祠泉和郭庄泉的五个岩溶泉域。超标污染点增多,分布范围由邻近矿区的局部地段扩大形成连片较大面积污染晕区。据污染点分布圈定,其中柳林泉约有 280km²、兰村—晋祠泉约

300km²、郭庄泉约 590km²、龙子祠泉约 430km²、三姑泉约 100km²。天桥泉泉域,近期也出现因采煤造成局部地段岩溶水超标污染。

3.2 化学耗氧量和三氮等来源于生活和有机“三废”的污染物含量增高,造成岩溶水超标污染的检出点增多、分布范围增大

工业有机废水,尤其是城镇生活污水与垃圾的排放量逐年上升,而处理率和处理程度多年维持较低水平,引起岩溶水的污染。如三姑泉泉域,丹河及支流白水河多年来因接纳大量污水而遭受污染(表 1)。水中有机污染指标:COD、NH₃-N 和 NO₂-N 的含量多年来一直处于很高的浓度范围,三氮含量呈现较大增幅,而且远远超过相应标准。受污水下渗影响,自 1990 年到 1995 年期间多次检出 COD、NH₂-N 和 NO₂-N 的超标污染。1995 年枯水期在晋城岩溶水盆地内检出 NO₃-N 达 21.07mg/l,超标 0.05 倍。以 1995 年与 1986 年同期检测结果的三氮平均浓度相比,NO₃-N 增高 0.78 倍、NH₃-N 增 0.77 倍,NO₂-N 增 0.13 倍。

表 1 丹河及其支流白水河历年有机污染状况表

Tab. 1 The perennial organic pollution status of Danhe and its tributary Baishuihe River 单位:mg/l

河段位置	时间(年)	COD	NH ₃ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N
高平河西	1988	708.97	19.528	0.065	0.974
	1992	1068.29	53.176	0.016	8.187
任庄水库	1988	202.70	4.042	0.094	3.088
	1992	121.55	8.312	0.456	2.367
白水河	1988	111.40	26.878	0.259	1.613
	1992	68.25	30.684	1.797	5.142

注:含量值为年平均值

各岩溶泉域,1986 年岩溶水监测均无 COD 和三氮的超标污染现象。近年来则在三姑泉、兰村—晋祠泉、龙子祠泉、郭庄泉、天桥泉和柳林泉等泉域的局部地段检出超标污染。在分布上,超标污染主要分布在污染河水渗漏带。由上述可见,工业和生活有机废弃物对本区岩溶泉域水环境的影响呈持续恶化的趋势。

3.3 挥发酚污染趋于加重,重金属的污染则趋于减弱

挥发酚和重金属等来源于工业“三废”排放的污染物,对岩溶水的污染影响仍集中出现在工业“三废”排放量大的部分岩溶水系统。随着能源基地建设,电力、焦化等行业迅速发展,增大了“三废”排放量,加之煤矸石自燃废气长期未能控制,挥发酚的污染进一步

加重。兰村—晋祠泉泉域,在 1986 年水质监测时,仅于地表水和第四系浅层水中检出超标现象,岩溶水中挥发酚含量均小于 $0.002\text{mg}/1$ 。20 世纪 80 年代末期,因古交工业区的污水大量排入汾河和太原市及周围矿区的废气排放,形成了包括兰村段汾河渗漏带和东、西山岩溶区的岩溶水中挥发酚含量高达 $0.011\sim 0.027\text{mg}/1$,超标 $4.5\sim 12.5$ 倍。

重金属污染组分在岩溶水中的含量普遍较低,仅在少数岩溶水系统的局部地段检出超标污染。在兰村—晋祠泉、柳林泉、三姑泉和龙子祠泉等泉域,1986 年检出铅含量超标。此外兰村—晋祠泉和郭庄泉泉域岩溶水的汞含量平均高达 0.2ppb 以上。经过加强工业污染源的治理,重金属污染物的排放量大为减少。据近年监测结果,上述各系统岩溶水的重金属污染物含量已明显降低,没有超标污染,兰村—晋祠泉和郭庄泉系统的汞含量均值下降到 0.02ppb ,可见通过控制污染物排放量,能够遏止岩溶水污染发展,促使岩溶水水质恢复。

3.4 原生污染的分布和污染程度基本不变

通过人工开采,可加速污染区岩溶水的交替和稀释,使水质好转。但因近年来岩溶水水位下降、水量减少和开采深度增加,水中污染物浓度的淡化过程减缓,水质污染仍较严重。如兰村—晋祠泉泉域的原生污染区内,平泉村采水区岩溶水中溶解性总固体含量变化,自 20 世纪 70 年代中期到 20 世纪 80 年代中期每年以 $50\sim 100\text{mg}/1$ 的速率递减。然而最近十年的变化甚小,每年下降仅 $5\sim 10\text{mg}/1$,且水的溶解性总固体、总硬度、硫酸盐、氟化物仍超标 $0.15\sim 2.85$ 倍。若能增大泉区的补给水量,可使水源质量进一步好转。

总的来看,经各级管理部门和有关企业的多年努力,区内岩溶水的有毒重金属污染已得到一定程度的控制。但一般化学物质、挥发酚和有机污染物含量升高所造成的岩溶水污染呈现不断恶化的趋势。煤炭开采、城镇生活的“三废”控制与治理,已成为环境保护和岩溶水污染防治的主要问题。据有关资料,晋、陕、蒙地区的煤炭产量,1980 年为 $1.61\times 10^8\text{t}$,1990 年为 $3.67\times 10^8\text{t}$,2000 年达 $5.3\times 10^8\text{t}$,2020 年达 $9.5\times 10^8\text{t}$ 。可见,资源开采规模将迅速增长,同时能源工业和城镇人口亦将大为发展,“三废”排放将对岩溶水环境造成更大影响。岩溶水的污染问题,应受到有关部门的足够重视,加强污染源控制和岩溶水环境的保护刻不容缓。

4 岩溶水污染的防治对策

岩溶泉域水污染问题已不容忽视。根据其环境状况和岩溶水污染特点及成因,考虑到岩溶水资源的潜在价值和当前的经济技术条件,按照控制、回用、减少污染物排放,加强水源地保护,改良环境的思路,提出如下对策、建议:

4.1 严格控制地表污染源,提高资源再生利用水平,减少污染物排放量

(1)各工矿企业和排污单位的“三废”排放必须达到国家有关标准要求。严格实行“三废”排放许可证制度,定期核查、强制超标排污单位限期治理,并依法进行管理。

(2)提高“三废”再生资源化,重点提高废渣利用率和废水重复使用率。矿山建设必须包括废水处理回用和废渣利用工程。提高矿山的环保工程投资比例($3\%\sim 5\%$)。大力发展资源综合利用和废物资源化产业,以减少污染物排放。提高城市综合污水和垃圾的处理水平,保护生态环境。

4.2 抑制地下污染源产生,防止污染物下渗污染岩溶水

(1)矿坑水下渗是主要的污染来源。因此,必须改进地下废弃物的排放工艺,修建防渗集水系统,把矿坑水全部排到地面处理回用,以抑制采区暴露面的水—岩作用,防止污染物转入水体下渗污染岩溶水。

(2)要加强矿区地下水供、排结合的研究与应用。提高废矿渣回填的开采工艺水平。减少废渣外排。强化实行露天区复耕环保工程,以达到资源开发与环境保护协调发展。

4.3 建立岩溶水水源地环境保护区

健全水源地或泉域环境管理与监测系统,对水源地、上游岩溶水强径流带和邻近水源地的裸露岩溶区及岩溶沟谷,作为重点管理区域,依法清除一切可能导致岩溶水源污染的因素。

4.4 综合治理水污染

对于水资源十分紧缺、而岩溶水已受到污染的地区,应采用标本兼治的综合治理措施:一方面以地下水污染治理技术,恢复水源水质;另一方面通过改造岩溶水补给环境与条件,增加清洁水补给量,促进岩溶水交替和解释自净功能,改良水源质量。

5 结 语

近年来,环保问题已引起人们的重视,但研究区

内岩溶水中的总硬度、溶解性总固体和硫酸盐、铁等污染物的含量在采煤区及其下游仍逐年增高,污染范围不断扩大;来源于生活和有机“三废”的污染物含量增高,造成岩溶水超标污染的检出点增多、分布范围增大,挥发酚污染趋于加重。因此,为了保证岩溶泉域生态环境的良性发展,必须要坚持综合治理原则,严格实行“三废”排放许可证制度,定期核查、强制超标排污单位限期治理,并依法进行管理;必须改进地下水废弃物的排放工艺,修建防渗集水系统,把矿坑水全部排到地面处理回用,以抑制采区暴露面的水—岩作用,防止污染物转入水体下渗污染岩溶水。

参考文献

[1] 韩行瑞,鲁荣安,等.岩溶水系统—山西岩溶大泉研究[M].地质

出版社,1993.

[2] 中国北方岩溶和岩溶水,地质出版社,1982年.

[3] 马腾,等.神头泉流量衰减原因分析及趋势预测[J].中国岩溶,2001,20(4).

[4] 侯敬泽等.山西省万家寨引黄入晋工程总干线环境水文地质问题[J].中国岩溶,2001,20(3).

[5] 韩行瑞,等.丹河岩溶水系统—中国北方岩溶水系统典型研究[M].广西师范大学出版社,1994.

[6] 裴捍华,等.山西岩溶水强径流带的成因类型及其水文地质特征[J].中国岩溶,2003,13(3).

[7] 韩行瑞,等.大规模采煤对岩溶区水环境的影响[J].中国岩溶,1994,13(2).

[8] 孙才志,等.山西晋祠泉在引水条件下的可再生性研究[J].中国岩溶,2001,20(1).

[9] 毕大元,等.焦作市某碱渣堆放场引起岩溶地下水氯离子污染的初步研究[J].中国岩溶,2003,22(2).

STUDY ON THE POLLUTION STATUS, TREND AND PROTECTION MEASURE OF SHANGXI KARST SPRINGS

SHI Jian¹, WANG Jing¹, LIU De-shen², HAN Xing-rui¹

(1. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 441004, China;

2. Guilin institute of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: The environment is fragile in karst spring basin, Shanxi province. The coal and water resources exist together there. The unreasonable discharge of industrious production and daily three wastes lead to pollution on spot or in large-range locally in the basin. The pollution mainly assumes the increases of the hardness, sulphate, dissolved total solids and iron as well as COD, etc.. And the case trends to be more serious. In order to limit the pollution, a series of synthetic ways are put forth as follows - the pollution source from ground surface should be controlled rigidly, the using level of the resources be enhanced, discharging amount be decreased, and protecting area for karst water be built etc..

Key words: Karst spring basin; water pollution; Protecting measure; Shanxi province