

王泱泱, 黄胜东, 潘东, 等. 滇西腾冲火山群典型地下水系统特征及地下水脆弱性评价[J]. 中国岩溶, 2024, 43(6): 1327-1340.

DOI: 10.11932/karst20240610

## 滇西腾冲火山群典型地下水系统特征 及地下水脆弱性评价

王泱泱<sup>1</sup>, 黄胜东<sup>2</sup>, 潘东<sup>2</sup>, 黄贵任<sup>2</sup>, 王宇<sup>3,4,5</sup>, 常河<sup>1</sup>, 蒲悦<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南昆明 650093; 2. 云南地质工程勘察设计院有限公司(一水), 云南昆明 650041; 3. 云南省高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室(筹), 云南昆明 650216; 4. 自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室, 云南昆明 650216; 5. 云南省地质环境监测院, 云南昆明 650216)

**摘要:** 腾冲火山群面积广、喷发类型齐全, 是中国最年轻的火山区之一, 研究其地下水系统特征是进行污染机制分析与评价的基础。文章从地质结构、水文地质特征入手, 归纳总结研究区地下水系统、含水层流动特征, 采用单因子分析法对所采集的39组水样进行分析, 采用DRASTIC模型, 对研究区进行地下水脆弱性评价。结果表明: 研究区为石头山北东侧山间谷地、南底河沟谷、明朗河河谷形成的河间地块, 主要接受花岗岩裂隙水、风化裂隙水以及断裂构造带裂隙水的入渗补给, 最终排泄于坝派大泉; 系统结构为成因及性质差异明显的含、隔水层(带)交互多层结构与断裂、断块和裂隙储水构造叠加形成的空间组合结构, 复杂性突出。研究区内低脆弱性地区、中等脆弱性地区、高脆弱性地区的占比分别为3.6%、42.1%、54.3%, 表明研究区地下水脆弱性整体偏高, 水质相对较差的为Ⅲ、Ⅳ的水样点多分布在脆弱性中等与较高区域, 表明地下水脆弱性评价结果基本可靠。

**关键词:** 腾冲火山群; 地下水系统特征; 单因子分析法; 地下水脆弱性评价

**创新点:** 提出两种主要类型的污染机制, 归纳与解释了地下水系统的脆弱性, 弥补了腾冲火山群在这方面研究的空白, 并为相似环境地下水系统研究提供了新的思路。

中图分类号: P641.8 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)06-1327-14

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### 0 引言

地下水系统是由若干性质和等级不同的地质、水文、环境要素关联和相互作用所形成的统一体, 并在各种自然、人为作用影响下, 地下水系统在时空上具不同形态和周期的易变特性, 故其复杂性非常突出<sup>[1-2]</sup>。随着人们对水资源与环境的重视程度日益增加, 对地下水系统的研究已从主要关注水资源的角度扩展到了水资源与环境并重的综合研究领域, 目

前地下水方面的研究成果主要集中于地下水富集规律、矿坑涌水及突水特征、地下水资源评价及管理、地下水污染及防治、生态地质环境条件等方面<sup>[3-7]</sup>。

自新生代以来, 腾冲火山活动较为强烈, 是我国著名的新生代板块碰撞带火山活动区域, 据《徐霞客游记》记载, 腾冲火山在1609年有过一次小规模喷发, 是该区最近的一次火山活动<sup>[8-10]</sup>。根据前人对腾冲火山岩的研究, 在总体上可以将黑空山、打鹰山、马鞍山划分为腾冲新生代火山群的主体部分<sup>[11-12]</sup>。

基金项目: 国家自然科学基金“磷石膏渣场对单斜构造岩溶—裂隙含水层地下水污染影响机理研究”(42267063)

第一作者简介: 王泱泱(1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 矿山开采技术条件分析。E-mail: 1033941274@qq.com。

通信作者: 黄胜东(1978—), 男, 高级工程师, 主要从事水工环地质勘查研究。E-mail: 470605182@qq.com。

收稿日期: 2024-02-20

马鞍山在腾冲火山群中成因形态特征典型,火山锥和火山口保存较为完整,熔岩流无风化层,保持了最新喷发火山的地貌特征,时代上为晚更新世或全新世<sup>[13]</sup>,地下水系统边界较为清晰,故选择马鞍山地区开展腾冲火山岩群地下水系统特征研究。目前腾冲火山群的研究主要集中在岩浆演化及成因<sup>[14-16]</sup>、火山通道及火山口的新发现<sup>[17-18]</sup>、火山喷发序列<sup>[19]</sup>、应力场分析<sup>[20]</sup>、地热流体<sup>[21-22]</sup>等方面。从已发表的文献分析,前人对于腾冲火山群地下水系统特征及地下水脆弱性的研究较为薄弱,本文以水文地质勘察为基础,以地球系统科学理论为指导,应用水文地质及环境地质学的原理及方法,从研究区地下水系统特征分析入手,对地下水污染过程及机制进行探究,开展地下水脆弱性评价,为区域地下水污染研究与防治提供科学依据。

## 1 研究区概况

### 1.1 自然地理

马鞍山地区位于云南省西部边陲腾冲市的西南部约 8 km 处,面积约为 96 km<sup>2</sup>。

研究区地势总体上北东高、西南低,最高点为马鞍山山峰,海拔 1 796.51 m,最低点位于荷花镇坝派大泉下游西侧的南底河河床处,海拔 1 147.64 m,相对高差 648.87 m。东部为石头山火山堆积台地、西部为宽缓河谷、南东侧为花岗岩山体隆起、北东侧为马鞍山火山群堆积物形成的山间谷地。此外,研究区的火山形态类型主要为具有火山口的截顶圆锥状火山,火山锥体底部直径一般为几百米,相对高度由十几米至几百米;锥体坡度较陡,火山口的深度一般几十米至百余米;喷发形式为中心式喷发,喷发性质为半剧烈—宁静式<sup>[23]</sup>。

该区气候属低纬度高原山地季风气候。由南而北,随海拔高度的增加,气温逐渐降低,降水逐渐增加,湿度逐渐增大,年平均气温 17.1 °C,年平均降雨量为 1 463.9 mm。地表水系较为发育,区内河流均属伊洛瓦底江水系大盈江流域,境内河段长 42 km,河床平均坡降 0.97%,径流面积 1 042.8 km<sup>2</sup>,年均径流量为 14.683 1 亿 m<sup>3</sup>,主要支流有明朗河、南底河、热海大沟等。

### 1.2 地质背景

研究区位于腾冲地块南部,为 SN 向转 SW 向断裂束的内弧转折端。区内地质构造主要为断裂,尤

以 SN 向断裂为主,次为 NWW 和 NE 向的断裂。研究区内与火山活动作用关联最为密切的断裂为瑞滇—腾冲县城—小陇川弧形断裂带,该断裂又被称为火山断裂,腾冲火山群大部沿此断裂的东西侧分布,其中马鞍山、老龟坡等全新世火山沿该断裂西侧的 SN 向次生断裂(F<sub>1,2</sub>)分布。

研究区主要出露的火山岩地层有第四系全新统火山堆积(Q<sub>4b</sub>)、第四系上更新统火山堆积(Q<sub>3b</sub>)、第四系下更新统火山堆积(Q<sub>1b</sub>),各地层岩性从新到老简述如下:

第四系全新统火山堆积(Q<sub>4b</sub>)主要沿马鞍山、打鹰山、老龟坡主火山口附近分布,范围约 1.5 km<sup>2</sup>、厚度 85~500 m,由浮石集块、角砾、火山弹碎块及火山灰组成,为爆发相;溢出口分布橄榄石安山岩、粗安岩及安山玄武岩,部分熔岩表面风化强烈,形成近圆形盾状火山,为溢出相。

第四系上更新统火山堆积(Q<sub>3b</sub>)的溢出相熔岩分布于中和、邦老、三宜等地,岩性主要为气孔状、致密状橄榄安山玄武岩,气孔状橄榄玄武岩、安山玄武岩;爆发相熔岩分布于小马鞍山、交椅凹处,分布面积较小,表层多风化呈土状。

第四系下更新统火山堆积(Q<sub>1b</sub>)的溢出相熔岩分布于大坪山、坝派、和顺等地,呈半环状分布,多形成尖锥状火山熔岩丘,岩性以块状英安岩为主,局部见辉石安山岩,流纹、流面较发育,水系以溢出口为中心向四周呈放射状分布。爆发相熔岩分布于左所营、来凤山等地,火山碎屑锥剥蚀形成环状分布山包,岩性为角闪安山岩。

此外, Q<sub>4b</sub> 与 Q<sub>3b</sub> 地层之间夹有第四系全新统洪积堆积层(Q<sub>4<sup>pl</sup></sub>)和冲积堆积层(Q<sub>4<sup>al</sup></sub>),于明朗河、南底河、热海河等山间沟谷零星分布,堆积杂乱,砾石分选、磨圆一般,厚度小、一般 2~5 m。Q<sub>1b</sub> 下覆新近系、石炭系地层,岩性多为砂砾岩、粉砂岩、黏土岩。基底为元古界的高黎贡山群及燕山晚期的花岗岩,岩性为灰、黄褐色黑云石英片岩、石英黑云片岩。

## 2 地下水系统特征

### 2.1 系统边界

#### 2.1.1 边界划分

根据含水系统的定义,含水系统的边界是由隔水的或相对隔水的岩层所组成的,含水系统边界类



沿山间谷地的北东侧浅埋起伏,此处地层为全新统火山堆积,赋存熔岩孔洞裂隙水、花岗岩裂隙水,对石头山北部覆盖的古冲沟地下水富集径流带形成补给,为透水边界。

南东部边界地貌类型为沟谷,所处地层为下更新统火山堆积,南底河右岸花岗岩基底起伏浅埋,形成局部隔水边界,浅埋基底两侧形成相对独立的地下水径流带,与右岸堆积的安山岩含水岩组形成了坝派大泉系统内局部地下水径流系统。

西部边界地貌为明朗河山间谷地,出露地层主要为第四系全新统冲积堆积与上更新统早期火山堆积,含水类型主要为安山岩类孔洞裂隙水,此处汇集了北部、西侧山区地表径流,汇水面积大,对谷地内熔岩孔洞裂隙水及松散层孔隙水形成补给,为补水边界。

## 2.2 含水系统

### 2.2.1 含水层组类型

研究区所在的地下水系统,根据地下水赋水空隙类型可将其划分为:松散岩类孔隙水、火山岩类孔洞裂隙水、基岩裂隙水。

松散岩类孔隙水主要分布于明朗河河谷、和顺盆地以及打鹰山附近的冲洪积台地,受古地貌沟谷的控制,以花岗岩体、早期熔岩堆积、古生界沉积岩层为基底,总体由北向南径流。松散岩类孔隙水与上覆的火山岩类孔洞裂隙水水力联系作用密切,更新统冲洪积含水层多具承压性。全新统冲积堆积层( $Q_4^{al}$ )与上更新统阶地堆积层( $Q_3^{al}$ )主要赋存孔隙潜水,勘察钻孔揭示富水性为中等~丰富,涌水量为 $220\sim 708\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。

火山岩类孔洞裂隙水广泛分布于研究区内始新世以来的火山堆积层,主要为安山岩类孔洞裂隙水,富水性为中等~丰富。由于其堆积的时期不同,含水岩体的矿物成分、孔隙结构、风化与固结程度存在差异,大尺度上各期熔岩含水层赋水性、透水性相似,晚更新世和全新世以来的熔岩孔洞充填程度低、发育密度大,透水性强;小尺度上由于其岩体结构和规模的差异,地下水赋存不均匀,熔岩孔洞裂隙水不具规律的连通、垂向渗透能力强,使得火山岩孔洞裂隙水多具承压性。此外,钻孔揭露石头山山体火山堆积层部位地下水位高程为 $1\ 397\sim 1\ 442\text{ m}$ ,根据区域已有资料<sup>[26]</sup>,此类型裂隙水的径流通道为熔岩冷凝洞管,层间的集水腔室汇集熔岩台地的补给并通过此

通道或裂隙沟通,集中形成管道径流,出口部位为下游河谷边缘熔岩覆盖的古河道。

基岩裂隙水按含水介质不同可划分为碎屑岩裂隙水、变质岩裂隙水、花岗岩裂隙水,富水性为贫乏~中等。碎屑岩裂隙水主要分布于地下水系统内北部及西部古生界地层的连绵山体部位,以及南东部山体的第三系碎屑岩沉积层中;变质岩裂隙水分布于元古界高黎贡山群变质岩山体中;花岗岩裂隙水分布于系统内西部、北东部的山体中。沿断裂带部位花岗岩裂隙水富集,泉流较大,循环深度大,有热泉出露。

### 2.2.2 储水构造形态

区内第四系更新统、全新统火山岩类孔洞裂隙水,与冲洪积层孔隙水的水力联系作用密切,含水层以燕山晚期花岗岩和早期火山堆积固结、充填岩体为基底,赋存并径流于古地貌中山间冲沟、河道部位。

火山熔岩堆积中浮石集块、角砾、火山弹碎块形成的集水腔室,和其间连通的熔岩裂隙,在空间上分布较为均匀,各个集水腔室在裂隙或孔隙的沟通下也存在着水力联系(图2,图3),含水层表现出明显的层状结构特征,研究区内山体部位均在火山堆积下伏的冲洪积层中揭露含水层,佐证了山体部位熔岩孔洞裂隙水、冲洪积层孔隙水的多层交互组合结构特征。

明朗河断陷谷地部位,自早更新世以来的多个熔岩堆积间歇期,冲洪积层厚度较大且较连续,可于局部河谷带形成连续的弱透水黏土层,构成系统内局部径流带具多层状结构特征,上、下含水层的补给径流有一定的差异,上层较多地接受两侧山体地表、地下水径流带的补给,下层主要由河谷上游古河道补给。河谷地带地下水的多层结构于径流系统内不连续存在,往往通过谷地边缘带、洼地发育带消水或跌水,如石头山北西侧下村内涝消水、雨伞大海子洼地消水(图4)。

## 2.3 地下水补径排条件

### 2.3.1 径流过程

#### 2.3.1.1 地下水的补给条件

工作区内地下水的补给以降水为主,熔岩孔洞裂隙的强烈发育使得入渗补给条件极为有利,除效果最为显著的降水直接入渗外,存在花岗岩裂隙水、

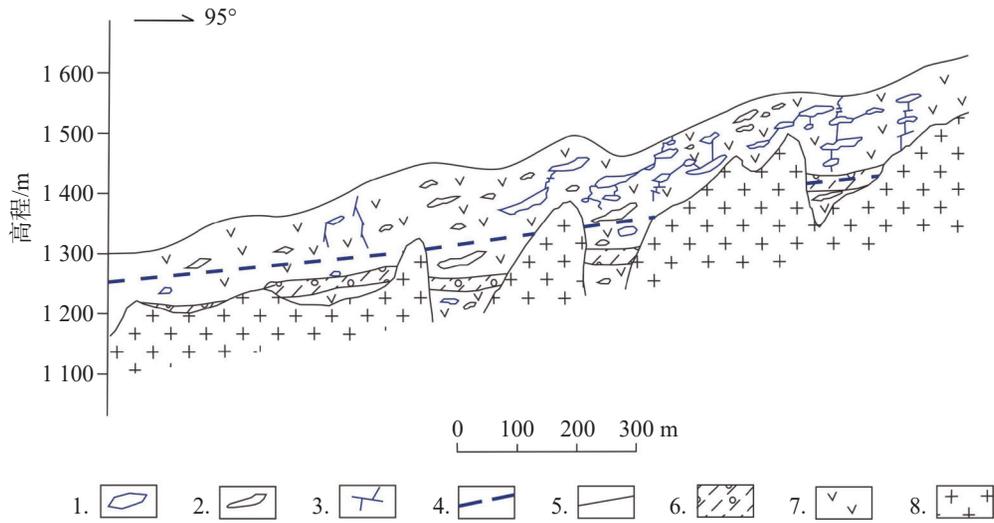


图 2 研究区地下水系统含水介质结构示意图

1.火山角砾集水腔室 2.不充水火山角砾 3.充水熔岩裂隙 4.地下水水位 5.推测岩性分界线 6.安山岩、安山玄武岩 7.冲洪积层砂、砾石夹亚黏土 8.花岗岩

Fig. 2 Schematic diagram of aquifer medium structures of the groundwater system in the study area

1. water-collecting chamber of volcanic breccia 2. volcanic breccia not filled with water 3. water-filled lava fissure 4. groundwater level 5. estimated lithological boundary line 6. andesite and andesite basalt 7. alluvial and pluvial gravel 8. granite



图 3 研究区北侧火山角砾与安山岩调查基本现状

Fig. 3 Basic status of investigation of volcanic breccia and andesite in the north of the study area

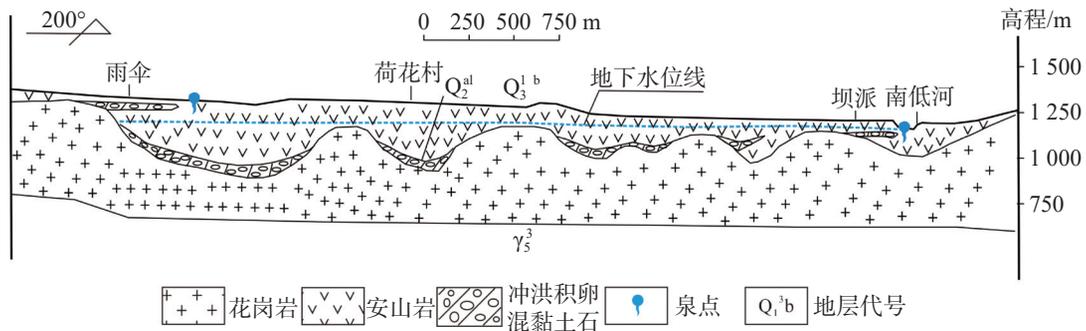


图 4 研究区地下水系统结构剖面图

Fig. 4 Profile of groundwater system structure in the study area

风化裂隙水以及断裂构造带裂隙水的入渗补给。

2.3.1.2 地下水的径流条件

地下水主要分布在明朗河、南底河盆谷地带及

下游谷地中。由于裂隙的发育为地下水的垂向入渗提供了良好的通道,受东西两侧山体、下伏弱透水岩组控制,不同类型裂隙水径流特征见表 1。

表 1 研究区不同类型裂隙水径流特征

Table 1 Runoff characteristics of different types of fissure water in the study area

序号	裂隙水类型	径流特征
1	基岩裂隙水	分布于明朗河谷地西侧、石头山东侧的带状花岗岩山体内,分别以网状风化裂隙和带状构造裂隙形式富集地下水、沿坡脚或河流切割部位呈散流状或带状出露
2	松散岩类孔隙水	以潜水形式向山体四周径流,进入熔岩堆积层转换为熔岩孔隙裂隙水,或短径流排入山谷
3	火山岩类孔隙裂隙水	多在河流切穿含水层部位集中溢出形成下降泉,或深循环的地下水沿断裂带露头、上覆盖层薄弱部位上升溢出,形成温泉及热泉

### 2.3.1.3 地下水的排泄条件

系统内元古界变质岩、中生界碎屑岩含水岩组均未形成集中排泄。地下水在明朗河谷地及东侧山体多期火山堆积体和古河道中大量富集,沿古河道径流,于谷地下游的下更新统火山堆积含水层中、在南底河右岸坝派处形成集中排泄(图 5)。



图 5 坝派大泉泉口

Fig. 5 Mouth of the Bapai spring

### 2.3.2 流场特征

研究区为明朗河、南底河盆谷地带与汇水山间槽谷之间的熔岩山体及下游谷地地下水富集区,石头山部位古地貌中的多处沟谷形成地下水的富集、径流带,于石头山山体的北部、西部发育古河道,沿山体由东向西再转为南西汇入明朗河下游谷地,于南底河右岸坝派处古河道切割形成区域的大泉排泄。研究区地下水系统在表层径流带底界至饱水带潜水含水层之间垂向径流分带发育<sup>[26]</sup>,分析认为地下水在垂向上沿断裂及连续的熔岩通道形成管道型径流,在排泄区于松散堆积体中沿规模大小不一的熔岩裂隙、火山弹和火山角砾、冲洪积砂砾石层的大孔隙内呈股状径流,于明朗河谷地东侧山体缓坡部位熔岩裂隙破碎带、谷地边缘带古河道形成富集并向南西径流(图 6)。研究区地下水流场见图 7 所示。总

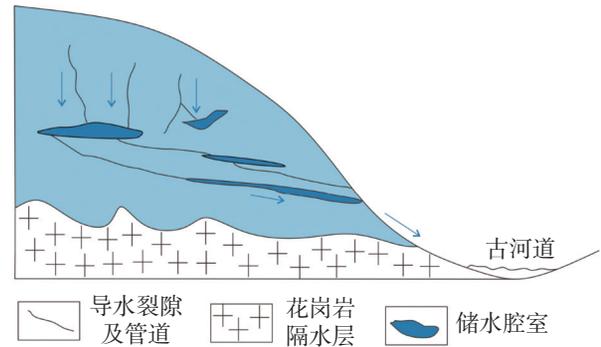


图 6 马鞍山地下水径流系统垂向分带图

Fig. 6 Vertical zoning map of groundwater runoff system in Ma'anshan

体上,研究区地下水径流方向在荷花镇以南由西北流向东南,在荷花镇以北方向由东北流向西南。

## 2.4 地下水系统水化学特征

研究区内地下水径流循环周期较长,溶滤作用和离子吸附交换较充分。区内河谷地区径流带中的安山岩岩体见钙华,下降泉矿化度一般。火山堆积熔岩孔隙裂隙水、冲洪积松散层孔隙水的舒卡列夫分类以  $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$  型为主,与花岗岩接触带及花岗岩裂隙水的水化学类型为  $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$  或  $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}\cdot\text{Mg}$  型,受地下水径流围岩、循环深度、花岗岩裂隙水补给的影响。

## 3 地下水环境现状

### 3.1 地下水质量

本次工作主要在研究区内地下水、地表水体采集水样,设置地表水采样点 9 个、地下水采样点 13 个,共采集 39 组水样。采用单因子评价法,在水样分析结果中选取有分类标准的指标并让其参与地下水质量评价,这些指标包括: pH、六价铬 ( $\text{Cr}^{6+}$ )、砷 (As)、汞 (Hg)、铜 (Cu)、锌 (Zn)、镉 (Cd)、铅 (Pb)、镍 (Ni)。其中地下水评价标准值取自《地下水质量

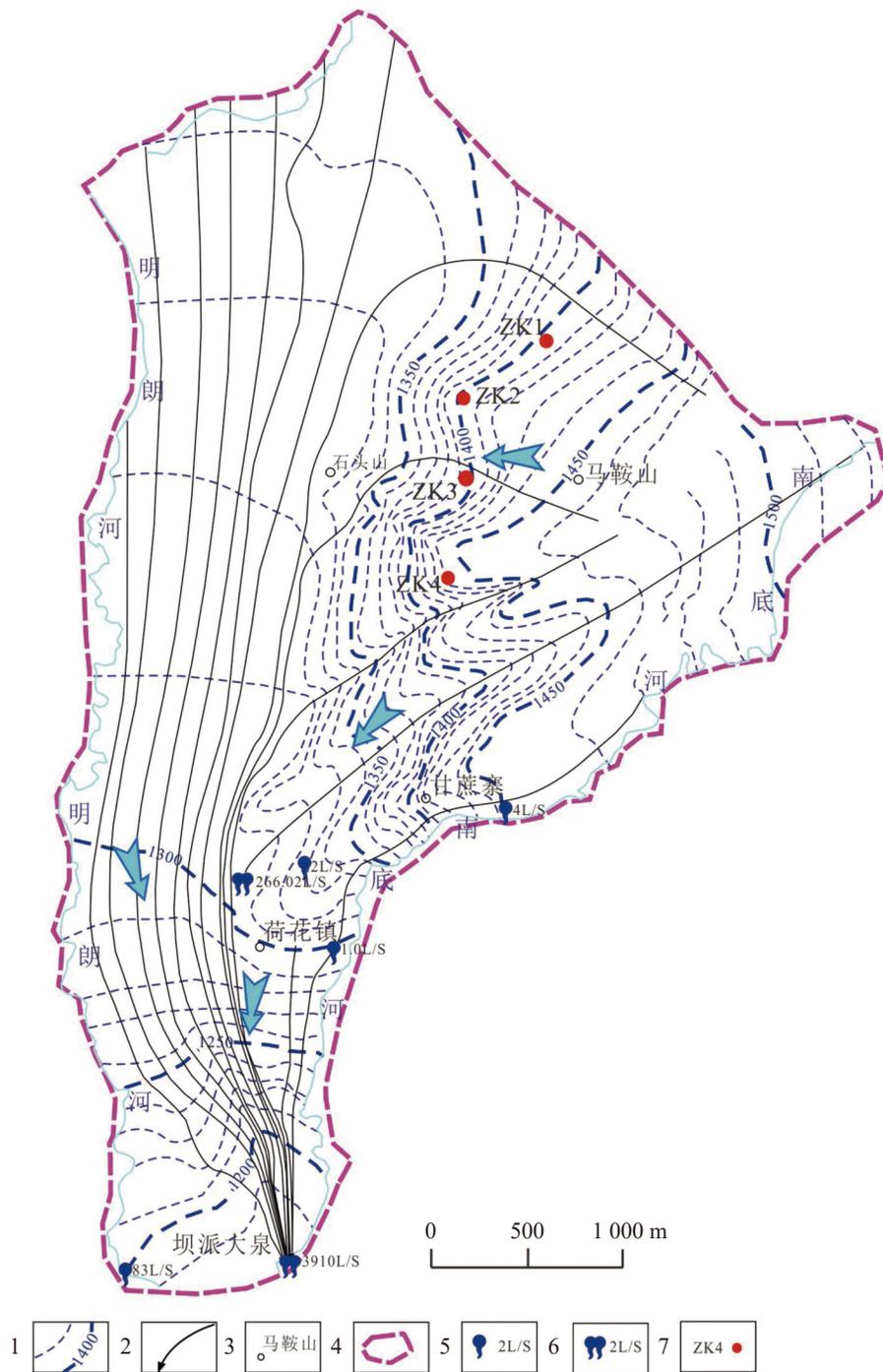


图 7 研究区地下水流场示意图

1. 推测等水位线及水位标高 2. 地下水流线 3. 地名 4. 研究区范围 5. 泉点及流量 6. 泉群及流量 7. 钻孔编号

Fig. 7 Schematic diagram of groundwater flow field in the study area

1. estimated water level line and water level elevation 2. groundwater flow line 3. place name 4. scope of the study area 5. spring point and flow 6. spring group and flow 7. borehole numbering

标准》(GB/T14848-2017)、地表水评价指标取自《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)。对 39 个水样进行单因子评价(表 2), 在 39 个水样中达到 I 类水的个数为 25 个, 占总取水样个数的 64.10%, 其中地下水样占 18 个, 地表水样占 7 个; 符合 III 类水的点

为 6 个, 占总取水样数的 15.38%, 其中地下水样占 1 个, 地表水样占 5 个; 符合 IV 类水的点 8 个, 占总取水样数的 20.51%, 其中地下水样占 3 个, 地表水样占 5 个。总的来说地下水相比地表水的水质较好。由单因子评价法结果可知, pH 指标与其他金属指标

表2 单因子评价法评价结果(表长而单调,结果相同的水样归纳一下,如SY1-SY6, I)

Table 2 Results of single factor evaluation (summary of water samples with the same results)

样品编号	pH	六价铬(Cr <sup>6+</sup> )	砷(As)	汞(Hg)	铜(Cu)	锌(Zn)	镉(Cd)	铅(Pb)	镍(Ni)	水质评价	备注
SY1—SY6	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	地下水
SY7—SY9	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
SY10	I	I	I	I	I	I	III	I	I	III	
SY11—SY12	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	地表水
SY18	I	I	I	I	I	I	I	III	I	III	
SY20	I	I	IV	I	I	I	I	I	I	IV	
SY13	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
SY14	I	I	I	I	I	I	I	I	III	III	
SY15	IV	I	I	I	I	I	I	I	I	IV	地下水
SY16—SY17	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
SY19	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
SY21	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
SY36	I	I	III	I	I	I	I	I	I	III	
SY22	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
SY23	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
SY24	I	I	I	I	I	I	II	III	I	III	
SY25	IV	I	I	I	I	I	I	I	I	IV	地表水
SY26	IV	I	I	I	I	I	I	I	I	IV	
SY32	I	I	I	I	I	I	I	IV	I	IV	
SY35	I	I	IV	I	I	I	I	I	I	IV	
SY37	I	I	III	I	I	I	I	I	I	III	
SY27	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
SY28	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
SY29	IV	I	I	I	I	I	I	I	I	IV	
SY30—SY31	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	地下水
SY33—SY34	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
SY38	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	
SY39	I	I	IV	I	I	I	I	I	I	IV	

所做出的评价结果并不重合,即pH指标达到IV类水质时,水样中其他金属元素指标都为I类;当镉(Cd)、砷(As)、铅(Pb)、镍(Ni)指标评价为IV类或III类时,pH指标都为I类。由此推测,造成pH超标的污染源与造成重金属超标的污染源并未形成混合型污染。其中水质超标地区主要分布在工业园区、固体废弃物填埋场以及农业生活集中区,其中工业园区主要为重金属元素超标,固体废弃物填埋场和农业生活集中区为pH值超标。

### 3.2 污染源及污染机制

#### 3.2.1 污染源

经调查,引起上述水质超标和劣化的主要污染

源如下:

(1)工业污染源,研究区分布有工业园区、石材加工园区。园区内污水管道未全覆盖,建筑、石材加工等企业废水除沉淀处理外,废水沿山体坡面排放,直接通过地表入渗进入地下水。

工业园区集中于山体北部坡体,为地下水补给区,废水产生量大,悬浊物、化学原料等随废水入渗,可对下游径流区地下水造成富集污染。

(2)农业农村污染源,研究区内农村生活、农业种植与养殖集中分布于明朗河谷地、南底河山谷,分布范围广。谷地部位河流、农田、坝塘下渗地下水现象较普遍,化肥、农药的持续过量施用于表层土体营养元素富集,致地表、地下水氨氮、亚硝酸盐氮、

硝酸盐氮和总磷含量升高,使水体富营养化。

(3)固体废弃物填埋场,研究区内固体废弃物污染源有马鞍山北西侧的某铅锌矿尾矿填埋、山体南部采坑处的建筑废料与生活垃圾堆填。

铅锌矿尾矿填埋堆场已完成防渗、渗滤液收集工程,未发现尾矿库明显渗漏迹象,但是危废填埋物防渗层在年久失效与工程振动破坏下,滤液仍可渗漏并污染地下水。

石头山南部山体采坑部位见多处小规模的建筑废料与生活垃圾堆填现象,山体部位岩体孔洞裂隙发育,污染物大概率会随着降水浸泡溶滤后入渗进入地下水。

### 3.2.2 污染机制分析

据研究区的污染源、马鞍山地下水系统边界、结构和含水介质特性、含水层防污性能,地表水与地下水转换过程分析,在腾冲火山群分布区地下水污染机制主要两种类型:越流渗入污染,直接渗入污染<sup>[27]</sup>。

农业污染源中由于生活垃圾不合理堆放,农田中化肥、农药的持续过量施用,导致地表、地下水氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮和总磷含量升高,使水体富营养化。经过降雨淋滤形成污染水,通过弱透水松散覆盖层越流渗透输入下伏火山岩类孔洞裂隙含水层(图 8)。主要发生在明朗河谷地、南底河山谷带的越流边界附近,分布于甘蔗寨、荷花乡等地。

结合污染源的调查与 SY20、SY32、SY35、SY39

样品中砷和铅元素在地下水与地表水中的评价结果,得出工业园区内污水管道未全覆盖,部分工业废水直接沿山体坡面排放,直接入渗地下水;石材加工园区废水沉淀后排入明朗河,部分直接入渗地下水;危废填埋物防渗层年久失效、地震与工程振动破坏下导致滤液大量入渗地下水,成为持续型渗入污染源(图 8)。主要发生在石头山北西侧、马鞍山北东侧垂向径流渗入较为发达的部位。

## 4 地下水脆弱性评价

### 4.1 评价方法

本次 DRASTIC 模型的评价因子主要基于《地下水污染防治分区划分工作指南》并结合研究区具体特征综合确定,传统的 DRASTIC 模型由地下水位埋深(D)、垂向净补给量(R)、含水层组介质类型(A)、土壤介质类型(S)、地形坡度(T)、包气带介质类型(I)和含水层渗透系数(C)等 7 个水文地质参数组成。模型中每个指标都分成几个区段,每个区段赋予评分。评价因子权重在使用指南推荐值基础上,根据研究区水文地质特征等因素加以修正,指标权重值范围为 1~5,对地下水脆弱性最具影响的因子权重赋值为 5,影响程度最小的因子权重赋值为 1,具体各指标数据来源权重、等级划分以及评分见表 3、表 4,最后通过加权求和,得到地下水脆弱性指数(DI)。

$DI = D_w D_R + R_w R_R + A_w A_R + S_w S_R + T_w T_R + I_w I_R + C_w C_R$   
式中: DI 表示地下水脆弱性指数,字母 D、R、A、S、

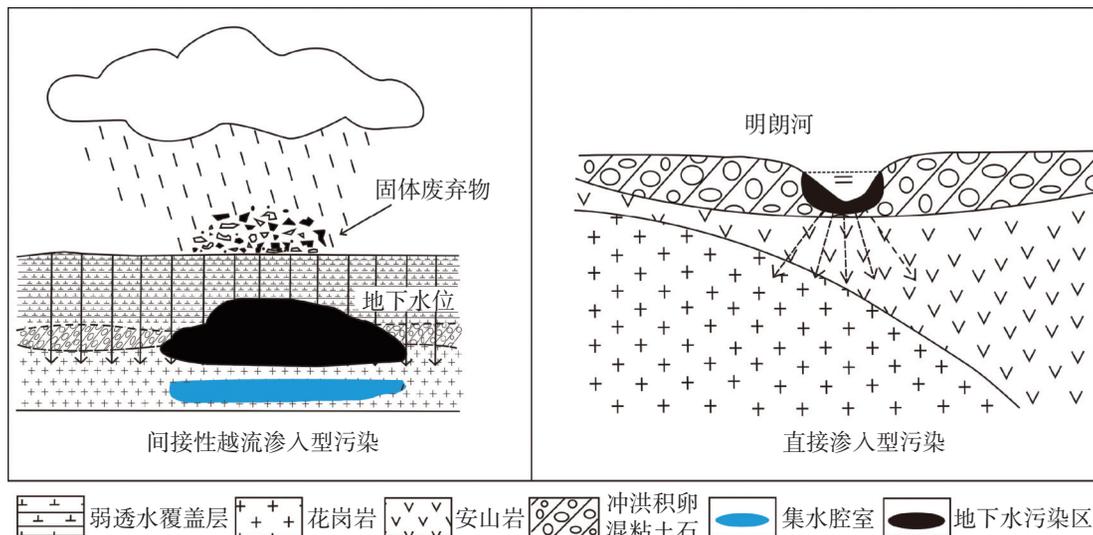


图 8 马鞍山地下水系统污染机制示意图

Fig. 8 Schematic diagram of pollution mechanism of groundwater system in Ma'anshan

表3 DRASTIC模型各指标说明和权重值  
Table 3 Description and weight value of each index of DRASTIC model

指标	数据来源	单位	权重
地下水位埋深(D)	现有水文地质资料收集	m	5
垂向净补给(R)	收集当地多年平均降雨量乘以降雨入渗系数	mm·a <sup>-1</sup>	4
含水层介质类型(A)	收集已有钻孔及区域水文地质资料进行综合分析	m	3
土壤介质(S)	综合收集地质资料、水文地质资料结合经验初步分析不同岩性全风化呈土壤后的类型		2
地形坡度(T)	10 m精度地形DEM提取	‰	1
包气带介质类型(I)	根据收集区域勘察资料、已有水文地质资料,综合分析进行统计		5
含水层渗透系数(C)	根据水文地质普查资料的抽水试验结合经验值进行取值	m·d <sup>-1</sup>	3

表4 脆弱性评估各指标等级划分和赋值  
Table 4 Grading and assignment of indicators for vulnerability assessment

指标	评分									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D	>300	(250,300]	(200,250]	(150,200]	(125,150]	(100,125]	(75,100]	(50,75]	(25,50]	(0,25]
R	0	(0,51]	(51,71]	(72,117]	(117,147]	(147,178]	(178,216]	(216,235]	(216,235]	>235
A	块状页岩、黏土	裂隙发育非常轻微变质岩或火成岩、亚黏土	裂隙中等发育变质岩或火成岩、亚砂土	风化变质岩或火成岩、粉砂	裂隙非常发育变质岩或火成岩、细粉砂	块状砂岩、细砂	层状砂岩、页岩序列、中砂	砂砾岩、粗砂	玄武岩、砂砾石	卵砾石
S	非涨缩和非凝聚性黏土	粘质壤土	粉质壤土	壤土	砂质壤土	膨胀或凝聚性黏土	粉砂、细沙	砾石、中砂、粗砂	卵砾石	缺失
T	>10	(9,10]	(8,9]	(7,8]	(6,7]	(5,6]	(4,5]	(3,4]	(2,3]	≤2
I	黏土	亚黏土	亚砂土	粉砂	粉细砂	细砂	中砂	粗砂	砂砾石	卵砾石
C	≤4	(4,12]	(12,20]	(20,30]	(30,35]	(35,40]	(40,60]	(60,80]	(80,100]	>100

T、I、C说明参见表3—表5,下标R表示指标值,下标W表示指标的权重。根据DI值,将脆弱性分为低、较低、中等、较高和高5个等级。

#### 4.2 评价结果

采用DRASTIC模型,评估研究区内地下水天然状态下的固有脆弱性,划分为脆弱性较低、中等、较高三种类型(图9)。从图9可知,低脆弱性地区、中等脆弱性地区、高脆弱性地区占比分别为3.6%、42.1%、54.3%,表明研究区地下水脆弱性整体偏高。低脆弱性地区主要分布于和顺乡的南西部位与马鞍山一带,主要由于此区域整体海拔较高,地形坡度大,地表径流和地下水更容易流失,地下水埋深大,且人

类活动影响程度较低,地下水受污染可能性小,因而地下水脆弱性低。中等脆弱区主要分布于研究区的北东部位以及南西角,该区域含水层渗透系数较高,污染物容易下渗进入地下水,造成污染,因而地下水脆弱性升高。较高脆弱区主要分布于明朗河下游、甘蔗寨—荷花—坝派等水资源分布较多的地区,此区域的地下水位埋深较小,含水介质结构不均匀,地下水的补给可通过管、槽状裂隙直接入渗,包气带中充填或堆积的火山灰、冲洪积泥质的吸附效应近似为缺失,并且工业企业也集中分布在此,地下水中重金属、有害类金属背景值较高,含水层对污染物或人类活动有较强的敏感属性,故而脆弱性较高。水质相对较差的Ⅲ、Ⅳ类水样点多分布在脆弱性中等与

表5 地下水脆弱性评价结果等级划分表  
Table 5 Grading of assessment results of the groundwater vulnerability

地下水脆弱性综合指数DI	≤70	(70,100]	(100,120]	(120,150]	>150
地下水脆弱性级别	低	较低	中等	较高	高

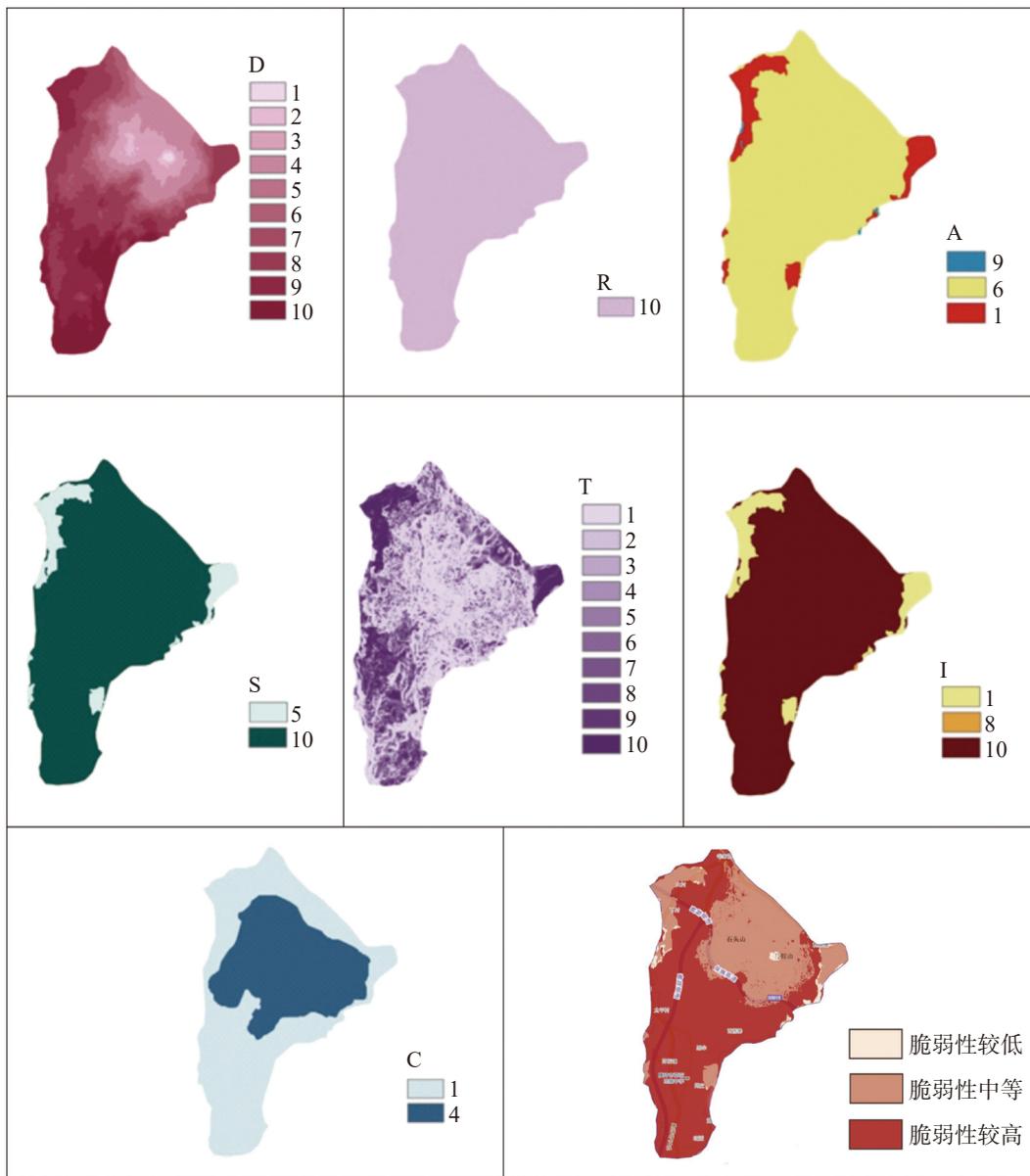


图 9 马鞍山地下水系统脆弱性分区图

Fig. 9 Zoning map of the vulnerability of Ma'anshan groundwater system

较高区域,表明地下水脆弱性评价结果基本可靠。

### 5 结 论

(1)研究区在强烈的构造运动和火山喷发作用下,地下水系统结构复杂,水动力性质多变;系统结构为成因及性质差异明显的含、隔水层(带)交互多层结构与断裂、断块和裂隙储水构造叠加形成的空间组合结构。

(2)研究区地下水沿断裂及连续的熔岩通道形成管道型径流,在松散堆积体中沿规模大小不一的熔岩裂隙、火山弹和火山角砾和冲洪积砂砾石层的

大孔隙内呈股状径流,于明朗河谷地东侧山体缓坡部位熔岩裂隙破碎带、谷地边缘带古河道形成富集,最终排泄于坝派大泉。

(3)研究区内低脆弱性地区、中等脆弱性地区、高脆弱性地区的占比分别为 3.6%、42.1%、54.3%。高脆弱区主要分布于明朗河下游、甘蔗寨—荷花—坝派等水资源分布较多的地区,这些区域的地下水位埋深较小,含水介质结构不均匀,且重金属、有害类金属背景值较高,从而对污染物或人类活动有较强的敏感属性。水质相对较差的Ⅲ、Ⅳ类水样点多分布在脆弱性中等与较高区域,表明地下水脆弱性评价结果基本可靠。

## 参考文献

- [1] 张俊, 尹立河, 赵振宏. 地下水系统理论研究综述[J]. *地下水*, 2010, 32(6): 27-30.  
ZHANG Jun, YIN Lihe, ZHAO Zhenhong. Review on groundwater systems[J]. *Ground Water*, 2010, 32(6): 27-30.
- [2] 陈梦熊, 马凤山. 中国地下水资源与环境[M]. 北京: 地震出版社, 2002: 385-417.  
CHEN Mengxiong, MA Fengshan. Groundwater resources and environment in China[M]. Beijing: Seismological Press, 2002: 385-417.
- [3] 张文强, 滕跃, 唐飞, 王金晓, 许庆宇, 张海林. 山东省肥城断块岩溶水系统地下水水化学特征及演化分析[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(5): 1047-1060, 1084.  
ZHANG Wenqiang, TENG Yue, TANG Fei, WANG Jinxiao, XU Qingyu, ZHANG Hailin. Groundwater hydrochemical characteristics and evolution of the karst water system in the Feicheng fault block in Shandong Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(5): 1047-1060, 1084.
- [4] 胡大儒, 郑克勋, 赵代尧, 陈占恒. 复杂岩溶水系统势汇区建坝成库可行性研究: 以北盘江流域普岔河水库为例[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(5): 736-745.  
HU Daru, ZHENG Kexun, ZHAO Daiyao, CHEN Zhanheng. Feasibility study on dam and reservoir construction in the catchment area of complex karst water system: Taking Pucha reservoir of Beipan river as an example[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(5): 736-745.
- [5] 任世川, 杨晓艳, 杨颖彬, 刘海峰, 杨帆. 丽江黑龙潭地下河系统的水均衡分析与预测评价[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(6): 1183-1192.  
REN Shichuan, YANG Xiaoyan, YANG Yingbin, LIU Haifeng, YANG Fan. Equilibrium analysis and prediction evaluation of the Heilongtan groundwater system in Lijiang of northwestern Yunnan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(6): 1183-1192.
- [6] 刘元晴, 文冬光, 吕琳, 李伟, 张福存, 王新峰, 孟顺祥. 沂蒙山区典型断陷盆地岩溶地下水系统特征: 以莱芜盆地为例[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(1): 157-167.  
LIU Yuanqing, WEN Dongguang, LYU Lin, LI Wei, ZHANG Fucun, WANG Xinfeng, MENG Shunxiang. Characteristics of karst groundwater flow systems of typical faulted basins in Yimeng mountain area: A case study of Laiwu basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(1): 157-167.
- [7] 莫美仙, 王宇, 李峰. 滇东断陷盆地地下水污染的水文地质模式[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 39(5): 88-95.  
MO Meixian, WANG Yu, LI Feng. Hydrogeological model of groundwater pollution in eastern Yunnan plateau downfaulted basin[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 39(5): 88-95.
- [8] 姚金. 腾冲新生代火山岩地球化学组成及其成因研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.  
YAO Jin. The geochemical characteristics and petrogenesis of Cenozoic volcanic rocks in Tengchong block[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [9] 段毅, 危自根, 杨小林, 叶泵, 王军. 腾冲火山结构研究进展和展望[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(4): 1288-1297.  
DUAN Yi, WEI Zigen, YANG Xiaolin, YE Beng, WANG Jun. Research progress and prospect of structure in Tengchong volcanic area[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(4): 1288-1297.
- [10] 皇甫岗. 腾冲火山研究综述[J]. *地震研究*, 1997, 20(4): 431-437.  
HUANGFU Gang. Review of studies on Tengchong volcanoes[J]. *Journal of Seismological Research*, 1997, 20(4): 431-437.
- [11] 赵勇伟, 樊祺诚. 腾冲马鞍山、打鹰山、黑空山火山岩浆来源与演化[J]. *岩石学报*, 2010, 26(4): 1133-1140.  
ZHAO Yongwei, FAN Qicheng. Magma origin and evolution of Maanshan volcano, Dayingshan volcano and Heikongshan volcano in Tengchong area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(4): 1133-1140.
- [12] 穆治国, 佟伟, Garniss H Curtis. 腾冲火山活动的时代和岩浆来源问题[J]. *地球物理学报*, 1987, 30(3): 261-270.  
MU Zhiguo, TONG Wei, Garniss H Curtis. Times of volcanic activity and origin of magma in Tengchong geothermal area, west Yunnan Province[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1987, 30(3): 261-270.
- [13] 崔笛. 腾冲新生代火山群岩浆起源与演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.  
CUI Di. The origin and evolution of Cenozoic volcanic magma in Tengchong area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- [14] 陈克非, 林叶, 申文豪, 徐锡伟, 汪文帅, 刘少林. 腾冲火山起源的地球物理和地球化学研究进展[J]. *地球与行星物理论评(中英文)*, 2023, 54(2): 216-230.  
CHEN Kefei, LIN Ye, SHEN Wenhao, XU Xiwei, WANG Wenshuai, LIU Shaolin. The origin of the Tengchong volcano: A review of geophysical and geochemical studies[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2023, 54(2): 216-230.
- [15] 季洪伟. 云南腾冲黑空山全新世火山岩地球化学与岩石成因[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.  
JI Hongwei. Geochemistry and petrogenesis of Heikongshan Holocene volcanic rocks in Tengchong, Yunnan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [16] 杨逸云, 赵志丹, 雷杭山, 武精凯, 苗壮, 张双全, 陈玲, 季宏伟. 云南腾冲全新世火山岩岩浆演化和岩石成因[J]. *岩石学报*, 2019, 35(2): 472-484.  
YANG Yiyun, ZHAO Zhidan, LEI Hangshan, WU Jingkai, MIAO Zhuang, ZHANG Shuangquan, CHEN Ling, JI Hongwei. Magma evolution and petrogenesis of Holocene volcanic rocks in Tengchong, Yunnan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(2): 472-484.

- [17] Li N, Zhao Y W, Zhang L Y. New chronology of the Quaternary Tengchong volcanic swarm, SW China and the discovery of a Holocene volcano[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2017, 91(5): 1940-1941.
- [18] Li N, Wei H Q, Zhang L Y. The discovery of Late Pleistocene Daliuchong volcanic conduit in the Tengchong volcanic field[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2016, 90(5): 1911-1912.
- [19] Li N, Zhao Y W, Zhang L Y, Wang J L. The quaternary eruptive sequence of the Tengchong volcanic group, Southwestern China[J]. *Lithos*, 2020(354-355): 105173.
- [20] 侯正阳, 王成虎, 王璞, 江英豪, 杨汝华. 基于火山口排列调查法的腾冲地区古地应力场反演[J]. *地震地质*, 2019, 41(4): 1042-1059.  
HOU Zhengyang, WANG Chenghu, WANG Pu, JIANG Yinghao, YANG Ruhua. Inversion research of paleostress field in Tengchong area based on vent alignment survey method[J]. *Seismology and Geology*, 2019, 41(4): 1042-1059.
- [21] 郑瑾, 邵曰舜. 云南腾冲火山群区域内水环境状况分析研究[J]. *水利规划与设计*, 2007, 80(6): 21-24.
- [22] 马致远, 李嘉祺, 翟美静, 吴敏, 许勇. 沉积型和火山型地热流体的同位素水文地球化学对比研究[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(6): 9-18.  
MA Zhiyuan, LI Jiaqi, ZHAI Meijing, WU Min, XU Yong. A comparative study of isotopic hydrogeochemistry of geothermal fluids of sedimentary basin type and volcanic type[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(6): 9-18.
- [23] 穆桂春, 刘淑珍, 戴鹤之, 孙兆明. 腾冲火山地貌[J]. *西南师范学院学报(自然科学版)*, 1982(4): 97-143, 147.
- [24] 中国地质调查局. 水文地质手册(第二版)[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 128-131.  
China Geological Survey. Handbook of hydrogeology[M]. Beijing: Geology Press, 2012: 128-131.
- [25] 王宇. 西南岩溶地区岩溶水系统分类、特征及勘查评价要点[J]. *中国岩溶*, 2002, 21(2): 114-119.  
WANG Yu. Classification, features of karst water system and key point for the evaluation to karst water exploration in Southwest China karst area[J]. *Carsologica Sinica*, 2002, 21(2): 114-119.
- [26] 杨杨, 赵良杰, 潘晓东, 夏日元, 曹建文. 西南岩溶山区地下水资源评价方法对比研究: 以寨底地下河流域为例[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(1): 111-123.  
YANG Yang, ZHAO Liangjie, PAN Xiaodong, XIA Riyuan, CAO Jianwen. Comparative study on evaluation methods of groundwater resources in karst area of Southwest China: Taking Zhaidi underground river basin as an example[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(1): 111-123.
- [27] 王宇. 岩溶高原地下水径流系统垂向分带[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(1): 1-8.  
WANG Yu. Vertical zoning of groundwater runoff system in karst plateau[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 1-8.

## Characteristics of groundwater system and assessment of groundwater vulnerability of the Tengchong volcano group in western Yunnan

WANG Yangyang<sup>1</sup>, HUANG Shengdong<sup>2</sup>, PAN Dong<sup>2</sup>, HUANG Guiren<sup>2</sup>,  
WANG Yu<sup>3,4,5</sup>, CHANG He<sup>1</sup>, PU Yue<sup>1</sup>

( 1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China; 2. Yunnan Geological Engineering Survey and Design Research Institute Limited Company, Kunming, Yunnan 650041, China; 3. Yunnan Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological Restoration in Plateau Mountainous Area, Kunming, Yunnan 650216, China; 4. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological Restoration in Plateau Mountainous Area, MNR, Kunming, Yunnan 650216, China; 5. Yunnan Institute of Geo-Environment Monitoring, Kunming, Yunnan 650216, China )

**Abstract** The Tengchong volcanic group encompasses a vast area and exhibits a diverse range of eruption types. It is one of the youngest volcanic areas in China. Studying the characteristics of its groundwater system is the basis for analysis and evaluation of pollution mechanisms. Ma'anshan exhibits typical genetic and morphological characteristics in the Tengchong volcanic group. The volcanic cones and craters of Ma'anshan are relatively complete. Because the lava flows exhibit no weathered layers, Ma'anshan retains the geomorphological characteristics of the volcanos with the most recent eruption. It is dated at the Late Pleistocene or Holocene. The boundary of the groundwater system is relatively clear. Starting with the geological structure and hydrogeological characteristics of Ma'anshan area, this paper summarized the boundary characteristics of groundwater system, aquifer system characteristics, aquifer flow characteristics, and characteristics of groundwater recharge and drainage in the study area. The single factor analysis was conducted to evaluate 39 groups of water samples collected. Combined with on-site investigations, pollution sources, pollution mechanisms were explored and the groundwater vulnerability of the study area was evaluated

through DRASTIC model.

The results show as follows. (1) The Ma'anshan area is located in the groundwater system of Bapaidaquan, bounded by the Shitoushan underground watershed at the northeast, by the groundwater barrier on the right bank of the Nandi river at the southeast, and by the recharge boundary of the Minglang river valley at the west. The Ma'anshan area constitutes an inter-river landmass composed of the Minglang river, the Nandi river, and north-east oriented catchment valley, and mainly receives infiltration and recharge from granite fissure water, weathered fissure water and fissure water from fractured structural zones. (2) Under the strong tectonic movement and volcanic eruption, the groundwater system exhibits a complex structure and changeable hydrodynamic properties. The water-collecting chambers formed by pumice aggregates, breccia, and volcanic bomb fragments in the volcanic lava accumulation, and the lava fissures connected between them, are evenly distributed in space. Each water collecting chamber is also hydraulically connected under the communication of fractures or pores. Showing obvious characteristics with layered structures, the aquifers of the mountains in the study area are all exposed in the alluvial and pluvial layers underlying the volcanic accumulations, which supports the multi-layer interactive structural characteristics of water from lava pores and from alluvial and pluvial layers. (3) Groundwater in the study area forms pipe-type runoff along faults and continuous lava channels, and forms strands of runoff in the loose accumulations along lava fissures, volcanic bombs and volcanic breccia of varying sizes and in macropores of alluvial and pluvial gravel layers. Then, runoff converges in the lava fissure zone on the gentle slope of the mountain on the east side of the Minglang river valley and in the ancient river channel at the valley edge, and is finally discharged into the Bapai spring. (4) Areas where the water quality exceeds permitted levels are mainly distributed in industrial parks, solid waste landfills and agricultural living areas. In industrial parks, the water quality exceeds permitted levels mainly due to excessive heavy metal elements. In solid waste landfills and agricultural living areas, water contains excessive pH values. According to the characteristics of pollution sources, structure and water-containing media, aquifer anti-fouling performance, and conversion process between surface water and groundwater, there are two main types of groundwater pollution mechanisms in the study area: trans-flow infiltration and direct infiltration. (5) The proportions of low-vulnerability areas, medium-vulnerability areas, and high-vulnerability areas in the study area are 3.6%, 42.1%, and 54.3% respectively. The high-vulnerability areas are mainly distributed in the lower reaches of the Minglang river, Ganzhezhai–Hehua–Bapai and other areas with more water resources. The depth of the groundwater level in this area is small, and the water-bearing medium is uneven. The recharge of groundwater can be directly infiltrated through pipes and trough fissures. The adsorption effect of volcanic ash and alluvial mud filled or accumulated in the air-bearing zone is approximate to be missing. Because industrial enterprises are also concentrated here, the background values of heavy metals and harmful metals in groundwater are high. Aquifers are highly sensitive to pollutants or human activities, and are, therefore, highly vulnerable. The water samples with relatively poor water quality of Class III and Class IV are mostly distributed in the areas with medium-and-high-vulnerability, indicating that the results of groundwater vulnerability assessment are basically reliable.

**Key words** the Tengchong volcano group, characteristics of groundwater system, single factor analysis, groundwater vulnerability assessment

(编辑 杨杨)