四川省简阳市地下水水化学特征及灌溉适宜性

张志强[1,3,4]，张 强[2]，刘超飞[1]，王超月[1,3,4]，付晓刚[1,3,4]，闫佰忠[1,3,4]

(1.河北地质大学，河北 石家庄 050031；2.成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室，四川 成都 610059；3.河北省水资源可持续利用与开发重点实验室，河北 石家庄 050031；4.河北省水资源可持续利用与产业结构优化协同创新中心，河北 石家庄 050031)

摘 要：[目的] 对四川省简阳市地下水水化学特征与灌溉适宜性进行分析和评价，为合理开发该区地下水资源提供科学依据。[方法] 利用 Gibbs 图、离子比值系数及多种统计分析方法，研究其浅表层与中深层地下水水化学特征，并将熵权理论与模糊物元法相结合，借助 Matlab 建立基于熵权的模糊物元模型，对地下水水质进行综合评价。[结果] 研究区浅表层主要分布淡水，中深层主要为微咸水，由浅至深地下水水化学类型由 HCO_3-Ca，HCO_3-Ca·Mg 型转化为 HCO_3-NaCa，HCO_3·SO_4-Ca-Mg，SO_4-Na·Ca 型。研究区地下水水化学成分主要受控于岩石风化作用，主要受岩盐、方解石、石膏、硅酸盐矿物的溶解及阳离子交替吸附作用的影响。浅表层地下水受人类活动影响比较明显；中深层地下水受深层盐卤水越流混合作用影响较明显。[结论] 研究区浅表层地下水水质良好，适宜用做灌溉水源，由浅至深，地下水水质逐渐变差，中深层地下水不宜长期用于农业灌溉。

关键词：地下水；水化学特征；模糊物元；熵权；水质评价

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2018)04-0067-08 **中图分类号**：X824

文献参数：张志强，张强，刘超飞，等.四川省简阳市地下水水化学特征及灌溉适宜性[J].水土保持通报，2018,38(4):67-74. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.011. Zhang Zhiqiang, Zhang Qiang, Liu Chaofei, et al. Hydrochemistry characteristics of groundwater and its suitability for irrigation in Jianyang City of Sichuan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(4):67-74.

Hydrochemistry Characteristics of Groundwater and Its Suitability for Irrigation in Jianyang City of Sichuan Province

ZHANG Zhiqiang[1,3,4], ZHANG Qiang[2], LIU Chaofei[1],
WANG Chaoyue[1,3,4], FU Xiaogang[1,3,4], YAN Baizhong[1,3,4]

(1. *Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei* 050031, *China*; 2. *State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan* 610059, *China*; 3. *Hebei Province Key Laboratory of Sustained Utilization and Development of Water Resource, Shijiazhuang, Hebei* 050031, *China*; 4. *Hebei Province Collaborative Innovation Center for Sustainable Utilization of Water Resources and Optimization of Industrial Structure, Shijiazhuang, Hebei* 050031, *China*)

Abstract: [Objective] In order to reveal the hydrochemical characterization of groundwater and provide a theoretical basis for the rational exploitation of groundwater resources, the hydrochemical characteristics and irrigation suitability of groundwater in Jianyang City of Sichuan Province were analyzed and evaluated. [Methods] Some research methods such as Gibbs plot, molar ratios and other statistical analysis were employed to study the hydrochemical characterization of groundwater in this area. Combining the entropy weight theory with the fuzzy matter-element method, the fuzzy matter-element model based on entropy weight is established by using Matlab to evaluate the groundwater quality comprehensively. [Results] The results indicate that groundwater in the study area is fresh water for shallow aquifers and brackish water for middle-deep aquifers. The shallow groundwater was dominated by the HCO_3-Ca and HCO_3-Ca·Mg types,

收稿日期：2018-01-25 **修回日期**：2018-02-21

资助项目：国家自然科学基金面上项目“岩溶隧道涌突水量计算方法深化与应用适宜性研究”(41472275)；河北省自然科学基金项目(D201843040)；河北地质大学青年科技基金项目(QN201701)

第一作者：张志强(1990—)，男(汉族)，山东省德州市人，助教，硕士，主要从事水文地质与环境地质研究。E-mail：zzqiang187@163.com。

通讯作者：张强(1971—)，男(汉族)，辽宁省营口市人，副教授，博士，主要从事水文地质、环境地质的教学与科研工作。E-mail：zhangqiang-cdut@qq.com。

and the middle-deep groundwater was dominated by the HCO_3-Na · Ca, HCO_3 · SO_4-Ca · Mg, SO_4-Na · Ca types. The groundwater in the study area was primarily controlled by weathering of rocks, including the dissolution of minerals(halite, calcite, gypsum and silicate) and ion-exchange adsorption. The shallow groundwater was primarily affected by human activities, and the middle-deep groundwater was affected by mixing from deep brine. [Conclusion] The results of comprehensive evaluation of water quality show that the shallow groundwater is suitable for agricultural irrigation, but the middle-deep groundwater is not suitable for agricultural irrigation in the long run. The groundwater quality gradually become worse from shallow aquifers to middle-deep aquifers.

Keywords: groundwater; hydrochemical characterization; fuzzy matter-element; entropy weight; water quality evaluation

地下水是重要的供水水源,尤其是在我国西南红层干旱区,水资源供需矛盾十分突出[1]。地下水水质的优劣直接制约着人们的生产生活,地下水中各离子组分的含量及分布特征是影响地下水水质的主要因素[2]。对地下水水化学特征的研究,能够了解地下水水质面貌、形成机制及演化规律,国内外专家学者在此方面已开展了大量的研究工作[3-7]。在了解地下水水化学特征的基础上,探索有效的研究方法合理评价地下水资源,以指导农业生产活动,是目前地下水环境研究亟待解决的问题。Giridharan 等[8]通过分析印度 Cooum 河地区地下水中主要离子成分,发现地下水水质主要受到碳酸盐、硅酸盐矿物的溶解及离子交换作用控制,并分别利用钠吸附比(SAR)、残余性碳酸钠(RSC)等单项指标分析了研究区地下水用于农业灌溉的适宜性。Varol 等[9]利用 R 型因子分析研究了土耳其 Tefenni 平原地区地下水水化学成分形成过程中所发生的水岩相互作用,并通过比较丰水期与枯水期 Na%的变化规律,发现枯水期地下水水质更不利于农业灌溉。Zouahri 等[10]利用 USSL 分类法研究发现,摩洛哥西北部地区地下水灌溉产生土壤盐害的风险较高,而产生土壤碱害的风险较低。何锦等[11]利用电导率(EC)、钠吸附比(SAR)等指标证实了沧州地区微咸水灌溉是土壤盐害和碱害发生的主要原因。此外,涉及灌溉水质评价的研究方法还有 Wilcox 分类法[12]、盐度与碱度法[13]、灌溉系数法等。多数研究方法都是利用单项指标分别对盐害和碱害风险进行评估,评价结果缺乏整体性、综合性。四川省简阳市作为我国西南红层干旱缺水地区的典型代表[14]。地下水资源是农业生产重要的供水水源。受岩性、地貌、气候及古沉积环境等因素影响,该区地下水矿化度由浅至深逐渐升高,呈现出明显的垂直分带现象。本文在阐明地下水水化学特征的基础上,综合多种评价指标(TDS, SAR, Na%, Cl^-, Ka),利用基于熵权的模糊物元方法来研究地下水在农业灌溉中的适宜性,以获得更加综合的评价结果,为该区合理、科学的开发优质地下水资源提供理论依据。

1 研究区概况

1.1 自然地理概况

简阳市位于四川盆地中部,西侧为龙泉山脉,沱江自北向南贯穿全区。地理坐标:104°11′56″—104°54′16″E,30°5′41″—30°38′57″N。研究区地貌以浅丘为主,其次为低山和河坝冲积平原,丘陵约占总面积的 88%。沱江自北向南流经全境,将境内丘陵分割为东西两部分。东部丘陵以中丘中谷、深丘中谷为主,兼有浅丘宽谷,地势由北向南倾斜,海拔 400～580 m。西部丘陵以浅丘宽谷为主,兼有部分缓丘河坝和中丘中谷,地势由西北向东南倾斜,海拔 369～500 m。西北辖有龙泉山脉中段的一部分山区。研究区属中亚热带湿润气候,四季分明,雨量充沛,年平均降水量为 836 mm,研究区年平均气温在 17 ℃左右。

1.2 地质及水文地质条件

简阳地区覆盖地层主要为第四系全新统冲洪积层(Q_4^{al+pl})。下伏地层为白垩系下统天马上组(K_1t)泥岩、砂岩,侏罗系上统蓬莱镇组(J_3P)砂质泥岩、泥质砂岩,侏罗系中统遂宁组(J_2sn)泥岩夹泥质粉砂岩,侏罗系中统上沙溪庙组(J_2s^2)泥岩夹泥质粉砂岩,砂岩、泥岩互层状分布,各岩层厚度不大。地下水类型主要为松散堆积砂砾石层孔隙水与红层砂岩—泥岩风化带孔隙裂隙水。松散堆积砂砾石层孔隙水主要分布于沱江沿岸阶地,其余绝大部分地区主要为红层砂岩—泥岩风化带孔隙裂隙水分布,占全区面积的 81.3%。研究区浅表层地下水主要补给来源为大气降水,径流受区内微地形地貌的控制,径流途径较短,其主要排泄方式为人工开采、蒸发及径流排泄。区内中深层地下水补给来源为西北部龙泉山处的大气降水及浅层地下水的越流补给,沱江为区内地下水最低排泄基准面。与中深层地下水相比,浅表层地下水动态受气候、地形地貌影响较显著,与地表水联系较密切。

2 资料与方法

2.1 数据来源

根据研究区村庄、农田分布状况,以及地形地貌、

地层岩性等因素,于 2015 年 6 月选取 36 组钻孔与水井水样进行分析测试,水质指标的检测由中国建筑西南勘察设计研究院有限公司岩土试验中心完成,测试方法按照国家相关标准。其中水样 S_1—S_{30} 取样深度 3—17 m,水样 D_1—D_6 取样深度 24—58 m,本次研究中将 S_1—S_{30} 与 D_1—D_6 分别定义为浅表层与中深层地下水水样(图 1)。

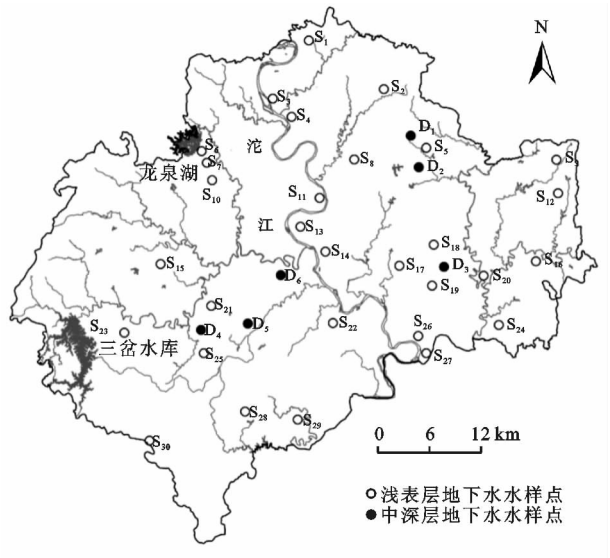


图 1　研究区取样点分布

2.2　水化学特征研究方法

Gibbs[15]通过分析全球水化学数据,认为影响水化学成分形成的主要因素包括岩石风化、大气降水和蒸发结晶。本次研究采用 Gibbs 图,确定控制研究区地下水水化学成分形成的主要因素。然后利用离子比值关系详细分析水化学成分形成过程中所发生的水文地球化学作用。

2.3　灌溉水质评价方法

目前,国内外专家、学者对灌溉水水质评价已做了大量的研究工作,提出了多种研究方法,主要包括单因子评价法、数理统计法、Wilcox 图解及 USSL 图解法等[16-18]。一般仅涉及一种或两种指标,所得结果难以全面反映灌溉水水质的整体状况,为了能够综合反映灌溉水水质的总体质量,本研究综合多项灌溉水质评价指标,利用模糊物元评价方法,并结合熵值法所确定的权重系数,对研究区浅表层与中深层地下水灌溉适宜性进行分析,以揭示研究区灌溉水水质的整体状况。

2.3.1　评价指标　钠吸附比(sodium adsorption ratio, SAR)是指示灌溉水或土壤溶液中钠离子含量的重要参数,也是衡量灌溉水体引起土壤碱化程度的重要指标[19]。SAR 值越高,土壤吸附 Na^+ 的能力越强,从而破坏土壤结构团粒结构,使土壤渗透性变差,导水能力也随之降低[20-21],其计算公式为:

$$SAR=\frac{Na^+}{\sqrt{(Ca^{2+}+Mg^{2+})/2}} \tag{1}$$

式中,所有离子单位均为 meq/L。

灌溉系数 K_a 是指土层上有某一水层,全部蒸发后留下的盐类,能使 1.2 m 土层积盐,使大多数作物不能生长,这个水层厚度即为灌溉系数[22]。它是根据碱类对 40 种作物的最大危害以及钠盐的相对危害性的试验中得出来的。灌溉系数 K_a 是根据钠离子与氯离子、硫酸根的相对含量来评价灌溉水体水质的,但其忽略了全盐的作用。其计算公式为:

$$\begin{cases} K_a=\dfrac{288}{5Cl^-} & (Na^+<Cl^-) \\ K_a=\dfrac{288}{Na^++4Cl^-} & (Cl^-<Na^+<Cl^-+SO_4^{-2}) \\ K_a=\dfrac{288}{10Na^+-5Cl^--9SO_4^{2-}} & (Na^+>Cl^-+SO_4^{2-}) \end{cases} \tag{2}$$

当地下水中 Na^+ 含量较高时,地下水中 Na^+ 会交换黏土颗粒吸附的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+},导致土壤渗透性降低,导致土壤水分运移受阻,影响作物生长[23-24]。Na%可以用来衡量灌溉水体引起土壤碱害的风险大小,Na%值越大,引起土壤碱害的风险性越大。其计算公式为:

$$Na\%=\frac{(Na^++K^+)\times 100}{Ca^{2+}+Mg^{2+}+Na^++K^+} \tag{3}$$

综合选取水样总矿化度 TDS、钠吸附比 SAR、易溶性钠百分比 Na%、灌溉系数 Ka 及 Cl^- 作为灌溉水质评价指标[25-26],将灌溉水体水质由好到差分别定义为Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ级 4 个等级。由于低优指标(TDS,SAR,Na%,Cl^-)与高优指标(K_a)共存,因此需要对 K_a 取倒数进行归一化处理(表 1)。

表 1　研究区灌溉水质评价标准及归一化后分级标准

参　数	标准限值				归一化后标准限值			
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
TDS/(mg·L^{-1})	<2 000	<3 000	<4 000	<6 000	<2 000	<3 000	<4 000	<6 000
SAR	<3	<5	<8	<12	<3	<5	<8	<12
Na/%	<20	<40	<60	<80	<20	<40	<60	<80
K_a	>18	>6	>1.2	>0.1	<0.055	<0.167	<0.833	<1
Cl^-/(mg·L^{-1})	<106.5	<213	<355	<532.5	<106.5	<213	<355	<532.5

2.3.2 基于熵权的模糊物元评价模型 在物元分析中所描述的事物 M 及其特征 C 和量值 c 组成物元 $\boldsymbol{R}=(M,C,x)$。其中,量值 x 具有模糊性,称其为模糊物元。若事物 M 有 n 个特征 $c_1,c_2,\cdots,c_n$ 及其相应的量值 $x_1,x_2,\cdots,x_n$,则 $\boldsymbol{R}$ 称为 n 维模糊物元[27-28]。若 m 个事物的 n 维物元组合在一起便构成 m 个事物的 n 维复合模糊物元 R_{mn}。记作:

$$\boldsymbol{R}_{mn}=\begin{bmatrix} & M_1 & \cdots & M_n \\ C_1 & x_{11} & \cdots & x_{m1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_n & x_{1n} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{R}_{mn}$——m 个事物的 n 个评价指标的复合物元;M_i——第 i 个事物($i=1,2,\cdots,m$);C_k——第 k 个特征($k=1,2,\cdots,n$);x_{ik}——第 i 个事物第 k 项特征对应的模糊量值。

模型的建立过程如下:

(1) 构建复合模糊物元。对 36 个监测数据和 4 级标准建立 40 个样品 5 个指标的复合模糊物元 $\boldsymbol{R}_{mn}$。

(2) 根据越大越优原则($\gamma_{ik}/x_{ik}/\max x_{ik}$),构建从优隶属度模糊物元 $\boldsymbol{R}_{mn}'$[29-30]。

$$\boldsymbol{R}_{mn}'=\begin{bmatrix} & M_1 & \cdots & M_m \\ C_1 & \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{m1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_n & \gamma_{1n} & \cdots & \gamma_{mn} \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中:γ_{ik}——从优隶属度;x_{ik}——第 i 个事物第 k 项特征对应的模糊量值;$\max x_{ik}$——各事物中每一项特征所有量值 x_{ik} 中的最大值。

(3) 根据标准模糊物元 $\boldsymbol{R}_s$ 和从优隶属度模糊物元 $\boldsymbol{R}_{mn}'$ 构建差平方模糊复合物元 $\boldsymbol{R}_{\Delta}$。标准模糊物元是从优隶属度模糊物元 $\boldsymbol{R}_{mn}'$ 中的最大值或最小值,本文以最大为最优,因此各指标的标准模糊物元均为 1。

若 $\Delta_{ij}(i=1,2,\cdots,n;\ j=1,2,\cdots,m)$ 表示标准模糊物元与复合从优隶属度模糊物元 $\boldsymbol{R}_{mn}'$ 中的各项差的平方,则组成差平方复合模糊物元 $\boldsymbol{R}_{\Delta}$,其中 $\Delta_{ij}=(\gamma_{0j}-\gamma_{ij})^2$,$(i=1,2,\cdots,n;\ j=1,2,\cdots,m)$,则

$$\boldsymbol{R}_{\Delta}=\begin{bmatrix} & M_1 & \cdots & M_m \\ C_1 & \Delta_{11} & \cdots & \Delta_{m1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_n & \Delta_{1n} & \cdots & \Delta_{mn} \end{bmatrix} \tag{6}$$

(4) 确定归一化判断矩阵。建立 m 个事物 n 个评价指标的判断矩阵 $\boldsymbol{B}=(x_{ij})_{mn}(i=1,2,\cdots,n;\ j=1,2,\cdots,m)$,并做归一化处理,得到归一化判断矩阵 $\boldsymbol{B}'$

$$\boldsymbol{B}_{ij}=\frac{x_{ij}-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}} \tag{7}$$

式中:$x_{\max}$,$x_{\min}$——同指标不同事物中的最满意者或者最不满意者。

(5) 计算各指标的熵 H_i 与熵权 W[31]:

$$H_i=\frac{1}{\ln m}\left(\sum_{j=1}^{m} f_{ij}\ln f_{ij}\right)$$

$$(i=1,2,\cdots,n;\ j=1,2,\cdots,m) \tag{8}$$

定义了第 i 个评价指标的熵之后,可得到第 i 个评价指标的熵权定义 $W=(\omega_i)_{1\times n}$

式中:$f_{ij}=\dfrac{1+b_{ij}}{\sum\limits_{j=1}^{m}(1+b_{ij})}$,$\omega_i=\dfrac{1-H_i}{n-\sum\limits_{i=1}^{n}H_i}$,且满足 $\sum\limits_{i=1}^{n}\omega_i=1$。

(6) 计算贴近度 ρH_j。贴近度是指被评价样品与标准样品之间的相互接近程度,其值越大表示两者越接近,反之则相离较远[32]。本文采用欧氏贴近度 ρH_j 作为评价标准,从而建立贴近度复合模糊物元 $\boldsymbol{R}_{\rho H}$

$$\boldsymbol{R}_{\rho H}=\begin{Bmatrix} & M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ \rho H_j & \rho H_1 & \rho H_2 & \cdots & \rho H_m \end{Bmatrix} \tag{9}$$

式中:$\rho H_j=1-\sqrt{\sum\limits_{i=1}^{n}\omega_i\Delta_{ij}}$ $(j=1,2,\cdots,m)$。

3 结果与讨论

3.1 地下水水化学特征

3.1.1 主要离子成分统计分析 主要离子成分统计分析是研究地下水水化学特征的基础,通过统计分析可以大致了解地下水水化学成分的基本特征。对浅表层与中深层地下水主要指标进行整理,分析其主要离子成分特征值(表 2)。根据矿化度的大小,可将地下水划分为淡水(TDS<1 g/L)、微咸水(1 g/L<TDS<3 g/L)和咸水(TDS>3 g/L),浅表层地下水 TDS 均小于 1 g/L,为淡水,而中深层地下水为微咸水。研究区中深层地下水主要阴阳离子含量均高于浅表层地下水(表 2)。浅表层地下水与中深层地下水水化学成分的形成机制有所差异,浅表层地下水受气候、地形地貌条件影响显著,地下水径流途径较短,交替循环迅速,而中深层地下水径流途径较长,与含水岩层进行充分的水岩相互作用,其水化学成分主要受含水层岩性影响显著。中深层地下水中 $K^+ + Na^+$ 与 SO_4^{2-} 变异系数为 110.04% 和 155.98%,变异程度较大,可能是部分地区受到深层盐卤水的混合作用所致。

3.1.2 矿化度 地下水总矿化度(TDS)是指地下水中所含有的各种离子、分子以及化合物的总量,是区分地下咸水、淡水的重要依据。由图 2 可以看出,地下水取样深度<20 m 时,其矿化度较低,一般在 500~1 000 mg/L,当取样深度>20 m 时,地下水矿化度取样深度的增大逐渐升高,最高达到 2 800 mg/L。

其原因,一方面是交替缓慢的中深层地下水,不断溶虑砂泥岩地层中钙芒硝结核及薄层石膏,另一方面,是由于深部位微承压性盐卤水向上越流,发生混合作用所致。

表 2　研究区地下水水化学组分统计特征值　　mg/L

参数	浅表层地下水					中深层地下水				
	最小值	最大值	均值	标准差	C_v/%	最小值	最大值	均值	标准差	C_v/%
$K^+ + Na^+$	2.30	74.80	24.56	13.64	55.53	10.39	617.90	187.43	206.25	110.04
Ca^{2+}	52.10	284.60	138.74	44.21	31.87	155.30	316.60	213.32	59.92	28.09
Mg^{2+}	4.86	47.42	21.50	10.32	48.01	21.89	77.79	45.27	20.26	44.74
Cl^-	7.09	89.82	45.92	23.38	50.91	58.50	224.61	101.09	58.18	57.55
SO_4^{2-}	21.76	226.40	66.07	40.94	61.97	7.68	1 624.30	365.36	569.87	155.98
HCO_3^-	170.90	555.30	374.44	93.65	25.01	305.00	799.36	568.73	176.49	31.03
pH 值	6.80	8.00	7.36	0.28	3.82	6.31	8.40	7.10	0.71	10.02
TDS	293.80	1 148.00	724.90	188.67	26.03	1 024.90	2 800.00	1 480.12	615.25	41.57
TH	160.10	815.70	431.64	132.87	30.78	401.70	1 001.03	654.60	213.54	32.62

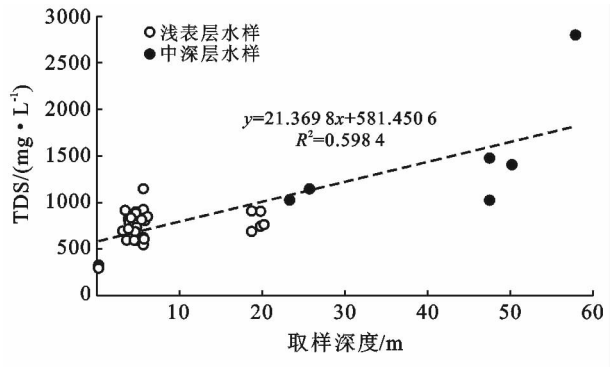


图 2　研究区地下水矿化度随取样深度变化

3.1.3　水化学类型　根据浅表层与中深层地下水中主要离子组分含量,绘制 Piper 图,由图 3 可以看出,浅表层地下水水样中碱土金属离子含量高于碱金属离子,而在中深层地下水中,部分水样的碱金属离子含量高于碱土金属离子,说明研究区地下水由浅表层至中深层,地下水优势阳离子逐渐由 $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ 转化为 K^++Na^+。由 Piper 图还可以看出,浅表层地下水水化学类型主要为 HCO_3－Ca,HCO_3－Ca・Mg 型,中深层地下水水化学类型主要为 HCO_3－Na・Ca,HCO_3・SO_4－Ca・Mg,SO_4－Na・Ca 型,由浅表层至中深层,地下水水化学类型发生明显变化。

3.2　水文地球化学作用

Gibbs 图是研究地下水水文地球化学作用的有效手段。利用 $Na^+/(Na^++Ca^{2+})$,$Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$ 与矿化度之间的关系,绘制研究区地下水水化学 Gibbs 分布图,以揭示控制其地下水水化学成分形成的主要水文地球化学作用。

由 Gibbs 分布图(图 4)可以看出,影响浅表层与中深层地下水水化学成分的主要因素是岩石风化作用,但中深层地下水水化学成分更趋向于海水的特性,这说明中深层地下水受到源于海相沉积的深层卤水的混合作用影响。

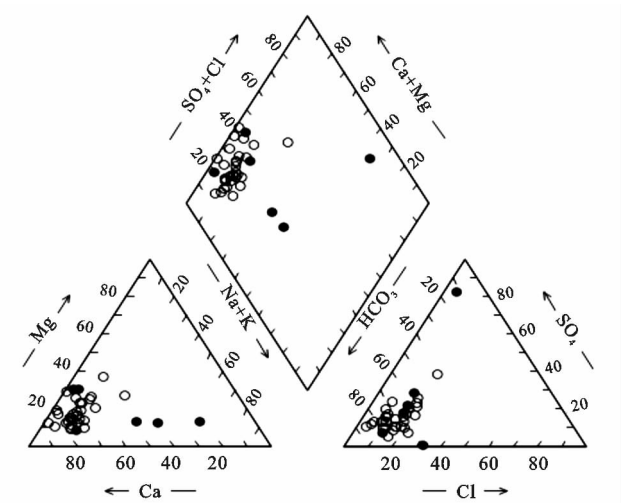


图 3　研究区浅表层与中深层地下水水样 Piper 图(%)

若地下水中 Ca^{2+},Mg^{2+},HCO_3^-,SO_4^{2-} 主要来源于碳酸盐岩(方解石、白云石)与硫酸盐(石膏、硬石膏)矿物的溶解,则 $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/(HCO_3^-+SO_4^{2-})$ 当量比值应接近于 1∶1,由 $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/(HCO_3^-+SO_4^{2-})$ 比值关系(图 5)可以看出,大多数水样点均落在 1∶1 等值线附近,说明地下水中 Ca^{2+},Mg^{2+},HCO_3^-,SO_4^{2-} 主要来源于碳酸盐岩(方解石、白云石)与硫酸盐(石膏、硬石膏)矿物的溶解。若地下水中 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 仅来自于白云石的溶解,则 Ca^{2+}/Mg^{2+} 当量比值应为 1,实际地下水中 Ca^{2+}/Mg^{2+} 远大于 1(图 5),说明 Ca^{2+} 并非主要来自于白云石的溶解,可能存在其它来源,如方解石、钙芒硝结核、石膏的溶解及阳离子交替吸附作用等。若地下水中 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 完全来源于方解石或白云石的溶解,则 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 的当量比值应接近于 1∶2 或 1∶4[33],由 Ca^{2+}/HCO_3^- 关系(图 5)可以看出,部分水样落在

1∶1与1∶2之间,说明 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 来源于方解石的溶解,然而大部分水样偏离1∶2,甚至落在1∶1线上方,则过量的 Ca^{2+} 可能来源于阳离子交替吸附作用或地层中钙芒硝结核、石膏的溶解。若地下水中 Na^+,Cl^- 主要来源于岩盐的溶解,则 Na^+/Cl^- 应接近于1∶1[34]。由 Na^+/Cl^- 关系(图5)可以看出,大多数浅表层地下水 Na+/Cl^- 分布于1∶1等值线附近,说明地下水中 Na^+,Cl^- 主要来源于岩盐的溶解,而部分浅表层地下水 Na^+/Cl^- 低于1∶1,此部分水样中 Cl^- 明显高于 Na^+,过量的钠离子有可能来自于人类或动物生活污水的渗流。大部分浅表层地下水水样均采自民井,地下水位埋深较浅,农村地区无成熟的污水处理设施,居民生活的排放,散养家畜、家禽排泄物的淋滤入渗,是本地区浅表层地下水 Cl^- 浓度偏高的主要原因。而中深层地下水多数水样 Na^+/Cl^- 比值位于1∶1等值线上方,Na^+ 明显较 Cl^- 高,说明除岩盐的溶解外,还可能存在硅酸盐矿物的溶解及阳离子交替吸附作用。

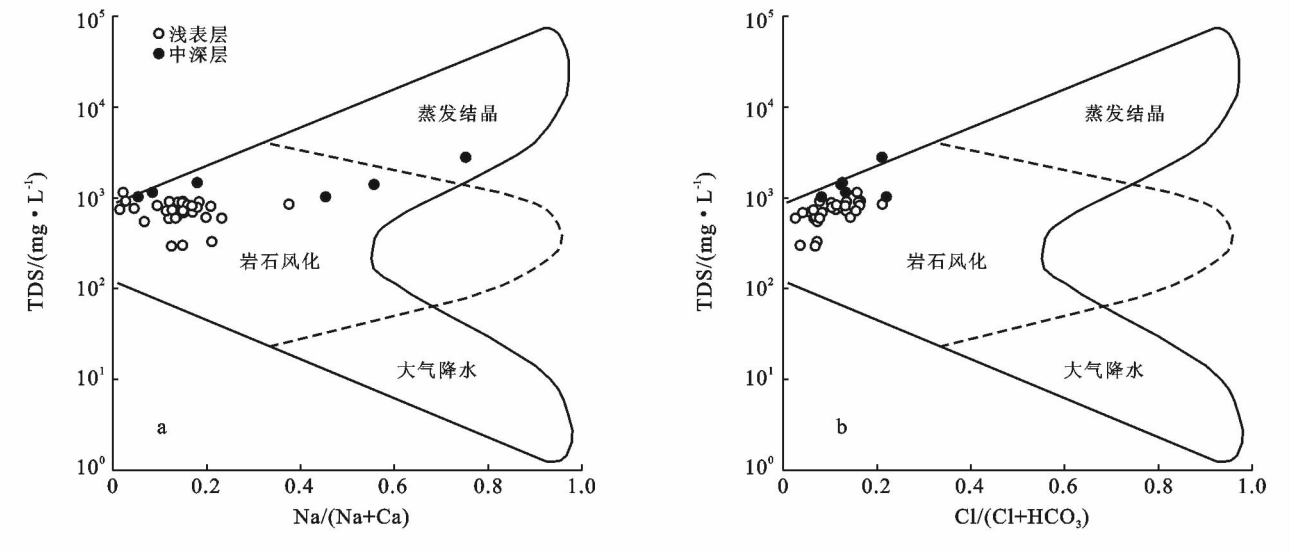


图4 研究区地下水水化学控制机制

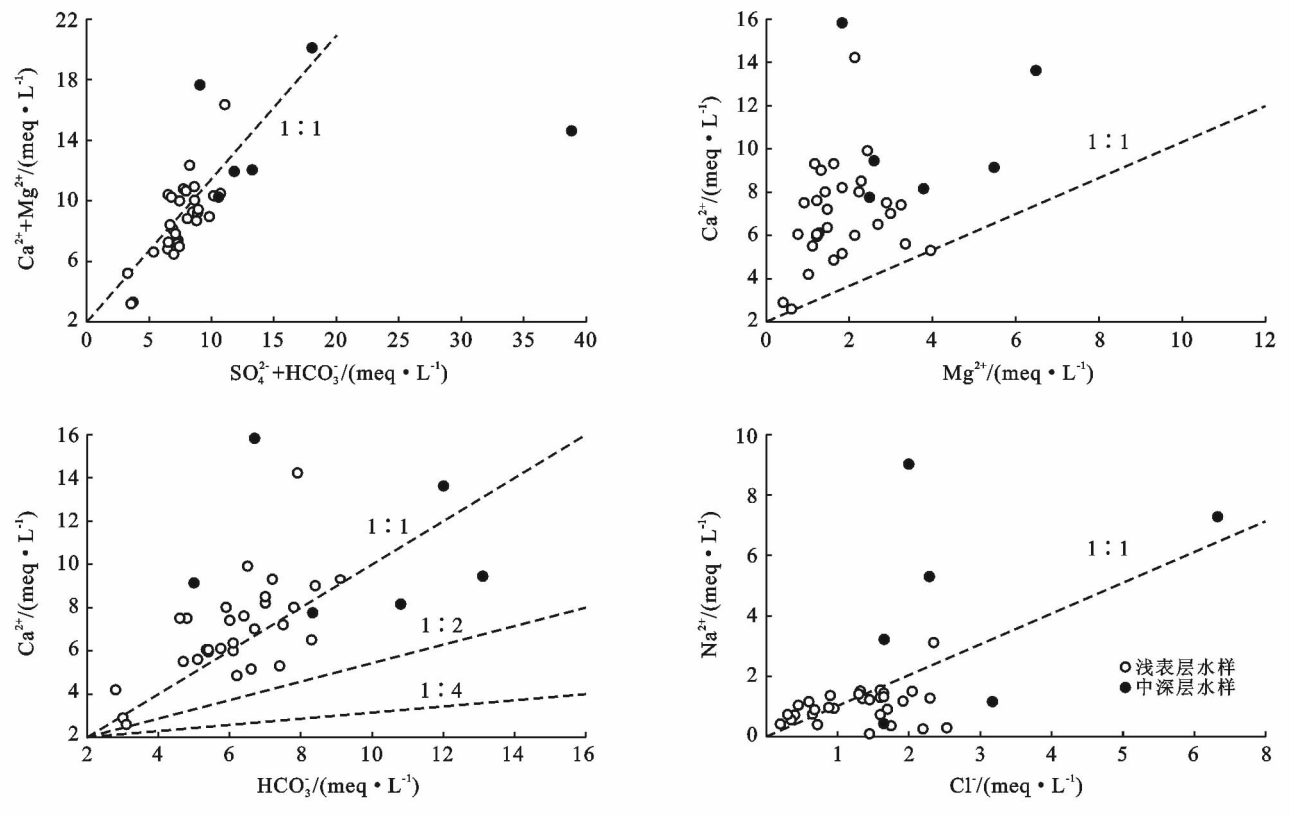


图5 研究区主要离子成分比值关系

3.3 综合评价结果分析

根据研究区灌溉水体水质评价指标(TDS,SAR,Na%,Cl^-,Ka),对 36 个监测点(浅表层、中深层)和分级标准建立 40 个样品 5 个指标的复合模糊物元,结合熵值法确定的各指标权重系数,计算得到各水样(浅表层、中深层)的贴近度,并与灌溉水质标准的贴近度进行比较,划分各水样的灌溉水质级别(表 3)。由表 3 可知,从主要离子组分含量角度分析,简阳地区所有浅表层地下水属于Ⅰ级水,水质良好,适宜用做灌溉水源。50%的中深层地下水属于Ⅱ级水,水质一般,易造成土壤盐碱灾害,不宜长期用于农业灌溉。综合分析浅表层与中深层地下水评价结果,可看出简阳地区地下水水质由浅至深逐渐变差,浅表层地下水较中深层更适于农业灌溉,农业水资源利用适宜浅井开采。

表 3　研究区各样本贴近度与评价结果表

样本	ρH_j	等级	样本	ρH_j	等级	样本	ρH_j	等级	样本	ρH_j	等级
S_1	0.094	Ⅰ	S_{11}	0.152	Ⅰ	S_{21}	0.094	Ⅰ	D1	0.132	Ⅰ
S_2	0.081	Ⅰ	S_{12}	0.081	Ⅰ	S_{22}	0.071	Ⅰ	D2	0.071	Ⅰ
S_3	0.093	Ⅰ	S_{13}	0.047	Ⅰ	S_{23}	0.089	Ⅰ	D3	0.386	Ⅱ
S_4	0.070	Ⅰ	S_{14}	0.047	Ⅰ	S_{24}	0.069	Ⅰ	D4	0.373	Ⅱ
S_5	0.050	Ⅰ	S_{15}	0.067	Ⅰ	S_{25}	0.092	Ⅰ	D5	0.105	Ⅰ
S_6	0.064	Ⅰ	S_{16}	0.101	Ⅰ	S_{26}	0.045	Ⅰ	D6	0.401	Ⅱ
S_7	0.072	Ⅰ	S_{17}	0.074	Ⅰ	S_{27}	0.089	Ⅰ	Ⅰ	0.214	/
S_8	0.077	Ⅰ	S_{18}	0.098	Ⅰ	S_{28}	0.105	Ⅰ	Ⅱ	0.385	/
S_9	0.070	Ⅰ	S_{19}	0.093	Ⅰ	S_{29}	0.088	Ⅰ	Ⅲ	0.710	/
S_{10}	0.061	Ⅰ	S_{20}	0.097	Ⅰ	S_{30}	0.056	Ⅰ	Ⅳ	1.000	/

4 结 论

简阳地区是川中红层干旱区的典型代表,川中红层区地下水水化学特征呈现明显的垂直分带现象。本文以简阳地区为例,系统分析了其地下水水化学特征及形成机制,并在此基础上对其浅表层与中深层地下水进行灌溉适宜性评价。

(1) 研究区地下水矿化度随深度增加而明显升高,浅表层主要分布淡水,中深层主要为微咸水。由浅至深,地下水水化学类型也发生明显变化,浅表层地下水主要为 HCO_3—Ca,HCO_3—Ca·Mg 型,中深层主要为 HCO_3—Na·Ca,HCO_3·SO_4—Ca·Mg,SO_4—Na·Ca 型。

(2) Gibbs 图揭示了控制浅表层与中深层地下水水化学成分的主要因素是岩石风化作用。主要离子比值关系揭示了浅表层与中深层地下水水化学成分受到岩盐、方解石、石膏、硅酸盐矿物的溶解及阳离子交替吸附作用的影响。部分浅表层地下水受人类活动影响比较明显;中深层地下水受深层盐卤水越流混合作用影响较明显。

(3) 水质综合评价结果显示,浅表层地下水水质良好,适宜用做灌溉水源,由浅至深,地下水水质逐渐变差,中深层地下水不宜长期用于农业灌溉。

[参 考 文 献]

[1] 陈倩,李长顺,钟金先. 四川红层浅层风化带裂隙水水化学特征的聚类分析[J]. 安全与环境工程,2012,19(2):43-47.

[2] 杨子林,李培月,吴健华,等. 泾源县饮用地下水水化学特征及水质评价[J]. 南水北调与水利科技,2010,8(5):99-104.

[3] Das B K, Kaur P. Major ion chemistry of Renuka Lake and weathering processes, Sirmaur District, Himachal Pradesh, India[J]. Environmental Geology, 2001, 40(7):908-917.

[4] Atapour H. Geochemical baseline of major anions and heavy metals in groundwaters and drinking waters around the urban areas of Kerman City, Southeastern Iran[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67(7):2063-2076.

[5] Favara R, Grassa F, Valenza M. Hydrochemical evolution and environmental features of Salso River catchment, central Sicily(Italy)[J]. Environ Geol, 2000, 39(11):1205-1215.

[6] Jalali M. Hydrochemical identification of groundwater resources and their changes under the impacts of human activity in the Chah Basin in Western Iran[J]. Environ Monit Assess, 2007, 130(1):347-364.

[7] 王焰新,高旭波. 人类活动影响下娘子关岩溶水系统地球化学演化[J]. 中国岩溶,2009,28(2):103-112.

[8] Giridharan L, Venugopal T, Jayaprakash M. Evaluation of the seasonal variation on the geochemical parameters and quality assessment of the groundwater in the proximity of River Cooum, Chennai, India[J]. Environ

Monit. Assess., 2008,143(1/3):161-178.

[9] Varol S, Davraz A. Evaluation of the groundwater quality with WQI (water quality index) and multivariate analysis: A case study of the Tefenni plain(Burdur/Turkey)[J]. Environmental Earth Sciences, 2015,73(4):1725-1744.

[10] Zouahri A, Dakak H, Douaik A, et al. Evaluation of groundwater suitability for irrigation in the Skhirat region, Northwest of Morocco[J]. Environmental Monitoring Assessment, 2015,187(1):4184.

[11] 何锦,范基姣,刘元晴,等.沧州地区微咸水水化学特征及灌溉水质评价[J].人民黄河,2016,38(5):134-138.

[12] Alam M, Rais S, Aslam M. Hydrochemical investigation and quality assessment of groundwater in rural areas of Delhi, India[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(1):97-110.

[13] 刘兆昌,李广贺,朱琨.供水水文地质[M].北京:中国建筑工业出版社,1998.

[14] 张志强.成都新机场地下水水化学特征及形成机制研究[D].四川 成都:成都理工大学,2016.

[15] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 1970,170(3985):795-840.

[16] Wilcox L V. Classification and use of irrigation waters [J]. Glycobiology, 2002, 12(3):229-234(6).

[17] Aref F, Roosta R. Assessment of groundwater quality and hydrochemical characteristics in Farashband plain, Iran [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(20):752.

[18] 肖振华,万洪富,郑莲芬.灌溉水质对土壤化学特征和作物生长的影响[J].土壤学报,1997,34(3):272-285.

[19] 宋新山,邓伟,章光新,等.钠吸附比及其在水体碱化特征评价中的应用[J].水利学报,2000,31(7):70-76.

[20] Karanth K R. Groundwater Assessment, Development and Management[M]. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1997.

[21] Haritash A K, Kaushik C P, Kaushik A, et al. Suitability assessment of groundwater for drinking, irrigation and industrial use in some North Indian villages [J]. Environmental Monitoring Assessment, 2008,145 (1/3):397-406.

[22] 周金龙,吴彬,王毅萍,等.新疆塔里木盆地平原区中盐度地下水分布及其质量评价[J].中国农村水利水电,2009(9):32-36.

[23] Ketata M, Gueddari M, Bouhlila R. Suitability assessment of shallow and deep groundwaters for drinking and irrigation use in the El Khairat aquifer (Enfidha, Tunisian Sahel) [J]. Environmental Earth Sciences, 2012,65(1):313-330.

[24] Ravikumar P, Somashekar R K, Angami M. Hydrochemistry and evaluation of groundwater suitability for irrigation and drinking purposes in the Markandeya River basin, Belgaum District, Karnataka State, India [J]. Environmental Monitoring Assessment, 2011,173 (1/4):459-487.

[25] Arumugam K, Elangovan K. Hydrochemical characteristics and groundwater quality assessment in Tirupur Region, Coimbatore District, Tamil Nadu, India[J]. Environmental Geology, 2009,58(7):1509-1520.

[26] Raju N J. Hydrogeochemical parameters for assessment of groundwater quality in the upper Gunjanaeru River basin, Cuddapah District, Andhra Pradesh, South India [J]. Environmental Geology, 2007,52(6):1067-1074.

[27] 张先起,梁川.基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用[J].水利学报,2005,36(9):1057-1061.

[28] 席北斗,于会彬,郭旭晶,等.基于模糊权物元理论的地下水水质评价模型构建及应用[J].环境工程学报,2009,3(2):381-384.

[29] Gu Chongshi, Zhang Zhijun, Cai Xin, et al. Application of entropy-based fuzzy matter-element analysis in seepage monitoring of RCC dam[J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 2011,5(1): 105-111.

[30] Wu Jianhua, Li Peiyue, Qian Hui, et al. On the sensitivity of entropy weight to sample statistics in assessing water quality: Statistical analysis based on large stochastic samples [J]. Environmental Earth Sciences, 2015,74(3):2185-2195.

[31] 余健,房莉,仓定帮,等.熵权模糊物元模型在土地生态安全评价中的应用[J].农业工程学报,2012,28(5): 260-266.

[32] 刘娜,艾南山,方艳,等.基于熵权的模糊物元模型在城市生态系统健康评价中的应用[J].成都理工大学学报:自然科学版,2007,34(5):589-595.

[33] Singh C K, Rina K, Singh R P, et al. Geochemical characterization and heavy metal contamination of groundwater in Satluj River Basin[J]. Environmental Earth Sciences, 2014,71:201-216.

[34] Li Peiyue, Wu Jianhua, Qian Hui. Assessment of groundwater quality for irrigation purposes and identification of hydrogeochemical evolution mechanisms in Pengyang County, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013,69(7):2211-2225.