文章编号:1672-3317(2018)07-0091-08

内陆平原区地下水系统中黏土的阻滞作用

杨 奕', 邢立亭'*, 李常锁2, 张文静', 黄林显'

(1. 济南大学资源与环境学院,济南 250022; 2. 山东省地矿工程勘察院,济南 250014)

杨奕, 邢立亭, 李常锁, 等. 内陆平原区地下水系统中黏土的阻滞作用[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(7): 91-98.

0引言

在地下水正常或偏咸条件下,黏土自身带负电荷,为保持其电中性而吸附地下水中的阳离子,故作为内 陆平原区地下水中的主要常规阳离子 Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺被黏土阻滞^[1-2]。阻滞作用的强度大小不仅与黏土的性 质^[3]、地下水流动系统的水动力特征^[4-3]有关,还与地下水的矿化度有关^[6]。一般来说,黏土阻滞地下水中Na⁺、 Ca²⁺、Mg²⁺的能力大小取决于黏土矿物的性质及质量分数^[7],黏土矿物的比表面积越大,对地下水中阳离子的 吸附、阻滞能力就越强^[8-10]。具有较大比表面积的黏土颗粒与地下水中Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺相作用时在黏土表面形 成双电层,地下水中Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺质量浓度以及pH值的变化会引起双电层性状的改变,进而影响黏土颗粒 对地下水中Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺的吸附能力^[11-13],如当配制的溶质质量浓度低于土中盐的质量浓度时,土中的盐就 会解吸到溶液中,溶液质量浓度一旦超过200 mg/L,黏土开始吸附溶液中的Na^{+[14]}。除此之外,大量试验证 明,黏土对地下咸水的阻滞强度随黏土有效孔隙度或水力坡度的增大而减小,一旦水力坡度大于某一阈值, 浅层咸水便会越流进入深层淡水^[15-16];并且越流过程中表示黏土阻滞强度的阻滞系数与其本身的渗透系数 成正比^[17]。黏土吸附地下水中水化学成分的过程机理主要包括Henry模型,即线性吸附,如黏土对葱、氨氮 的吸附等温曲线符合该模型,阻滞系数分别为2 523.36、60.868^[18-19];Langmuir模型,即单分子层化学吸附,符 合该模型的如黏土吸附地下水中有机磷、Mn^{2+[20-21]};Freundlich模型,即物理吸附^[23],如黏土吸附铵根离子^[24]。 前人开展的大量试验研究停留在黏土阻滞污染物质的效果及部分影响因素方面,而缺乏对黏土阻滞地下水 中Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺过程机理的探讨。

由于内陆平原区沉积物颗粒较细,黏土矿物量高,地下水径流滞缓,地下水在垂直方向上呈咸淡水交替 分布,并呈现水化学类型的水平分带和垂直分带特征^[5]。因此,为分析黏土的吸附、阻滞作用对地下水水化 学特征的影响,深化对咸淡水水质演化过程中的水文地球化学作用的认识,兹通过地质钻探和抽水试验采 集不同深度的原状土与地下咸水,采用野外水质实时监测、室内吸附等温试验法、因子分析方法、相关性分 析方法,探讨黏土阻滞地下水中主要常规阳离子的过程机理。

收稿日期:2017-09-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41172222,41472216,41772257)

作者简介:杨奕(1992-),女,山东济南人。硕士研究生,研究方向为地下水科学与工程。E-mail: 1027263175@qq.com 通信作者:邢立亭(1966-),男,山东即墨人。教授,主要从事水文地质研究。E-mail: xlting596@163.com

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

内陆平原区的济阳地区 0~20 m 土层以浅岩性为主,由古河道变更泛滥淤积而成的第四系松散堆积物, 20~113 m 岩性以河、湖相的粉土、粉质黏土、黏土为主,部分是粉砂、细砂和中砂(图1),垂向上具多层结构,单 层厚度较小^[26]。受黏土阻滞作用、蒸发浓缩、水岩作用、水动力条件等多方面因素影响,地下水的电导率随深度 的增加而呈先增大后减小趋势(图1),地下水水化学类型多以Cl·SO₄-Na·Mg型、Cl·SO₄-Mg·Na型水为主。



图1 深度为0~113 m的地层柱状图

1.2 样品采集

在内陆平原咸水区布置4个水位、水质长期监测孔(图1),孔深12~113.6m不等(表1)。通过钻探施 工^[27],采集6~6.2、48~48.2、51~51.2、71~71.2、84~84.2、97~97.2、102~102.2、112~112.2m深度的原状土,测定原 状土样的孔隙比和黏土矿物量,孔隙比在0.496~0.849之间,黏土矿物量在21.1%~45.6%区间内(表2),变异 系数为24.49%。取采集土样各3000g,除去杂物,置阴凉通风处自然风干、过筛研磨、充分混匀、装瓶,用于 吸附试验。

从14-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2-2									
水文观测孔孔号	1#	2#	3#	4#					
孔深/m	12.0	49.2	95.0	113.6					
滤水管下置深度/m	8~12	13~49.2	79~94	98~107.9					
滤水管下置深度处的岩性	粉土、粉质黏土夹粉土	粉质黏土、粉土、粉砂	粉质黏土、黏土	粉砂、细砂、中砂为主					

表1 水文地质钻孔基本参数

黏土取样液	采度/m	6~6.2	48~48.2	51~51.2	71~71.2	84~84.2	97~97.2	102~102.2	112~112.2
孔隙比	Ł	0.612	0.535	0.510	0.512	0.564	0.645	0.496	0.849
	石英	55	34.3	/	36.2	47.4	52.6	21.1	37.7
	方解石	0	12.6	/	16.7	8.3	1.1	54.9	25.7
7亡4加县。(0/	长石	15	7.5	/	11.8	17	15.1	0.1	15.5
仰彻里/%	伊利石	8	35.8	/	31.2	24.4	29.5	14.5	13.5
	蒙脱石	12	2	/	0.4	0.4	0.4	8.9	0.4
	高岭石	10	7.8	/	3.7	2.5	1.3	0.5	7.2

表2 土样基本理化性质

供试水样取自水文观测孔1#、2#、3#、4#(表1),就地密封保存^[28],运回实验室后在7d内完成样品前处理,水化学成分的毫克当量百分数如表3所示,水文观测孔1#、3#、4#内的地下水水化学类型为Cl·SO4-Na·Mg型;水文观测孔2#内的地下水水化学类型为Cl·SO4-Mg·Na型。

表3 供试水样水化学成分毫克当量百分数(n=392)

测试组分		阳离	子占比/%		阴离子占比/%			
	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg^{2+}	Cl	SO4 ²⁻	HCO ₃ ⁻	
1#	0.04	51.71	11.57	36.68	57.79	29.23	12.98	
2#	0.02	41.09	15.03	43.86	49.84	48.38	1.78	
3#	0.04	41.59	18.66	39.71	65.81	31.48	2.71	
4#	0.03	41.46	27.10	31.41	44.57	47.30	8.13	

1.3 野外地下水水质实时监测

选取水文观测孔 1#、2#、3#、4#滤水段处的地下水进行理化指标测试。所测试地下水的理化指标包括水温(T)、pH值、电导率(EC),测试仪器为美国 In-Situ 公司生产的 Aqualtroll600 型多参数水质探测仪,测试精度分别±0.1 ℃、±0.1、1±0.1 µS/cm。电导率的大小反映了水中的离子量,故可用电导率表征矿化度的变化^[29]。根据 2016 年 12 月 31 日一2017 年 3 月 4 日地下水水质实时监测可知,研究区各水文观测孔内地下水的水质相对稳定,但在地下水埋深 8~11、13~49、79~90、98~106 m 区间内,地下水电导率平均值分别为8 801.82、14 603.57、18 734.42、11 314.42 µS/cm。

1.4 R型因子分析法

采用R型因子分析法推断不同深度地下水的水化学作用类型。选取地下水中Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、 Cl、SO₄²⁻、总硬度、pH值、EC指标作为分析对象,借助SPSS10.0软件进行相关性分析、因子分析,得到各指标 相关系数矩阵后,采用主成分分析法提取特征值,并选取主因子,为更好地解释主因子所代表的含义,采用 最大方差旋转法对指标矩阵进行旋转。

1.5 室内吸附等温试验

室内吸附等温试验采用批处理法^[30]。首先,将一定量黏土移入250 mL具塞锥形瓶内,加入所需体积和 质量浓度的供试水样,然后将具塞锥形瓶放入SHZ-82A水浴恒温振荡器内恒温振荡3h,即在吸附达到饱和 时取样,样品经4000 r/min高速离心分离、0.45 μm微孔滤膜过滤,吸取一定量滤液分别用PXSJ-216F离子计 测定滤液的Na⁺质量浓度、日本岛津-AA7000原子吸收分光光度计测定滤液的Ca²⁺、Mg²⁺质量浓度,重复3 次,测定结果中有效数据为307组,对有效数据进行吸附等温线分析。

1.6 阻滞系数的确定

吸附剂(黏土)对吸附质(Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})的吸附容量 q_e 计算式为:

$$q_e = \frac{\left(C_0 - C_e\right)V}{M} \ . \tag{1}$$

吸附等温线是描述体系中吸附剂表面和溶液中吸附质二者之间数量关系的曲线,通过Temkin、Langmuir、Freundlich、Henry等温线方程进行拟合,拟合的优劣通过决定系数*R*²评定,4种方程拟合计算式分别为:

$$q_{\rm e} = q_{\rm m} \frac{K_L C_{\rm e}}{1 + K_L C_{\rm e}} , \qquad (2)$$

$$q_{\rm e} = K_{\rm F} C_{\rm e}^{1/b},\tag{3}$$

$$q_e = a \lg C_e + d , \qquad (4)$$

$$q_{\rm e} = K_{\rm d} C_{\rm e} \ . \tag{5}$$

计算黏土的线性分配系数及有效孔隙度,然后进一步计算阻滞系数R_d^[31],即:

$$n = \frac{e_0}{1 + e_0} , (6)$$

$$R_{\rm d} = 1 + \frac{1-n}{n} K_{\rm d} , \qquad (7)$$

式中: C_0 为溶液中吸附质的初始质量浓度(mg/L); C_e 为溶液中吸附质的吸附平衡质量浓度(mg/L); q_e 为吸附剂的平衡吸附量(mg/kg);V为溶液的体积(L);M为吸附剂的质量(kg); K_F 、b分别为Freundlich吸附方程中的吸附平衡常数(mg^{1-1/b}·L^b/g)、无量纲参数;a、d分别为Temkin方程中的吸附平衡常数; q_m 为Langmuir吸附方程中吸附剂的最大吸附量(mg/kg); K_L 为Langmuir吸附方程中吸附剂的吸附平衡常数(L/mg); K_a 为Henry方程中的分配系数(L/kg); e_0 为孔隙比;n为有效孔隙度; R_a 为阻滞系数。

2 结果与分析

2.1 地下水水化学特征受黏土的吸附作用影响

通过 SPSS 软件建立因子分析模型(表4、表5),含水层深度 8~12 m处地下水的第一主因子 F1以 Mg²⁺、 Cl、SO4²、总硬度为主,其方差贡献率为64.164%,且4个水化学指标在主因子上的荷载值均在0.8以上;第二 主因子 F2 主要由 pH 值决定,其方差贡献率为31.235%。故第一主因子、第二主因子反映溶滤、阳离子交换 吸附等作用及地下水在径流过程中的酸碱演化对地下水水化学成分的影响。

카 구 加 加 지	十出八	初始特征值			旋转平方和载入			
小文观测孔	主成分	特征值	方差/%	累计方差/%	特征值	方差/%	累计方差/%	
1.4	1	5.775	64.164	64.164	5.775	64.164	64.164	
1#	2	2.811	31.235	95.398	2.811	31.235	95.398	
2#	1	7.150	79.446	79.446	7.150	79.446	79.446	
2#	2	1.525	16.941	96.388	1.525	16.941	96.388	
	1	3.145	34.943	34.943	3.145	34.943	34.943	
3#	2	2.016	22.397	57.340	2.016	22.397	57.340	
	3	1.211	13.456	70.797	1.211	13.456	70.797	
14	1	4.918	54.647	54.647	4.918	54.647	54.647	
4#	2	1.315	14.607	69.254	1.315	14.607	69.254	
	3	1.092	12.138	81.393	1.092	12.138	81.393	

表4 因子分析的特征值和累积贡献率

表5 不同深度地下水的旋转因子荷载矩阵

水化営地庁	1#		2#	2#		3#			4#		
小化子相称	主成分1	主成分2	主成分1	主成分2	主成分1	主成分2	主成分3	主成分1	主成分2	主成分3	
Na ⁺	-0.135	0.973	0.984	0.174	0.908	-0.008	0.157	0.850	-0.121	-0.004	
Ca^{2+}	-0.992	0.109	0.967	-0.091	0.145	-0.504	0.620	0.701	0.425	-0.357	
Mg^{2+}	0.999	-0.017	0.971	0.174	-0.323	0.845	0.105	0.790	-0.172	0.456	
HCO ₃ ⁻	-0.978	0.690	-0.780	0.563	0.524	0.308	0.295	0.671	-0.646	0.100	
Cl ⁻	0.965	0.257	0.974	0.19	0.242	-0.73	-0.317	-0.730	-0.091	0.235	
${{\rm SO}_{4}}^{2-}$	0.863	0.469	0.946	0.273	0.654	0.295	0.410	0.901	0.121	-0.001	
pH值	-0.364	0.921	0.141	-0.988	0.689	0.462	-0.262	0.688	0.510	-0.237	
EC	0.203	-0.825	-0.919	0.212	0.911	-0.250	-0.168	-0.052	0.610	0.765	
总硬度	0.984	0.179	0.992	0.078	-0.361	-0.238	0.583	0.90	-0.134	0.224	

含水层深度13~49.2 m处的地下水的第一主因子F1以Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl、SO4²⁻、总硬度、EC为主,其方 差贡献率为79.446%,且7个水化学指标在主因子的荷载值在0.9以上,但EC与F1负相关;第二主因子F2主 要由HCO3⁻和pH值决定,其方差贡献率为16.941%,且2个水化学指标在主因子的荷载值均在0.5以上,但 pH值与F2负相关。故第一主因子、第二主因子反映混合作用、阳离子交换吸附作用、碳酸演化及酸碱演化 对地下水水化学成分的影响。

含水层深度 79~94 m 处的地下水的第一主因子 F1 以 Na⁺、SO₄²⁻、pH 值、EC 为主,其方差贡献率为 34.943%,且4个水化学指标在主因子的荷载值在 0.6 以上;第二主因子 F2 主要由 Mg²⁺和 Cl 所决定,其方差

贡献率为22.397%,且2个水化学指标在主因子的荷载值均在0.7以上,但Cl与F2负相关;第三主因子F3主要由Ca²⁺所决定,其方差贡献率为13.456%,且水化学指标在主因子的荷载值均在0.6以上。故第一主因子、第二主因子、第三主因子反映浓缩作用、酸碱演化、溶滤作用、离子交换吸附作用及方解石、石膏等的溶解/沉 淀作用对地下水水化学成分的影响。

含水层深度98~107.9 m处的地下水的第一主因子F1以Ca²⁺、SO4²⁻、总硬度为主,其方差贡献率为54.647%,且4个水化学指标在主因子的荷载值在0.7以上;第二主因子F2主要由Ca²⁺、HCO3、EC所决定,其方差贡献率为14.607%,且水化学指标在主因子的荷载值均在0.45以上,但Cl⁻与F2负相关;第三主因子F3 主要由EC所决定,其方差贡献率为12.138%,且水化学指标在主因子的荷载值均在0.7以上。故第一主因子、第二主因子、第三主因子反映方解石、石膏等的溶解/沉淀、溶滤、离子交换吸附、混合等作用对地下水水化学成分的影响。

2.2 黏土对地下水中Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的吸附等温模型

根据黏土对地下水中Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的吸附特性及吸附等温线(图2)分析可知,随地下水中Na⁺、Ca²⁺、 Mg²⁺质量浓度的升高,吸附容量呈递增趋势,但吸附容量的增加速率是一个由快到缓的变化过程。各深度 黏土对地下水中Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的实际最大吸附容量与Langmuir方程得到的最大吸附容量拟合程度较高,偏 差仅在5%~15%之间,且吸附等温线与Henry方程拟合所得的相关性较高(表6),故各深度黏土对地下水中 Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的最优吸附等温曲线符合Henry方程、Langmuir方程,为单分子层化学吸附或线性吸附过程。



图2 不同深度黏土对地下水中Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的吸附等温曲线

2.3 地下水中Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的形成受黏土的吸附作用影响

黏土的最大缓冲容量*MBC*是Langmuir吸附等温方程中最大吸附量*Q*_m与吸附平衡常数*K*_ℓ的乘积,黏土 吸附过程中的线性分配系数*K*₄是常规离子在黏土内质量浓度与地下水中质量浓度的比值,二者均反映了黏 土的吸附能力。经对*MBC*、*K*₄的计算并分析得出(图3),6、48 m深度的黏土对地下水中常规离子的吸附能 力顺序表现为Mg²⁺>Na⁺>Ca²⁺,51、112 m深度的表现为Na⁺>Ca²⁺>Mg²⁺,71、84、97、102 m深度的表现为Na^{+>} Mg²⁺>Ca²⁺。不同深度黏土的线性分配系数与相应深度的黏土矿物总量的相关性高达0.906 5,且随黏土矿物 量的增加线性分配系数越大。故造成吸附能力差异性的一部分原因可能是不同深度上主要黏土矿物伊利 石、蒙脱石量的不同,使交换吸附的离子的种类及阳离子交换吸附能力不同¹³²¹。综上,黏土对地下水中Mg²⁺ 或Na⁺的吸附能力较强,对地下水中水化学成分的形成具有一定控制作用,并且黏土的吸附能力受黏土矿物

表6 黏土吸附地下水中Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的吸附等温线模型拟合参数

秋 上取送涩度/	抽下水中的肉乙	Lang	gmuir型方程参数	Henry 型方程参数		
输工以杆/标/是/m	地下小中的离丁	Q _m 质量分数/(mg·kg ⁻¹)	K _L 质量分数/(L·mg ⁻¹)	R^2	K _d 质量分数/(L·mg ⁻¹)	R^2
	Na ⁺	4.60	0.001 1	0.916 4	0.239 6	0.631 1
6	Ca ²⁺	1.87	0.015 0	0.743 8	0.102 0	0.400 1
	Mg^{2+}	2.72	0.026 9	0.039 4	2.929 2	0.385 1
	Na ⁺	1 009.09	0.045 3	0.715 0	0.860 6	0.078 3
48	Ca ²⁺	466.67	0.003 6	0.940 8	0.833 9	0.851 1
	Mg^{2+}	600.00	0.001 3	0.985 3	0.845 1	0.963 7
	Na^+	22.37	0.001 4	0.752 8	1.073 9	0.890 7
51	Ca ²⁺	909.09	0.000 6	0.771 8	0.919 1	0.707 4
	Mg^{2+}	833.33	0.000 3	0.888 9	0.813 2	0.746 8
	Na ⁺	1 000.00	0.000 4	0.476 4	0.485 5	0.818 2
71	Ca ²⁺	15 873.02	0.000 1	0.922 9	0.673 8	0.946 3
	Mg^{2+}	909.09	0.000 5	0.911 6	0.370 1	0.733 6
	Na ⁺	277.78	0.002 3	0.242 1	0.725 4	0.184 8
84	Ca ²⁺	1 250.00	0.000 2	0.997 6	0.026 2	0.826 0
	Mg^{2+}	1 250.00	0.000 3	0.557 4	0.657 0	0.923 7
	Na ⁺	416.67	0.000 6	0.938 2	0.536 8	0.901 1
97	Ca ²⁺	222.22	0.000 7	0.455 4	0.163 6	0.588 0
	Mg^{2+}	769.23	0.000 8	0.594 0	0.687 6	0.895 5
	Na ⁺	400.00	0.001 9	0.894 2	0.451 8	0.713 2
102	Ca ²⁺	625.00	0.000 3	0.634 3	0.207 0	0.822 6
	Mg^{2+}	11 235.96	0.000 1	0.983 6	0.460 6	0.906 9
	Na ⁺	192.31	0.001 2	0.635 2	1.509 5	0.925 1
112	Ca ²⁺	5 000.00	0.000 1	0.903 1	0.211 1	0.513 4
	Mg^{2+}	3 333.33	0.000 1	0.940 3	0.377 4	0.856 9



表了	7 🤇	不同	深度	.黏土	对地	下水	中	离	子	阻滞	系	数
----	-----	----	----	-----	----	----	---	---	---	----	---	---

取样深度/m	$R_{ m d-Na}$	$R_{ ext{d-Ca}}$	$R_{ m d-Mg}$	阻滞系数之和
6	1.2474	1.1053	4.0255	6.3782
48	2.0168	1.9852	1.9852	5.9873
51	5.5907	3.3209	2.2281	11.1397
71	3.0675	3.8690	2.8470	6.9365
84	3.4604	1.1012	3.5397	8.1013
97	2.8144	1.5529	3.3240	7.6913
102	2.9859	1.9099	3.0245	7.9203
112	4.8762	1.5420	1.9691	8.3873

图 3 黏土对地下水中Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的MBC及线性分配系数变化趋势

2.4 地下水中Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的垂向迁移受黏土的阻滞作用影响

根据黏土对地下水中Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的阻滞系数 $R_{d}(表7)$ 可知,一定深度的黏土对地下水中不同常规离子的阻滞强度不同,48、112 m深度的黏土对地下水中不同常规离子的阻滞强度顺序表现为Na⁺>Mg²⁺>Ca²⁺,51 m深度的表现为Na⁺>Ca²⁺>Mg²⁺,71 m深度的表现为Ca²⁺>Na⁺>Mg²⁺,6、84、97、102 m深度的表现为Mg²⁺>Na⁺>Ca²⁺。不同深度的黏土对地下水中Na⁺(Ca²⁺、Mg²⁺)的阻滞程度亦不同。

黏土对地下水中Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的阻滞系数与对应深度地下水中Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的毫克当量百分数的相 关性高达0.9044(图4),且随黏土阻滞强度的增加地下水中Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的毫克当量百分数越高。黏土对 地下水中Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的阻滞系数之和与实时观测的对应深度的电导率的相关性高达0.9122(图4),阻滞 系数之和越大,电导率越高。因此,黏土的阻滞作用对地下水中的Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的垂向迁移、水化学类型及 水质的分带性具有重要影响。



图4 阻滞系数与离子组分的毫克当量百分数的相关性及阻滞系数之和与电导率的相关性

3 结论

1)内陆平原区地下水的水化学成分的形成受阳离子交换吸附作用、酸碱演化、混合作用、碳酸演化、浓缩作用、方解石、石膏等的溶解/沉淀作用、溶滤作用的影响。

2)不同深度黏土对地下水中Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的最优吸附等温曲线符合Henry方程、Langmuir方程,表现为随供水中Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的质量浓度的升高,黏土的吸附容量呈递增趋势,但吸附容量的增加速率是一个由快到缓的变化过程,为线性吸附或单分子层化学吸附过程。

3)6、84、97、102 m深度的黏土对地下水中常规离子的吸附能力顺序表现为Mg²⁺>Na⁺>Ca²⁺,51 m的表现 为Na⁺ >Ca²⁺>Mg²⁺,48、112 m的表现为Na⁺>Mg²⁺ > Ca²⁺,71 m的表现为Ca²⁺>Na⁺>Mg²⁺,并且随黏土矿物量的 增加,黏土的吸附能力越强。

4)一定深度的黏土对地下水中不同常规离子的阻滞强度不同,不同深度的黏土对地下水中Na⁺(Ca²⁺、 Mg²⁺)的阻滞程度亦不同,并且黏土的阻滞作用在一定程度上影响地下水中的Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的垂向迁移、地 下水水化学类型及水质分带性。

5)地下水水化学成分的形成不仅与地层岩性有关,还与古地理气候、水动力条件以及水文地球化学作用密切相关,兹仅探讨黏土对地下水中Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺的阻滞作用,黏土对常规阴离子的控制作用尚需进一步研究。

参考文献:

- MAJHI A, MONASH P, PUGAZHENTHI G. Fabrication and characterization of γ-Al₂O₃ clay composite ultra filtration membrane for the separation of electrolytes from its aqueous solution[J]. Journal of Membrane Science, 2009, 340(1/2):181-191.
- [2] 何璟.纳滤膜表面荷电性能的研究[D].天津:天津大学,2007.
- [3] 王莹.粘性土弱透水层压缩释水与越流机理研究:以华北平原为例[D].北京:中国地质大学(北京), 2016.
- [4] 李静. 咸水越流过程中水、盐运移机理的实验研究[D]. 唐山:河北联合大学, 2012.
- [5] 王英. 咸水越流过程中盐分迁移特征的实验及模拟研究[D]. 唐山:河北联合大学, 2013.
- [6] 徐叶净. 咸水越流过程中粘性土膜效应的实验研究[D]. 唐山:河北联合大学, 2014.
- [7] 李法虎. 土壤物理化学[M]. 北京:化学工业出版社, 2006.
- [8] KAHLE M, KLEBER M, JAHN R. Retention of dissolved organic matter by phyllosilicate and soil clay fractions in relation to mineral properties[J]. Organic Geochemistry, 2004, 35(3):269-276.
- [9] CHURCHMAN G.J. Is the geological concept of clay minerals appropriate for soil science-A literature-based and philosophical analysis[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2010, 35(15/18):927-940.
- [10] OLPHEN V, HSU, HO P. An introduction to clay colloid chemistry[J]. Soil Science, 1963, 97(4):290.
- [11] 张志红. 疏浚底泥污染物在粘土防渗层中的运移规律研究[D]. 北京:北京交通大学, 2007.
- [12] ABDOU F M, NENNAH M E, FODA M S, et al. Selective adsorption of potassium and calcium on clay minerals[J]. Crop Science, 1987, 48(5):1 292-1 304.
- [13] 左文喆, 徐叶净, 王英, 等. 粘性土膜效应的实验研究[J]. 离子交换与吸附, 2013, 29(6):551-560.
- [14] 曹文炳, 万力, 龚斌, 等. 水位变化条件下粘性土渗流特征试验研究[J]. 地学前缘, 2005, 12 (S1):101-106.
- [15] 王平. 咸水通过粘性土层的弥散作用实验研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2010.

- [16] 康华. 渭河沉积物对污染质的吸附及阻滞作用研究[D]. 西安:长安大学, 2010.
- [17] 朱雅宁. 氨氮在弱透水层中的渗透迁移规律研究[D]. 长春:吉林大学, 2011.
- [18] 宋顶峰. 有机磷通过弱透水层迁移转化规律的研究[D]. 长春:吉林大学, 2012.
- [19] VICO L, ACEBAL S G. A langmuir modelation for Mn²⁺ adsorption by fibrous clay minerals[J]. Anales Des La Asociation Quimica Argentina, 2000, 88 (3): 45-52.
- [20] ZAYED A M, SELIM A Q, MOHAMED E A, et al. Adsorption characteristics of Na-A zeolites synthesized from egyptian kaolinite for manganese in aqueous solutions: response surface modeling and optimization[J]. Applied Clay Science, 2017,140:17-24.
- [21] ZHOU W, REN L, ZHU L. Reducement of cadmium adsorption on clay minerals by the presence of dissolved organic matter from animal manure[J]. Environmental Pollution, 2017, 223:247-254.
- [22] LUUKKONEN T, SARKKINEN M, KEMPPAINEN K, et al. Metakaolin geopolymer characterization and application for ammonium removal from model solutions and landfill leachate[J]. Applied Clay Science, 2016, 119:266-276.
- [23] 邢立亭,张凤娟,李常锁,等.鲁北平原浅层地下水水化学特征[J].灌溉排水学报, 2015, 34(6):90-94.
- [24] 王立艳.内陆微咸水区水文地球化学作用试验研究[D].济南:济南大学, 2014.
- [25] 张凤娟.内陆浅层咸水成因机制与演化规律研究[D].济南:济南大学,2015.
- [26] 供水管井技术规范:GB50296-99[S]. 北京:中国标准出版社,1999.
- [27] 地下水环境监测技术规范:HJ/T 164-2004[S].北京:中国环境科学出版社, 2004.
- [28] ZHANG Z, QIN Y, WANG G X, et al. Numerical description of coalbed methane desorption stages based on isothermal adsorption experiment[J]. Science China Earth Sciences, 2013, 56(6):1 029-1 036.
- [29] 陈素平. 天然水中电导率与矿化度的关系探讨[J]. 山西水利科技, 2011,18(2):78-80.
- [30] OMER M F, RENUGA V, SRIPRIYA N, et al. Adsorption isothermal studies on the removal of bod and cod of a leather tannery effluent using clinoptilolite [J]. International Journal of Chemtech Research, 2017, 10(1):496-500.
- [31] VIMONSES V, LEI S, JIN B, et al. Kinetic study and equilibrium isotherm analysis of Congo Red adsorption by clay materials[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 148(2/3):354-364.
- [32] 卢颖.多元统计方法在张掖盆地地下水水化学分布规律研究中的应用[D].石家庄:河北地质大学,2016.

The Role of Clay in Retarding Solute Transport in Inshore Aquifers

YANG Yi¹, XING Liting^{1*}, LI Changsuo², ZHANG Wenjing¹, HUANG Linxian¹

(1.School of Resource and Environment, University of Jinan, Ji'nan 250022, China;

2. Shandong Province Geotechnical Engineering Investigation Institute, Ji'nan 250014, China)

Abstract: [Objective] Hydro-geochemistry of groundwater is controlled by the minerals of the aquifer and the purpose of this paper is to study the role of clay in modulating the salinity of an inshore aquifer. [Method] Clay and saline groundwater samples were taken from different depths via drilling and pumping tests in hydrogeological investigations of an inshore aquifer. The impact of clay content on retardation of chemical transport was investigated by real-time monitoring groundwater quality, isothermal adsorption measurement, factor analysis and correlation analysis. [Result] The isothermal adsorption of Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ to the clay in the aquifer can be fitted to the Henry formula and the Langmuir formula. The retardation of Na⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺ by the clay changed along the depth due to the variations in the minerals types and minerals contents, with Na⁺ adsorption much stronger than Ca²⁺ and Mg²⁺. [Conclusion] Retardation of the three ions by the clay affects the formation of chemical zonation and salinity of the groundwater.

Key words: clay; adsorption isothermal equation; retarding action; groundwater chemistry composition; inland plains

责任编辑:刘春成