

地表水渗漏对娘子关岩溶泉水水质的影响

王桃良¹, 赵春红², 梁永平², 霍建光¹, 唐春雷², 王维泰², 申豪勇²

(1. 阳泉市娘子关泉域管理处, 山西 阳泉 045000;
2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、
广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要:娘子关泉水作为阳泉市主要的供水水源,受特定地质结构与人为污染等因素的影响,水质呈现逐年恶化的趋势,部分组分含量目前已处于超标或临界超标状态。在分析泉域岩溶水系统地质结构基础上,通过泉域内各主要河流渗漏量实测与水化学测定,采用物理混合方法评价河流渗漏途径对娘子关泉水水质的污染影响程度。

关键词:娘子关泉域;地表污水;渗漏;岩溶水污染程度

中图分类号:P641

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2015)05-0041-05

娘子关泉水是我国北方最大的泉水之一,多年平均天然流量达 $12.1\text{ m}^3/\text{s}$,娘子关泉水目前是山西省阳泉市的主要供水水源。受采煤等人为污染,数十年来泉水部分化学含量长期处于增长态势,以致目前的 SO_4^{2-} 、总硬度含量已处于超标或临界超标的状态,直接威胁到饮水安全。本文着重评估河流污水渗漏对娘子关泉水污染的影响程度,为泉水保护提供基础性依据。

1 娘子关泉域结构模式

娘子关泉域总的汇水面积 7217 km^2 。泉域位于沁水向斜东北翼,地层向西偏南倾斜,含水层为寒武—奥陶碳酸盐岩(图1)。泉域东侧华北平原控制岩溶地下水以及地表河水的排泄基准,总体上都呈现出与地层倾向相反由西向东径流的“逆置型系统”模式特征^[1-2]。这种系统模式的最大特点是煤系地层和城市均分布在地表流域上游地区,而河流下游碳酸盐岩裸露河段的地表水渗漏成为岩溶水的重要补给来源。娘子关泉域内从北向南地表水系有温河、桃河、南川河、松溪河、清漳河东源支和西源支,它们近乎等间距排列从西向东贯穿泉域,西部为石炭二叠系煤系地层和三叠系碎屑

岩产流区,东部为寒武—奥陶碳酸盐岩渗漏区;各河流上游依次为孟县、阳泉市、平定县、昔阳县、和顺县和左权县城区,这些以煤炭为主要工业结构的城市几乎一致地坐落在碎屑岩到碳酸盐岩的接触地带附近,河流经过城市后进入碳酸盐岩裸露河段,河水在大量渗漏补给泉域岩溶水的同时,也是采煤以及城市生活污水的载体,导致河流成为泉域岩溶水的重要污染途径。

根据前人对娘子关泉域岩溶水评价结果^[3],河流对岩溶水的多年平均渗漏补给量为 $6511\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ ($2.06\text{ m}^3/\text{s}$),占到泉域岩溶水补给总量的18.2%。

2 地表水状况

2.1 地表水来水状况

根据调查,娘子关泉域内主要河流枯水期均成为排污河,矿坑排水、生活污水、工业污水以及淋滤各种固体垃圾的废水最终都进入河道。以阳泉市为例,虽然多数地区都建了污水处理厂,但受到了处理能力、处理项目、处理深度的限制,一些水质项目含量超标严重,如2012年废污水总排放量为 $22.57\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$

收稿日期:2014-11-03

基金项目:阳泉财政“阳泉市娘子关泉域岩溶水污染调查评价及保护对策”项目;中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2014003);中国地质调查局地质调查项目“山西娘子关泉域岩溶水文地质环境地质调查”(12120114019101)

作者简介:王桃良(1963-),男,山西昔阳人,高级工程师,主要从事娘子关泉域水资源管理与保护研究。E-mail:nzgqy@163.com

通讯作者:梁永平(1962-),男,山西平遥人,研究员,主要从事北方岩溶水调查与研究。E-mail:lyp0261@karst.ac.cn

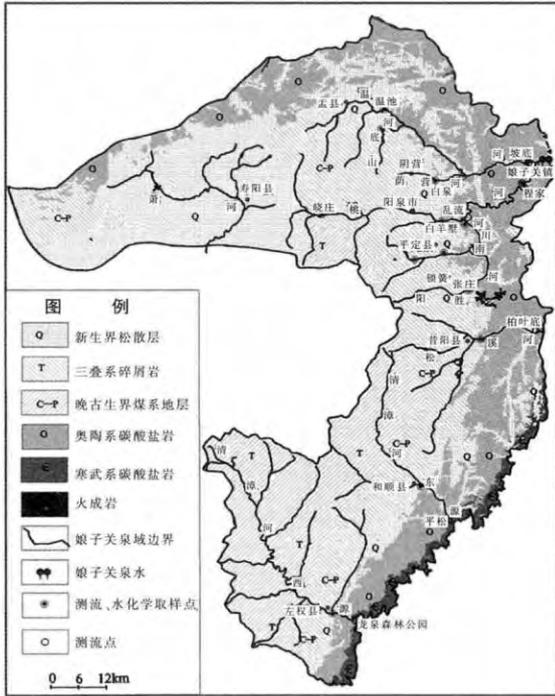


图1 娘子关泉域地质略图

Fig.1 The geological situation in the Niangziguan spring area

(表1),但全市满负荷的污水处理能力仅为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 至少有近 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的污水直接排入河流, 加上一些项目经处理仍然不能达标, 因此河流污水渗漏成为娘子关泉域岩溶水污染的主要原因。

表1 阳泉市废水排放量情况表
Table1 The wastewater discharge of Yangquan city

位置	市区	平定	盂县	郊区	合计
2006~2012 年年均排放量/ $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$	5207.05	956.56	492.11	933.88	7589.60
2006~2012 年日均排放量/ $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	14.27	2.62	1.35	2.5586	20.80
2012 年排放总量/ $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$	6155.80	1026.38	712.11	343.69	8237.98
2012 年日均排放总量/ $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	16.87	2.81	1.95	0.94	22.57
2012 年污水处理厂处理量/ $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$	2972.41	613.80	570.79	224.3	4157.00
污水处理厂处理规模能力/ $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	8.00	3.00	2.00	2.00	15.00

2.2 地表水水质

2013 年 5 月, 我们对泉域内各河流进入碳酸盐岩区断面以及部分排水口等进行了取样分析, 共包含 14 个取样断面, 测点分布见图 1(分析项目 41 项), 并按

照地下水质量标准(GB/T14848-93)采用综合评价法进行了评价, 结果表明, 除了桃河上游晓庄断面外, 其余地表水均为 V 类水(见表 2), 水的溶解性总固体(TDS)大多在 1 g/L 以上, 最大的为锁簧河, 达到 16.3 g/L 。

表2 按照地下水分类标准对地表水的评价结果
Table2 The surface water evaluation result according to groundwater classification standard

取样点位置	超标项目	TDS/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	评价级别
桃河晓庄断面	无	431	II
荫营河	总硬度、TDS、 SO_4^{2-} 、TFe、Mn、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$	3157	V
白泉断面	浑浊度、总硬度、TDS、 SO_4^{2-} 、TFe、Mn、 $\text{NO}_2\text{-N}$	1459.5	V
温河温池	总硬度、TDS、 SO_4^{2-} 、Mn、 $\text{NO}_2\text{-N}$	1638.5	V
城西泉上游	N	2234	V
温河	总硬度、TDS、 SO_4^{2-} 、Mn、Hg	479	V
坡底泉下游	浑浊度、TFe、Mn、挥发酚、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$	749	V
清漳河	味、TFe、Mn、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、Hg	893	V
西源左权县城	总硬度、 SO_4^{2-} 、TFe、 $\text{NH}_3\text{-N}$	1994.7	V
清漳河	浑浊度、总硬度、TDS、 SO_4^{2-} 、TFe、Mn、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$	16256.6	V
东源和顺县城	总硬度、TDS、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、Mn、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、F	1832	V
松溪河	pH、总硬度、TDS、 SO_4^{2-} 、Co	1588	V
上游昔阳县城	总硬度、TDS、 SO_4^{2-} 、Mn	1818	V
桃河	总硬度、TDS、 SO_4^{2-} 、Mn、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$	5706.5	V
白羊墅大桥	浑浊度、总硬度、TDS、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、TFe、Co、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$		
锁簧河	总硬度、TDS、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、Mn、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、F		
南川河入口			
南川			
河暂石桥断面			
南川河南			
坳桥断面			
阳胜河			
张庄			
南川河			
乱流断面			

3 各河流的渗漏量计算

3.1 枯水期河流渗漏量的实测

与水质取样分析同期配套, 选择各河流碳酸盐岩渗漏段上下断面为测流上下游断面, 以及娘子关泉群上游断面为温河、桃河测流下游断面, 各河流枯水期除支流外, 无其他区间来水, 据此计算各河流在碳酸盐岩渗漏段的渗漏量, 结果显示, 枯水期的渗漏量达到 $12.11 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (见表 3), 由前述各河流的水质分析评

价结果可知,这些漏失水量为不合格的污水。

表3 娘子关泉域实测河流渗漏量汇总表 (m³/d)

Table3 The leakage of the rivers in Niangziguan spring area (m³/d)

河流	测流上下断面	上游水量	区间水量	下游水量	渗漏量
温河	温池-坡底	22 485.37	22 241.94	1 7401.1	27 326.21
温河支流 荫营河	白泉-温河入口	16 741.94	0	3 898.70	12 843.24
桃河	桃河乱流-程家	50 280.7	0	15 306.1	3 4974.6
南川河	平定暂石桥-乱流	19 631.97	2500	16 324	5 807.97
松溪河	昔阳-柏叶底	27 547.08		3 100.34	24 446.74
清漳河西源支	左权-龙泉森林公园	19 107.48	1190.744	1 2303.8	7 994.424
清漳河东源支	和顺县-平松南东	35 907.84		15325.62	20 582.22
合计		174 960.44	25 932.68	79 760.96	121 132.2

3.2 河流漏失系数及渗漏率的计算

河流的漏失能力可由单位长度的漏失系数表达,它与河川地质结构(河川松散层岩性结构、岩溶发育强度等)、来水量大小以及河水渗漏状态(垂向的自由渗漏、顶托渗漏,侧向渗漏等)及河水与岩溶地下水的水动力关系密切相关,在地表水与地下水无水动力联系的自由渗漏状态下,其数值可通过上、下断面测流来计算获得。对某一河流而言,根据水均衡原理,其资源量服从以下方程:

$$Q_w = Q_{上} + Q_{区} - Q_{下} - Q_e \quad (1)$$

式中: Q_w 为河流渗漏量; $Q_{上}$ 为上游碎屑岩地区产流量(计算时要对城市排水量还原); $Q_{区}$ 为碳酸盐岩地区区间来水量; $Q_{下}$ 为下游河流径流量; Q_e 为河面蒸发量。

如假定河流的漏失系数对同一河流是常数,同时考虑到水面蒸发量忽略不计,碳酸盐岩区间产流量(碳酸盐岩区实际观测的年地表径流深为10mm)取其半,经简化推导后的各河流单位公里长的漏失系数计算方程为:

$$Q_{上} \times (1-\beta)^{L_1} + Q_{区} \times (1-\beta)^{L_2} = Q_{下} \quad (2)$$

其渗漏率为(单位%):

$$\alpha = 1 - (1-\beta)^L$$

式中: β 为河流单位长度漏失系数; L_1 为河流在碳酸盐

岩区的渗漏长度(km); L_2 为区间来水入口到下断面的渗漏长度(km)。

将历年实测、观测和计算的数据代入上述方程,最后求得各河流的漏失系数为:

3.2.1 桃河

漏失系数 $\beta_1=0.0072$ (漏失率24.56%),计算方程为:

$$Q_{桃河上} \times (1-\beta_1)^{39} + Q_{出南川河} \times (1-\beta_1)^{35} + Q_{桃区} = Q_{出桃河} \quad (3)$$

3.2.2 温河

漏失系数 $\beta_2=0.0156$ (漏失率49.14%),计算方程为:

$$Q_{温河上} \times (1-\beta_2)^{43} + Q_{温区} = Q_{出温河} \quad (4)$$

3.2.3 南川河

漏失系数 $\beta_3=0.0167$ (漏失率28.3%),计算方程为:

$$Q_{阳胜河上} \times (1-\beta_3)^{23} - Q_{库漏} \times (1-(1-\beta_3)^{17}) + Q_{尚怡河上} \times (1-\beta_3)^{16} + Q_{南区} = Q_{出南川河} \quad (5)$$

3.2.4 松溪河

漏失系数 $\beta_4=0.1536$ (漏失率88.75%),计算方程为:

$$Q_{松溪河上} \times (1-\beta_4)^L = Q_{出松溪河} \quad (6)$$

3.2.5 清漳河西源支

由于缺乏清漳河西源支地表水长期观测资料,因此河流漏失系数根据2014年5月偶测数据计算,漏失系数为 $\beta_5=0.0563$ (漏失率39.53%),计算方程为:

$$Q_{清漳河西源支上} \times (1-\beta_5)^{L_1} + Q_{支流上} \times (1-\beta_5)^{L_2+L_3} = Q_{出清漳河西源支}$$

3.2.6 清漳河东源支

碳酸盐岩渗漏段为从和顺县城到新村段,总长度15km,考虑到清漳河东源支和清漳河西源支地质地貌条件相似,采用清漳河西源支的渗漏系数 $\beta=0.0563$,则清漳河东源支河水的漏失百分率为 $1-(1-0.0563)^{15}=58.07\%$ 。

此外,温河还有支流山底河、荫营河支流,为计算方便,采用温河的漏失系数和荫营河的渗漏长度进行计算。荫营河汇入温河前在碳酸盐岩裸露区的渗漏长度为 $L_1=5.27$ km(荫营河白泉断面到入温河口),入温河再到娘子关渗漏长度为 $L_2=21.17$ km,则郊区污水流经荫营河、温河最终到达下游娘子关的平均污水渗漏率为 $1-(1-0.0156)^{26.44}=33.59\%$ 。枯水期山底河的污水为溢流出的老窑水,在表1污水排放量统计中未计入其中,且水质极差,因此,将其渗漏量单独列出。

3.3 河流渗漏量计算

采用各河流碳酸盐岩河段输入量,计算近年各河流渗漏量如表4所示。

表4 娘子关泉域河流污水对岩溶水渗漏补给量汇总表($10^4\text{m}^3/\text{a}$)
Table4 The recharge of Niangziguan spring area from surface water leakage($10^4\text{m}^3/\text{a}$)

行政区	对应河流	渗漏率/%	2006~2012年平均排放量	2006~2012年平均渗漏量	2012年排放总量	2012年渗漏量
市区	桃河	24.56	5207.05	1278.85	6155.80	1511.86
平定	南川河	40.69	956.56	389.22	1026.38	417.63
盂县	温河	49.14	492.11	241.82	712.11	349.93
郊区	荫营河	33.59	933.88	313.69	343.69	115.45
郊区	山底河	33.59	73	17.8	73	17.8
昔阳	松溪河	88.75	1005.47	892.35	1005.47	892.35
和顺	漳河东源支	58.07	1310.64	761.09	1310.64	761.09
左权	漳河西源支	39.53	697.42	275.69	697.42	275.69
	合计		10676.13	4170.52	11324.51	4341.81

注:和顺、昔阳污水排放量和山底河老窑水流量,因缺资料,采用了工作中单次实测量

4 河流渗漏途径对娘子关泉水主要组分含量的贡献估算

4.1 河流对泉域岩溶水的输入

根据上述结果,各河流在碳酸盐岩河段的渗漏量

与水质输入值如表5所示。

4.2 河流渗漏污染对娘子关泉水主要组分含量的影响程度评估

将河流渗漏量与输入水质组分含量相乘即获得各河流相应组分对岩溶地下水的输入量(表6),结果表

表5 娘子关泉域河流水质输入值汇总表(mg/L)
Table5 The river water quality of Niangziguan spring area (mg/L)

取样点位置	2006~2012年 平均渗漏量 $/10^4\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$					取样点位置	2012年 渗漏量 $/10^4\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$				
	TDS	总硬度	NH_4^+	Cl^-	TDS		SO_4^{2-}	NO_3^-	NO_2^-	Mn	
温河温池	241.82	1459.5	1040	0	59.2	温河温池	349.93	773	37.5	2.8	1.42
荫营河白泉	313.69	3157	981	20	110	荫营河白泉	115.45	1804	43.2	2.8	2.84
山底河山底村	17.8027	8272	4870	--	111	山底河山底村	17.8027	5781	--	--	--
桃河白羊墅大桥	1278.85	1994.65	909	38	151	桃河白羊墅大桥	1511.86	1171	19	3	0.24
南川河段暂石桥	225.94	1588	1046.5	2	1344.5	南川河段暂石桥	225.94	857	27.5	1.515	0.0885
南川河入桃河乱流	163.29	5706.5	1017	4	2568	南川河入桃河乱流	163.29	826	42	3	0.089
松溪河昔阳县城	892.35	893	538	17	53.6	松溪河昔阳县城	892.35	385	0.56	0	0.1
清漳河东源和顺县城	761.09	749	428	17.5	63.6	清漳河东源和顺县城	761.09	242	0.56	0	0.62
清漳河西源左权县城	275.69	479	329	2.8	28.7	清漳河西源左权县城	275.69	139	5.81	1.15	0.24

明,通过河流每年输入进娘子关泉域岩溶水的、总硬度、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 都在 10^4t 以上,以2006~2012年娘子关泉水平均流量 $6.71\text{m}^3/\text{s}=21164.79\times 10^4\text{m}^3/\text{a}$ 计,假定河流输入物质含量均从娘子关泉水排泄,则现状河流渗漏对泉水矿化度的贡献值为 $322.8\text{mg}/\text{L}$,对总硬度的贡献值为 $146.82\text{mg}/\text{L}$,对 SO_4^{2-} 含量的贡献值为 $153.45\text{mg}/\text{L}$,对 Cl^- 含量的贡献值为 $50.61\text{mg}/\text{L}$,依次占娘子关泉水多年平均含量的48.95%、30.3%、62.1%和79.0%。虽然河流的渗漏总量不足泉域岩溶水资源量的20%,但仅根据物理混合计算(化学反应后的结果

要复杂,可能引起不同组分含量的增减),对水化学的含量贡献比重则占重要优势,由此可见河流污水对泉域岩溶水的污染程度。

5 结论

(1)娘子关泉域特定的“逆置型”结构模式是地表水成为岩溶地下水主要补给源的地质基础,使泉域环境质量极其脆弱;

(2)枯水期的实测结果表明,泉域内河流对岩溶地下水的渗漏补给量达到 $12.11\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$,这些渗漏水量均

表6 各河流对娘子关泉域岩溶水补给水质量汇总表 (t/a)
Table6 The recharge water quality of the rivers in Niangziguan spring area(t/a)

河流名称	TDS	总硬度	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	河流名称	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Mn
温河主干	3529.4	2514.93	0.00.000	143.16	温河主干	1869.27	90.68	6.77	3.43
白泉河	9903.2	3077.30	62.74	345.06	白泉河	5658.97	135.51	8.78	8.91
山底河(老窑水)	1472.6	866.99	0.00	19.76	山底河(老窑水)	1029.17	--	--	--
桃河	25508.6	11624.75	485.96	1931.06	桃河	14975.33	242.98	38.37	3.07
南川河主干	3587.9	2364.46	4.52	3037.76	南川河主干	1936.31	62.13	3.42	0.20
南川河入桃河	9318.1	1660.66	6.53	4193.29	南川河入桃河	1348.78	68.58	4.90	0.15
松溪河	7968.7	4800.84	151.70	478.30	松溪河	3435.55	5.00	0.00	0.89
清漳河东源支	5700.6	3257.47	133.19	484.05	清漳河东源支	1841.84	4.26	0.00	4.72
清漳河西源支	1320.6	907.02	7.72	79.12	清漳河西源支	383.21	16.02	3.17	0.66
合计	68309.7	31074.41	852.36	10711.57	合计	32478.42	625.17	65.41	22.03
对泉水的含量贡献/mg·L ⁻¹	322.8	146.82	4.03	50.61	对泉水的含量贡献/mg·L ⁻¹	153.45	2.95	0.31	0.10

有多项组分超标，按照地下水质量标准评价均为类水，所以河流渗漏是泉域岩溶地下水污染的主要途径；

(3)采用物理混合的方法结果表明,娘子关水中的主要组分含量 30%以上来自河流渗漏的补给,其中对总硬度和 SO₄²⁻的贡献率分别达到 48.95%、30.3%，因此杜绝污水进入碳酸盐岩河段是治理泉域岩溶水污染的重要手段。

参考文献：

[1] 梁永平, 韩行瑞, 王维泰, 等. 中国北方岩溶地下水环境问题与保护[M]. 北京:地质出版社,2013. (LIANG Yongping, HAN Xingrui,

WANG Weitai, et al. The Karst Groundwater Environment and Protection of Northern China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013. (in Chinese))

[2] 潘军峰, 张江汀, 梁永平, 等. 山西省岩溶泉域水资源保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. (PAN Junfeng, ZHANG Jiangting, LIANG Yongping, et al. Karst Groundwater Protection in Shanxi Province[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2008. (in Chinese))

[3] 梁永平, 霍建光, 张江华, 等. 娘子关泉域岩溶地下水资源评价报告 [R]. 阳泉: 阳泉市水利局,2004. (LIANG Yongping, HUO Jianguang, ZHANG Jianghua, et al. Karst groundwater evaluation in Niangziguan spring area [R]. Yangquan: Yangquan Bureau of Water Resources, 2004. (in Chinese))

Influence of Surface Water Seepage on Water Quality in Niangziguan Spring Area

WANG Taoliang¹, ZHAO Chunhong², LIANG Yongping²,

HUO Jianguang¹, TANG Chunlei², WANG Weitai², SHEN Haoyong²

(1.Niangziguan Spring Area Management Office, Yangquan 045000, China;

2.Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Karst Dynamics Laboratory, Ministry of Land and Resources & Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guilin 541004, China)

Abstract: Niangziguan spring as the main source of water supply to Yangquan City is affected by the particular geological structure and human factors such as water pollution, deteriorating trend and component content exceeding the standard. This paper evaluated the effect of the river seepage on the pollution of the water quality of the Niangziguan spring with the physical mixing method by analyzing the karst water system on the basis of geological structure, and making observation and measurement of the main river leakage and water chemistry.

Key words: Niangziguan spring area; polluted surface water; leakage; karst water pollution degree