

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.04.005

豫东平原扶沟等地高氟地下水成因和富集条件探讨

刘海风, 邓 斌, 古艳艳

(河南省地质矿产勘查开发局第五地质勘查院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对研究区 211 眼机井地下水水质调查结果, 分析研究区高氟水分布特征、演化规律、水化学特征、高氟水形成的主导条件、影响氟富集的主要因素。结果表明: 该区域浅层地下水中 F^- 质量浓度随地下水埋深的增加呈上升趋势; 地下水化学类型以 $HCO_3^-Na \cdot Mg$ 和 HCO_3^-Na 型碱性水为主; 主导氟富集的环境条件是强碱化水化学环境, 地下水中 F^- 质量浓度与 Na^+ 质量浓度呈正相关, F^- 质量浓度与 Ca^{2+} 质量浓度和 HCO_3^- 质量浓度分别呈负相关关系; 除自然因素外, 人类频繁活动也影响着水体中氟化物质量浓度的变化。

关键词: 豫东平原; 地下水; 氟化物; 分布特征; 氟富集

中图分类号: P641.12 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2015)04-0027-05

Enrichment condition and causes of high fluoride groundwater in Fugou and other regions in Yudong Plain

LIU Haifeng, DENG Bin, GU Yanyan

(No. 5 Institute of Geo-Exploration of Henan, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: According to the groundwater quality survey results of 211 wells in the study region, the authors of this article analyzed the distribution characteristics, evolution law, and hydro-chemical characteristics of high fluoride groundwater, and the leading condition of high fluorine water formation, the main factors of influencing the fluorine concentration as well. The results show that fluoride concentrations in the shallow groundwater of the area has a rising trend as the bury of groundwater increases; the main chemical types of groundwater are $HCO_3^-Na \cdot Mg$ and HCO_3^-Na alkaline water; the environmental condition that controls fluoride enrichment is alkali water chemical environment; fluoride concentration in groundwater has positive correlation with Na^+ concentration, having negative correlation with concentration of Ca^{2+} and HCO_3^- ; besides the natural factor, frequent human activities also affect the change of fluoride concentration in water.

Key words: Yudong Plain; groundwater; fluoride; distribution characteristics; fluoride enrichment

氟化物是人体必需的元素, 人体各种组织均需要氟化物, 但过量摄入则可产生氟中毒。据统计, 水中氟质量浓度为 1.1 ~ 2.0 mg/L 时, 氟斑牙发病率在 30%, 有少量氟骨症, 为轻病区; 氟质量浓度为 2.1 ~ 4.0 mg/L 时, 氟斑牙发病率在 80%, 有一定量氟骨症, 为中等病区; 氟质量浓度为 4.1 mg/L 以上时, 氟斑牙发病率大于 90%, 有较多氟骨症, 为重病区。氟在自然界广泛分布, 是人类饮食中的必需元

素。人们很早以前就已经将氟缺乏与龋齿的患病率联系起来, 含氟牙膏也被广泛提倡使用。尽管氟对人类是必需的, 但最佳的摄入量只是在一个很窄的范围之内, 过量氟摄入的危害已被证实。据《河南省地方性氟中毒防治研究概要》资料: 地方性氟中毒主要侵犯骨骼系统, 表现为氟斑牙和氟骨症。病情轻者, 牙釉质出现白垩、着色、缺损样改变, 即所谓氟斑牙; 重者可侵害骨骼, 表现为全身关节疼痛、活

动受限、骨骼变形,甚至瘫痪,即所谓氟骨症。国内外众多专家学者对自然界的氟化物进行了深入研究^[1-5],一些专家学者也对高氟地下水的形成进行研究^[6-10],对氟的防治措施也做了较多的研究^[11],但对有关豫东地区地下水氟化物富集因素及形成条件比较系统的研究尚显不足。豫东大部分地区以地下水作为生活饮用水水源,饮用水中氟质量浓度与人体健康息息相关,是制约地下水水质的重要指标。为了保障城乡居民饮水安全,为合理开采地下水提供依据,迫切需要加强地下水氟化物的研究。本文以豫东平原高氟区为研究对象,通过水质调查,分析研究区地下水中氟化物的分布、富集及成因等,旨在为更深入研究豫东地区地下水中氟化物变化规律及防治提供依据,也为类似地区地下水氟化物研究提供借鉴。

1 氟化物分布规律及演化

1.1 氟化物分布规律

选取高氟区扶沟县和鄢陵县一带作为专题研究区,研究区浅层地下水氟化物质量浓度分布情况见图1。该区浅层地下水中氟化物质量浓度普遍超出饮用水标准。研究区主要为农村地区,其生产生活用水和农业灌溉用水来源以开采的浅层地下水为主。随着地下水开采力度的不断加大,加上降水的影响,研究区浅层地下水浅部水的垂向上循环交替加剧,使得浅层地下水埋深10~20 m之间的氟化物质量浓度平均值最小,埋深40~60 m的氟化物质量浓度平均值最大。从不同浅层地下水埋深氟化物平

均质量浓度趋势线来看,氟化物质量浓度随着浅层地下水埋深的增加而增加,见图2。

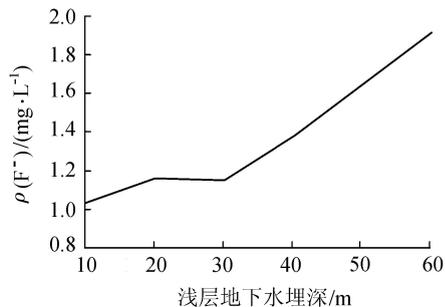


图2 $\rho(\text{F}^-)$ 与浅层地下水埋深的关系

1.2 氟化物演化

研究区的气候属半湿润、半干旱类型,蒸降比为2.0~2.5。由于黄河在历史上具有游荡性特点,整个豫东平原的微地貌较为复杂,分布着规律不等的槽形、碟形等易涝洼地,地表水中氟化物质量浓度较高,一般在0.4~1.0 mg/L,个别河段大于2 mg/L。全新统松散沉积物主要来自黄土地区,云母、角闪石、电气石、磷灰石等高氟矿物较多,黏土、粉质黏土中的总氟一般为400~610 $\mu\text{g}/\text{mL}$,水溶性氟3~10 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。20世纪50年代至60年代初期,地下水位埋深一般在2.0 m左右,80年代初,水位埋深2.0~4.0 m和小于2.0 m的面积仍大于60%,包气带岩性以毛细作用较强的粉土分布最广。特别是一些低洼地区,地下水径流微弱,以垂直交替为主,蒸发作用强烈。水质以钠多钙少,偏碱性, HCO_3-Na , $\text{HCO}_3-\text{Na} \cdot \text{Mg}$ 型水分布面积较大。苏打化土壤广泛发育。

总之,研究区氟源较为丰富,又具有促使氟活化和富集的条件,因此早期浅层高氟地下水分布十分普遍,并往往达到较高的质量浓度级别。

20世纪80年代以来,研究区加大了地下水的开采力度,因而加快了地下水的垂向更替,水位埋深较以前略有下降,部分地区蒸降比略有降低。全区氟化物质量浓度见表1。从表1可以看出,高氟水分布面积有所减少,特别是研究区西部和西北部高氟水分布区面积明显减少。

表1 20世纪80年代和2012年氟化物质量浓度对比

$\rho(\text{F}^-)/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	F^- 质量浓度分布面积占全区面积比例/%	
	20世纪80年代	2012年
<0.5	3.6	5.8
[0.5,1.0)	25.5	32.2
[1.0,2.0)	56.4	51.9
[2.0,3.0]	12.3	8.3
>3.0	2.3	1.8

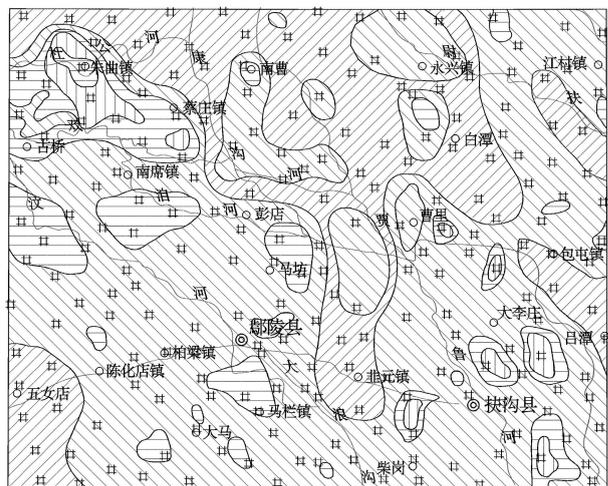


图1 浅层地下水氟化物质量浓度分区

2 地下水高氟区类型

为了明确反映高氟地下水形成的机理和特征,依其水中氟的来源和主要形成作用,将研究区高氟区地下水的成因类型划分为“溶滤-径流富集型”,即氟富集于松散沉积物,在溶滤、水解等作用下进入地下水,随水迁移、径流的过程中,遇有氟富集的环境条件时便发生富集。

研究区位于豫东黄河冲积扇高氟环境区的中下游地区,地下水的补给、排泄以垂直交替为主,浅层地下水为一“垂直调节型”地下水库。因此,氟溶滤、水解、阳离子吸附交替作用强烈,使水中氟质量浓度增加。氟受“水库”垂直调节的控制,约束了水中氟的活性,加之地形低洼,地下水径流迟缓,使氟区域富集。这是研究区地下水高氟区形成的原因之一。原因之二,研究区位于高氟环境区地下水的富集带,研究区以北至冲积扇脊柱地带,为环境区氟的溶滤、水解带。由于富氟岩土广布,溶滤面积大,氟水解作用强,使研究区氟的积累大大增加。氟沿地下水流向运移至研究区后,由于地下水径流迟缓,使研究区地下水氟趋于稳定并富集,形成地下水高氟区。

3 地下水中氟的来源和富集条件

3.1 氟的来源

除了极微量气态氟随水凝结进入水中,含氟粉尘落入溶解于水中以及含氟废水的排放入渗等外,地下水中的氟还来源于岩和土,即浅层松散沉积物。

研究区浅层松散沉积物主要来自黄河冲积层和双洎河冲积层。由于黄河流经大面积的黄土区和基岩山区,在漫长的地质历史风化剥蚀过程中,含氟岩石及矿物为研究区浅层沉积物提供了氟的物质来源。本次研究对浅层沉积物做了含氟矿物分析,结果见表2。

含氟矿物经长期风化、溶滤和水解作用,氟被解析,形成大量可被溶解的氟化物(萤石 CaF_2),溶解

度为 40 mg/L ; 氟磷灰石 $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$, 溶解度为 $200 \sim 500 \text{ mg/L}$; 氟盐 NaF , 溶解度为 $40 \sim 540 \text{ mg/L}$ 。由于含氟矿物的水溶性和黏土的吸附性,使氟广布于浅层沉积物中,浅层沉积物成为研究区地下水中氟的主要来源。

3.2 主导氟富集的环境条件

地下水中氟富集的环境条件比较复杂,主要为地形地貌、气象水文、地质背景和水文地质条件以及水、土化学环境等。而主导高氟地下水的主要条件,则是强碱化水化学环境。

研究区地下水中氟的迁移和富集,几乎涉及水中所有的主要离子成分和离子间的相互关系。

a. $\rho(\text{F}^-)$ 与 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 的关系。它们是一对拮抗体。表生带中氟与钙的作用形成氟化钙(CaF_2)沉淀,并被水溶解。氟在水中的迁移、富集受钙浓度制约,钙的质量浓度大时易产生氟化钙的沉淀,水中氟质量浓度有所降低。研究区地下水中氟受钙质量浓度制约的情况见图3。从图3可以看出,氟质量浓度与钙质量浓度大致呈现负相关,即水中钙的增加抑制了水中氟的增加。

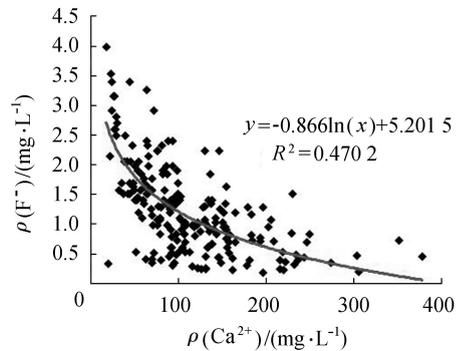


图3 $\rho(\text{F}^-)$ 与 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 的相关性

b. $\rho(\text{F}^-)$ 与 $\rho(\text{Na}^+)$ 的关系。如图4所示,氟(F^-)质量浓度与钠(Na^+)质量浓度大致呈正相关,氟和钠的质量浓度在蒸发浓缩作用下总是同时增加。研究区为高氟碱性环境, HCO_3^- 在不断形成和积累,钠在地下水中的质量分数为 $50\% \sim 80\%$, 钠

表2 包气带含氟矿物分析

采样地点	深度/m	含氟矿物名称	质量/g	在粉质土重亚砂土中的质量分数/%		矿物描述
				在岩石中	所含的质量分数/%	
扶沟县 城郊乡 蒋洼村	0.7~0.9	角闪石	0.0558	2.2800	0.0189	浅绿-绿色,柱状、次柱状(次棱角状)
		电气石	0.0008	0.0300	0.0003	褐灰-蓝灰色,柱状
		磷灰石	0.0054	0.1200	0.0018	无色、圆柱状-柱状、圆状
		云母	2.4787	93.0900	0.7698	白云母占绝对优势,无色片状-板状;黑云母少为浅褐色,片状-板状
扶沟县 城郊乡 东蒋凹村	0.9~2.3	角闪石	0.1252	2.4680	0.0390	浅绿-绿色,柱状、次柱状(次棱角状)
		电气石	0.0057	0.1120	0.0020	褐灰-蓝灰色,柱状
		磷灰石	0.0164	0.3230	0.0050	无色、圆柱状-柱状、圆状
		云母	4.6562	91.7680	1.4550	白云母占绝对优势,无色片状-板状;黑云母少为浅褐色,片状-板状

的活性较高,形成钠含氟水的存在,地下水中氟随钠的活性增大而增加。

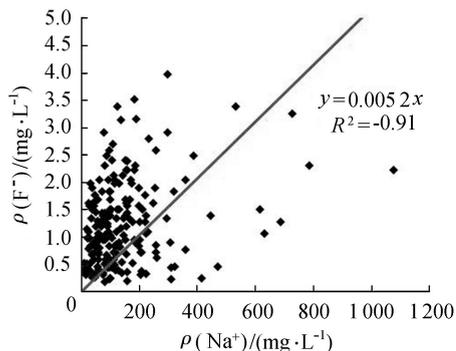


图4 $\rho(\text{F}^-)$ 与 $\rho(\text{Na}^+)$ 的相关性

c. $\rho(\text{F}^-)$ 与 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 的关系。 $\rho(\text{F}^-)$ 与 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 大致呈正相关,见图5。

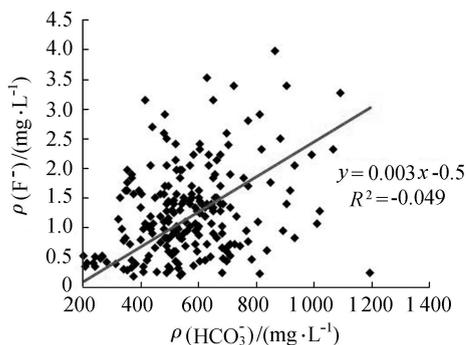


图5 $\rho(\text{F}^-)$ 与 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 的相关性

4 地下水氟富集的主要影响因素

地下水中的氟化物主要来源是岩石、土层中氟化物。流域内岩石、土层中氟化物质量比,较地下水中的氟质量浓度高出许多甚至几个数量级,因此,在岩石风化过程中,部分氟化物被地下水所溶解,导致氟化物质量浓度增高。如,伏牛山—桐柏山—大别山一带,因广泛分布含氟化物的花岗岩和萤石矿脉,构成典型的富氟地球化学环境区。下面简述一下主导研究区氟富集的几个主要因素。

4.1 地形地貌因素

研究区地下水氟的富集明显受地形地貌控制。

a. 岗地。由于地形高,水位相对深埋,地下水径流较好,有利于氟向洼地迁移,故为低、中氟水分布。如:尉氏县朱曲镇北、南曹乡周边和永兴镇一带,以及扶沟县的韭园镇北部,氟质量浓度多小于0.5 mg/L。

b. 洼地。由于水位埋深浅,易溶盐类易于聚集,加之地下水蒸发浓缩作用强烈,苏打盐渍化相对较强,使洼地地下水趋于碱化或碱化增强,从而有利于水中氟富集,形成高氟水分布。如:扶沟县城西南的两塚坡、鄢陵县城北的马汞、扶沟县城北的大李庄乡一带,氟质量浓度一般都大于1.0 mg/L。

c. 掩埋型洼地。广大的近期黄河冲积平原上,

由于近期黄河冲积层掩埋了黄泛前的洼地、盐碱地而形成了目前看似平坦的掩埋地貌。在掩埋洼地,由于富含碳酸氢钠的盐碱土被埋于地下,促使地下水碱化程度增强,形成强碱化水化学环境,因此,掩埋型洼地适于水中氟富集,形成高氟地下水分布。如,分布于研究区西北部朱曲以南、双洎河以北的地区,由于双洎河冲积层掩埋了古黄河冲积扇前缘以及大李庄北一包屯西,近期黄河冲积层掩埋了古低洼地,氟富集程度最高,氟质量浓度超过3.0 mg/L,其他类似地区氟质量浓度一般为1.0~3.0 mg/L。

4.2 水文地质因素

a. 地下水运动特征。研究区地下水运动特征表现为水力坡度小、径流迟缓,如在南席镇西北至古桥乡、扶沟县东部径流相对较好的地区,一般是氟随水径流方向迁移。径流迟缓的地区,一般氟反复上下淋溶而又很少向外区流失,因而水中氟易于富集。

b. 地下水埋藏条件。地下水位埋藏条件对氟富集的影响也较明显。随着埋深的变化,氟富集呈现有规律性变化的特点:埋深小于2.0 m,水中氟易于富集,为高氟区;埋深2.0~4.0 m,高氟水分布面积小且氟质量浓度低,大部分地区为中氟水分布区;埋深大于4.0 m的岗地,为低氟、中氟水分布区。

c. 地下水动态类型。“入渗-蒸发型”地下水动态类型对氟富集有相当大的影响。降水入渗补给时,水化学溶滤、阳离子吸附交替作用强烈,对氟扩散、迁移以及水中氟富集产生较大的影响;地下水垂直排泄时,浓缩作用强烈,氟反复上下淋溶,利于水中氟富集。

4.3 土化学环境因素

研究区土化学环境为高氟碱性环境。高氟分布往往与富含碳酸氢钠的盐碱土分布相一致,这是由于浅层土层中富含溶解度大的盐类大量累积的结果。易溶盐类累积,使土层中氟迁移性发挥,增大了土层中水溶性氟质量比,同时也加快了氟盐(NaF)的形成与集散。

研究区由于浅层土层中积累了较多的易溶盐类,因此常形成一片片古老的盐碱地。降水入参与含盐最高的土层接触,经过溶滤和阳离子吸附交替,使地下水不断地获得盐分而趋于碱化或碱化增强,地下水氟易于富集。

4.4 钠、钙的交替作用

研究区地下水中的氟质量浓度随着钠、钙质量浓度比值的增大而增加(图6),这是由于水中钙的减少和钠的增大,或者是土层中的钠交替或置换水中的钙,使水中的钠质量浓度增高。

研究区浅层沉积物是富钠的,降水入参与土层长期接触,在蒸发浓缩及溶滤作用过程中,钠、钙交替或置换,很容易造成地下水中重碳酸离子同碱土

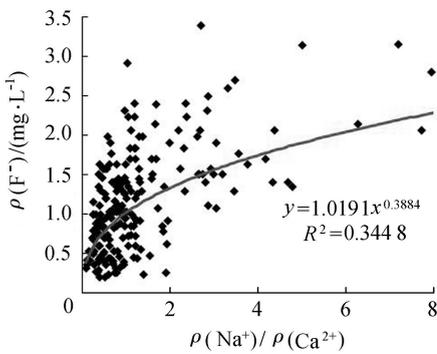


图6 $\rho(\text{F}^-)$ 与 $\rho(\text{Na}^+)/\rho(\text{Ca}^{2+})$ 的关系

金属钙伴存,并转化为统碱土金属钠结合,成为有利于氟富集的水化学环境。为了进一步说明这个问题,对酸化和碱化这两个概念加以分析。酸化,指的是水中强酸离子同碱土金属离子伴存;碱化,指的是水中碳酸离子同碱土金属伴存。酸化和碱化不同于

表2 水质类型与水中氟质量浓度的关系

$\rho(\text{F}^-)$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	水化学类型阳离子为 Na(以 Na 为主)		水化学类型阳离子为 Mg(以 Mg 为主)		水化学类型阳离子为 Ca(以 Ca 为主)	
	样品数/个	百分比/%	样品数/个	百分比/%	样品数/个	百分比/%
>2	24	38.7	8	13.8	0	0
[2,1]	26	41.9	41	70.7	20	22.0
<1	12	19.4	9	15.5	71	78.0

可见,主导高氟地下水形成的环境条件是强碱化水化学环境,氟随水化学碱化程度的增强而富集。氟成因类型有溶滤型、碱化型和热水富集型。

4.6 人为因素

人为因素主要包括人类活动带来的污染和地下水的合理开采。降水中的氟主要来源于近年增加的氟化氢化合物(CFC)和工业排放的含氟化物大气烟尘。降水和含氟废水排放,使大量可溶性或不可溶性氟进入地表水体和浅层地下水体中。部分地区曾使用污水灌溉,污水中也含有较高质量浓度的氟化物,质量浓度范围在 0.37 ~ 0.8 mg/L 之间。此外,化肥中含有一定量的氟化物,在传统灌溉条件下使用肥料,导致 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 F^- 进入地下水中,使水中氟离子富集, F^- 质量浓度在农灌区地下水中高于其他土地类型地区。地下水不合理的混层开采,加速了含水层之间的水力交换,导致高氟含水层的水进入低氟含水层。根据多年监测资料,位于研究区南部的礼贤监测井,在 1984—2009 年间氟化物质量浓度年际变化较为剧烈,由 1984 年的 0.6 mg/L 上升到 2009 年的 1.47 mg/L。这反映了人类活动对地下水氟化物的影响作用。

4.7 气象水文因素

蒸发量和干燥度对氟的累积也有较大的影响。蒸发量大,干燥度高,浅层地下水蒸发浓缩作用强烈,氟易于富集。

酸碱度,它们是指地下水化学演化的方向和性质。强酸化,水氟质量浓度降低;强碱化,水中氟质量浓度增加,氟易于富集,如尉氏的朱曲和蔡庄一带、扶沟的大李庄一带的地下水高氟区,为强碱化水环境,即水中重碳酸离子同碱土金属钠离子伴存。

4.5 水质类型因素

研究区划分的水质类型反映了地下水酸碱化的强弱,体现了高氟地下水的形成机理,控制了氟富集程度不等的地下水分布。

重碳酸·钠型水,水中重碳酸离子同碱土金属钠离子伴存,水化学碱化程度相对最强,因此控制了高氟地下水的分布。重碳酸·钙型水,水中重碳酸离子同碱土金属钙离子伴存,水化学碱化程度降低,水质受钙离子质量浓度的制约,不利于水中氟的富集,因此控制了低、中氟地下水的分布,见表 2。

5 结 语

在地形低洼、气候干旱、蒸发量大于降水量、河湖水与地下水闭流、岩石和土壤中含氟矿物多、地下水径流迟缓与排泄不畅、土壤多碱性盐渍土、地下水化学类型为 HCO_3^- -Na·Mg 和 HCO_3^- -Na 型的强碱化水化学环境、浅层含水层底部有隔水的黏土层等条件下,氟离子容易在地下水中富集而形成高氟水,造成饮用水氟超标。但随着浅层地下水开采力度的加大,地下水垂直方向的循环交替加速,高氟水分布面积较早期有所减少,再加上科学的降氟措施,高氟地下水对人类的影响是可以得到缓解的。

参考文献:

- [1] SELINUS O, ALLOWAY B. 医学地质学[M]. 郑宝山,等,译. 北京: 科学出版社, 2009: 263-266.
- [2] 任福弘, 曾溅辉, 刘文生, 等. 高氟地下水的水文地球化学环境及氟的赋存形式与地氟病患率的关系[J]. 地球学报, 1996, 17(1): 86-97. (REN Fuhong, ZENG Jianhui, LIU Wensheng, et al. Hydro-geochemical environment of high fluorine groundwater and the relation between the speciation of fluorine and the diseased ratio of endemic fluorosis[J]. Acta Geoscientica Sinica, 1996, 17(1): 86-97 (in Chinese))

(下转第 66 页)

- Jiucang-Zhonghua section of Chishui River[J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 2014, 30 (1): 16-20. (in Chinese))
- [5] 季益虎,方宏萍,沈兴鹏,等.赤水河茅台段水环境趋势分析[J].贵州化工,2012,37(5):37-41. (JI Yihu, FANG Hongping, SHEN Xingpeng, et al. Trend of water environment quality in Maotai section of the Chishui River [J]. Guizhou Chemical Industry, 2012, 37(5): 37-41. (in Chinese))
- [6] 吴湘香,李云峰,沈子伟,等.赤水河浮游植物群落结构特征及其与水环境因子的关系[J].中国水产科学,2014,21(2):361-368. (WU Xiangxiang, LI Yunfeng, SHEN Ziwei, et al. Relationship between phytoplankton community structure and aquatic environmental factors in the Chishui River [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(2): 361-368. (in Chinese))
- [7] 马建华.正确处理治理开发与保护关系 全面促进赤水河流域经济社会可持续发展[J].人民长江,2014,44(4):1-7. (MA Jianhua. Correctly handling relationship between regulation, development and protection of river basin to promote water resources development of Chishui River Basin [J]. Yangtze River, 2014, 44(4): 1-7. (in Chinese))
- [8] 白平,杨为民.保护赤水河流域生态环境迫在眉睫[EB/OL]. [2014-06-30]. http://www.cenews.com.cn/sylm/hjyw/201402/t20140207_764293.htm.
- [9] 贵州省环保厅.贵州省赤水河中、上游水质月报[EB/OL]. [2014-06-25]. <http://www.gzhjbh.gov.cn/hjjcs/hjzlsjzx/dbsszk/69739.shtml>.
- [10] 贵州省环保厅.贵州省环境状况公报.[EB/OL]. [2014-06-25]. <http://www.gzgov.gov.cn/xxgk/zfxxgkzl/zfxxgkndzdgz/hjbhxxgk/gzdt/205826.shtml>.
- [11] 贵州省环保厅.贵州省重点流域水质月报.[EB/OL]. [2014-06-25]. http://www.gzhjbh.gov.cn/00939062-3/A/02/02/index_2.shtml.
- [12] 仁怀市政府.中国酒都仁怀2013年完成规模以上白酒企业产量30万千升[EB/OL]. [2014-06-27]. <http://www.chinanews.com/df/2014/01-10/5722082.shtml>.
- [13] WANG Yi, LI Lifeng, WANG Xuejun. Taking stock of integrated river basin management in China [M]. Bei Jing: Science Press, 2010.
- [14] WWF China. PRC PDA: public-private-partnership: development of a PWS pilot mechanism in Chishui Watershed [R]. Beijing: Asian Development Bank, 2013. (收稿日期:2014-09-05 编辑:彭桃英)

(上接第31页)

- [3] APAMBIRE W M, BOYLE D R, MICHEL F A. Geochemistry, genesis and health implications of fluoriferous groundwaters in the upper regions of Ghana [J]. Environmental Geology, 1997, 33(1): 13-24.
- [4] GUPTA S K, DESHPANDE R D, AGARWAL M, et al. Origin of high fluoride in groundwater in the North Gujarat-Cambay region, India [J]. Hydrogeology Journal, 2005, 13(4): 596-605.
- [5] FAROOQI A, MASUDA H, KUSAKABE M, et al. Distribution of highly arsenic and fluoride contaminated groundwater from east Punjab, Pakistan, and the controlling role of anthropogenic pollutants in the natural hydrological cycle [J]. Geochemical Journal, 2007, 41: 213-234.
- [6] 朱其顺,许光泉.中国地下水氟污染的现状及研究进展[J].环境科学与管理,2009,34(1):42-51. (ZHU Qishun, XU Guangquan. Present situation and research progress of groundwater fluorine pollution in China [J]. Environmental Science and Engineering, 2009, 34(1): 42-51 (in Chinese))
- [7] 李海霞,罗汉金,赤井纯治,等.内蒙古苏尼特地下水氟污染形成机理研究[J].水文地质工程地质,2008,35(6):107-111. (LI Haixia, LUO Hanjin, CHIJIN Chunzhi, et al. Study on the forming mechanism of fluoride pollution in Inner Mongolia Sunit [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(6): 107-111 (in Chinese))
- [8] 李世君,王新娟,周俊,等.北京大兴区第四系高氟地下水分布规律研究[J].现代地质,2012,26(2):47-52. (LI Shijun, WANG Xinjuan, ZHOU Jun, et al. Distribution law of high fluoride groundwater in quaternary in Daxing District of Beijing [J]. Geoscience, 2012, 26(2): 47-52 (in Chinese))
- [9] 邢丽娜,郭华明,魏亮,等.华北平原浅层含氟地下水演化特点及成因[J].地球科学与环境学报,2012,34(4):34-40. (XING Lina, GUO Huaming, WEI Liang, et al. Evolution feature and genesis of fluoride groundwater in shallow aquifer from North China Plain [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(4): 34-40. (in Chinese))
- [10] KRUSE E, AINCHIL J. Fluoride variations in groundwater of an area in Buenos Aires Province [J]. Argentina Environmental Geology, 2003, 44(1): 86-89.
- [11] 范基姣,佟元清,李金英,等.我国高氟水形成特点的主要影响因子及降氟方法[J].安全与环境工程,2008,5(1):14-16. (FAN Jijiao, TONG Yuanqing, LI Jinying, et al. Affecting factors of high-fluorine water in our country and scheme to avoid fluorosis [J]. Safety and Environmental Engineering, 2008, 5(1): 14-16 (in Chinese)) (收稿日期:2014-03-17 编辑:彭桃英)