

· 非主题来稿 ·

四川盆地南缘红层咸水发育规律

董建兴^{1,2}, 孙东^{1,2}, 魏良帅^{3*}, 张志鹏^{1,2}, 黄瑞⁴, 杨海军^{1,2}

DONG Jianxing^{1,2}, SUN Dong^{1,2}, WEI Liangshuai^{3*}, ZHANG Zhipeng^{1,2}, HUANG Rui⁴, YANG Haijun^{1,2}

1.四川省地质矿产勘查开发局成都水文地质工程地质中心,四川成都610081;

2.四川华地环境科技有限责任公司,四川成都610081;

3.中国地质科学院探矿工艺研究所,四川成都611734;

4.荣县应急管理局,四川荣县643100

1.Chengdu Hydrogeology Survey & Engineering Geology Survey Center, Geology & Mineral Resources Exploration & Development Bureau of Sichuan Province, Chengdu 610081, Sichuan, China;

2.Sichuan Huadi Environmental Science and Technology Co., Ltd, Chengdu 610081, Sichuan, China;

3.Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu 611734, Sichuan, China;

4.Emergency Management Bureau of Rongxian, Rongxian 643100, Sichuan, China

摘要:四川盆地南缘分布的红层区,相比盆地内部具有地貌类型众多、地形坡度大、构造发育、地层倾角大的特点,对其咸水发育规律的研究鲜有报道。通过水文地质调查、水文地质钻探、取样分析测试等方法,发现咸水发育主要受地层岩性和地下水循环条件控制。红层砂泥岩中含可溶盐是咸水发育的物质基础,含泥岩地层中更易发育咸水。地下水类型、斜坡结构、深度及断层主要影响了地下水的循环交替条件,循环交替强烈发育淡水,循环交替滞缓则会发育咸水。断裂带深部成分复杂的咸水会因浅部地下水的开采而上涌,造成浅部地下水咸化。四川盆地南缘红层咸水发育规律的研究,对该区找水过程中避开咸水层具有借鉴意义。

关键词:溶解性总固体(TDS);地层岩性;地下水类型;斜坡结构;深度;断层

中图分类号:P642.13⁺2;P641 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)08-1394-08

Dong J X, Sun D, Wei L S, Zhang Z P, Huang R, Yang H J. Discussion on the development regularity of salt water in red beds in the southern margin of Sichuan Basin. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(8): 1394-1401

Abstract: Compared with the center of Sichuan Basin, the red beds distributed in the southern margin of it are characterized by many geomorphological types, large topographic slopes, well-developed structures and steep dipping, and there are few reports on the development regularity of the saline water in the red beds. Through investigation, hydrogeological drilling, sampling analysis and testing, it is found that the development of salt water is mainly controlled by lithology and groundwater circulation. Soluble salt in red sandstone and mudstone is the material basis for the development of salt water. Salt water is more likely to develop in mudstone-bearing strata. Groundwater type, slope structure, depth and fault mainly affect the cycling conditions of groundwater. Fresh water is strongly developed in cycling alternation, while salt water is developed in slow cycling alternation. Salt water with complex composition in the deep part of the fault zone will well up due to exploitation of shallow groundwater, resulting in salinization of shallow groundwater. The study result has reference significance for avoiding saline water layer in the process of water exploration in red beds in the southern margin of Sichuan Basin.

Key words: TDS; formation lithology; groundwater type; slope structure; depth; fault

收稿日期:2020-08-30;修订日期:2021-03-23

资助项目:中国地质调查局项目《乌蒙山连片贫困缺水区1:5万水文地质调查项目(中国地质科学院探矿工艺研究所)》(编号:DD20160287)

作者简介:董建兴(1984-),男,硕士,高级工程师,从事水文地质、环境地质调查与研究。E-mail:564834360@qq.com

*通信作者:魏良帅(1979-),男,高级工程师,从事水文地质、工程地质与环境地质调查与研究。E-mail:53831087@qq.com

四川盆地南缘红层区多数为水资源贫乏区。由于地质背景条件及水文、气候等多种因素的影响,区内土地蓄水和墒情较差,旱灾频繁,制约了当地社会经济的发展。鉴于此,四川省人民政府与自然资源部合作开展了“四川省红层丘陵区地下水调查与开发利用规划及农村找水打井示范工程”项目,历时 7 年,打井 213.5 万口,解决了 105 县近 800 万人的饮水困难;中国地质调查局实施了“乌蒙山连片贫困缺水地区 1:5 万水文地质调查”工作,涉及部分红层区,实施探采结合井多口,为当地居民供水,解决用水难题。在钻掘的红层水井中,部分为微咸水、咸水,不宜饮用,不仅没有利用价值,且会引发咸水与淡水混合,污染浅部淡水。为了打出适宜人蓄饮用的“甜水井”,保护浅部淡水资源,必须研究咸水的发育规律,避开咸水层,以提高成井效率,切实解决居民饮水困难。

许多学者、水文地质调查人员对西南红层严重缺水地区地下水的咸水发育特征进行了研究^{[1-5]①②},一致认为地层含盐是红层地下水咸水形成的物质基础,地下水的循环交替滞缓是咸水形成的必要条件。在浅部,地下水循环交替强烈,稀释作用强,一般为重碳酸盐型淡水;而在深部,地下水循环交替滞缓,水岩相互作用时间长,形成微咸水、咸水;地层平缓的地区比倾角大或陡倾的地区更易发育咸水^[6]。

前人研究主要针对四川盆地内部地层平缓区或滇中地区,含盐地层、深度为影响咸水发育的主要因素,尚未针对盆周构造发育地区开展相关研究,亦未考虑斜坡结构、断裂构造对咸水发育的控制作用。本文在前人研究基础上,通过水文地质调查、水文地质钻探、取样分析测试等手段,系统探讨四川盆地南缘盆周地层岩性、地下水循环条件对咸水发育的影响。

1 研究区概况

研究区位于四川盆地南缘屏山县、绥江县一带,处于川滇南北向构造-小江断裂带之东缘与其东侧的北东向构造的结合部位,属于旋扭构造中的马边-沐川帚状构造体系,由一系列褶皱轴面及伴生的断裂面组成旋回面,收敛于马边,向东撒开,呈帚状。地貌类型主要有构造侵蚀阶梯状中-高山地貌,条形龙脊状中-高山地貌,岩溶中山峡谷、环状

溶蚀山地地貌等,出露地层主要为三叠系飞仙关组(T_{1f})、嘉陵江组(T_{1j})、雷口坡组(T_{2l})、须家河组(T_{3xj}),侏罗系自流井组(J_{1-2z})、沙溪庙组(J_{2s})、遂宁组(J_{3sn})、蓬莱镇组(J_{3p}),下白垩统(K_1)等。其中,侏罗系、白垩系为红层砂泥岩,地层倾角 $6^\circ \sim 80^\circ$,普遍大于盆地中部红层区的 $1^\circ \sim 5^\circ$ 。

研究区地下水类型众多,按大类可分为松散岩类孔隙水、碳酸盐岩裂隙岩溶水、碎屑岩孔隙裂隙水、岩浆岩变质岩裂隙水 4 种。其中,红层区主要分布碎屑岩孔隙裂隙含水岩组,单井涌水量一般小于 $300 \text{ m}^3/\text{d}$ (图 1)。

在红层区碎屑岩孔隙裂隙水大类中,砂岩孔隙裂隙水主要赋存于下白垩统(K_1)中;砂岩夹泥岩孔隙裂隙水主要赋存于中侏罗统沙溪庙组(J_{2s})、上侏罗统蓬莱镇组(J_{3p})中;泥岩夹砂岩孔隙裂隙水主要赋存于中-下侏罗统自流井组(J_{1-2z})、上侏罗统遂宁组(J_{3sn})中。

在红层区碎屑岩孔隙裂隙含水层中,浅部主要赋存风化带裂隙水;深部主要赋存构造裂隙水,其中,砂岩夹泥岩、泥岩夹砂岩孔隙裂隙含水层中赋存层间裂隙水,一般具承压性。

2 研究方法

本次通过调查、钻探、取样分析测试等手段,查明研究区地层岩性、含水层结构、斜坡结构、构造条件、水质特征等;利用机民井、钻孔地下水中的溶解性总固体(TDS)指标,参照水文地质手册(第二版,表 2-5-3)^[7],判别地下水的咸淡,TDS $<1 \text{ g/L}$ 为淡水,TDS $=1 \sim 3 \text{ g/L}$ 为微咸水,TDS $=3 \sim 10 \text{ g/L}$ 为咸水;分析地层岩性、地下水循环条件对地下水 TDS 的控制作用,探讨咸水发育规律。

3 咸淡水发育特征

本次在研究区共统计了 25 处钻孔、机民井的水质数据,其中包括非红层水井、红层水井、断裂带上红层水井。水井的 TDS 数据显示出咸淡水的发育规律,分别叙述如下。

3.1 非红层区水井 TDS 特征

非红层区水井中地下水的 TDS 值普遍较低,最大值为 937 mg/L ,未发育咸水(表 1)。TDS 最高的 ZK36 发育于顺向坡灰岩地层中,岩层倾角与地形坡度基本一致,径流排泄条件较差;TDS 较高的

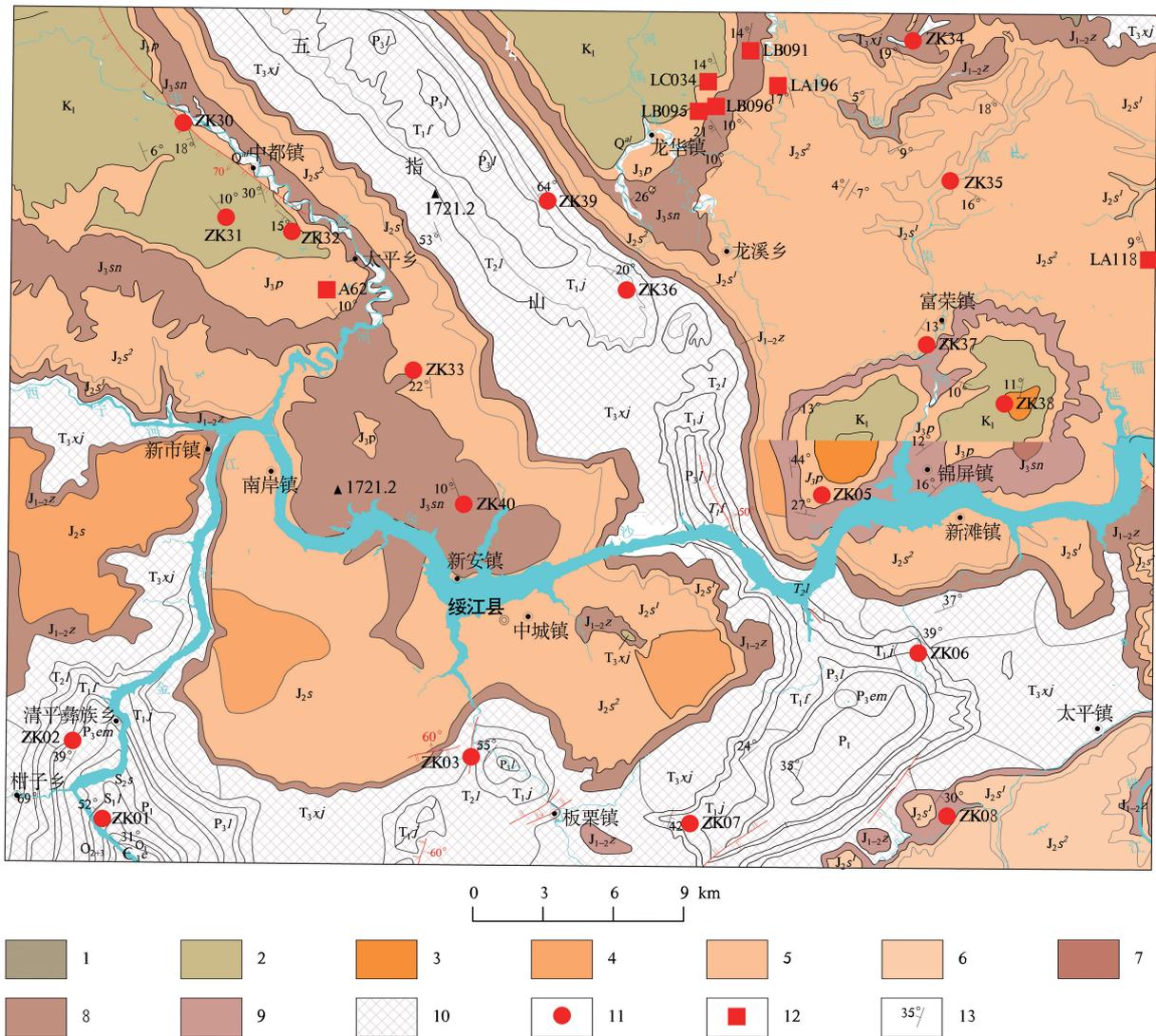


图1 研究区水文地质略图

Fig. 1 Simplified hydrogeological map of the study area

砂岩孔隙裂隙水:1—单井涌水量 50~100 m³/d;2—单井涌水量 10~50 m³/d;砂岩夹泥岩孔隙裂隙水:3—单井涌水量大于 300 m³/d;4—单井涌水量 50~100 m³/d;5—单井涌水量 10~50 m³/d;6—单井涌水量小于 10 m³/d;泥岩夹砂岩孔隙裂隙水:7—单井涌水量大于 300 m³/d;8—单井涌水量 10~50 m³/d;9—单井涌水量小于 10 m³/d;10—非红层地下水;11—钻孔;12—机井;13—地层产状;ε₃e—上寒武统二道水组;O₁—下奥陶统;O₂₊₃—中上奥陶统;S₁l—下志留统龙马溪组;S₂s—中志留统石门坎组;P₁l—下二叠统;P₂l—中二叠统梁山组;P₃em—上二叠统峨眉山组;P₃l—上二叠统乐平组;T₁j—下三叠统嘉陵江组;T₂l—中三叠统雷口组;T₃xj—上三叠统须家河组;J₁₋₂z—中下侏罗统自流井组;J₂s¹—中侏罗统下沙溪庙组;J₂s²—中侏罗统上沙溪庙组;J₃sn—上侏罗统遂宁组;J₃p—上侏罗统蓬莱镇组;K₁—下白垩统;K₂j—上白垩统夹关组

ZK03 发育于逆向坡中,ZK07 发育于切向坡(层面内倾)中,径流排泄条件均不佳。

3.2 红层区水井 TDS 特征

由表 2 可得,红层区水井中地下水的 TDS 值有以下特征。

(1) TDS 与岩性具有一定的相关性(表 2;图 2)。砂岩、泥质砂岩中的井水 TDS 一般较低,均未超过 450 mg/L。砂泥岩互层、含泥岩地层(砂质泥

岩+砂岩、钙质泥岩+砂岩)中的井水 TDS 较高,超过 1000 mg/L 的 3 个水点均发育于砂泥岩互层中;ZK08 位于砂泥岩互层中,其 TDS 较低,可能受到斜坡结构利于地下水循环交替的影响;LA118 也位于砂泥岩互层中,TDS 亦较低,可能受到井深浅、浅部地下水径流快的影响。

(2) TDS 与地下水类型具有一定的相关性(表 2;图 3)。风化带裂隙水、构造裂隙水的 TDS 一般

表 1 非红层水井 TDS 特征

Table 1 Characteristics of total dissolved solids in non-red water wells

编号	孔深/m	地层	岩性	岩层产状	斜坡坡向	斜坡坡度	TDS/(mg · L ⁻¹)
ZK34	101.00	T ₃ xj	长石石英砂岩、钙质泥岩	243° ∠ 19°	159°	23°	93
ZK36	129.93	T ₁ j	灰岩	43° ∠ 20°	57°	21°	937
ZK39	114.10	T ₂ l	灰岩	57° ∠ 64°	沟谷中		202.01
ZK01	131.00	S ₁ l; O ₂₊₃	砂泥岩、白云岩	313° ∠ 52°	230°	31°	300
ZK02	150.00	T ₂ l; T ₁ j	灰岩	297° ∠ 39°	286°	24°	312
ZK03	200.00	P ₂ l; P ₃ em	砂泥岩; 玄武岩	307° ∠ 55°	117°	45°	510
ZK06	142.10	T ₁ j	碳酸盐岩	41° ∠ 39°	94°	32°	312
ZK07	120.00	T ₁ j	碳酸盐岩	107° ∠ 42°	352°	29°	542

注: S₁l—下志留统龙马溪组; O₂₊₃—中上奥陶统; T₁j—下三叠统嘉陵江组; T₂l—中三叠统雷口坡组; T₃xj—上三叠统须家河组; P₂l—中二叠统梁山组; P₃em—上二叠统峨眉组

表 2 红层水井 TDS 特征

Table 2 Characteristics of total dissolved solids in red bed wells

编号	孔深/m	地层	岩性	岩层产状	斜坡坡向	斜坡坡度	斜坡结构	主要地下水类型	TDS / (mg · L ⁻¹)
A62	150	J ₃ p	砂泥岩互层	53° ∠ 10°	28°	9°	顺向坡, 倾角>坡角	层间裂隙承压水	2417
ZK05	131	J ₃ sm	砂泥岩互层	11° ∠ 27°	77°	25°	切向坡(层面外倾), 倾角>坡角	层间裂隙水	1640
ZK33	72.3	J ₃ s ²	砂泥岩互层	265° ∠ 22°	260°	20°	顺向坡, 倾角>坡角	层间裂隙水	1300
ZK37	170.54	J ₂ s ²	砂质泥岩、砂岩	124° ∠ 13°	259°	19°	切向坡(层面内倾)	构造裂隙水	684
LA196	80	J ₂ s ²	砂岩、砂质泥岩	256° ∠ 17°	309°	18°~23°	切向坡(层面外倾), 倾角<坡角	构造裂隙水	590.13
LB096	53	J ₃ sm	砂泥岩互层	227° ∠ 10°	9°	17°	切向坡(层面内倾)	层间裂隙水	507.38
ZK32	100.45	K ₁	砂岩	220° ∠ 15°	66°	15°	逆向坡	构造裂隙水	431.74
LB095	57	J ₃ p	钙质泥岩、砂岩	239° ∠ 21°	243°	20°	顺向坡, 倾角>坡角	风化带孔隙裂隙水	410.79
LA118	20	J ₂ s ²	砂泥岩互层	251° ∠ 9°	50°	19°	逆向坡	风化带孔隙裂隙水	233.78
LC034	70	J ₃ p	泥质砂岩	251° ∠ 14°	218°	15°	顺向坡, 倾角≈坡角	构造裂隙水	233.78
ZK31	101.9	K ₁	砂岩	53° ∠ 10°	12°	11°	切向坡(层面外倾), 倾角≈坡角	构造裂隙水	210.1
ZK08	135	J ₁₋₂ z	砂泥岩互层	124° ∠ 30°	130	37	顺向坡, 倾角<坡角	层间裂隙水	146
ZK35	100.6	J ₂ s ¹	泥质砂岩、砂岩	208° ∠ 16°	121°	36°	切向坡(层面外倾), 倾角<坡角	构造裂隙水	114
ZK38	102.4	K ₂ j	砂岩	281° ∠ 11°	241°	11°	切向坡(层面外倾), 倾角=坡角	构造裂隙水	102
LB091	2.8	J ₃ sm	泥质砂岩	282° ∠ 14°	295°	10°	顺向坡, 倾角>坡角	风化带裂隙水	87.44

注: J₁₋₂z—中下侏罗统自流井组; J₂s¹—中侏罗统下沙溪庙组; J₂s²—中侏罗统上沙溪庙组; J₃sm—上侏罗统遂宁组; J₃p—上侏罗统蓬莱镇组; K₁—下白垩统; K₂j—上白垩统夹关组

较低, 均未超过 700 mg/L。层间裂隙水的 TDS 相对较高, 超过 1000 mg/L 的 3 个水点均发育于层间裂隙水中; ZK08、LB096 位于层间裂隙水中, 其 TDS 较低, 可能受到斜坡结构利于地下水循环交替的影响。

(3) TDS 与水井的深度具有一定的相关性(表 2; 图 4), 在层间裂隙水和风化带裂隙水中, TDS 与

井深具有较好的正相关性。TDS 较高的一般发育于较深的水井中, 超过 1000 mg/L 的水点(ZK33、A62、ZK05) 均位于井深大于 60 m 的层间裂隙水中; ZK08 井深大于 100 m, 地下水 TDS 也较低, 认为是由于斜坡结构利于地下水循环交替所致。井深小于 60 m 的风化带裂隙水, TDS 虽然均小于 510 mg/L, 但同样存在随着井深增加而增大的趋势。

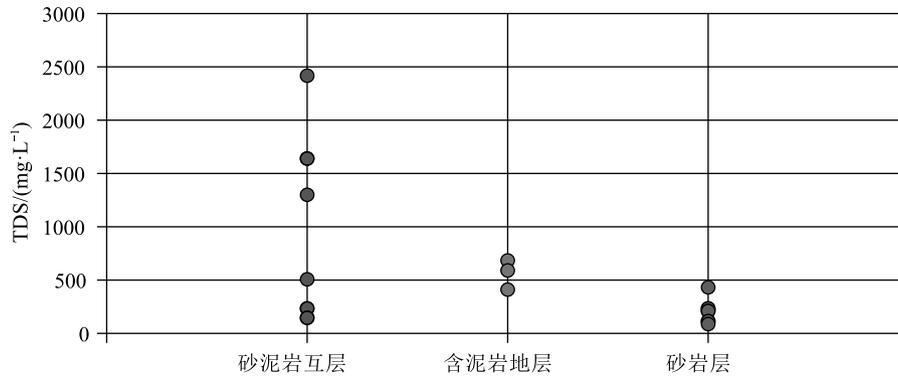


图2 含水层岩性与 TDS 对应关系图

Fig. 2 Correspondence between lithology of aquifer and total dissolved solids

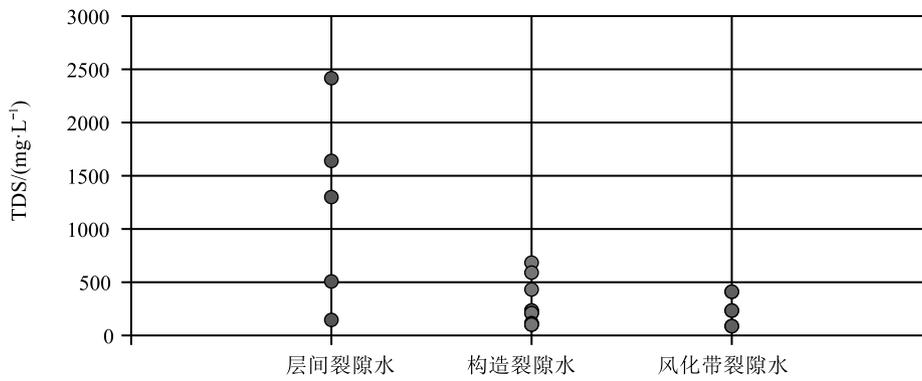


图3 地下水类型与 TDS 对应关系图

Fig. 3 Correspondence between groundwater types and total dissolved solids

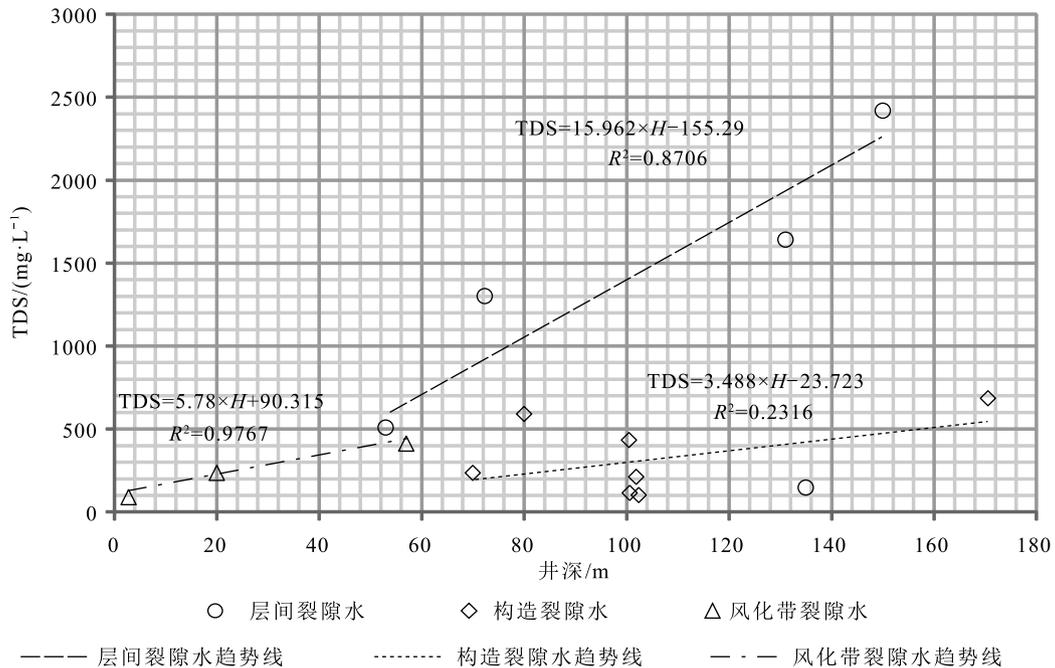


图4 地下水类型、水井深度(H)与 TDS 的对应关系图

Fig. 4 Correspondence diagram of groundwater type, well depth and total dissolved solids

(4)在层间裂隙水中,TDS 与斜坡结构存在一定的相关性(表 2)。在层间裂隙水中,不利于地下水排泄的斜坡结构条件下,井水的 TDS 较高,如逆向坡、切向坡(层面内倾)、顺向坡(岩层倾角>坡角)或切向坡(层面外倾,倾角>坡角)等。超过 1000 mg/L 的 3 个水点均发育于顺向坡(岩层倾角>坡角)的斜坡结构中;在有利于地下水排泄的斜坡结构条件下,井水的 TDS 较低,如 ZK08。

3.3 断裂带上水井 TDS 特征

由表 3 可知,在断裂带上的红层水井,成井后立即(2017 年 8 月)测定的 TDS 均在 1000 mg/L 以下,适宜人畜饮用。钻孔开采约一个月之后再次测定水中的 TDS,均超过 2000 mg/L,达到微咸水标准,认为是断裂带沟通深部咸水层造成的。

3.4 咸淡水发育规律

在上述 25 个水点中,发育淡水 20 处,微咸水 5 处。其发育具备一定的规律:在非红层地区水点均为淡水;在红层区,淡水一般发育于砂岩、泥质砂岩的风化带裂隙水、构造裂隙水或斜坡结构利于地下水排泄的地区;咸水发育于井深大、砂泥岩互层的层间裂隙含水层,且斜坡结构不利于地下水排泄的地区;位于红层区的断裂带上 2 个水点,呈现出先淡后咸的特点。

4 成因模式

4.1 地层岩性的影响

地层岩性决定了地下水中盐分的来源。在非红层区碳酸盐岩、玄武岩、石英砂岩中,地下水的 TDS 一般都较低,达不到微咸水的标准;而在红层砂泥岩地层中,地下水的 TDS 较高,尤其在砂泥岩互层中发育微咸水。

红层区砂泥岩地下水的 TDS 相比非红层区岩性高,主要是受沉积环境的影响,在红层中普遍含石膏、岩盐、芒硝等,NaCl、Na₂SO₄、CaSO₄、CaCl₂等可溶性矿物含量较高,且易溶于水,在地下水的溶

解作用下,矿物中的离子进入地下水中,使地下水的 TDS 升高^[8]。

红层中砂泥岩互层或含泥岩地层中地下水的 TDS 高于砂岩层,主要是由于砂岩中的可溶盐成分(方解石)以胶结物的形式充填于碎屑颗粒之间,易溶盐(石膏、芒硝、钙芒硝)成分多以薄膜或夹层分布在层间;而泥岩中的可溶盐和易溶盐成分,以晶粒状、晶簇状、团块状、条带状、薄层状分布在岩层中,比砂岩中含量多^[9-10]。在干旱蒸发的环境下,水体较浅,砂体基本不发育,沉积物主要为泥岩和膏盐岩互层,与砂岩相比,易溶的膏盐岩与泥岩具有更好的伴生性^[11]。

4.2 地下水循环条件的影响

地下水的循环条件决定了地下水中盐分的积累,一般地下水循环条件好,盐分不易积累,发育淡水,反之则容易积累,发育咸水。地下水的循环条件受地下水类型、斜坡结构,井深、断层等因素的影响。

4.2.1 地下水类型

由表 2、图 3 可知,风化带裂隙水和浅层构造裂隙水中未发育咸水,而层间裂隙水中发育微咸水,是由于地下水循环条件的差异造成的。

在风化带裂隙含水层中,裂隙发育密集均匀,深度浅,加之盆地南缘地形坡度较大,地下水循环条件较好,未发育咸水。

浅部构造裂隙水主要赋存于砂岩、泥质砂岩等脆性地层中,且无上覆盖层,裂隙发育受构造应力场的控制,具有明显而稳定的方向性,比风化带裂隙宽,发育深度深,地下水循环径流条件较好,未发育咸水。

层间裂隙水主要发育于砂泥岩互层的地层中,泥岩中裂隙不发育为隔水层,而砂岩中发育较宽大的构造裂隙为含水层^[12](图 5)。地下水受泥岩隔水层的限制,在井深大、斜坡结构不利于排泄的条件下,地下水的循环条件差,易于盐分积累,发育微咸水或咸水^[13]。

表 3 断裂带上红层水井 TDS 特征

Table 3 Characteristics of total dissolved solids in red water wells on fault zone

编号	孔深	水位	地层	岩性	构造部位	2017 年 8 月	2017 年 9 月
						TDS/(mg · L ⁻¹)	TDS/(mg · L ⁻¹)
ZK40	100.30	29.00	J ₃ sn	泥岩夹粉砂岩	小断层上盘	379.76	2000
ZK30	119.62	95.00	K ₁ ;J ₃ P	钙质泥岩、粉砂岩;砂岩	中都断层带	507.92	2310

注:J₃sn—上侏罗统遂宁组;J₃P—上侏罗统蓬莱镇组;K₁—下白垩统

4.2.2 斜坡结构

在层间裂隙含水层中,地下水在层间裂隙露头处接受大气降雨的补给,沿层间裂隙发育方向,由高处向低处运移。斜坡结构会影响地下水的径流、排泄条件,导致地下水与围岩相互作用时间不同,影响 TDS^[14-16]。

(1) 顺向坡或切向坡(层面外倾)的情况下,岩层倾角小于坡角,含水层在坡面上存在露头,可以很好地排泄地下水,地下水循环条件较好,地下水与围岩的相互作用时间短,不易形成咸水,钻孔多为淡水孔(图 6-a)。

(2) 顺向坡或切向坡(层面外倾)的情况下,岩层倾角大于等于坡角,含水层在坡面上不存在露头,地下水得不到很好地排泄,循环条件差,地下水与围岩的相互作用时间长,易形成微咸水;当侧向(与现有剖面方向垂直)具有沟谷排泄通道时,也往往是淡水(本次未讨论),认为侧向无沟谷排泄通道(图 6-b、c)。

(3) 逆向坡或切向坡(层面内倾)的情况下,岩层内倾,含水层在坡面露头处接受降雨补给后,向山体内部运移,地下水径流、排泄条件差,几乎处于停滞状态,地下水与围岩的相互作用时间长,易形成微咸水(图 6-d)。

4.2.3 深度

在层间裂隙水和风化带裂隙水中,地下水的 TDS 随着深度的增加而升高,是由于裂隙的发育程度随着深度增加而减弱,使地下水循环条件随着深度的增加而变差^{[6, 17]③}。

4.2.4 断层

在断层带实施的 2 个钻孔,刚成井后测试地下水 TDS 均较低,开采一段时间后再次测试, TDS 升至 2000 mg/L 以上。一般认为咸水井抽水开采,地下水径流循环条件增强,同时将岩层中的可溶盐分带走,井水的 TDS 会呈现降低的趋势,但此处相反。钻孔前,断层带浅部地下水循环条件好,为淡水;深部地下水循环条件差,为经过深循环、成分复杂的咸水^④。随着钻孔水的开采,浅部淡水减少,同时水头降低,深部咸水在压力的驱使下上涌与浅层水混合,导致水质 TDS 增高。

5 结论

四川盆地南缘红层区咸水的发育主要受地层岩性和地下水循环条件的控制。

(1) 地层岩性决定了地下水中盐分的来源。红

层砂泥岩中普遍含 NaCl、Na₂SO₄、CaSO₄、CaCl₂ 等可溶盐,是其发育咸水的物质基础;泥岩中的可溶盐和易溶盐成分比砂岩中含量多,且沉积于干旱蒸发的环境下,与膏盐岩具有更好的伴生性,故含泥岩地层中更易发育咸水。

(2) 咸水发育受地下水循环条件的影响,而地下水循环条件主要受地下水类型、斜坡结构、深度和断层的控制。①在风化带裂隙和浅部构造裂隙含水层中,地下水循环条件较好,咸水不发育;而在层间裂隙水中,受泥岩隔水层的限制,在斜坡结构不利于排泄、深度大的条件下,地下水循环条件差,易发育咸水。②斜坡结构控制着层间裂隙地下水的循环条件。当在顺向坡或切向坡(层面外倾),且倾角小于坡角条件下,地下水循环交替强烈,发育淡水;当在顺向坡或切向坡(层面外倾),且倾角大于坡角,或逆向坡、切向坡(层面内倾)的条件下,坡面沟谷不发育时,地下水排泄不畅,循环交替滞缓,易发育咸水。③在层间裂隙和风化带裂隙含水层中,随着深度的增加,裂隙的发育程度减弱,地下水循环条件变差,地下水会由淡水转变为微咸水,甚至是咸水。④在断裂带,浅部地下水循环条件好为淡水,深部地下水循环条件差为咸水。浅部地下水在开采过程中,水头降低,深部地下水在水头差的驱使下向浅部运移,导致井水变咸。

致谢: 调查、水文地质钻探、取样等工作均由项目组人员完成,样品测试由四川省地矿局成都综合岩矿测试中心完成,审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见,谨此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 朱春林,李智毅,饶春富,等.滇中红层浅层地下水的特征和农村供水示范工程的建立[J].地质通报,2010,29(4): 610-615.
- [2] 张福存,鄢毅,刘安云,等.西南红层浅层地下水特征及其开发利用模式[J].水文地质工程地质,2008,(3): 53-56.
- [3] 陈倩.四川红层地下水水化学特征及水资源开发工程适宜性研究[D].成都理工大学博士学位论文,2011.
- [4] 苏培东.川中红层区地下水特征及勘探开发方法探讨[J].水文,2007,27(4): 38-40.
- [5] 陈倩,毛郁,李成.四川泸州红层区浅层地下水水化学特征分析[J].中国测试,2013,39(6): 42-45.
- [6] 旷正国,樊新庆.重庆西部红层浅层地下水的咸淡水问题[C]//地下水勘察与监测技术方法经验交流会.河北保定,2003: 275-280.
- [7] 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.
- [8] 朱春林.滇中红层地下水富集规律及开发利用研究[D].中国地质大学(北京)博士学位论文,2010.
- [9] 周绪纶.四川盆地红层浅层风化带裂隙水及其合理开发利用[J].

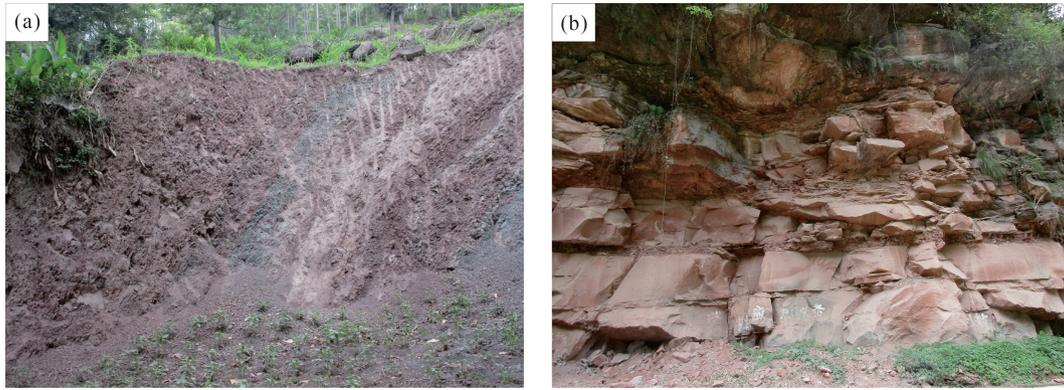


图 5 泥岩与砂岩裂隙发育特征对比

Fig. 5 Comparison of fracture development characteristics between mudstone and sandstone
a—泥岩裂隙特征; b—砂岩裂隙特征

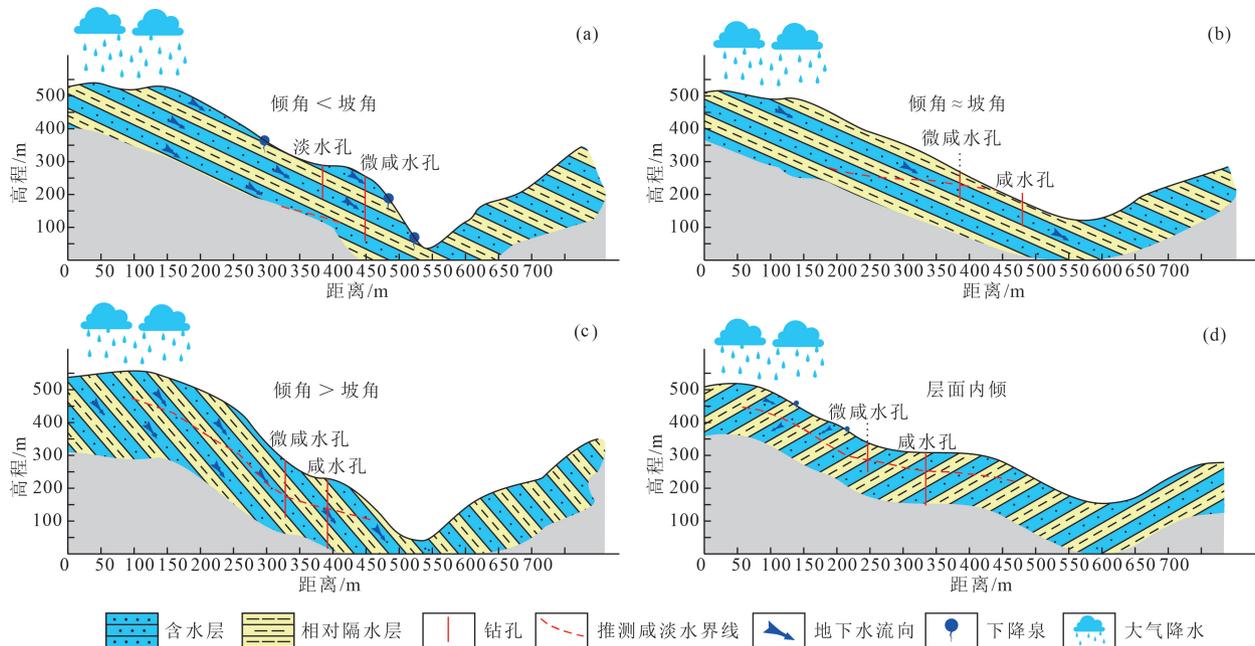


图 6 砂泥岩互层中咸水成因模式示意图

Fig. 6 Schematic diagram of salt water genetic model in interbedded sandstone and mudstone

四川地质量报,2007,27(3): 184-191.

[10] 彭华,吴志才.关于红层特点及分布规律的探讨[J].中山大学学报(自然科学版),2003,42(5): 109-113.
[11] 操应长,王健,高永进,等.济阳拗陷东营凹陷古近系红层—膏盐层沉积特征及模式[J].古地质量报,2010,13(4): 375-386.
[12] 李志勇,黎义勇,黄长生,等.赣江流域红层盆地典型构造样式与地下水动力学模式[J].地质通报,2020,39(12): 1873-1882.
[13] 聂世平.川中北白垩系红层咸水水文地质特征及形成条件的初探[J].水文地质工程地质,1986,(5): 20-22.
[14] 朱春林,邢志会,饶春富,等.滇中红层含盐层水文地质特征[J].云南地理环境研究,2009,21(6): 1-7.
[15] 孙熠,邓太平,刘玉洁,等.四川红层分布区地下水水化学若干问题探讨—以自贡市为例[J].西南民族大学学报(自然科学版),2007,

33(3): 408-413.

[16] 樊新庆,李彪,温金梅,等.重庆市红层地区饮用水水质问题及饮水对策研究[J].中国农村水利水电,2010,(12): 141-142.
[17] 成六三.重庆市红层地下水资源开发利用现状及对策[J].水资源开发与管理,2018,(9): 70-73.
①四川省地质局二〇八地质队.筠连幅、叙永幅 1:20 万区域水文地质普查报告.1980.
②云南省地质局水文地质工程地质队革命委员会.泸州幅 1:20 万区域水文地质普查报告.1977.
③四川省地质局水文地质工程地质队.犍为幅 1:20 万区域水文地质普查报告.1980.
④云南省地质局水文地质工程地质队革命委员会.宜宾幅 1:20 万区域水文地质普查报告.1977.