

赵春红, 申豪勇, 卢海平, 等. 晋祠泉域岩溶地下水防污性能评价与水质保护区划分[J]. 中国岩溶, 2024, 43(4): 822-830.

DOI: 10.11932/karst2024y034

晋祠泉域岩溶地下水防污性能评价与水质保护区划分

赵春红^{1,2,3}, 申豪勇^{1,2,3}, 卢海平^{1,2,3}, 王志恒^{1,2,3}, 梁永平^{1,2,3}, 唐春雷^{1,2,3}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/广西岩溶资源环境工程技术研究中心, 广西 桂林 541004; 2. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心/岩溶动力系统与全球变化国际联合研究中心, 广西 桂林 541004; 3. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 广西 平果 531406)

摘要: 晋祠泉域岩溶水是太原市生活和工农业生产等重要的水源。文章以新划分的晋祠泉域岩溶水系统为评价对象, 在欧洲方法及“水量脆弱性评价”的基础上, 选取包气带厚度、入渗补给强度、上覆地层岩性及岩溶含水层的富水性4个指标, 进行泉域岩溶水系统防污性能评价及水质保护区划分。结果表明: 泉域泉源保护区主要分布在晋祠公园及周边; 一级保护区主要分布在汾河主流、西山山前碳酸盐岩裸露区、屯兰川、天池河及柳林河碳酸盐岩渗漏段等; 二级保护区主要分布在泉域北部、汾河北岸等; 准保护区主要分布在汾河南岸、东南部的太原盆地地区等。

关键词: 防污性能评价; 水质保护区; 岩溶地下水; 晋祠泉域

创新点: 依据晋祠泉域新的岩溶水文地质条件、地下水资源现状等, 在欧洲方法及“水量脆弱性评价”的基础上, 选取包气带厚度、入渗补给量、上覆地层岩性及岩溶含水层的富水性4个指标, 开展山西省晋祠泉域岩溶地下水防污性能评价, 重新划分泉域水质保护区。

中图分类号: X523; P641.8 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2024) 04-0822-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

地下水防污性能评价是开展地下水资源管理和保护的一种重要方法^[1-3]。目前对地下水防污性能评价应用最多的方法为美国地质调查局的 DRASTIC 法^[4-6]。由于岩溶含水层其独特的地表—地下水双层结构, DRASTIC 评价方法不适用于岩溶区地下水防污性能评价^[1, 7-8]。岩溶区地下水防污性能评价方法使用较广泛的为欧洲方法^[9], 主要包括 COP^[10-13]、PI^[14-15]、EPIK^[16-17]等。由于欧美国家在岩溶区多采取直接饮用岩溶泉水的取水方式, 地下水环境问题多集中在水质方面, 因此其防污性能评价及保护区

划分主要是以保护水质为目标^[18], 而关于中国北方突出的岩溶水水量环境问题研究较少^[19]。目前中国北方岩溶区基本采用定性方法划分重点保护区, 且将水量水质保护区均划入同一保护区开展保护^[20]。因水质水量问题成因、产生的区域及采取的保护措施不同, 梁永平等^[18, 21]提出了“水量脆弱性”和“水质脆弱性”观点和“先分类、后分级”的岩溶含水层保护区划分方法, 并提出了定量评价方法与相应的保护措施。

近年来, 随着气候变化和岩溶水大规模开发、采煤等人类活动的加剧, 改变了山西省太原市晋祠泉域内岩溶水资源现状, 尤其是汾河二库修建后, 泉域

资助项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB21220044); 中国地质调查局地质调查项目(DD20230425, DD20160242, DD20190334)

第一作者简介: 赵春红(1986—), 女, 副研究员, 主要从事岩溶水文地质与水资源调查评价。E-mail: chunhong0504@163.com。

通信作者: 卢海平(1987—), 男, 副研究员, 主要从事岩溶水文地质、环境地质调查研究工作。E-mail: luhaiping@mail.cgs.gov.cn。

收稿日期: 2023-03-31

的水文地质条件等已发生了改变,梁永平等^[22-26]在大量调查、监测和研究的基础上,重新划分了泉域边界,泉域面积由2 030 km²变为2 713 km²。基于原有认识划分的泉域保护区已不能满足水资源管理与保护的需要,急需在现有认识基础上,重新划分泉域保护区并制订相应的保护措施。本文在欧洲方法及“水量脆弱性评价”的基础上,开展山西省晋祠泉域岩溶地下水防污性能评价,划分泉域水质保护区,以期合理保护与科学利用晋祠泉域岩溶水资源提供依据。

1 研究区概况

晋祠泉实际上由难老泉、圣母泉及善利泉三个泉组成,出露于太原西山悬瓮山下,距太原市中心25 km,是晋祠泉域岩溶水的集中排泄点。晋祠泉域地形总体上为北高南低,西高东低;大致以汾河干流古交段为界,汾河北岸为碳酸岩类裸露区,汾河南岸为碎屑岩类山区,东南部为太原断陷盆地,地势平坦,土地肥沃,山区以较大的落差与盆地直接接触,形成泉域地形地貌的基本格局。泉域为典型的温带半干旱大陆性季风气候^[27]。区内河流水系较为发育,汾河是流经本区最大的河流,此外还分布有天河河、屯兰川等多条河流。泉域地层出露比较齐全,基底变质地层有新太古界界河口岩群及五台群;由下到上发育有古生界寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系,中生界三叠系和新生界新近系、第四系地层(图1)。

2 地下水防污性能评价

2.1 评价因子选取

欧洲方法的构建是基于“源—路径—目标”概念模型,主要考虑上覆地层(O)、径流特征(C)、降水条件(P)和岩溶含水层介质结构网络(K)4个因子,被广泛应用于管道型岩溶含水层的防污性能评价。O因子主要考虑表层与岩溶水系统之间覆盖层特性,主要包括表土层、底土层、非岩溶含岩层、碳酸盐岩岩层,是浅覆盖层厚度、孔隙度、渗透性的综合指标;C因子主要考虑降雨通过包气带渗透进入岩溶含水层的水量,指的是包气带的径流能力,主要针对裸露岩溶区考虑,北方岩溶区大都为覆盖型岩溶、埋藏型岩溶,上覆有数百至上千米的第四系黄土或碎屑岩隔水层,包气带、隔水层厚度巨大,下伏岩溶含水层

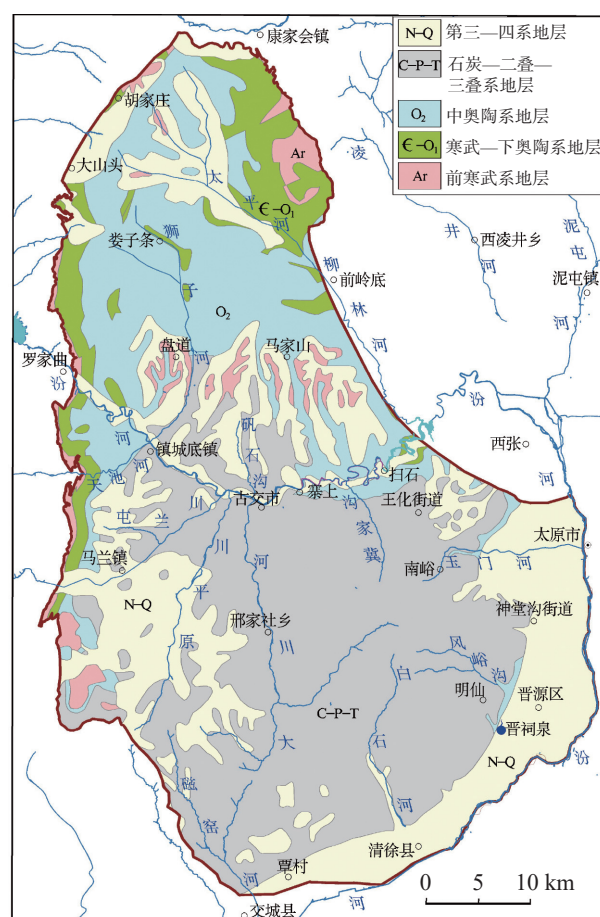


图1 晋祠泉域地质简图

Fig. 1 Geological map of the Jinci spring basin

与地面落水洞之间的水力联系较弱;P因子主要考虑降雨量、雨强、雨频等因素,对裸露岩溶区污染物质进入岩溶含水层有较迅速的响应,北方岩溶区降雨补给径流途径、径流时间长,雨强、雨频等信息经过巨厚包气带的“滤波”作用而削弱,降雨的响应时间通常都大于6个月以上;K因子主要考虑岩溶网络发育程度,在裸露岩溶区可通过地质测绘、洞穴测量、地球物理探测、钻孔岩心观察等获得,北方岩溶区通常难以获得。

北方岩溶泉域系统规模和面积大,各泉域以相对独立、完整的岩溶水系统进行循环^[28];含水层主要为下古生界寒武系—奥陶系碳酸盐岩,含水介质结构以相对较均一的溶蚀裂隙和局部的岩溶管道或集中径流带为主^[9],覆盖型及埋藏型岩溶区上覆有数百米甚至上千米的第四系黄土或碎屑岩隔水层,包气带厚度大,除面状大气降雨入渗补给外,还存在着裸露段河流线状入渗、第四系越流补给以及沿着导水断裂带的入渗补给,补给源与补给方式多样,系统结

构与岩溶发育特征等均与欧洲和中国西南岩溶区有着显著的差异^[28-29]。采用欧洲方法进行评价存在着模型适用性难题,且评价参数获取难度大,甚至无法获得评价参数。

本文在北方岩溶水系统特殊补给、径流、排泄等水文地质条件及岩溶含水层系统防污性能主要影响要素的基础上,根据岩溶水在包气带的入渗时长、河流水库的渗漏和降水分区入渗及相关参数的获取,富水性取代岩溶含水层介质结构网络等,提出包气带厚度、入渗补给强度、上覆地层岩性及岩溶含水层富水性 4 个因子作为北方岩溶含水层防污性能的指标,并应用于中国北方典型的岩溶水系统晋祠泉域开展岩溶水防污性能评价。

表 1 包气带厚度及入渗补给强度分级表

Table 1 Grading of thickness of unsaturated zone and infiltration recharge intensity

级别	5~4	4~3	3~2	2~1	1~0
包气带厚度/m	0~37	37~185	185~370	370~740	740~951.33
入渗补给强度/mm·a ⁻¹	2 378.80~200	200~150	150~100	100~50	50~0

2.1.2 入渗补给强度

晋祠泉域水文地质条件调查表明,泉域岩溶地下水资源的主要补给来源有大气降水入渗补给(包括碳酸盐岩裸露区的直接入渗补给和松散层覆盖区的间接入渗补给)和主要河流在碳酸盐岩裸露区的渗漏补给(包括水库渗漏补给)。

根据水量、氯量等野外均衡试验结果^[32],晋祠泉域岩溶水的大气降水入渗系数分为:(1)中奥陶统碳酸盐岩裸露区,降雨入渗系数为 0.21;(2)下奥陶统、中—上寒武统碳酸盐岩裸露区,为岩溶一般发育区,降雨入渗系数为 0.123。(3)碳酸盐岩覆盖区,降雨入渗系数为 0.043;(4)碳酸盐岩埋藏区及前寒武系火成岩、变质岩区,石炭系或新近系泥岩、页岩构成区内碳酸盐岩埋藏区的隔水顶板,大气降水降落到地表后,很难透过泥页岩相对隔水层补给岩溶地下水;前寒武纪火成岩、变质岩区透水性差,且构成岩溶地下水的隔水边界,故在本次评价中认为碳酸盐岩埋藏区及前寒武系火成岩、变质岩区岩溶水有效降水入渗系数为 0。降水入渗补给强度由降水量和分区入渗系数获得。其中对泉域内多个雨量站多年(1956—2016 年)平均降水量按照泰森多边形进行分区处理。

2.1.1 包气带厚度

包气带厚度越大,污染物在包气带内随运移路径增加、接触反应时间加长,污染物被包气带岩土吸附、深化降解量将越多,包气带的自净能力越强。包气带厚度越厚,表示地下水环境防污性能越高,越不易遭受到污染。

该指标数据由泉域岩溶地下水流场和 DEM 高程数据用 ArcGIS 计算获得。其中泉域内岩溶水最大包气带厚度为 951.33 m,最小为 0 m。

指标分级参照邻区娘子关泉域包气带的垂直渗透系数,渗透系数为 37 m·a⁻¹^[30-31],并以 1 a、5 a、10 a、20 a 的渗流时间进行分级(表 1)。

对于裸露区河流入渗补给量以单位面积上渗漏量表示入渗补给强度。晋祠泉域内河流及水库碳酸盐岩渗漏段主要为汾河罗家曲—镇城底段、汾河寨上一扫石段,汾河二库(晋祠泉域内),天池河、屯兰川和柳林河渗漏段,以及其他支流(如西山山前开化沟、风峪沟)等。各段渗漏长度分别为汾河罗家曲—镇城底段 21.61 km,汾河寨上一扫石段 18.61 km,天池河 6.04 km,屯兰川 3.75 km,柳林河 3.24 km,其他支流 5.21 km。设置汾河河宽等效为 0.2 km,汾河各支流河宽等效为 0.1 km。根据水量均衡原理,各河流多年(1956—2016 年)平均单位面积上的渗漏量见表 2。利用地下水数值模型及均衡分析计算,汾河二库渗漏补给晋祠泉域的量占整个二库渗漏量的 84.93%。2006 年下半年,汾河二库蓄水位超出中奥陶统强岩溶发育层后,开始大量渗漏补给岩溶地下水^[22],2007—2016 年汾河二库(晋祠泉域内)平均渗漏量为 1.4477 m³·s⁻¹,汾河二库蓄水面积(晋祠泉域内)按 1.63 km² 计算,则汾河二库(晋祠泉域内)(2007—2016 年)平均单位面积上的渗漏量为 2 378.80 mm·a⁻¹(表 2)。

根据以上大气降雨入渗补给和河流渗漏补给,计算泉域内单位面积补给量为 0~2 378.80 mm·a⁻¹,按

表 2 各河流多年平均渗漏量
Table 2 Average annual seepage volume of each river

位置	渗漏长度 /km	多年平均渗 漏量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	单位面积上渗 漏量/ $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$
汾河罗家曲—镇城底段	21.61	0.5000	364.83
汾河寨上一扫石段	18.61	0.4700	398.22
汾河二库(晋祠泉域内)	/	1.4477	2 378.80
天池河	6.04	0.0330	172.30
屯兰川	3.75	0.0400	336.38
柳林河	3.24	0.0570	554.80
其他支流	5.21	0.0230	139.22

照表 1 对入渗补给强度进行分级。

2.1.3 上覆地层岩性

上覆地层岩性影响污染物在岩层中的生物降解、化学反应能力和地下水传输速度等。按照碳酸盐岩分布埋藏类型划分晋祠泉域岩溶地下水的上覆地层岩性。主要分为：(1)碳酸盐岩裸露区：指碳酸盐岩出露地表的分布区。按照地层及岩溶发育特征，分为中奥陶统碳酸盐岩裸露区和中、上寒武统及下奥陶统碳酸盐岩裸露区。(2)碳酸盐岩覆盖区：指碳酸

盐岩地层之上直接覆盖未固结成岩的松散层分布区，区内松散层主要为新近系和第四系。(3)碳酸盐岩埋藏区及非碳酸盐岩区，碳酸盐岩埋藏区上覆地层岩性主要为石炭系或新近系泥岩、页岩，非碳酸盐岩主要为前寒武系变质岩和中生代火成岩；(4)河床砂砾石区，入渗最快，吸附能力较弱。该评价因子为定性指标，具体评价指标和因子分级如表 3。

2.1.4 岩溶含水层的富水性

综合考虑含水层岩性、地质构造、水动力条件、岩溶地下水流场、钻孔单位涌水量等进行富水性划分。岩溶含水层的富水性按统一换算为抽水水位降深 10 m，口径 8 吋(203 mm)时的钻孔单位涌水量进行分级划分，单井涌水量大于等于 $5\,000\text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的井区为极强富水区；单井涌水量 $3\,000 \sim 5\,000\text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的井区为强富水区，单井涌水量大于等于 $1\,000 \sim 3\,000\text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的井区为中等富水区；单井涌水量 $100 \sim 1\,000\text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 为弱富水区；单井涌水量小于 $100\text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 为贫水区。该因子为定性指标(表 3)。级别越大，代表岩溶发育程度和含水层导水性能越强、污染质扩散迁移速度越快，其对地下水的影响越大。

表 3 上覆地层岩性及富水性分级表
Table 3 Grading of lithology of overlying strata and water abundance

级别	4.5	3.5	2.5	1.5	0.5
上覆地层岩性	河床砂砾石区	中奥陶统碳酸盐岩裸露区	中、上寒武及下奥陶统碳酸盐岩裸露区	碳酸盐岩覆盖区	碳酸盐岩埋藏区及非碳酸盐岩区
单位涌水量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ (富水性)	$\geq 5\,000$ (极强富水性)	$3\,000 \sim 5\,000$ (强富水性)	$1\,000 \sim 3\,000$ (中等富水性)	$100 \sim 1\,000$ (弱富水性)	<100 (贫水性)

晋祠泉域内极强富水区主要分布在：(1)太原盆地西边山断裂带石庄头村到晋祠段和晋源区南峪到清徐西梁泉段，为泉域岩溶地下水排泄区；(2)从南峪到晋祠泉口的岩溶地下水强径流带内；(3)在径流、汇流区的汾河沿岸的周家山南侧、汉道岩西侧和天池河与汾河交汇的镇城底到炉峪口段；(4)盘道—马家山转换带南侧咀底坡一带。岩溶地下水强富水区基本围绕极强富水区分布。岩溶地下水中等富水区除围绕强富水区分布外，还包括汾河二库向南到岩溶地下水强径流带起始点的尖草坪区南峪一带。岩溶地下水弱富水区主要分布于除了极强、强、中等富水区外的泉域岩溶地下水补给区、补给径流区的岩溶含水层裸露区及浅埋藏区和太原盆地岩溶地下水深埋滞流区。岩溶地下水贫水区主要分布在西山马兰—石千峰复向斜核部碳酸盐岩深埋的岩溶地下

水滞流区。此外，泉域内无碳酸盐岩含水层分布的地区也归到岩溶地下水贫水区这一级别^[25]。

2.2 计算方法

2.2.1 隶属级别

根据评价指标的分级标准特征，采用线性内插法确定各因素隶属级别函数。定量因素直接采用线性内插法来确定评价因子对应的级别，定性因子按照对地下水影响的程度确定取各级别的中值，作为隶属级别。

上覆地层岩性及富水性所隶属的级别划分按照表 3 所示。包气带岩性及入渗补给量 2 个指标所隶属的级别按照线性内插法来确定；确定级别特征值 x_j (表 4)，线性型隶属级别函数的图形及所对应的函

表 4 其余 2 个指标的级别特征值
Table 4 Level eigenvalues of the other two indicators

指标	级别特征值 x_j					
	1	2	3	4	5	6
包气带厚度/m	951.33	740	370	185	37	0
入渗补给强度/mm·a ⁻¹	0	50	100	150	200	525.6

数公式见图 2、式 1。

$$Y = i + \frac{X - X_j}{X_{j+1} - X_j} \tag{1}$$

式中： Y 为隶属级别； X_j 为分区标准； X 为实测值； $i=0, 1, 2, 3, 4; j=1, 2, 3, 4, 5$ ；由实测值 X 代入上述公式即可确定出隶属级别。

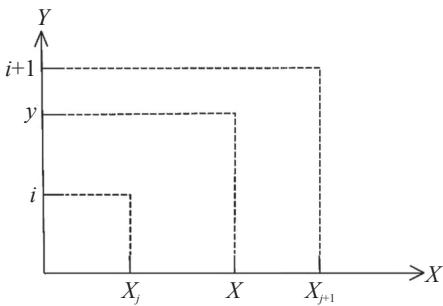


图 2 隶属级别函数分布图
Fig. 2 Distribution of membership level function

2.2.2 确定权重

把 4 项地下水防污性能评价指标组成指标集：

$D=(d1,d2\cdots d4)=($ 富水性，入渗补给强度，上覆地层岩性，包气带厚度)

d_j 为指标集中的指标， $j = 1,2,\cdots,4$

利用专家打分法、二元比较法确定 4 个因子的权重^[25]。结合研究区的水文地质条件等，确定 4 个因子的相对重要性为：入渗补给强度>富水性>包气带厚度>上覆地层岩性。

归一化得出指标权向量为 $\vec{w} = (0.25,0.6,0.03,0.12)$

2.3 评价结果

采用 ArcGIS 地理信息系统软件栅格分析工具，按防污性能评价分值=0.25×级别(富水性)+0.6×级别(入渗补给强度)+0.03×级别(上覆地层岩性)+0.12×级别(包气带厚度)，计算防污性能评价分值，根据表 5 地下水防污性能评价的污染难易程度与级别的对应关系，判断各单元格所属污染程度，划分地下水防污性能级别。对每一栅格中各评价因子隶属级别特征值加权平均，获得最终防污性能分级评价结果如表 5、图 3、图 4。

3 保护区划分

基于以上防污性能评价结果，结合泉域地质、水文地质、环境水文地质问题、水资源保护目标等，泉域岩溶水保护区划分为泉源保护区、一级保护区、二级保护区和准保护区(表 5, 图 4)，并依据《中华人民共和国水法》、《中华人民共和国水污染防治法》、《水污染防治行动计划》、《山西省泉域水资源保护条例》、《太原市晋祠泉域水资源保护条例》、《山西省岩溶泉域水资源保护》等，对照对应的保护区级别，进行泉域水资源保护。

(1)泉源保护区：晋祠泉源区(主要指晋祠公园及附近范围)定为泉源保护区，面积 2.06 km²，占泉域总面积的 0.08%。保护内容除了水量、水质外，景观及古建筑保护也是主要保护内容。

(2)水质一级保护区：主要分布在汾河主干流、

表 5 评价结果
Table 5 Evaluation results

级别	污染程度	保护区级别	保护区面积/km ²	面积占比/%
4~5	极易污染区	泉源保护区	2.06	0.08
3~4	较易污染区	水质一级保护区	89.55	3.30
2~3	稍难污染区	水质二级保护区	975.59	35.96
1~2	较难污染区			
0~1	极难污染区	水质准保护区	1 645.38	60.66

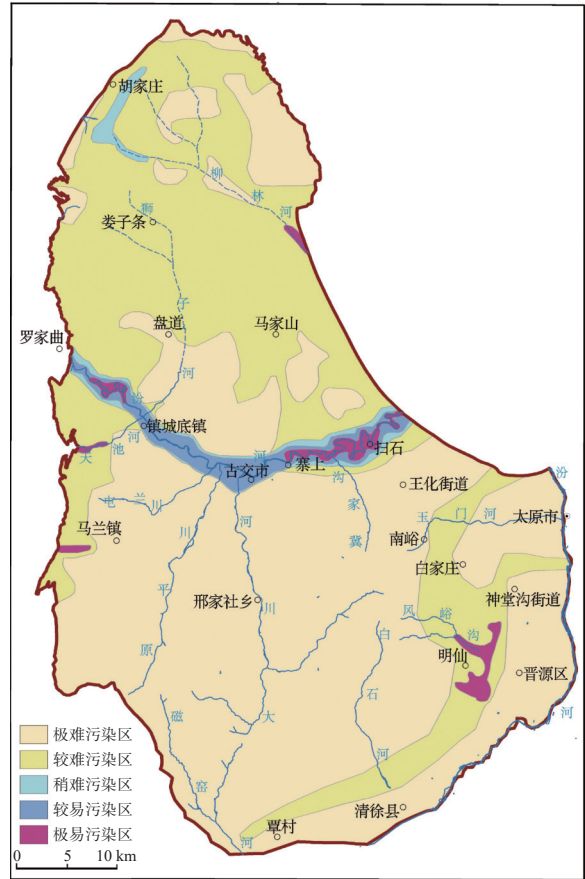


图 3 晋祠泉域岩溶含水层防污性能分级
Fig. 3 Grading of karst aquifer vulnerability in the Jinci spring area

西山山前碳酸盐岩裸露区, 屯兰川、天池河及柳林河碳酸盐岩渗漏段, 面积为 89.55 km², 占泉域总面积的 3.30%。

① 汾河主流保护区, 主要是污染防护带, 严格执行《山西省汾河流域水污染防治条例》, 禁止排污, 特别是古交市污水排放的管制, 以防止污染地下水。古交市区段是目前晋祠泉域岩溶地下水主要污染源区之一。为保障晋祠泉水质, 建议结合新建的古交市第二污水处理厂, 对污水实现全部处理, 现有污水处理厂要严格执行达标排放。

② 西山山前碳酸盐岩渗漏段保护区: 该沟在店头以下为裸露灰岩区, 透水性强。店头以上, 有多处小煤矿及炼焦厂分布, 排放的矿井水及污水水质极差, 入渗地下进入岩溶含水层可直接污染晋祠泉。该区目前主要污染源为矿坑排水以及关闭煤矿形成的“老窑水”。煤污染防治矿排水按相关法规进行管理, 针对晋祠泉域煤矿老窑水的处理, 可采取老矿井物理封闭、坑下水处理工程、坑道外集中处理等。



图 4 晋祠泉域岩溶水系统水质保护区分布图
Fig. 4 Distribution of the protected areas for water quality of karst water system in the Jinci spring area

(3) 水质二级保护区: 主要分布在泉域北部、汾河北岸, 以及太原盆地西边山断裂带晋祠—平泉排泄区, 及南峪—神堂沟一带, 面积 975.59 km², 占泉域总面积的 35.96%。

(4) 水质准保护区: 准保护区主要分布在泉域汾河南岸、东南部的太原盆地区以及南部边缘地带, 面积 1 645.38 km², 占泉域总面积的 60.66%。

4 结论与建议

(1) 针对晋祠泉域岩溶水的特点和存在的问题, 建议采用“先分类、后分级”的方法开展晋祠泉域岩溶水保护区划分。需要进一步研究如何有机结合水量保护区与水质保护区划分, 从而更好地开展泉域岩溶水保护。

(2) 在欧洲方法及“水量脆弱性评价”的基础上, 结合泉域水文地质条件及保护目标等, 依据晋祠泉

域岩溶水防污性能评价结果,划分出晋祠泉域水质保护区,其中泉源保护区面积 2.06 km²,泉域面积占比 0.08%;水质一级保护区面积 89.55 km²,泉域面积占比 3.30%;水质二级保护区面积 975.59 km²,泉域面积占比 35.96%;水质准保护区面积 1 645.38 km²,泉域面积占比 60.66%。

(3)泉源保护区及水质一级保护区是晋祠泉域岩溶水防污性能较低的区域,建议对该区域污染源进行严格管控以降低岩溶水的污染风险。

参考文献

- [1] 邹胜章,李录娟,卢海平,刘芹芹,苏春田,朱丹尼.岩溶地下水系统防污性能评价方法[J].*地球学报*,2014,35(2):262-268.
ZOU Shengzhang, LI Lujuan, LU Haiping, LIU Qinqin, SU Chuntian, ZHU Danni. The vulnerability assessment method of karst groundwater[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 35(2): 262-268.
- [2] 崔亚丰,何江涛,王曼丽,赵阅坤,王菲.岩溶地区地下水污染风险评价方法探究:以地苏地下河系流域为例[J].*中国岩溶*,2016,35(4):372-383.
CUI Yafeng, HE Jiangtao, WANG Manli, ZHAO Yuekun, WANG Fei. Exploration of risk assessment method towards groundwater contamination in karst region: A case study in Disu underground river system basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(4): 372-383.
- [3] 彭淑惠,王宇,黄成,李芹,王裕琴.昆明石板桥岩溶地下水系统污染边界及其防污性能研究[J].*中国岩溶*,2015,34(4):362-368.
PENG Shuhui, WANG Yu, HUANG Cheng, LI Qin, WANG Yuqin. A study on the pollution boundary of karst groundwater system and its antifouling performance in Dabanqiao, Kunming[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(4): 362-368.
- [4] Aller L, Bennett T, Lehr J H, Petty R J, Hackett G. Drartic: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 1987, 29(1):23-37.
- [5] 徐发凯,何丽,王一帆,何昌,牛毓,刘文君,宋伟宏.2010-2019年黄河干流兰州和白银段水质时空变化特征[J].*水资源保护*,2021,37(4):44-50.
XU Fakai, HE Li, WANG Yifan, HE Chang, NIU Yu, LIU Wenjun, SONG Weihong. Temporal and spatial variation characteristics of water quality in Lanzhou and Baiyin section of the Yellow River mainstream from 2010 to 2019[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(4): 44-50.
- [6] 李泽君,黄本胜,邱静,蔡安朋,杨志峰,陈思淳.变化环境下韩江生态流量演变特征分析[J].*水资源保护*,2021,37(5):22-29.
LI Zejun, HUANG Bensheng, QIU Jing, CAI Yanpeng, YANG Zhifeng, CHEN Sichun. Analysis on evolution characteristics of ecological flow of Hanjiang river under changing environment[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(5): 22-29.
- [7] 钟佐桑.地下水防污性能评价方法探讨[J].*地学前缘*,2005,12(Suppl.1):3-11.
ZHONG Zuoshen. A discussion of groundwater vulnerability assessment methods[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(Suppl.1): 3-11.
- [8] 严明疆,张光辉,王金哲,聂振龙,申建梅,郝明亮.漳滏平原地下水系统脆弱性最佳地下水水位埋深探讨[J].*地球学报*,2009,30(2):243-248.
YAN Mingjiang, ZHANG Guanghui, WANG Jinzhe, NIE Zhenlong, SHEN Jianmei, HAO Mingliang. Discussion on the groundwater depth of the optimal groundwater system vulnerability in Hufu Plain[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 30(2): 243-248.
- [9] Francois Z. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers final report[R]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003.
- [10] Vias J M, Andreo B, Perles M J, Carrasco F, Vadillo I, Jimenez P. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate(karstic) aquifers: the COP method[J]. *Hydrogeology Journal*, 2006,14(6):912-925.
- [11] 汪莹,罗朝晖,吴亚,李洁,顾栩.岩溶地下水脆弱性评价的城镇化因子:以水城盆地为例[J].*地球科学*,2019,44(9):2909-2919.
WANG Ying, LUO Zhaozhui, WU Ya, LI Jie, GU Xu. Urbanization factors of groundwater vulnerability assessment in karst area: A case study of Shuicheng basin[J]. *Earth Science*, 2019, 44(9): 2909-2919.
- [12] 晋华,郝晓燕,杨瑞芳,刘虎.基于COP法的神头泉域岩溶含水层脆弱性评价[J].*太原理工大学学报*,2014,45(5):669-673.
JIN Hua, HAO Xiaoyan, YANG Ruifang, LIU Hu. Groundwater vulnerability evaluation in karst aquifer of Shentou spring region based on COP method[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2014, 45(5): 669-673.
- [13] 王振兴,李向全,侯新伟,张春潮,桂春雷,左雪峰.煤炭开采条件下三姑泉域岩溶含水层保护评价[J].*中国岩溶*,2019,38(1):28-39.
WANG Zhenxing, LI Xiangquan, HOU Xinwei, ZHANG Chunhao, GUI Chunlei, ZUO Xuefeng. Karst aquifer protection evaluation to the Sangu spring basin under the condition of coal mining[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(1): 28-39.
- [14] Goldscheider N. Karst groundwater vulnerability mapping: Application of a new method in the Swabian Alb, Germany[J]. *Hydrogeology Journal*, 2005, 13(4): 555-564.
- [15] 徐慧珍,高赞东.岩溶地区地下水防污性能评价:PI方法[J].*新疆地质*,2006,24(3):318-321.
XU Huizhen, GAO Zandong. Assessment of groundwater vulnerability in karst areas using PI method[J]. *Xinjiang Geology*, 2006, 24(3): 318-321.
- [16] Doerfliger N, Jeannin P Y, Zwahlen F. Water vulnerability assessment in karst environments: A new method of defining

- protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method)[J]. *Environmental Geology*, 1999, 39(2): 165-176.
- [17] 邹胜章, 张文慧, 梁彬, 陈宏峰, 梁小平. 西南岩溶区表层岩溶带水脆弱性评价指标体系的探讨[J]. *地学前缘*, 2005, 12(Suppl.1): 152-158.
- ZOU Shengzhang, ZHANG Wenhui, LIANG Bin, CHEN Hongfeng, LIANG Xiaoping. A discussion of the assessment of ground water vulnerability in epikarst zone of the karst area, Southwest China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(Suppl.1): 152-158.
- [18] 梁永平, 韩行瑞, 王维泰, 赵春红, 贺可强, 潘国营, 全长水, 石东海, 李家田, 贾玉跃, 赵有美, 沈健, 刘喜坤, 唐春雷. 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, ZHAO Chunhong, HE Keqiang, PAN Guoying, TONG Changshui, SHI Donghai, LI Jiatian, JIA Yuyue, ZHAO Youmei, SHEN Jian, LIU Xikun, TANG Chunlei. The karst groundwater environmental problems and protection of Northern China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.
- [19] 梁永平, 申豪勇, 高旭波. 中国北方岩溶地下水的研究进展[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(5): 199-219.
- LIANG Yongping, SHEN Haoyong, GAO Xubo. Review of research progress of karst groundwater in Northern China[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(5): 199-219.
- [20] 梁永平, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 唐春雷, 赵一, 谢浩, 石维芝. 对中国北方岩溶水研究方向的思考与实践[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(3): 363-380.
- LIANG Yongping, SHEN Haoyong, ZHAO Chunhong, WANG Zhiheng, TANG Chunlei, ZHAO Yi, XIE Hao, SHI Weizhi. Thinking and practice on the research direction of karst water in Northern China[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(3): 363-380.
- [21] 梁永平, 韩行瑞, 李录秀, 薛凤海, 张文忠. 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.
- LIANG Yongping, HAN Xingrui, LI Luxiu, XUE Fenghai, ZHANG Wenzhong. Water resources protection in karst springs in Shanxi Province[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2008.
- [22] 王志恒, 梁永平, 申豪勇, 赵春红, 唐春雷, 谢浩, 赵一. 自然与人类活动叠加影响下晋祠泉域岩溶地下水动态特征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(6): 1823-1837.
- WANG Zhiheng, LIANG Yongping, SHEN Haoyong, ZHAO Chunhong, TANG Chunlei, XIE Hao, ZHAO Yi. Dynamic characteristics of karst groundwater in Jinci spring under superimposed influence of natural and human activities[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(6): 1823-1837.
- [23] 郭芳芳, 梁永平, 王志恒, 申豪勇, 赵春红. 山西太原西山汾河二库的泉域归属及其渗漏量计算[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(4): 493-500.
- GUO Fangfang, LIANG Yongping, WANG Zhiheng, SHEN Haoyong, ZHAO Chunhong. Attribution of spring fields and seepage calculation of Fenhe second reservoir in Xishan, Taiyuan, Shanxi Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(4): 493-500.
- [24] 陆帅帅, 郑秀清, 李旭强, 陈军锋, 张永波, 臧红飞. 晋祠泉域岩溶水生态系统健康评价[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(1): 34-41.
- LU Shuaishuai, ZHENG Xiuqing, LI Xuqiang, CHEN Junfeng, ZHANG Yongbo, ZANG Hongfei. Health assessment of karst groundwater ecosystem of Jinci spring area[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(1): 34-41.
- [25] 梁永平, 张发旺, 申豪勇, 唐春雷, 赵春红, 王志恒, 侯宏冰, 任建会, 郭芳芳. 山西太原晋祠—兰村泉水复流的岩溶水文地质条件新认识[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(1): 11-18, 34.
- LIANG Yongping, ZHANG Fawang, SHEN Haoyong, TANG Chunlei, ZHAO Chunhong, WANG Zhiheng, HOU Hongbing, REN Jianhui, GUO Fangfang. Recognition of the critical hydrogeological conditions of the Jinci spring and Lancun spring in Shanxi[J]. *Hydrogeology & Engineering*, 2019, 46(1): 11-18, 34.
- [26] 高旭波, 王万洲, 侯保俊, 高列波, 张建友, 张松涛, 李成城, 姜春芳. 中国北方岩溶地下水污染分析[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(3): 287-298.
- GAO Xubo, WANG Wanzhou, HOU Baojun, GAO Liebo, ZHANG Jianyou, ZHANG Songtao, LI Chengcheng, JIANG Chunfang. Analysis of karst groundwater pollution in Northern China[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(3): 287-298.
- [27] 殷丹. 山西省晋祠泉复流条件研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- YIN Dan. Research on reflowing condition of Jinci spring in Shanxi Province[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [28] 梁永平, 王维泰. 中国北方岩溶水系统划分与系统特征[J]. *地球学报*, 2010, 31(6): 860-868.
- LIANG Yongping, WANG Weitai. The division and characteristics of karst water systems in Northern China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2010, 31(6): 860-868.
- [29] 卢海平, 张发旺, 赵春红, 夏日元, 梁永平, 陈宏峰. 我国南北方岩溶差异[J]. *中国矿业*, 2018, 27(Suppl.2): 317-319.
- LU Haiping, ZHANG Fawang, ZHAO Chunhong, XIA Riyuan, LIANG Yongping, CHEN Hongfeng. Differences between southern karst and northern karst besides scientific issues that need attention[J]. *China Mining Magazine*, 2018, 27(Suppl.2): 317-319.
- [30] 赵春红, 梁永平, 卢海平, 王维泰. 娘子关泉域岩溶水脆弱性模糊综合评价[J]. *水文*, 2013, 33(5): 52-57.
- ZHAO Chunhong, LIANG Yongping, LU Haiping, WANG Weitai. Fuzzy evaluation of karst water vulnerability in Niangziguan spring area[J]. *Journal of China Hydrology*, 2013, 33(5): 52-57.
- [31] 山西省娘子关泉域岩溶水研究领导组. 山西省娘子关泉域岩溶水资源评价及其开发利用科研报告[M]. 北京: 地质出版社, 1986.
- Shanxi Province Niangziguan Spring Area Karst Water Research Leading Group. Research report on the evaluation and development of karst water resources in the Niangziguan spring area of Shanxi Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986.
- [32] 申豪勇, 梁永平, 徐永新, 张发旺. 中国北方岩溶地下水补给研究进展[J]. *水文*, 2019, 39(3): 15-21.

SHEN Haoyong, LIANG Yongping, XU Yongxin, ZHANG
Fawang. Research progress of karst groundwater recharge in

Northern China[J]. Journal of China Hydrology, 2019, 39(3):
15-21.

Vulnerability assessment of karst groundwater in the Jinci spring area and the zoning of protected areas for water quality

ZHAO Chunhong^{1,2,3}, SHEN Haoyong^{1,2,3}, LU Haiping^{1,2,3}, WANG Zhiheng^{1,2,3},
LIANG Yongping^{1,2,3}, TANG Chunlei^{1,2,3}

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Guangxi Karst Resources and Environment Research Center of Engineering Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. International Research Centre on Karst under the Auspices of UNESCO, National Center for International Research on Karst Dynamic System and Global Change, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406, China)

Abstract Jinci spring is a famous karst spring in Shanxi Province, and its backflow is an ecological restoration goal of the Shanxi Provincial government. Composed of Nanlao spring, Shengmu spring, and Shanli spring, Jinci spring is exposed at the foot of Xuanweng mountain in the western mountains of Taiyuan, twenty-five kilometers away from the city center, and it is a concentrated discharge point for karst water in the Jinci spring area. Karst water in the spring area is mainly supplied by atmospheric precipitation infiltration and leakage from rivers and reservoirs. Karst water in the Jinci spring area is an important water source for people's life and industrial and agricultural production in Taiyuan City. In recent years, with the intensification of climate change, large-scale development of karst water, coal mining and other human activities, especially after the construction of the second reservoir of the Fenhe river, the karst hydrogeological conditions in the spring area have undergone fundamental changes, with the spring area expanding from 2,030 km² to 2,713 km², which has affected the evaluation, management and protection of karst water resources in the spring area. The original zoning of protected areas can no longer meet the needs of water resource management and protection. Therefore, it is urgent to re-zone the protected areas and formulate corresponding protection measures. In terms of the problems on water quality and quantity, there exist differences in the causes, regions, and protective measures, and thus LIANG Yongping et al. proposed the concepts of "water quantity vulnerability" and "water quality vulnerability", as well as a method of "first classifying, and then grading" for the zoning of karst aquifer protected areas. This study focuses on the hydrogeological conditions of special recharge, runoff, and discharge in the karst water system of North China, as well as the main influencing factors of the antifouling performance of karst aquifer systems. It combines European methods and "water vulnerability assessment" to evaluate the antifouling performance. Based on infiltration duration of karst water in the unsaturated zone, leakage of rivers and reservoirs, precipitation infiltration in different regions, and replacement of karst aquifer media structure with water abundance, this study selects four factors to evaluate the antifouling performance of karst aquifers in North China, including the thickness of unsaturated zone, the amount of infiltration recharge, the lithology of overlying strata, and the water abundance of karst aquifers. Taking the newly divided karst water system in the Jinci spring area as the evaluation object, this study aims to evaluate the vulnerability of karst water system in the spring area and to zone the protected areas. The results show as follows, (1) The protected areas are mainly distributed in Jinci park and its surrounding areas. (2) The first-class protected areas are mainly distributed in the main stream of the Fenhe river, the exposed areas of carbonate rocks in the front of western mountains of Taiyuan, and the leakage sections of carbonate rocks in Tunlanchuan, the Tianchi river and the Liulin river. (3) The second-class protected areas are mainly distributed in the north of the spring area and the north bank of the Fenhe river. (4) The quasi-protected areas are mainly distributed in the south bank of the Fenhe river and the Taiyuan basin in the southeast. The newly zoned protected areas for spring water quality can provide a basis for the rational protection and scientific utilization of karst water resources in the Jinci spring area.

Key words vulnerability assessment, protected areas for water quality, karst groundwater, the Jinci spring area

(编辑 黄晨晖)