

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2013.05.007

打狗河流域表层岩溶泉分布特征及水化学特征的影响因素

孟小军,唐建生,李兆林,梁小平,潘晓东,苏春田

(中国地质科学院岩溶地质研究所,广西 桂林 541004)

摘要:利用野外调查所得的打狗河流域表层岩溶泉的水化学数据,分析地形地貌、地层岩性、土壤植被、地质构造等因素对表层岩溶泉分布特征及水化学特征的影响。结果表明,打狗河流域表层岩溶泉主要发育于峰丛地貌;白云岩最有利于表层岩溶泉的形成;植被越茂盛,表层岩溶泉越容易发育;地质构造通过控制岩溶发育来影响表层岩溶泉发育。受含水介质中地层岩性控制,打狗河流域表层岩溶泉水化学类型比较集中,主要为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型;表层岩溶泉流域面积较小,径流时间、径流路径较短,水岩相互作用较弱,使得其 pH 值偏低,地下水中方解石饱和指数与白云石饱和指数均未达饱和。

关键词:表层岩溶泉;分布特征;水化学特征;打狗河流域

中图分类号:P641 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2013)05-0032-06

Factors influencing distribution characteristics and hydrochemical characteristics of epikarst spring in Dagou River Basin

MENG Xiaojun, TANG Jiansheng, LI Zhaolin, LIANG Xiaoping, PAN Xiaodong, SU Chuntian
(Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: Based on the field investigation data of hydrochemical characteristics of the epikarst spring in the Dagou River Basin, the influences of topography and landforms, formation lithology, soil vegetation, and geological structure on the distribution characteristics and hydrochemical characteristics of the epikarst spring in the Dagou River Basin were analyzed. The results show that the epikarst spring mainly develops from peak cluster landforms in the Dagou River Basin, and dolomite is most conducive to the development of epikarst springs. The more the vegetation flourishes, the more easily the epikarst spring develops. The geological structure influences the development of epikarst springs through the control of karst development. Controlled by formation lithology in the water-bearing medium, hydration types were concentrated in the epikarst spring in the Dagou River Basin, with $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ being the main type. Because the spring drainage area is small, the runoff time and flow path is short, and the water-rock interaction is weak, the PH value is low, and SIc and SId in the aqueous solution are not saturated.

Key words: epikarst spring; development characteristics; hydrochemical characteristics; Dagou River Basin

表层岩溶带是指岩溶地区表层一定深度内风化较强烈的部分,它具有存储、输送降水补给的作用,是岩溶水系统的重要组成成分^[1]。表层岩溶带中的表层岩溶水因地形、岩性、构造等出露地表而形成表层岩溶泉。表层岩溶带是南方一种比较普遍的岩溶现象^[2-5],其赋存的水体是西南岩溶山区峰丛谷

基金项目:贵州重点地区岩溶流域水文地质环境地质调查项目(1212011121160)
作者简介:孟小军(1988-),男,助理工程师,从事岩溶水文地质研究。E-mail: mengxiaojun@karst.ac.cn

地、峰丛洼地地区居民用水的主要来源^[6]。目前对西南地区表层岩溶泉已经开展了很多研究工作,如研究表层岩溶泉的分布特征、水动态特征、水化学、水温等^[7-11]。

本研究选取打狗河流域典型的表层岩溶泉,分析打狗河流域地形地貌、地层岩性、土壤植被、地质构造对表层岩溶泉发育的影响,并通过传统的水化学方法,分析打狗河流域表层岩溶泉的水化学特征,找出影响表层岩溶泉分布特征和水化学特征的因素,为该地区的水资源保护与开发利用提供科学依据。

1 研究区的地质条件

研究区位于贵州高原向广西丘陵过渡的斜坡地带,主要在贵州省荔波县内,另包括贵州省三都县、独山县部分区域,见图1。研究区地理坐标范围为东经107°23′~108°24′,北纬25°06′~25°50′,处于中亚热带季风湿润气候区,年平均气温18.3℃,多年(1981—2010年)平均降雨量为1218.8mm,雨量充沛,气候宜人。研究区流域总面积约4100km²,其中碳酸盐岩地区面积约3000km²。

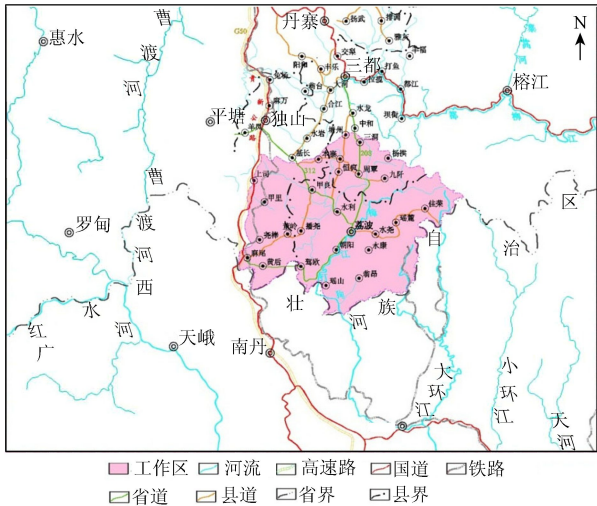


图1 研究区交通位置

研究区内出露地层较为齐全,以泥盆系、石炭系、二迭系和三迭系发育最多,占测区总面积的80%左右,其中下奥陶系锅铲组(O_{1g}),泥盆系望城坡组(D_{3w})、尧梭组(D_{3y}),石炭系岩关阶组(C_{1y})、黄龙群组(C_{2hn})、马平群组(C_{3mp}),二迭系栖霞组(P_{1q})、茅口组(P_{1m}),三迭系法郎组(T_{2f})、永宁镇组(T_{1y})中段,以碳酸盐岩为主。

研究区位于川黔南北向构造带东南隅及南岭东西向复杂构造带北侧的交汇地带,测区曾经历了多次构造变动,形成了较为复杂的构造格局,构造形迹以褶皱为主,断裂较少;断裂又以纵向压性、压扭性为主,东西向地层规模也较大,稀疏展布。

格局上看,有北紧南疏、西窄东宽之规律。区内构造体系主要有南北向、东西向及新华夏系3个构造体系。

2 研究方法

选取打狗河流域267个表层岩溶泉为研究对象,其分布如图2所示,结合1:5万水文地质调查成果来分析地形地貌、地层岩性、土壤植被、地质构造4个因素对表层岩溶泉区域分布规律影响。在267个表层岩溶泉中选取25个水样做水化学特征分析,进一步了解其发育特征。

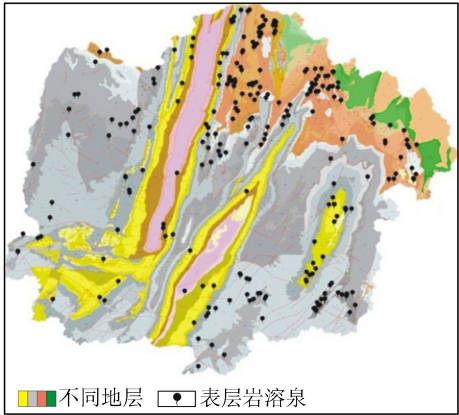


图2 打狗河流域表层岩溶泉分布

3 打狗河流域表层岩溶泉发育特征

3.1 地形地貌对表层岩溶带及表层岩溶泉的影响

3.1.1 对表层岩溶带的影响

据野外调查,在峰丛洼地地区,表层岩溶带比较发育,受地形控制明显,斜坡地段以及一般地形坡度超过35°以上的地区,由于地表水流速过快,水岩相互作用时间较短,表层岩溶带发育相对较弱,厚度为3~5m左右,不利于表层岩溶水的滞留;当坡度在15°~35°之间时,水岩相互作用时间较长,受地表水溶蚀、侵蚀作用,表层岩溶带最为发育,厚度为5~10m,有利于表层岩溶水的滞留;在峰丛谷地地区,表层岩溶带发育程度为中等,通常也受地形控制,一般从斜坡至坡脚地带,厚度为2~8m;在溶丘洼地和溶丘谷地,因受地下水位浅埋藏的严格控制,表层岩溶带发育较弱,厚度很小,普遍在2~4m左右;在峰林洼地和峰林谷地地区,一般地形坡度较大,不利于水岩相互作用,表层岩溶带发育相对较弱。受地形地貌控制,表层岩溶带主要发育于地表水、表层岩溶水集中汇流的径流区及排泄区,由于长期受地表水和地下水的侵蚀、溶蚀作用,常常形成以溶沟、溶槽、溶孔、溶隙、溶缝为特征的岩溶形态。

3.1.2 对表层岩溶泉的影响

根据对打狗河流域267个表层岩溶泉统计的结

果,发育于峰丛谷地中的表层岩溶泉 120 个,发育于峰丛洼地中的 132 个,发育于溶丘谷地中的 13 个,溶丘洼地中的 2 个。合计谷地发育 133 个,洼地发育 134 个。

研究区内常见的岩溶地貌类型为峰丛洼地、峰丛谷地、峰林洼地、峰林谷地、溶丘沟谷、溶丘洼地。从表 1 中可知,表层岩溶泉主要发育于峰丛洼地、峰丛谷地中,溶丘沟谷、溶丘洼地少量发育,峰林谷地、峰林洼地未见发育。表层岩溶泉在地形地貌上的分布特征与表层岩溶带的发育特征是密切相关的,表层岩溶带最发育的峰丛洼地、峰丛谷地最有利于表层岩溶水的储存,易出露成泉,形成表层岩溶泉。

3.2 地层岩性对表层岩溶带和表层岩溶泉的影响

据野外调查和室内测试分析,研究区内的 P_1m 、 C_3mp 、 C_2hn 、 C_1y^2 、 C_1y^1 地层属于较纯灰岩,而且岩层以厚层、巨厚层状为主,夹中厚层。由于区内降水丰富,此类地层岩石的水岩相互作用强烈,对表层岩溶带发育较为有利,表层岩溶带中溶沟、溶槽、溶隙、溶缝、溶孔、石牙、石柱、石脊等也较发育。但由于连通性较好,地下水的渗透、溶蚀和侵蚀能力较强,通过表层岩溶水的作用,为深部岩溶发育提供十分有利的条件,使得此类地层虽然表层岩溶带很发育,但是表层岩溶带的富水性较弱。

而以白云岩为主的 C_1d^2 、 D_3y 、 D_3w 地层中,与纯灰岩相比,其岩溶作用相对较缓慢,使得地下水的渗透、溶蚀、侵蚀能力相对变弱,深部岩溶发育不强烈,在表层岩溶带底部形成了一个相对隔水层,将地下水赋存于表层岩溶带中,增加了表层岩溶带中水岩相互作用的时间,促进了表层岩溶带的进一步发育。以白云岩为主的 C_1d^2 、 D_3y 、 D_3w 地层中,表层岩溶带较发育,且富水性良好,由于具有相对隔水层,表层岩溶水容易在地势低洼处出露成泉。

以泥质灰岩为主或者含有碎屑岩夹层的 D_2d^3 、 T_1y 、 P_1q 地层中,由于酸性不溶物质含量较高,使得岩石的水岩相互作用较低,表层岩溶带发育相对较弱,富水性相对较弱,但是此类地层中常常发育相对隔水层,使表层岩溶水容易出露成泉。

在以上 3 类地层中,表层岩溶带发育强度从强到弱依次是:纯灰岩地层 (P_1m 、 C_3mp 、 C_2hn 、 C_1y^2 、 C_1y^1),白云岩地层 (C_1d^2 、 D_3y 、 D_3w),泥质灰岩或者含有碎屑岩夹层地层 (D_2d^3 、 T_1y 、 P_1q);表层岩溶带富水性由大到小依次是:白云岩地层 (C_1d^2 、 D_3y 、 D_3w),泥质灰岩或者含有碎屑岩夹层地层 (D_2d^3 、 T_1y 、 P_1q),纯灰岩地层 (P_1m 、 C_3mp 、 C_2hn 、 C_1y^2 、 C_1y^1)。

对各地层出露的表层岩溶泉密度进行统计发现,白云岩地层 (C_1d^2 、 D_3y 、 D_3w) 出露的表层岩溶泉密度最高,分别是 0.104 个/ km^2 、0.222 个/ km^2 、0.322 个/ km^2 ,其次是泥质灰岩或者含有碎屑岩夹层地层 (D_2d^3 、 T_1y 、 P_1q),最后是纯灰岩地层 (P_1m 、 C_3mp 、 C_2hn 、 C_1y^2 、 C_1y^1),其发育特征与表层岩溶带的富水特征一致,但与表层岩溶带的发育特征不一致。

表 1 表层岩溶泉在各地层岩性内分布密度统计

地层代号	主要化学成分所占比例/%				表层岩溶泉		
	CaO	MgO	酸性不溶物	CO ₂	地层面积/ km^2	个数	密度/(个· km^{-2})
T_1y	51.52	0.60	6.02	41.56	12.94	1	0.077
P_1m	54.20	0.91	2.14	42.72	238.10	12	0.050
P_1q	52.70	0.78	4.53	42.42	228.86	20	0.087
C_3mp	54.35	0.81	0.76	43.40	362.10	14	0.039
C_2hn	55.09	0.28	1.50	42.87	953.85	36	0.038
C_1d^2	34.39	18.30	0.96	46.44	472.28	49	0.104
C_1y^2	51.37	1.46	6.28	40.36	122.90	4	0.033
C_1y^1	52.56	0.89	3.45	42.50	195.51	6	0.031
D_3y	30.37	20.33	3.77	45.58	241.53	55	0.228
D_3w	30.82	19.58	4.67	44.99	114.87	37	0.322
D_2d^3	48.84	1.06	8.86	40.51	92.63	7	0.076

3.3 土壤、植被对表层岩溶带及表层岩溶泉的影响

研究区内多为岩溶山地、洼地及谷地,土层覆盖厚度与植被覆盖率变化很大,一般情况下,植被茂盛的地方,土层覆盖厚度大;植被较稀少的地方,水土流失严重,基岩容易裸露。

植被与土壤对表层岩溶带的发育具有促进作用,其在岩溶过程中具有保持水分、延长水岩相互作用时间的作用,且提供 CO₂ 气体,加快岩溶作用^[12]。

对打狗河地区岩溶区植被类型及面积进行统计,了解不同植被类型表层岩溶发育情况,见表 2。

表 2 表层岩溶泉在各植被类型中的分布统计

植被类型	植被		表层岩溶泉泉点	
	面积/ km^2	百分比/%	个数	密度/(个· km^{-2})
森林	325.8	10.86	61	0.187
灌丛	778.2	25.94	125	0.161
乔幼林	267.9	8.93	42	0.157
灌丛草地	680.7	22.69	30	0.044
草地	622.2	20.74	9	0.014

从表 2 可知,打狗河流域表层岩溶主要发育于植被较为茂盛的灌丛区域,其泉点发育密度从大到小依次是森林、灌丛、乔幼林、灌丛草地、草地。其中森林植被类型的表层岩溶泉发育密度是草地的 13 倍,是灌丛草地的 4 倍。这说明打狗河地区植被对岩溶泉的发育分布影响巨大,植被越茂盛,表层岩溶泉越容易发育。

3.4 地质构造对表层岩溶带及表层岩溶泉的影响

研究区内分布着大大小小的褶皱,褶皱以南北

向或近南北向发育,表层岩溶泉在各褶皱带上分布不均。据野外水文地质调查,研究区内向斜构造多以巨厚层的二迭系、石炭系石灰岩为主的碳酸盐岩组成的向斜核部及翼部,其核部和翼部的落水洞、洼地、地下暗河发育,表层岩溶带富水性较弱,表层岩溶泉发育较弱。中、上石炭系灰岩为向斜核部的较为紧密的褶皱构造,褶皱核部岩溶发育,有大型洼地、落水洞、溶洞、漏斗、地下河发育,而翼部岩溶发育稍差,表层岩溶泉发育(图3)。

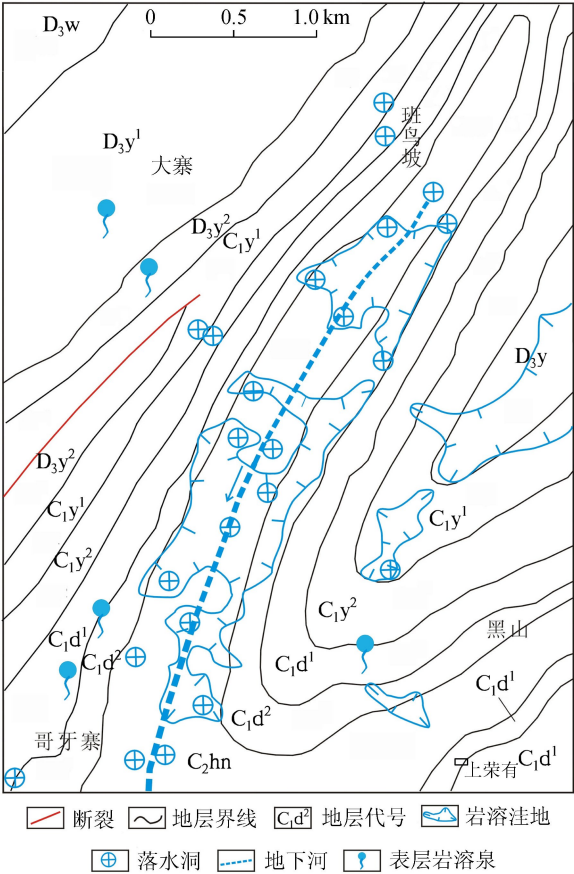


图3 大寨向斜岩溶分布

综上,不同的褶皱构造对表层岩溶泉发育的影响不同,褶皱构造对表层岩溶泉发育的影响主要通过控制地下岩溶发育,一般落水洞、漏斗、地下河较发育的地区,表层岩溶泉发育较弱,反之,表层岩溶泉较发育。

同理,断裂构造也是通过控制地层的岩溶发育情况来控制表层岩溶带的发育。研究区内,发育有北北东-北东向,北西-北西西向,近南北向及近东西向断裂。这种断裂构造经历了多期地壳运动,断裂的力学性质发生了改变,具有多期复合、改造的性质。不同时期、不同体系、不同性质、不同方向的断裂带及断裂带交汇区地表,往往沿断裂带发育有较多的线状分布的岩溶洼地、落水洞、消水洞、漏斗、溶洞、岩溶泉等,地下往往发育有较大规模的地下河,

而这些岩溶发育地区,表层岩溶泉发育较弱。研究区内西南侧张性断层、大型节理裂隙发育有尧花地下河系统、皇后地下河系统等,深部岩溶发育,表层岩溶带富水性较弱,表层岩溶泉发育较弱。而在研究区的北部、东南部,张性断层、大型裂隙节理相对较少,表层岩溶泉较发育,分布密度较高。

4 打狗河流域表层岩溶泉的水化学特征

为了进一步查明地形地貌、地层岩性、土壤植被、地质构造对表层岩溶泉的影响,对打狗河流域表层岩溶泉的水化学特征进行分析。利用野外调查所取的水样,对267个表层岩溶泉中的25个表层岩溶泉进行水化学分析,以确定表层岩溶泉水化学特征及其影响因素。

4.1 表层岩溶泉的水化学类型

选取的25个表层岩溶泉所处的地层岩性见表3。

表3 表层岩溶泉出露地层统计

地层代号	岩 性	表层岩溶泉个数
T ₁	灰色中层灰岩	1
P _{1m}	灰色中厚层灰岩	2
P _{1q}	深灰色中厚层灰岩	8
C _{2hn}	灰色中厚层白云岩	4
C _{1d} ²	灰色中厚层灰岩	9
D _{3y}	灰色中薄层白云岩	1

从 piper 三线图(图4)可以看出,打狗河流域的表层岩溶泉主要类型为 HCO₃-Ca 型,其中 B675、B115 点为 HCO₃-Mg-Ca 型,其出露地层分别为 D_{3y}、C_{2hn}¹ 地层,其地层岩性为白云岩。

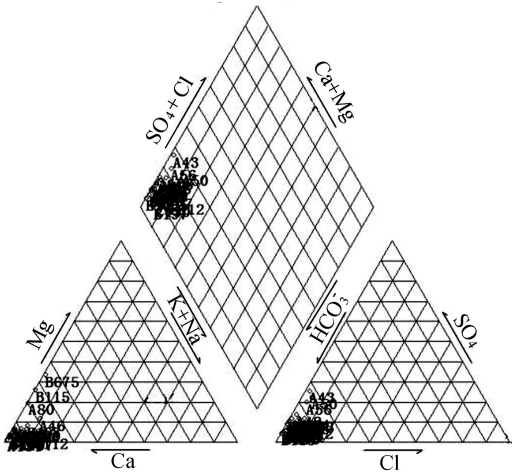


图4 水化学类型 piper 图

结合水文地质图及野外调查资料,另外3个C_{2hn}地层表层岩溶泉的泉流域范围仍在C_{2hn}地层,其水化学类型呈HCO₃-Ca型的主要原因是,白云石的溶解度要低于方解石的溶解度,由于表层岩

溶泉水的径流时间、径流路径较短,方解石未能充分溶解于地下水中,地下水中 Mg^{2+} 的含量比例要远小于 Ca^{2+} 离子的含量。打狗河流域表层岩溶水的水化学类型比较集中,常规离子中 K^+ 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 离子含量较少,主要以 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 为主,这主要因为受含水介质中的地层岩性控制,土壤植被对 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 浓度的影响较小。

4.2 pH 值

对各水样点的 pH 值进行统计,发现表层岩溶泉的 pH 值介于 6.55 ~ 7.29 之间,均值 6.98,总体 pH 值偏中性,与表层以下岩溶水相比,pH 值偏低。分析其原因,主要是因为大气降水进入表层岩溶带后,其中的弱酸离子尚未与岩石中的弱碱离子进行充分离子交换与吸附作用。这从另一方证明了表层岩溶泉受地形地貌控制,表层岩溶泉流域较小,表层岩溶水在表层岩溶带中的滞留时间较短,降水渗入其中,会很快从岩溶裂隙中排出,出露成泉。

4.3 饱和指数

饱和指数是地下水水化学研究中应用最广泛的一个指标,用于判断和研究矿物在地下水中的饱和状态。当饱和指数等于 0 时,矿物在水溶液中达到溶解平衡状态,即同一时间内溶解量与析出量相等;当饱和指数为负值时,说明矿物在水溶液中未达到平衡,处于非饱和状态,矿物继续溶解,且饱和指数的绝对值越大,溶蚀能力越强;当饱和指数为正值时,说明矿物在水溶液中处在过饱和状态,矿物溶解量小于析出量,将发生沉淀,且饱和指数值越大,沉淀趋势越强。饱和指数的定义为

$$S_i = \lg \frac{I_{IAP}}{K} \tag{1}$$

式中: S_i 为饱和指数; K 为在某一温度下矿物达到溶解平衡时的平衡常数; I_{IAP} 为矿物在溶解反应过程中相关组分的离子活度积(所有组分均为离子)。

利用现有的主要化学指标,采用水化模拟软件 Phreeqc 分别计算 25 个表层岩溶泉样品中的方解石饱和指数(S_{lc})和白云石饱和指数(S_{ld}),计算结果见图 5。在 S_{lc} 与 S_{ld} 散点图中,除第 7 号样品与第 24 号样品的 S_{lc} 值刚好达到饱和外,其他样品的 S_{lc} 值均为达到饱和值,其主要原因是表层岩溶中水岩相互作用时间较短,岩溶水与岩石中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 离子尚未达到溶解平衡状态,表层岩溶水就出露成泉。该原因与表层岩溶泉中 pH 值偏低的原因相同。从图 5 中可以看出, S_{lc} 值主要介于 0 ~ -1 之间,而 S_{ld} 值主要介于 -1 ~ -3 之间,主要原因是所取的样品所在地层的白云岩含量普遍低于方解石含量。

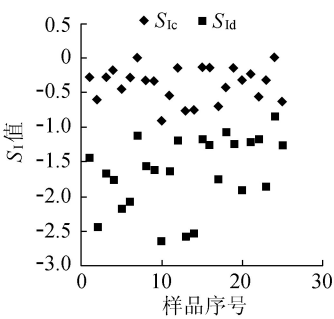


图 5 方解石、白云石饱和指数散点图

5 结 论

a. 打狗河流域表层岩溶泉主要发育于峰丛洼地、峰丛谷地的山坡上或者山脚下,在溶丘洼地、溶丘谷地中有少量发育,在峰林洼地、峰林谷地中未见发育;表层岩溶泉出露密度最高的地层是以白云岩为主的 C_1d^2 、 D_3y 、 D_3w 地层,其次是以泥质灰岩或者含有碎屑岩夹层的 D_2d^3 、 T_1y 、 P_1q 地层,最后是以纯灰岩为主的 C_3mp 、 C_2hn 、 C_1y^2 、 C_1y^1 地层;土壤和植被有利于表层岩溶带和表层岩溶泉的发育,植被越茂盛,表层岩溶泉出露的密度越高,森林地区岩溶泉密度是草地的 13 倍,是灌丛草地的 4 倍;地质构造主要通过控制地层岩溶发育程度来控制表层岩溶泉的发育,当地层中落水洞、漏斗、地下暗河较发育时,表层岩溶泉发育较少,反之愈多;在张性断层、大型节理较发育的研究区西南侧地下河系统发育,而表层岩溶泉少见。

b. 受含水介质控制,打狗河流域的表层岩溶泉水化学类型主要为 HCO_3-Ca 型,其中有少量的表层岩溶泉属于 $HCO_3-Mg-Ca$ 。含水介质中,地层岩性起主要作用,土壤植被对主要离子浓度的影响不大。受地形地貌影响,表层岩溶泉流域面积较小,在表层岩溶带中径流时间与径流路径较短,地下水未能与碳酸盐岩发生充分的离子交换吸附作用,使得其 pH 平均值偏低,为 6.98,未成弱碱性,其方解石饱和指数(S_{lc})和白云石饱和指数(S_{ld})均小于或等于零, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 尚未达到溶解平衡状态。因表层岩溶泉主要发育于构造不发育的地区,所以其水化学特征与地质构造的相关性不大。

参考文献:

[1] 袁道先,戴爱德,蔡五田,等. 中国南方裸露型岩溶峰丛山区岩溶水系统及其数学模型研究[M]. 南宁:广西师范大学出版社,1996.
[2] 袁道先. 现代岩溶学和全球变化研究[J]. 地学前缘, 1997, 4(1/2): 17-25. (YUAN Daoxian. Modern karstology and global change study [J]. Earth Science Frontiers,

- 1997,4(1/2):17-25. (in Chinese))
- [3] 刘再华. 表层岩溶带的水温特征及其与下部包气带的对比 [J]. 中国岩溶, 1991, 10 (4) : 277-282. (LIU Zaihua. Characteristics of water temperature in epikarst zone and its comparison with that in lower aeration zone [J]. Carsologica Sinica, 1991, 10 (4) : 277-282. (in Chinese))
- [4] 蒋忠诚. 中国南方表层岩溶带的特征及形成机理 [J]. 热带地理, 1998, 18 (4) : 322-326. (JIANG Zhongcheng. Features of epikarst zone in south china and formation mechanism [J]. Tropical Geography, 1998, 18 (4) : 322-326. (in Chinese))
- [5] 蒋忠诚, 袁道先. 表层岩溶带的岩溶动力学特征及其环境和资源意义 [J]. 地球学报, 1999, 20 (3) : 302-308. (JIANG Zhongcheng, YUAN Daoxian. Dynamics features of the epikarstzone and their significance in environments and resources [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1999, 20 (3) : 302-308. (in Chinese))
- [6] 蒋忠诚, 王瑞江, 裴建国, 等. 我国南方表层岩溶带及其对岩溶水的调蓄功能 [J]. 中国岩溶, 2001, 20 (2) : 106-110. (JIANG Zhongcheng, WANG Ruijiang, PEI Jianguo, et al. Epikarst zone in south China and its regulation function to karst water [J]. Carsologica Sinica, 2001, 20 (2) : 106-110. (in Chinese))
- [7] 刘再华, 袁道先. 中国典型表层岩溶系统的地球化学动态特征及其环境意义 [J]. 地质论评, 2000, 46 (3) : 324-327. (LIU Zaihua, YUAN Daoxian. Features of geochemical variations in typical epikarst systems of China and their environmental significance [J]. Geological Review, 2000, 46 (3) : 324-327. (in Chinese))
- [8] 章程, 曹建华. 不同植被条件下表层岩溶泉动态变化特征对比研究: 以广西马山县弄拉兰电堂泉和东旺泉为例 [J]. 中国岩溶, 2003, 22 (1) : 1-5. (ZHANG Cheng, CAO Jianhua. Seasonal and diurnal variation of physicochemistry of typical epikarst springs under different vegetation: a case study of Landiantang Spring and Dongwang Spring at Nongla Village, Mashan County, Guangxi [J]. Carsologica Sinica, 2003, 22 (1) : 1-5. (in Chinese))
- [9] 邹胜章, 朱远峰, 梁彬. 湘西洛塔表层岩溶泉的生态环境类型及水文特征 [J]. 地质前缘, 2008, 15 (4) : 190-197. (ZOU Shengzhang, ZHU Yuanfeng, LIANG Bin. Hydrologic features and the eco-environmental classification of epikarst springs in Luota, West of Hunan, China [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15 (4) : 190-197. (in Chinese))
- [10] 姚昕, 夏日元, 唐健生. 湘西洛塔岩溶生态微景观结构对表层岩溶泉的影响 [J]. 中国水土保持, 2006 (11) : 35-37. (YAO Xin, XIA Riyuan, TANG Jiansheng. Influence of Karst micro landscape structures to Karstic spring of surface layer in Luota of Western Hunan [J]. Soil and Water Conservation in China, 2006 (11) : 35-37. (in Chinese))
- [11] 姜光辉, 郭芳. 表层岩溶泉的水资源管理与开发工程设计 [J]. 水文, 2008, 28 (4) : 31-33. (JIANG Guanghui, GUO Fang. Water resources management and exploitation design of epikarst spring [J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28 (4) : 31-33. (in Chinese))
- [12] 邓艳, 蒋忠诚, 覃星铭, 等. 岩溶生态系统中不同植被枯落物对土壤理化性质的影响及岩溶效应 [J]. 生态学报, 2009, 29 (6) : 3307-3315. (DENG Yan, JIANG Zhongcheng, QIN Xingming, et al. Impacts of litter on physical and chemical soil properties and its Karst effects on different forested Karst ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29 (6) : 3307-3315. (in Chinese))

(收稿日期: 2013 - 01 - 23 编辑: 彭桃英)

(上接第 31 页)

- [6] 毕建新, 张杰. 烟台市王家庄地下水应急水源评价 [J]. 城市地质, 2012, 7 (1) : 18-19. (BI Jianxin, ZHANG Jie. The evaluation on the emergency groundwater sources in Wangjiazhuang, Yantai [J]. Urban Geology, 2012, 7 (1) : 18-19. (in Chinese))
- [7] 王素芬, 刘记来, 房利民, 等. 北京市应急水源工程续采可持续利用研究 [J]. 人民长江, 2010, 41 (24) : 20-24. (WANG Sufen, LIU Jilai, FANG Limin, et al. Study on sustainable exploitation of groundwater emergency water-supply field under emergency situation for Beijing City [J]. Yangtze River, 2010, 41 (24) : 20-24. (in Chinese))
- [8] 方星, 毛建国. 安徽省主要城市地下水应急水源建设初步探讨 [J]. 安徽地质, 2010, 20 (4) : 279-282. (FANG Xing, MAO Jianguo. Preliminary discussion on providing alternative groundwater sources in major cities in Anhui Province [J]. Geology of Anhui, 2010, 20 (4) : 279-282. (in Chinese))
- [9] 杨齐青, 马震, 孙晓明, 等. 华北主要城市地下水应急水源供水前景分析 [J]. 地质调查与研究, 2009, 32 (4) : 297-305. (YANG Qiqing, MA Zhen, SUN Xiaoming, et al. Analysis on the water supply prospect of the emergency water source in the major cities of North China [J]. Geological Survey and Research, 2009, 32 (4) : 297-305. (in Chinese))
- [10] 崔秋苹, 徐海振, 刘立军, 等. 河北省重要城市地下水应急水源地方案建议 [J]. 水文地质工程地质, 2010, 37 (6) : 12-16. (CUI Qiuping, XU Haizhen, LIU Lijun, et al. Plan suggestion for emergency water supply sources of key cities in Hebei Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37 (6) : 12-16. (in Chinese))
- [11] 浙江省地质环境监测院. 杭州市环境地质调查评价报告 [R]. 杭州: 浙江省地质环境监测院, 2009.
- [12] 浙江省地质环境监测总站. 杭州市之江国家旅游度假区供水水文地质评价报告 [R]. 杭州: 浙江省地质环境监测院, 1994.

(收稿日期: 2013 - 04 - 05 编辑: 彭桃英)