

深州地区浅层地下水同位素组成及其指示意义

冯欣, 高业新, 张冰, 崔浩浩, 张亚哲

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061)

摘要:以国土资源部地下水科学深州基地80 m范围内的4眼综合试验井为研究对象,通过开展同位素分析,讨论了浅层地下水氢氧同位素及硼同位素组成,确定了咸水、微咸水的来源。研究表明:咸水、微咸水的氢氧同位素普遍偏负,其数值均未超出海相成因咸水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的特征值,咸水 $\delta^{11}\text{B}\%$ 明显低于海水的 $\delta^{11}\text{B}\%$ 值并介于海水和陆相淡水的 $\delta^{11}\text{B}\%$ 值之间,该数值表明了区域地下水的陆相成因;经计算两微咸水含水层咸水混入比例呈逐年增加的趋势,这与含水层TDS及 Cl^- 含量增加显示出的咸化呈现一致的情况,进一步证明了研究区微咸水出现了一定程度的咸化。

关键词:浅层地下水;氢氧同位素;硼同位素;地下水咸化;深州地区

中图分类号:P339;P334.2

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)02-0039-06

Isotope composition characteristics and implications of shallow groundwater in Shenzhou Area

FENG Xin, GAO Yexin, ZHANG Bing, CUI Haohao, ZHANG Yazhe

(The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: This paper discussed hydrogen and oxygen isotopes and boron isotope of shallow groundwater and determined the sources of brackish water and salt water, which used the 4-hole comprehensive test well within 80 m of the aquifers of different depths in groundwater science and engineering experimental site of ministry of land and resources as the object of studying. The results show that the values of hydrogen and oxygen isotopes of salt water and brackish water in the area are generally negative, and the values of $\delta^{18}\text{O}$ and δD do not exceed the characteristic values of marine saltwater. The $\delta^{11}\text{B}\%$ value is between $\delta^{11}\text{B}\%$ of seawater and continental freshwater and obviously lower than $\delta^{11}\text{B}\%$ in seawater. It proves the terrestrial origin of regional groundwater. The results show that the mix ratio of salty water in two brackish aquifers is increasing yearly by calculations, which is consistent with the increase of TDS and Cl^- in the aquifer. Furthermore, it is proved that the brackish water in the study area tended to be more salty to some extent.

Key words: shallow groundwater; hydrogen and oxygen isotopes; boron isotopes; salinization of groundwater; Shenzhou Area

1 研究背景

同位素技术应用于地下水研究,始与20世纪50年代,初期主要以人工同位素示踪为主,利用中子、 γ 射线源测定土壤含水量、密度、孔隙度等。60年代以来,随着测量技术的不断改进,使得该学科迅

速发展而得到普遍应用^[1],经过几十年的不断研究,稳定同位素方法特别是氢氧同位素已被证明是认识地下水来源和演化的特有工具之一^[2]。

近30余年来,随着高精度测试方法的建立,使硼、氯同位素应用于地球化学领域的方法得到了改进和创新,硼同位素作为良好的示踪剂,已广泛用于

收稿日期:2017-08-02; 修回日期:2017-10-27

基金项目:国土资源部公益性行业专项(200911004);地科院水环所基本科研业务费(SK201301);中国地质科学院基金项目(YYMF201624)

作者简介:冯欣(1986-),女,河北石家庄人,硕士,助理研究员,从事水文地质、环境地质研究。

通讯作者:张亚哲(1981-),女,河北栾城人,硕士,助理研究员,主要从事水文地质及野外试验场管理工作。

解决地球化学过程中的许多问题,在示踪水体特别是地下水污染物来源、受污染程度及范围方面取得了一定研究成果^[3]。

滨海区域咸水研究较为深入,国内外学者在咸淡水界面运动、咸淡水驱替研究、咸水微咸水开发利用、水文地球化学模拟地下水化学环境演化等方面取得了较为丰富的研究成果^[4-8]。而针对内陆咸水区的研究较少,内容集中在室内土柱实验和常规水化学等方面^[9-10],在应用同位素开展内陆浅层咸水的形成机理以及水动力和水化学演化规律方面的研究程度较低,同时与滨海区的海侵运动和过度开采造成的地下水咸化相比内陆咸水区古地理环境和古水文地质条件及基底构造等综合作用是其咸水形成的内因,二者有其本质上的区别;因此,针对内陆咸水区的同位素组成特征、地下水补给来源等问题开展研究,对合理开发利用地下水、防治地下淡水过量开采所引起环境问题具有重要的理论和实际意义。

本项目依托国土资源部地下水科学与工程试验基地—深州基地(以下简称深州试验基地),开展分层水样采集,结合当地气象资料等,采用氢氧稳定同位素及硼同位素研究了区域地下咸水、微咸水的来源及咸淡水混合比例。该研究对于掌握区域咸水特征和进一步开展减缓咸水下移研究工作,有重要的支撑作用。

2 研究区概况

深州试验基地位于河北省衡水深州市东南护驾迟镇南张家庄,地理坐标: N37°54'23.0"; E115°40'44.3",占地面积 24 300 m²。试验场区地处华北平原中部,自上而下分为 5 个含水组:第 I 含水组底界

埋深 40~60 m,第 II 含水组底界埋深一般为 120~170 m,第 III 含水组底界埋深 250~350 m,含水层厚度大,颗粒粗。第 IV 含水组底界埋深 350~450 m。第 V 含水组底界埋深 450~600 m。第 I、II 含水组以冲积、洪积为主,第 I 含水组该的含水层间无明显的隔水层,透水性好,水质普遍为咸水。第 II 含水组岩性颗粒较细,以细砂、粉细砂为主,渗透性和富水性好于第 I 含水组。第 III、IV、V 含水组以冲积、洪积和河湖相堆积作用为主,隔水层分布广泛且厚度大。5 个含水组的地质时代分别对应于全新统、晚更新统、中更新统、早更新统和新近系上新统明化镇组。

主要试验井群位于深州试验基地东南角的地下水动力学平台中,该平台现有 14 眼机井(图 1),在揭露的 600 m 范围内,分布有 10 眼专门观测井,4 眼综合试验井。本项目主要应用浅部 80 m 范围内的 4 眼综合试验井开展相关研究。试验井基本参数见表 1。

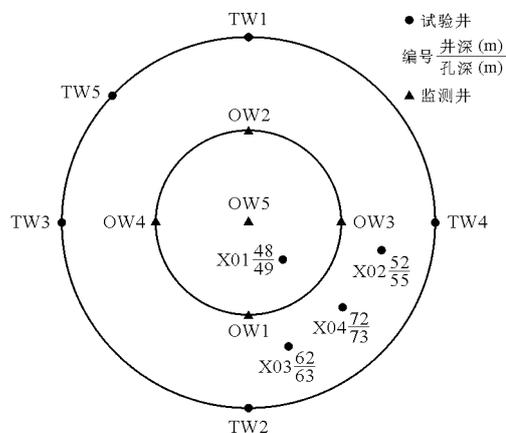


图 1 试验井位置示意图

表 1 试验井基本参数

编号	水样性质	成井/ m	井口直 径/mm	滤水管 位置/m	含水层 岩性	成井水位 埋深/m	成井矿化度/ (g·L ⁻¹)	涌水量/ (m ³ ·h ⁻¹)
X01	第 I 含水组咸水	47	146	30.6~39.6	细+中+粗砂	10.2	11.0	4.656
X02	弱透水层咸水	52	110	49.5~50.7	粉细砂	10.9	10.2	0.22
X03	弱透水层微咸水	62	110	55.8~61.8	中细砂	21.9	0.9	0.1356
X04	第 II 含水组顶部微咸水	72	146	65.2~70.4	细砂+粗砂	30.3	0.8	2.06

3 氢氧同位素

在全球范围内,每年循环海洋的水蒸气以及降水和地表径流接近动态平衡,只有大的气候变化才

可明显地改变地表水、地下水和冰川水的淡水储量。因此,主要受温度控制的 δD 、 $\delta^{18}O$ 同位素成为有效地评价地下水来源和水流路径的研究工具之一^[11]。

随着深度增加,研究区地下水的 $\delta^{18}O$ 值呈现减

小趋势,最咸处(30~40 m)咸水的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -8.5‰ ~ -9.6‰ ,一般比当地大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负。由 $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ 散点图(图2)可知,2014年相较2011年的同位素值落在降水线的右下方且明显偏离了当地大气降水线^[12],说明该地区浅层地下水在两个不同时期经历的蒸发浓缩作用强度呈现了略微增大的趋势^[13]。同时可以看出,深层微咸水的氢氧同位素值与浅层咸水相比显示出贫化特征,表明X03、X04两含水层中的微咸水的可能并非全部来自降雨补给,结合区域地下水常年超采导致水位常年下降的情况,浅层地下水向深层含水层的越流补给成为其重要的补给方式^[14]。

氢氧同位素证据显示,研究区内咸水和微咸水的氢氧同位素普遍偏负,其数值均未超出海相成因咸水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的特征值^[15-16]($\delta^{18}\text{O} > -7.00\text{‰}$ 、 $\delta\text{D} > -55.0\text{‰}$,图2中所示的交叉点为海相成因咸水与大陆演化成因咸水的分界点)。通过上述分析,在氢氧同位素方面排除了深州地区地下咸水微咸水中的盐分来自于海水的可能。因此,在研究区

离子比例分析^[17]的基础上进一步确定了地下水中的盐分可能来源于围岩的淋滤作用,该地区地下水为大陆盐化成因咸水。

4 硼同位素

硼在天然样品中往往以未电离的呈三角形结构的硼酸 $\text{B}(\text{OH})_3$ 和四面体结构的 $\text{B}(\text{OH})_4^-$ 离子两种形式存在。重同位素 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 富集在 $\text{B}(\text{OH})_3$ 中,而轻同位素 $\delta^{10}\text{B}\text{‰}$ 富集在 $\text{B}(\text{OH})_4^-$ 中^[18]。

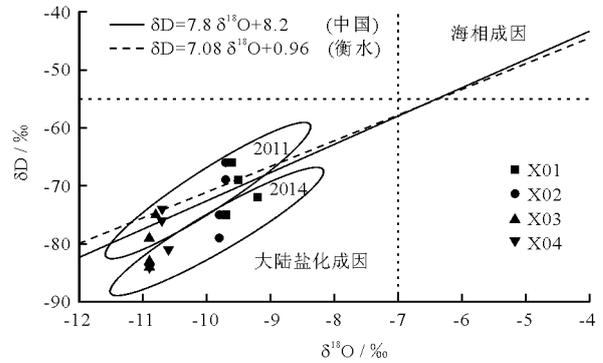


图2 研究区 $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ 散点图

表2 研究区硼同位素及离子比例组成

试验井	时间	pH	B/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Cl/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\delta^{11}\text{B}$ ‰	(Na/Cl)/ 10^{-2}	(Ca/Cl)/ 10^{-2}	(Mg/Cl)/ 10^{-2}	TDS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
X01	2011	7.29	0.68	4558	15.99	54.41	8.73	17.90	11317
	2012	7.53	0.54	4398.5	15.86	55.50	8.57	18.31	11124
	2013	7.24	0.87	4485	17.08	52.98	8.82	17.79	11673
	2014	7.26	0.60	4651	16.45	56.96	8.78	17.66	11864
	均值	7.33	0.67	4523.13	16.35	54.96	8.73	17.92	11494.50
X02	2011	7.30	0.54	4324	17.33	49.75	9.32	18.60	10227
	2012	7.03	0.50	4302	15.71	51.52	8.58	18.88	10357
	2013	7.33	0.70	4613	14.96	52.20	8.19	18.86	10755
	2014	7.34	0.42	4628	16.53	54.93	8.50	17.52	10842
	均值	7.25	0.54	4466.75	16.13	52.10	8.65	18.47	10545.25
X03	2011	7.03	0.05	993.5	5.00	36.68	12.09	9.56	1209
	2013	7.17	0.07	1061.0	7.35	36.09	13.07	10.22	1631
	2014	7.27	0.09	1156	8.36	36.43	11.28	9.39	1710
	均值	7.16	0.07	1070.17	6.90	36.40	12.15	9.72	1516.67
X04	2011	8.45	0.13	516.5	5.68	54.40	10.53	11.29	1139
	2013	7.99	0.09	555.85	6.34	55.05	8.54	11.06	1429
	2014	7.35	0.07	659.80	7.77	49.20	9.16	8.13	1227
	均值	7.93	0.10	577.38	6.60	52.88	9.41	10.16	1265.00

本项目的硼同位素测试由中国科学院青海盐湖研究所完成,采用 TRiton 热电离子质谱仪测定,监测范围(3~320)amu,分辨率450,灵敏度1/500,丰度灵敏度 2×10^{-8} 。

样品的硼同位素组成表示为:

$$\delta^{11}\text{B}(\text{‰}) = \left(\frac{(^{11}\text{B}/^{10}\text{B})_{\text{样品}}}{(^{11}\text{B}/^{10}\text{B})_{951}} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

式中:NIST951 H_3BO_3 标准物质的测定值为:4.05234 ± 0.00021 ($n=3, 2\sigma$)

地下水受到咸水入侵时,在混合、吸附、水岩等作用下会令硼同位素发生分馏,使得硼同位素显著区别于区域背景值。因此,在结合水化学和其它同位素等信息情况下,硼及其同位素作为良好示踪剂为研究水圈中物质的地球化学循环过程提供了新的手段^[19]。

将深州试验基地不同试验井的 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 值列于表2,表2中还同时列出了地下水的pH值、TDS、氯的含量、硼的含量及主要离子比等。由表2可知,研究区咸水pH值变化范围为7.03~7.53,微咸水为7.03~8.45,硼同位素的变化范围在咸水中为15.71~17.33,微咸水为5~8.36。咸水 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 平均值为16.24,微咸水均值6.75,其 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 值介于海水(39.5‰)和陆相地下水($-3\text{‰} \pm 5\text{‰}$)之间^[20],且明显低于海水中的 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 值,因此从硼同位素含量方面也进一步表明了该区域地下水的非海相来源。

由表2可以发现水中硼的富集较复杂,尽管在TDS较高的水中硼的含量较高,但硼浓度最高的水其含盐量并不是最高的。

研究区地下水中的主要阴离子为 Cl^- 、 SO_4^{2-} ,阳离子以Na、K、Mg为主。不同深度不同含水层的Na/Cl、K/Cl、Mg/Cl、Ca/Cl比值也有一定的区别,图3、图4给出了研究区微咸水、咸水中的硼同位素组成与Na/Cl、Ca/Cl、Mg/Cl以及TDS的关系。由图3可以看出,研究区内微咸水含水层各数据点比较离散,硼同位素组成与Na/Cl、Mg/Cl及Ca/Cl均没有明显的相关性,硼同位素组成随着地下水中TDS的增大而呈一定的正向相关关系。

而在咸水(图4)中可以看出, $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 值与Ca/Cl比值有相关性,这表明咸水中的硼同位素组成受Ca离子含量的影响。在碳酸盐结晶过程中, $\delta^{10}\text{B}\text{‰}$ 会优先于 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 以 $\text{B}(\text{OH})_4^-$ 形式进入到 CaCO_3 中或与碳酸盐共沉淀^[21]。当水中Ca离子含量较高时咸水中的硼可能会随少量的碳酸盐进入到固相中,在此过程中咸水中的 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 相对富集, $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 值增加。

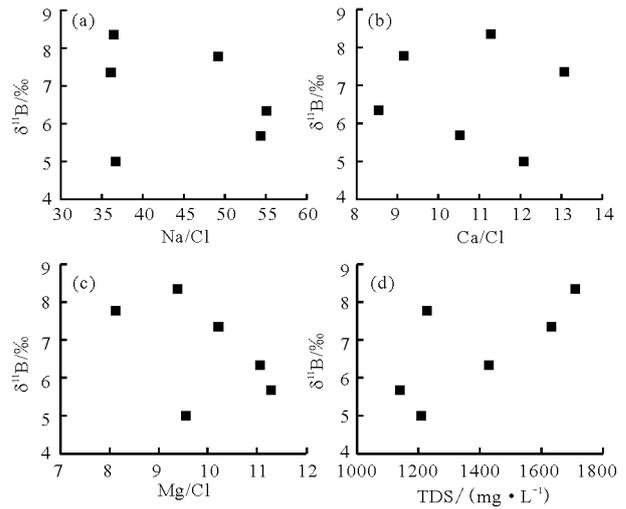


图3 微咸水中B与各离子比例及TDS关系图

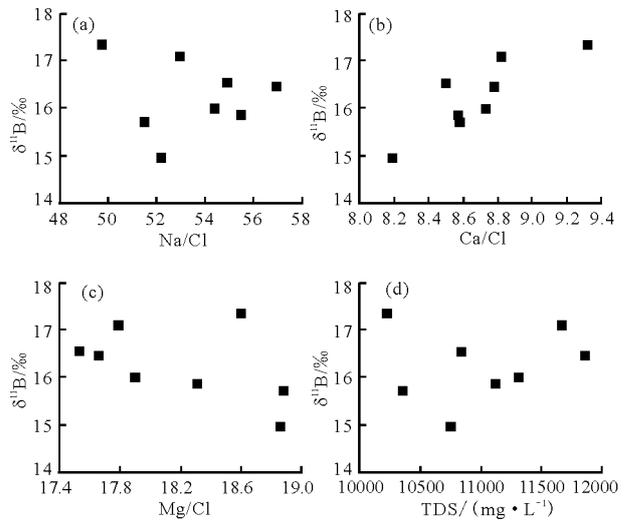


图4 咸水中 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 与各离子比例及TDS关系图

研究区开展了分层监测孔现场分级联合试验,并投入示踪剂。研究结果表明,在X02、X03及X04井中均监测到X01井投放的示踪剂。由此可知各含水层之间存在水力联系,上层咸水通过一定途径进入下层含水层^[22]。而海相与陆相来源水的硼同位素组成具有十分明显的差别。海水的 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 值稳定在39.5‰左右,地下卤水的 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 值可达57.5‰,而陆相地下淡水的 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 值一般介于 $-3\text{‰} \pm 5\text{‰}$ 之间。因此,地下淡水一旦受到咸水的污染, $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 值都会明显地升高^[23]。

当咸水与淡水混合按照不同比例混合时,在混合的初期,混合水的 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 值随咸水的掺入而急剧增加至咸水的 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 值后趋于稳定^[17]。即当只有少量的咸水混入时,即可以通过 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 值的增大而判断咸水是否混入。

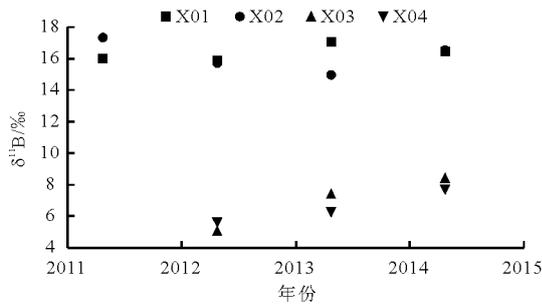


图 5 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 随时间变化规律

由图 5 可以看出,浅层咸水 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 较稳定,随着时间变化程度不大,而微咸水中 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 随时间推移呈现逐步上升的趋势,而相应的硼含量并未出现显著增加。

经研究表明^[24],咸水和淡水混合可由以下公式计算:

$$\delta^{11}\text{B}_{\text{混}} = \frac{FC_{\text{B咸}}\delta^{11}\text{B}_{\text{咸}} + (1 - F)C_{\text{B微咸}}\delta^{11}\text{B}_{\text{微咸}}}{FC_{\text{B咸}} + (1 - F)C_{\text{B微咸}}} \quad (2)$$

上式经过变换整理可以得出:

$$F = \frac{C_{\text{B咸}}(\delta^{11}\text{B}_{\text{咸}} - \delta^{11}\text{B}_{\text{微咸}})}{C_{\text{B咸}}(\delta^{11}\text{B}_{\text{咸}} - \delta^{11}\text{B}_{\text{混}}) + C_{\text{B微咸}}(\delta^{11}\text{B}_{\text{混}} - \delta^{11}\text{B}_{\text{微咸}})} \quad (3)$$

式中: F 为咸水混合分数; C_B 为各水样浓度; $\delta^{11}\text{B}$ 为各水样中硼同位素含量。

以 2012 年测得的 X01 井水样 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ (15.86) 为咸水背景值, X03、X04 井水样为微咸水背景值, 以 X03、X04 水样 2013、2014 年测试值为 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 混合值,用公式(2)计算对应年份微咸水中混入咸水比例见表 3。

表 3 微咸水 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 混入比例统计表

试验井	$\delta^{11}\text{B}\text{‰}$			混入比例/%	
	2012	2013	2014	2013	2014
X03	5.00	7.35	8.36	1.19	3.19
X04	5.68	6.34	7.77	1.31	4.71

由表 3 计算结果可以得出,研究区内两微咸水含水层咸水混入比例呈现逐年增加的情况,这与研究区两含水层 TDS 含量及 Cl^- 含量增加所显示出的咸化呈现一致的情况。进一步证明了研究区微咸水出现了一定程度的咸化情况。

5 结论与展望

(1)研究区内氢氧同位素结果显示,地下水在

不同时期经历的蒸发浓缩作用强度不同,呈现了的增大趋势。区域内咸水、微咸水的氢氧同位素普遍偏负,其数值均未超出海相成因咸水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 的特征值,进一步证明了区域内地下水为大陆盐化成因地下水。

(2)地下咸水 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 介于海水和陆相地下水的 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 值之间,且远偏离海水 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 值。微咸水含水层 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 较离散,硼同位素组成随着地下水中 TDS 的增大而呈一定的正向相关关系;在咸水中 $\delta^{11}\text{B}\text{‰}$ 值与 Ca/Cl 比值有相关性,这表明咸水中的硼同位素组成受 Ca 离子含量的影响。

(3)研究区含水层间存在水力联系,两微咸水含水层咸水混入比例呈现逐年增加的情况,这与含水层 TDS 含量及 Cl^- 含量增加所显示出的咸化呈现一致的情况。进一步证明了研究区微咸水出现了一定程度的咸化情况。

由于测试经费和测试周期较长的限制,导致测试样本数目较少,不能完全确定研究区弱透含水层和第二含水层顶部是否被上层咸水影响,但现有数据显示,该两含水层地下水呈现了一定的咸化趋势,且在第二含水层顶部含水层中的咸化趋势较为明显。

参考文献:

- [1] 李学礼,孙占学,刘金辉.水文地球化学:第 3 版[M].北京:原子能出版社,2010:94-99.
- [2] AGGARWAL P K, GAT J R, FROEHLICH K F. Isotopes in the water cycle: Past, present and future of a developing science[J]. Springer Verlag GmbH, 2007 (38): 621-622.
- [3] 郎赞超,刘丛强,赵志琦.硼及其同位素对水体污染物的示踪研究[J].地学前缘,2002,9(4):409-415.
- [4] VALLEJOS A, SOLA F, PULIDO-BOSCH A. Processes influencing groundwater level and the freshwater-saltwater interface in a coastal aquifer[J]. Water Resources Management, 2015,29(3):679-697.
- [5] 孟庆生,佟雪,郑西来,等.大沽河咸水入侵区氯离子浓度、矿化度与地层电阻率关系实验研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2015,45(5):87-92.
- [6] 黄向青,甘华阳,路剑飞,等.雷州湾东海岛滨岸地下水化学要素变化特征和水质现状[J].水资源与水工程学报,2013,24(5):59-65.
- [7] 龙秋波,袁刚,王立志,等.邯郸市东部平原区微咸水现状及开发利用研究[J].水资源与水工程学报,2010,21(4):126-129.
- [8] 韩非,吴吉春,张永祥.咸/卤水入侵越流含水层的数值

- 模拟:以山东省莱州湾南岸为例[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2011, 47(3): 281-290.
- [9] 荣慧峰, 殷文静, 杨学亮, 等. 沧州地下水咸水成因分析[J]. 地下水, 2011, 33(2): 26-27+45.
- [10] 李亚美, 成建梅, 李敏敏, 等. 咸水在黏性土中迁移转化的试验研究[J]. 水资源保护, 2015, 31(3): 88-93.
- [11] 徐彦泽. 沧州市地下水的水文地球化学与稳定同位素[D]. 北京: 中国地质大学, 2009.
- [12] 王仕琴, 宋献方, 肖国强, 等. 基于氢氧同位素的华北平原降水入渗过程[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 495-501.
- [13] 汪敬忠, 吴敬禄, 曾海鳌, 等. 内蒙古河套平原水体同位素及水化学特征[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(4): 104-112.
- [14] 李莎, 成建梅, 李敏敏, 等. 人类开采活动影响下的衡水地区地下水水质特征及演化[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 55-61+100.
- [15] 周炼, 刘存富, 王佩仪. 河北平原第四系咸水同位素组成[J]. 水文地质工程地质, 1998(3): 4-8.
- [16] 周炼, 刘存富. 河北沧州地区天然水的氯同位素组成[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1996, 21(5): 563-566.
- [17] 冯欣, 张亚哲. 深州地区地下水离子比例系数分析研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(4): 18-20+24.
- [18] DOTSIKA E, POUTOUKIS D, MICHELOT J L, et al. Stable isotope and chloride, boron study for tracing sources of boron contamination in groundwater: Boron contents in fresh and thermal water in different areas in Greece[J]. Water Air & Soil Pollution, 2006, 174(1-4): 19-32.
- [19] 肖荣阁, 大井隆夫, 蔡克勤, 等. 硼及硼同位素地球化学在地质研究中的应用[J]. 地学前缘, 1999, 6(2): 361-368.
- [20] LESLIE D, LYONS W B, WARNER N, et al. Boron isotopic geochemistry of the McMurdo Dry Valley lakes, Antarctica[J]. Chemical Geology, 2014, 386(12): 152-164.
- [21] KLOCHKO K, KAUFMAN A J, YAO W, et al. Experimental measurement of boron isotope fractionation in seawater[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2006, 248(1-2): 276-285.
- [22] 李亚美, 成建梅, 崔莉红, 等. 分层监测孔现场分级联合试验确定含水层参数[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(3): 132-137.
- [23] 肖军, 贺茂勇, 肖应凯, 等. 硼同位素地球化学应用研究进展[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(9): 20-33.
- [24] 肖应凯, 廖步勇, 王中良, 等. 长江口咸淡水混合过程中溶解态硼的含量及同位素组成特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(4): 324-327.

(上接第38页)

- [14] 邓建伟, 唐小娟, 张新民. 石羊河流域北部平原区生态安全评价[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(8): 21-24.
- [15] 胡芳芳. 甘肃河西内陆地区生态需水分析与生态恢复[J]. 北京农业, 2012(6): 189-190.
- [16] 陈福昌, 杨小英, 杨小梅. 石羊河流域水问题及生态需水估算[J]. 甘肃联合大学学报(自然科学版), 2008, 22(3): 82-87.
- [17] 靳美娟. 生态需水研究进展及估算方法评述[J]. 农业资源与环境学报, 2013, 30(5): 53-57.
- [18] 张恒嘉. 河西内陆河流域(张掖)水资源现状及生态环境问题研究[J]. 现代农业科技, 2009(2): 238.
- [19] 杨立彬, 黄强, 阮本清, 等. 额济纳绿洲生态需水研究[J]. 水利学报, 2012, 43(9): 1127-1133.
- [20] 张瑞君, 段争虎, 陈小红, 等. 民勤县2000-2009年来水资源生态环境压力分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(2): 558-563.
- [21] 陈亚宁, 郝兴明, 李卫红, 等. 干旱区内陆河流域的生态安全与生态需水量研究——兼谈塔里木河生态需水量问题[J]. 地球科学进展, 2008, 23(7): 732-738.
- [22] 郝博, 粟晓玲, 马孝义. 甘肃省民勤县天然植被生态需水研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 158-164.
- [23] 蒋友严, 韩涛, 王有恒, 等. 石羊河调水10a来民勤绿洲生态脆弱性变化[J]. 干旱区研究, 2014, 31(1): 157-162.
- [24] 杨辉, 刘威. 对鄂州市生态农业气象服务的思考[J]. 现代农业科技, 2016(16): 298+300.
- [25] 黄庆忠, 刘芳, 莫丽娜. 基于GIS环江县桑蚕农业气候区划[J]. 广西农学报, 2014, 29(5): 38-41+37.
- [26] 汪志荣, 张晓晓, 田彦杰. 流域生态需水研究体系和计算方法[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(15): 3204-3211.
- [27] 徐先英, 丁国栋, 孙保平, 等. 内陆河下游民勤绿洲主要防风固沙植被生态需水量研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 144-148.
- [28] 鱼腾飞, 冯起, 司建华, 等. 遥感结合地面观测估算陆地生态系统蒸散发研究综述[J]. 地球科学进展, 2011, 26(12): 1260-1268.
- [29] 唐小娟, 邓建伟, 张新民, 等. 石羊河流域北部平原区生态功能区划研究[J]. 中国农村水利水电, 2009(5): 23-25.