

# 中国主要地方病区地质环境研究进展与展望

张福存<sup>1</sup> 文冬光<sup>2</sup> 郭建强<sup>1</sup> 张二勇<sup>2</sup> 郝爱兵<sup>2</sup> 安永会<sup>1</sup>

(1.中国地质调查局水文地质环境地质调查中心,河北保定 071051;2.中国地质调查局,北京 100037)

**摘要:**地方性砷中毒、氟中毒和大骨节病是中国目前流行的主要地方病病种,严重威胁着群众的身体健康。本文总结了我国北方主要盆地高砷水、高氟水分布规律及形成机理和中国大骨节病区地质环境的特点及其相互关系研究的进展,并就其研究方向进行了展望。

**关键词:**地方病;地质环境;高氟地下水;高砷地下水;大骨节病

**中图分类号:**X143 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2010)03-0551-12

## 1 前言

地方病是指“由水土原因引起的地方性疾病”,也称“水土病”。中国分布范围广、危害大的地方病病种主要有地方性氟中毒、地方性砷中毒、地方性甲状腺肿大、大骨节病和克山病等。这些地方病大多与人类居住环境水土中人体所需元素含量的不足和过量有关。低碘造成的地方性甲状腺肿大通过改水和食用加碘盐等措施可以治愈和预防,克山病经过多年综合防治已经基本得到控制。目前地方性氟中毒、地方性砷中毒、高碘型地方性甲状腺肿大依然严重威胁着人民群众的身体健康。大骨节病经综合防治目前仅在四川阿坝、西藏和青海南部地区有新发病例(图 1~2)。

开发利用适宜饮用地下水是保障病区群众饮水安全高效、经济的途径和手段,研究地方病区地质环境特点及其相互关系,对病区寻找符合饮用水标准的地下水具有重要的指导作用。“十一五”期间,中国地质调查局实施了“地方病严重区地下水勘查与供水安全示范”项目,以北方饮水型砷中毒、氟中毒及大骨节病严重且病人集中的地区为重点,以地下水系统理论为指导,利用遥感解译、水文地质调查、地球物理勘探、水文地质钻探、岩土水样测试、同位素、

微生物地球化学、环境磁学和数值模拟等手段,调查含水层结构、地下水补给-径流-排泄条件、地下水水化学特征,研究高砷、高氟地下水分布规律及形成机理和大骨节病区地质环境,进而针对不同情况提出安全供水途径。本文就是该项目取得的部分成果。

## 2 高砷地下水分布规律与形成机理

中国原生高砷地下水集中分布区主要位于北方干旱-半干旱地区,自东向西分布在松嫩平原、大同盆地、河套平原、银川平原、青海贵德盆地和新疆奎屯地区,总体上呈东西向条带状分布。本次工作未涉及新疆高砷地下水区。

### 2.1 北方高砷地下水分布和水文地质环境特点

(1)大同盆地、河套平原、银川平原、松嫩平原高砷地下水区在分布规律上有相似之处。在水平方向上,从山前倾斜平原前缘向冲湖积平原中心,地下水砷含量递增,一般在沉积中心和地势低洼处最高,总体上具有明显的分带性,但高砷水井呈点状分布,砷含量在短距离内相差很大。垂向上多赋存于浅层承压、半承压含水层,高砷井一般小于 80 m。

大同盆地形成于古近纪以后,晚新生代地层沉积厚度受基底和构造控制,马营凹陷厚度最大,向东北、西南两侧变薄。从山前倾斜平原到盆地中心冲湖

收稿日期:2010-05-30;改回日期:2010-06-07

基金项目:中国地质调查局地质大调查计划项目“地方病严重区地下水勘查与供水安全示范”(1212010634700)及其所属工作项目资助。

作者简介:张福存,男,1963年生,教授级高级工程师,从事水文地质调查研究工作;E-mail:zhangfucun@sina.com。

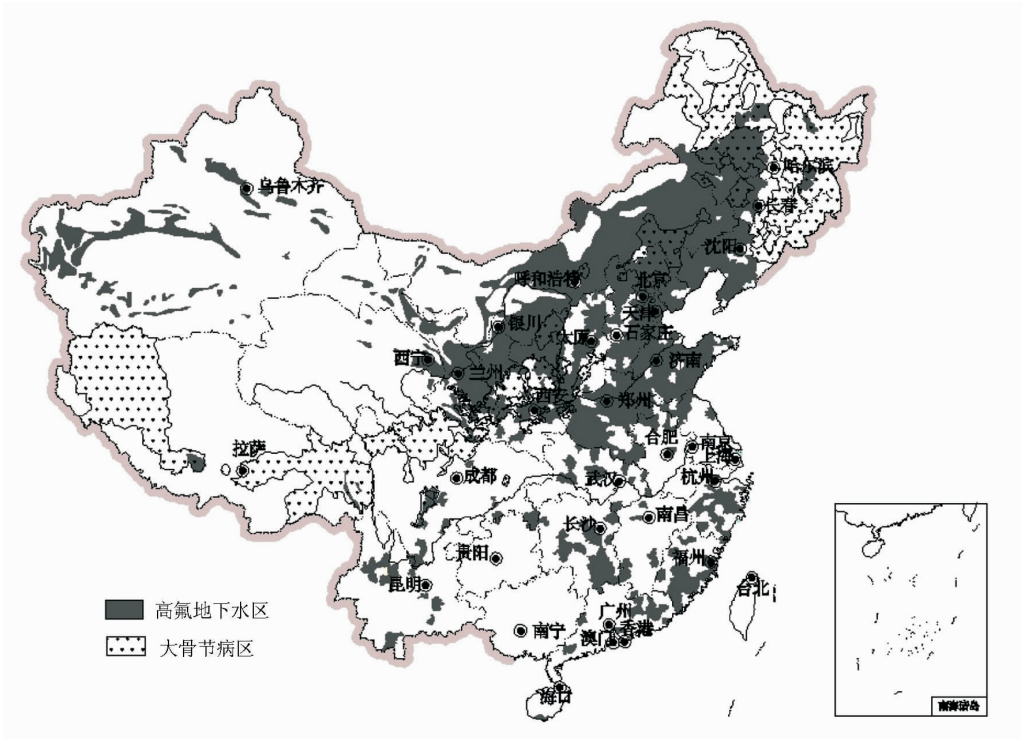


图1 高氟地下水及大骨节病分布图(据谭见安等<sup>[4]</sup>,略有修改)

Fig.1 Distribution map of high fluorine groundwater and Kashchin-Beck disease area in China

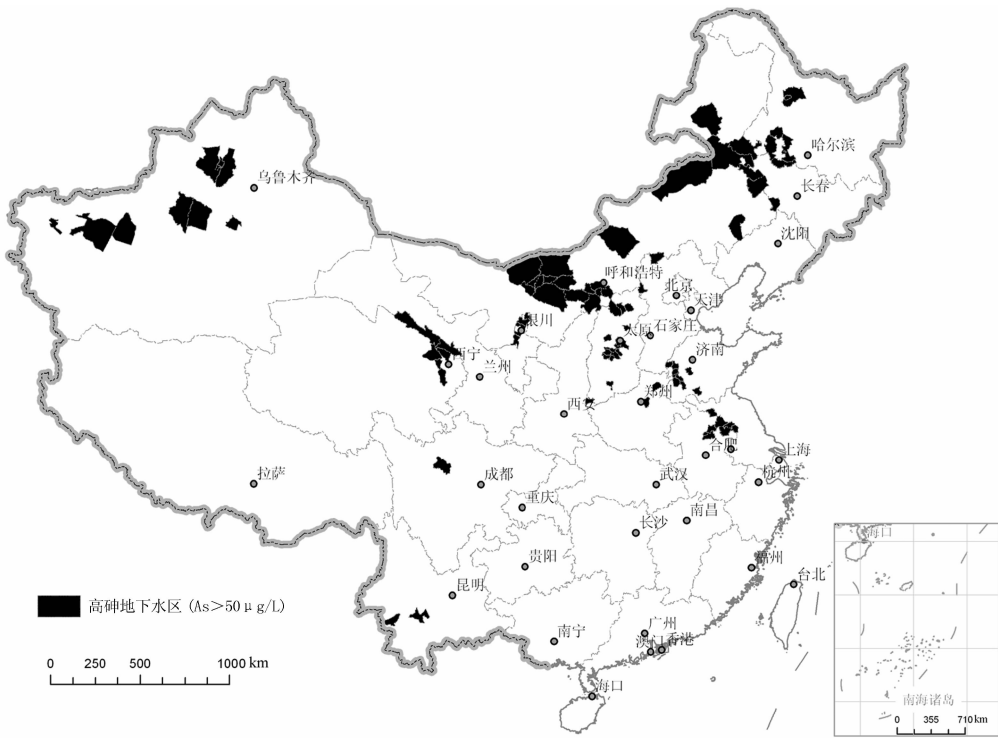


图2 高砷地下水分布图(据沈雁峰等<sup>[4]</sup>,略有修改)

Fig.2 Distribution map of high arsenic groundwater in China

积平原,地下水砷含量从  $0.6 \mu\text{g/L}$  增加到  $1820 \mu\text{g/L}$ 。高砷地下水主要分布于马营凹陷内的桑干河与黄河河间洼地及山前倾斜平原与洪冲湖积平原的交接洼地,总体上在朔城区—应县段呈连续分布,在应县以北地段呈点状断续分布,盆地中心山阴一带是砷的主要富集区,也是重病区<sup>[3]</sup>;垂向上主要分布在  $15\sim 60 \text{m}$ (最大砷浓度约在  $20 \text{m}$ )、少数分布在  $100\sim 150 \text{m}$  地下水中。高砷含水层颗粒较细,为含淤泥的富有机质河湖相地层;该区地势平坦,地下水水力坡度小,为地下水滞流区。

河套平原形态上呈现北深南浅、西深东浅的不对称箕状拗陷,西北部一直是盆地的沉降中心地带。高砷地下水分布在沉积中心地带,西部杭锦旗、临河区地下水砷含量超标程度及超标率高于东部五原地区。以总砷含量  $>0.05 \text{mg/L}$  为标准,东部地区  $0.05 \text{mg/L} \leq \text{As} < 0.25 \text{mg/L}$  的超标点数为  $85.1\%$ 、 $\geq 0.25 \text{mg/L}$  超标点仅为  $14.9\%$ ;而西部地区对应两个区间超标率分别为  $56.9\%$  和  $43.1\%$ 。在西部地区高砷地下水呈带状分布,而在东部呈灶状分布,短距离内地下水砷含量变化较大(图 3)。地下水砷含量

$1.1\sim 1740 \mu\text{g/L}$ ,砷中毒高发区为  $350\sim 1740 \mu\text{g/L}$ 。在一定深度内,随着深度的增加,地下水砷含量增大,高砷水井深度一般在  $20\sim 35 \text{m}$ <sup>[4]</sup>。高砷含水层多为粉细砂层或粉细砂与粘土、淤泥质粘土互层,沉积物有机质含量高。

银川断陷盆地中部断落较深,向两侧以断阶状或斜坡状抬升,呈西陡东缓的巨大宽缓向斜形态,高砷水区就位于沉降中心银北凹陷区的冲湖积平原,总体上呈两个条带分布于冲湖积平原区。西侧条带位于山前冲洪积平原前缘的湖积平原区,在全新世早期为古黄河河道。东侧条带靠近黄河的冲湖积平原区,在全新世晚期为黄河故道,平行于黄河分布(图 4)。垂向上地下水砷含量随深度增加而降低,高砷地下水一般赋存于  $10\sim 40 \text{m}$  的潜水含水层;第一、第二承压水大部分地区未检出或含量低于  $10 \mu\text{g/L}$ 。砷含量最高值潜水为  $177 \mu\text{g/L}$ 、承压水为  $47 \mu\text{g/L}$ 。高砷层位主要为黄色、灰色粉砂、细砂,并夹有薄层的黑色腐殖物。

松嫩平原高砷地下水主要分布于吉林西部霍林河、洮儿河盲尾散流地带,通榆县和洮南县河间洼地

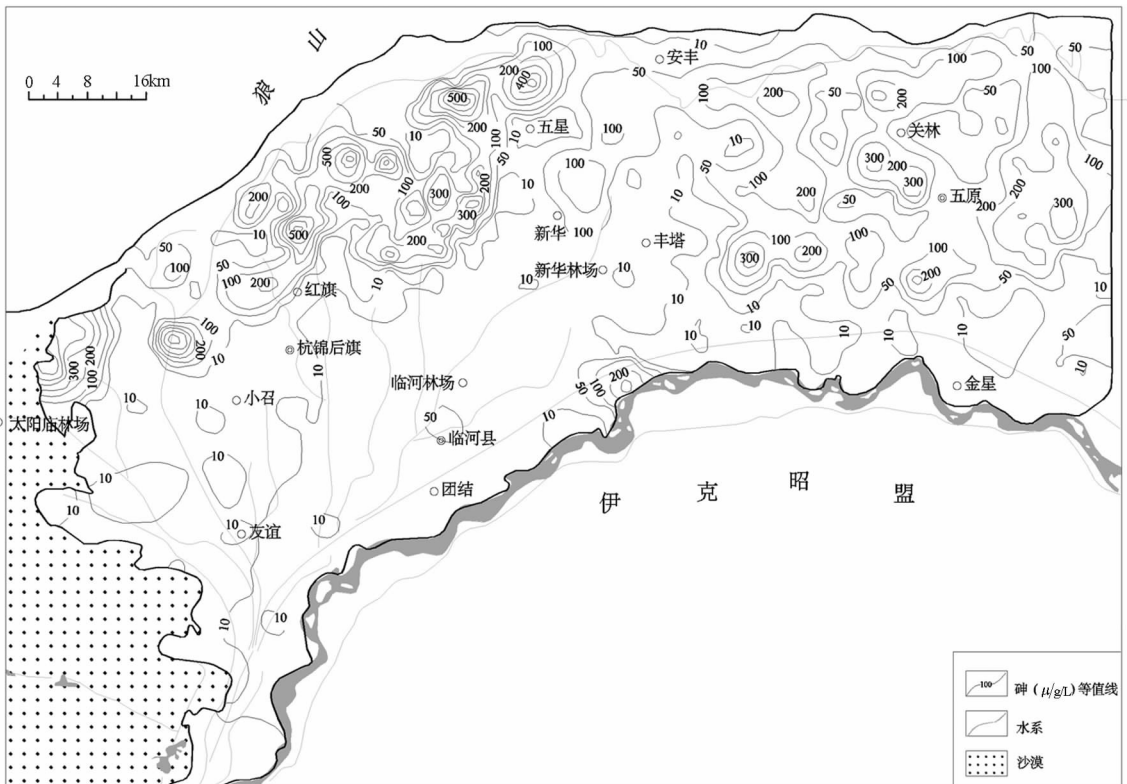


图 3 河套平原地下水砷含量等值线图(据高存荣等,略有修改)  
Fig.3 Contours map of arsenic content in groundwater in Hetao plain

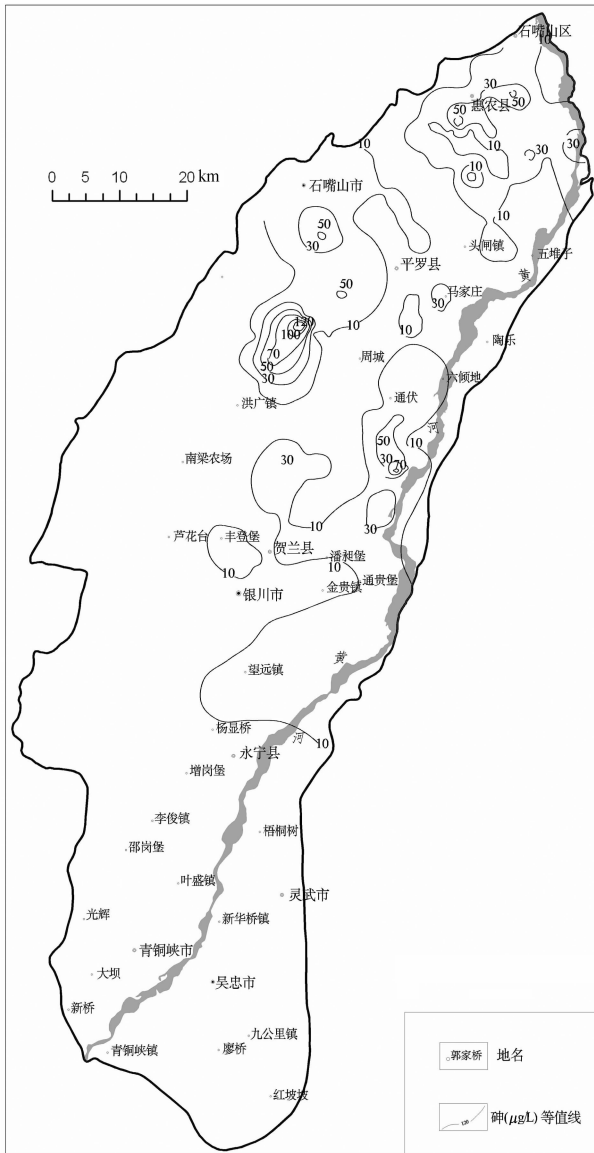


图4 银川平原潜水砷含量分布图

Fig.4 Contours map of arsenic content in phreatic water in Yinchuan plain

以及低平原区的地下水滞留带。砷含量均值潜水为  $18.2 \mu\text{g/L}$ 、第四系承压水为  $32.3 \mu\text{g/L}$ ，古近—新近系承压水为  $25.2 \mu\text{g/L}$ 。地下水中的砷主要富集在  $10\sim 100 \text{ m}$  的含水层中，其中  $50\sim 80 \text{ m}$  井段砷浓度较高，均值  $43.2 \mu\text{g/L}$ ，最高达  $152.4 \mu\text{g/L}$ 。粉砂淤泥质沉积物和富含有机质的湖积物，为砷的赋存提供了空间。黑龙江三肇地区也有小面积高砷水分布。

地下水砷含量不仅在空间上差异大，而且在时间上也随着不同季节地下水水位的波动而变化，特别是引黄灌溉的河套平原和银川平原。银川平原

NX08-2 监测孔 2008 年水位变幅约  $2 \text{ m}$ 、对应的砷含量变幅近  $130 \mu\text{g/L}$  (图 5)；与地下水水位升降趋势相同，水位低时砷含量为低峰，而水位高时地下水中砷含量增大。河套平原近年来的调查和监测结果也表明，绝大部分监测井水砷含量高水位期（灌溉期）大于低水位期（非灌溉期）。

(2) 青海贵德盆地也有高砷地下水分布。该盆地处于青海东北部，地处黄河上游龙羊峡—松巴峡之间。贵德盆地以新近系贵德群和第四系分布面积最广，厚度巨大。贵德群地层以细颗粒湖相碎屑岩为主，不仅发育承压自流水，同时还赋存承压自流热水。受北北西向及近东西向断裂控制，贵德盆地地热异常区发育有两个异常中心，地热区围绕近东西向张性断裂带呈椭圆形展布。地下水砷含量高的 3 个钻孔 (04、05、08 号) 紧靠地热异常中心断裂分布，深度分别为  $251.25 \text{ m}$ 、 $322.91 \text{ m}$  和  $318.48 \text{ m}$ ，砷含量随深度加大而增加，分别为  $112 \mu\text{g/L}$ 、 $296 \mu\text{g/L}$  和  $318 \mu\text{g/L}$ 。

(3) 内蒙古克什克腾旗高砷地下水位于同兴镇白音泉，病区村分布在山间沟谷中，沟谷两侧为中山、低中山，山区分布有毒砂 ( $\text{FeAsS}$ ) 及含砷铅锌矿脉，居民饮用水为第四系松散岩类孔隙潜水，地下水含砷量  $19.8\sim 82.2 \mu\text{g/L}$ ，高砷水呈岛状分布；沟谷下游地下水砷含量  $14\sim 18.8 \mu\text{g/L}$ ，病区地下水砷含量在小流域内由上游至下游呈递减趋势。

## 2.2 高砷水水化学特征

大同盆地、河套平原、银川平原和松嫩平原高砷地下水化学特征具有相似的特点 (表 1)，一般为中性到弱碱性， $\text{pH}$  多在  $7.0\sim 9.4$ ； $\text{Eh}$  多为负值； $\text{Fe}$ 、 $\text{Mn}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{HPO}_4^{2-}$ 、 $\text{NH}_4^+$  含量较高， $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  含量较低。地下水  $\text{As(III)}/\text{As}$  大于  $0.5$ ， $\text{As(III)}$  含量高。地下水以  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Na}^+$  为主，水化学类型一般为  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Na}$  型。有些地区井水呈黄绿色、有浓烈的腐殖酸和  $\text{H}_2\text{S}$  气味， $\text{CH}_4$  逸出可点燃。这都反映高砷地下水处于一种还原环境。同时，病区井水不仅砷含量高，还普遍存在氟含量过高的问题。贵德盆地和克什克腾旗高砷地下水  $\text{pH}$  及水化学类型与上述盆地不同，有其自己的特点。

## 2.3 高砷地下水形成机理

中国北方高砷地下水成因总体上可以分为 3 种类型：还原型高砷地下水，包括大同盆地、河套平原、银川平原和松嫩平原等，分布面积广，危害大；地热型

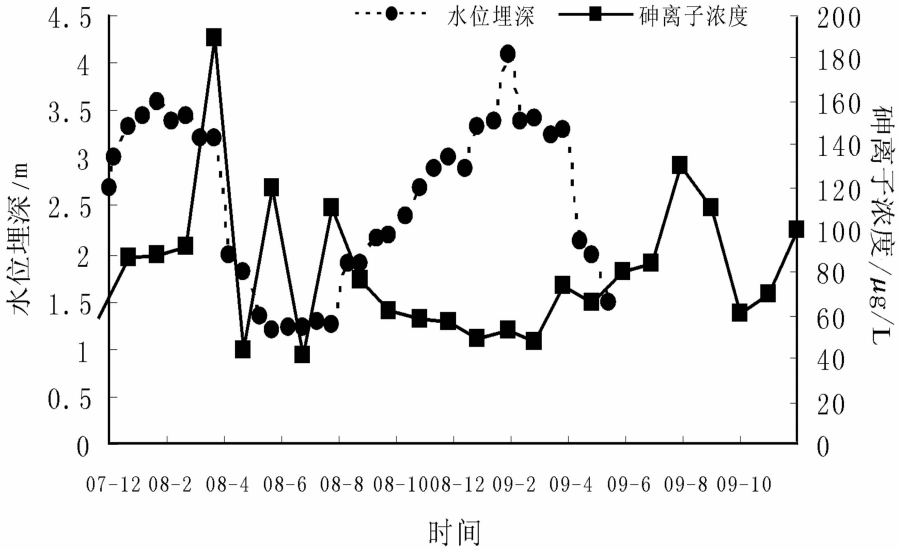


图 5 银川平原长观孔水位埋深及砷含量曲线  
Fig.5 Contrast map between arsenic content and groundwater level depth of long term observation well

表 1 北方主要高砷地下水区水化学特征

Table 1 Chemical characteristics of groundwater in main high arsenic areas in North China

地区	pH	Eh/mV	As(II)/As	砷与其他离子的关系	水化学类型	其他
大同盆地	7.2~9.4	-11.80~-83.1	0.53	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (<2.0 mg/L)、NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (<10.0 mg/L) 相对较低, 与 As 含量负相关; 检测到 HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ; Fe(>0.5)、Mn(>0.1)、HCO <sub>3</sub> 含量较高	HCO <sub>3</sub> -Na 为主 HCO <sub>3</sub> -Cl-Na	井水多呈淡黄绿色, 有浓烈的 H <sub>2</sub> S 气味, 且含 CH <sub>4</sub> 气体, 可点燃
河套平原	7.2~8.9	-60~-150	0.79	高砷水区 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> 超标率低于全区和低砷水区; Cl <sup>-</sup> 、Fe、F <sup>-</sup> 超标率高于全区和低砷水区; 砷与磷、铁含量密切相关	Cl-HCO <sub>3</sub> -Na Cl-Na HCO <sub>3</sub> -Cl-Na	重病村井水呈黄绿色, 有浓烈的腐殖酸和 H <sub>2</sub> S 气味, CH <sub>4</sub> 逸出, 可点燃
银川平原	7.5~8.5	-60~-170	0.61	As 与 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 负相关, 与 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、PO <sub>4</sub> <sup>3+</sup> 正相关。NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 含量高, 均值 0.79mg/L, 最大 2.68mg/L	HCO <sub>3</sub> -Na-Ca Cl-HCO <sub>3</sub> -Na	
松嫩平原	8.0~9.3			As 与 Fe、HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、Mn、Cl <sup>-</sup> 、PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> 和 TDS 正相关, 与 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、Se 负相关	HCO <sub>3</sub> -Na-Mg HCO <sub>3</sub> -Cl-Na	
贵德盆地	8.4~8.7				HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> -Cl-Na	
克什克腾旗	6.9~7.9				HCO <sub>3</sub> -Ca	

高砷水,如贵德盆地;矿化型高砷水,如克什克腾旗。

2.3.1 还原型高砷地下水形成机理

区域高砷地下水的形成需要有砷的物源、将含水层固相中的砷释放到地下水中的地球化学机制和使释放到地下水中的砷不迅速流失且富集的水文地质条件<sup>[6]</sup>。

(1)盆地周边富砷地层是盆地高砷环境的主要原生生物源,盆地内富有机质的湖相沉积物是次生富

砷介质,含水层系统中铁磁性矿物为砷的主要载体。

大同盆地周边山区石炭—二叠纪沉积岩砷含量 0.54~22.00 mg/kg,西部广布的煤系地层砷含量均值 102.75 mg/kg;沉积物样品平均砷含量 18.7 mg/kg。河套平原的西、北、东三面环山,北部狼山、大青山山地由片麻岩、大理岩组成,其成矿性好,含砷量高,狼山西段山前炭窑口、东升庙大型多金属硫化物矿床矿体埋藏较浅或裸露,矿床及围岩中 As 含量很高,

炭窑口样品砷含量平均 29.39 mg/kg<sup>[6]</sup>。银川平原贺兰山北段煤系地层发育,沙巴台煤矿六一十三层煤砷含量 2~10 mg/kg。其含量都超过上地壳砷丰度值(1.5 mg/kg)数倍甚至数十倍。

盆地周边富砷岩石中的砷元素或化合物经风化作用、降水淋滤溶入水中,其活泼性增强,随地下水及河流向盆地迁移,沉积物通过表面吸附与离子交换吸附作用,以及螯合作用,使得砷、铁、锰等金属离子从水中沉淀出来,沉积物中 As 含量主要受到颗粒粒度的控制,随着沉积物粒度由粘土向砂变大而逐渐减少,在富含有机质的细颗粒、湖相沉积的粘土和粉砂中富集。大同盆地沉积物环境磁学研究表明,强磁性和弱磁性矿物中砷含量分别为 77.0~310.8 mg/kg 和 35.0~70.4 mg/kg,各为全岩样品平均砷含量(18.7 mg/kg)的 4.3~17 倍和 1.9~3.7 倍,含铁磁性矿物(主要为铁的氧化物及氢氧化物矿物)对砷具有明显的富集作用,高砷含水层沉积物中磁性矿物以亚铁磁性矿物(磁赤铁矿等)为主。

(2)高 pH、低 Eh 还原条件使沉积物中的砷解吸和溶解进入地下水中。大同盆地、河套平原等盆地处于封闭-半封闭沉积环境,在富含有机质的地层中,有机质在细菌或微生物作用下不断发生分解,消耗大量氧气,并产生 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S,使得地下水环境呈还原性。同时,干旱-半干旱地区的蒸发和 CO<sub>2</sub> 与碳酸钙的反应也使得含水系统的 pH 值增大,一般为 7.2~9.4。

pH 是影响地下水中砷活性的一个重要因素。pH 值的增大可以造成被吸附的砷从铁锰氧化物或氢氧化物等或粘土矿物中解吸,或者说它可以阻止被吸附。在氧化和酸性至中性条件下,砷以砷酸根离子形式被氧化物矿物强烈吸附,且砷酸盐的吸附量相对较大。随着 pH 值增大,砷从氧化物矿物表面解吸,使溶液中砷的浓度增加。pH 的升高还可引起磷酸根、钒酸根、铀酰和钼酸根等酸根离子的解吸而在溶液中积累。这些被吸附的阴离子以竞争吸附方式与氧化物上吸附位置相互作用,并以复杂的方式影响相互结合的程度,从另一方面进一步限制砷的吸附量。

在还原条件下,砷从沉积物中释放。在氧化环境中,地下水中的砷的化合物(砷酸盐或亚砷酸盐)会被胶体或铁锰氧化物或氢氧化物吸附,导致地下水中的砷含量极低。但变为还原环境时,胶体变得不稳

定或铁(锰)的氢氧化物被还原,形成了更为活泼的离子组分,而溶入地下水中,吸附在其上面的砷的化合物也随着进入地下水中。在松嫩平原应用 PHREEQC 软件进行反向地球化学模拟的结果也证明了地下水中砷与铁、锰元素的相关性。

含水层沉积物中的天然有机质能被一些原生细菌利用,来还原溶解氧化铁,从而释放出砷。在大同盆地沉积物中发现 5 种砷还原菌属,砷还原菌主要分布在沉积物中深层,由此可知砷还原菌在沉积物中下层的还原作用是砷由沉积物向地下水迁移的重要因素之一。

(3)高 pH、低 Eh 还原条件使沉积物中的砷进入地下水中,这些封闭、半封闭盆地中心低洼平坦的地形、细颗粒的含水层使地下水径流滞缓,进入地下水中的砷得以不断积聚,从而形成高砷地下水。

(4)地下水中砷的迁移转化不仅受地下水组分和沉积物矿物成分的影响,而且受含水介质中砷形态的控制。不同的含水介质中,砷的赋存形式也有差异,这种差异决定着沉积物中砷的迁移、转化行为。通过系列提取法,发现典型高砷区含水介质中砷的赋存形态,包括可溶态、可交换态、Fe-Mn 氧化物吸附态、碳酸盐吸附态、有机质和硫化物吸附态以及基质态等。

高砷地下水的形成是多因素综合作用的结果,是一个复杂的地质过程,其分布在大尺度上的规律性与小尺度上的差异性也说明了这一点。

### 2.3.2 地热型高砷水形成机理

青海贵德盆地高砷地下水形成与地热有关。岩屑统计表明,盆地北部的日月山和拉鸡山地区的太古界至古元古界变质岩、火山岩为砷的原生物源<sup>[7]</sup>。新近系贵德群形成于干旱、炎热气候条件下咸水滨湖-半咸水或淡水滨湖环境,以细颗粒湖相地层为主,富含有机质,成为次生富砷地层。而现代半封闭的地形以及地下热水水文地球化学环境则是形成饮水型地方性砷中毒重病区的促进因素。典型地热井钻孔地下水砷含量随深度增加和地下水温度升高而增加,并与孔深和水温呈正相关关系。

### 2.3.3 矿化型高砷水形成机理

克什克腾旗砷中毒地方病区位于大兴安岭南端低中山沟谷中上游地下水径流区,居民饮用第四系松散岩类孔隙潜水,含水层岩性为第四系冲洪积砂砾石、含砾中粗砂等,厚度一般为 5~8 m,水位埋深

一小于 3~5 m。病区白音皋北部山区分布的硫砷铁矿床( $\text{FeAsS}$ )风化带经地下水溶滤,形成局部高砷水,随后地下水将砷带入山间谷地第四系松散岩类孔隙水,由于沟谷纵坡降较小,地下水流速变缓,水位埋藏较浅,蒸发作用强烈,从而形成高砷地下水。

### 3 高氟地下水分布规律及形成机理

高氟地下水主要分布在秦岭—淮河以北的平原、盆地,本项目重点在松嫩平原、大同盆地、河套平原、河西走廊、塔里木盆地西缘以及贵德盆地和陕西大荔县高氟区开展了工作。考虑到篇幅所限和讨论问题的完整性,本文仅选择其中部分典型地区进行了分析,同时也对海侵富集型高氟水进行论述。

#### 3.1 高氟地下水分布规律

氟在地下水中富集具有明显的分带性规律,总体上从山前到滨海平原或盆地中心,由补给区、径流区至排泄区,地下水含氟量逐渐增高。垂向上,蒸发浓缩型和溶滤富集型高氟水以浅层地下水为主,且浅层地下水中的氟含量普遍大于中深层;地热温泉型和海侵富集型往往相反,一般是地下水自深而浅氟含量降低。

(1)松嫩平原地下水中氟的分布具有明显的分带性,盆地中央低平原及高低平原过渡地区分布有大面积的高氟潜水,氟离子含量普遍 $>1 \text{ mg/L}$ ,从平原中部向四周氟离子含量呈现降低趋势,但在西部山前平原局部滞流区,氟离子含量也较高。垂向上高氟地下水主要分布在潜水和井深 $<80 \text{ m}$ 的第四系承压水中,超标率大于 70%,其中在 $<10 \text{ m}$ 的潜水中氟含量均值高达  $4.56 \text{ mg/L}$ ,超标率为 94.1%,最大值为  $14 \text{ mg/L}$ 。在 $>80 \text{ m}$ 的地下水中,虽然超标率也较高,但均值都较低。

大同盆地浅层孔隙水中的氟离子含量普遍较高,最高  $4.5 \text{ mg/L}$ ,高值区主要分布于盆地中部和北部,氟含量  $1\sim 2 \text{ mg/L}$ 的高氟水主要分布于盆地洪积扇前缘一带;氟含量高于  $2 \text{ mg/L}$ 的高氟水零星分布于盆地地势较低的部分洼地。南部和周边山前地下水中的氟离子含量稍低,最小值为  $0.14 \text{ mg/L}$ ,平均  $1.33 \text{ mg/L}$ ;盆地中深层孔隙地下水中的氟离子较浅层低,最高值为  $2.8 \text{ mg/L}$ ,最低为  $0.14 \text{ mg/L}$ ,平均含量为  $0.94 \text{ mg/L}$ ,高值区分布与浅层地下水相似。总体上沿地下水径流途径,由补给区、径流区至排泄区,孔隙地下水中的氟含量逐渐升高,且浅层孔隙地下水中的氟含量

普遍大于中深层孔隙地下水。

河西走廊张掖甘州区自山前砾质平原至细土平原,地下水中氟离子含量具有逐渐增高的水平分带规律;同时细土平原区地下水氟离子含量具有随深度增加而降低的垂直分带规律。高氟水主要分布在盆地中部地势低洼的细土平原区,富氟含水层为 $0\sim 40 \text{ m}$ 的浅层地下水,高氟水含氟量一般为  $2\sim 4 \text{ mg/L}$ ,最高可达  $7.6 \text{ mg/L}$ 。

(2)贵德盆地三河地区平面上地下热水中氟离子含量等值线与温度等值线形态相似(图 6),且  $200 \text{ m}$ 深度水平上氟离子含量由外围的  $0.5 \text{ mg/L}$ ,向三河平原区大于  $5 \text{ mg/L}$ 变化。表明盆地高氟地下水明显受控于地热异常。分析典型钻孔地下水氟离子含量与深度、温度关系,可以看出,伴随深度的增加,地下水温度升高,地下水氟离子含量随之增加。地下水氟离子含量与水温成正相关(图 7)。

(3)海侵富集型高氟水主要赋存于中深层,如河北平原东部沧州地区深层地下水含氟量超标率达到 80%以上,其中第四系含水岩组中更新统孔隙承压含水层(第三含水层,顶底板埋深  $150\sim 250 \text{ m}$ )为主要富氟含水层,氟离子含量为  $0.47\sim 7.12 \text{ mg/L}$ 。

#### 3.2 高氟地下水水化学特征

高氟地下水一般呈碱性,pH 多为  $7.5\sim 8.5$ ,地下水水化学类型复杂,以苏打水为主的碳酸钠、钠镁、钠钙水居多。

高氟水一般矿化度较高,氟离子浓度总的变化趋势是随 TDS 的增大而升高,但到一定浓度后便渐趋于稳定,大同盆地、陕西大荔县氟含量都在大于  $1500 \text{ mg/L}$ 逐渐稳定。氟离子浓度也随总碱度的增大而升高。地下水中的氟含量,随着  $\text{Na}^+$ 离子浓度增大和  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 离子浓度减少而升高,且以  $\text{HCO}_3^-$ 为优势阴离子,在  $\text{HCO}_3^-$ 占优势的碱性环境中有利于含氟矿物中可交换的氟离子被水中的羟基置换,释放到地下水中。

#### 3.3 高氟地下水形成机理

北方高氟水成因主要为蒸发浓缩型、溶滤富集型、地热温泉型和海侵富集型,在某一个地区可能不止一种成因。

北方松嫩平原、河西走廊等多数平原盆地高氟水成因以蒸发浓缩为主,高氟水富集机理为上游富含氟离子的地下水,径流到地势平坦或低洼地带,由于地下水径流滞缓、水动力条件差、水位埋藏浅、蒸

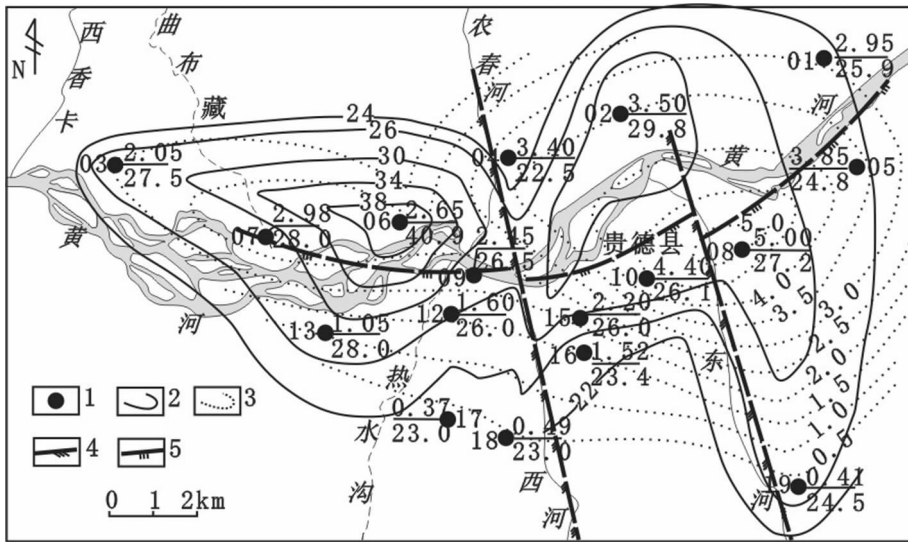


图6 贵德盆地地下水氟离子等值线图(200 m 深度)(据石维栋)  
 1-钻孔(氟离子浓度/水温);2-温度等值线(°C);3-氟离子浓度等值线(mg/L);4-压性断裂;5-张性断裂  
 Fig.6 Contour map of Fluoride concentration in geothermal water in Guide basin(200 m)  
 1-Bore hole(mg/L/°C);2-Temperature contours(°C);3-Fluoride concentration contours(mg/L);  
 4-Compressive fault;5-Tensional fault

发作用强烈，氟离子等化学元素在特定表生地球化学环境下在浅层地下水中浓缩富集。

溶滤富集型是在富氟岩石或沉积物中氟含量的本底值较高，地下水溶滤作用将氟元素大量携带下来，到地势平坦的地区或洼地后，由于地下水径流变慢，氟元素逐渐富集，造成水中氟离子浓度较高，从而形成高氟地下水。

青海贵德盆地高氟地下水平面分布特征总体上与地下热水的分布范围一致，表明其明显受控于地热异常，富含有机质的细颗粒湖相地层成为次生富氟地层，半封闭环境中高 pH(大于 8)、高温(一般大于 30°)的热水有利于对氟的解吸和富集，加之深部热水本身含氟量就高，从而形成高氟水。

在华北平原东部沿海地区高氟水成因是海侵富集型，即在海水入侵时，海陆交替沉积的细粒粘土类矿物因其较大的表面能吸附大量氟离子，海水中大量氟化物伴随沉积物留了下来，在适当的水文地球化学条件下转入地下水中，成为地下水中主要氟物质来源；同时咸淡水混合过程中海水中大量 Na<sup>+</sup>与淡水中 Ca<sup>2+</sup>发生的阳离子交换作用，使得地下水中 Na<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup>值急剧增加，而 Na<sup>+</sup>的增加，导致水中碱性的增强，OH<sup>-</sup> 取代 F<sup>-</sup> 的离子代换作用加强，提高了氟离子活性，加速岩石中氟矿物的溶解、迁移和富集

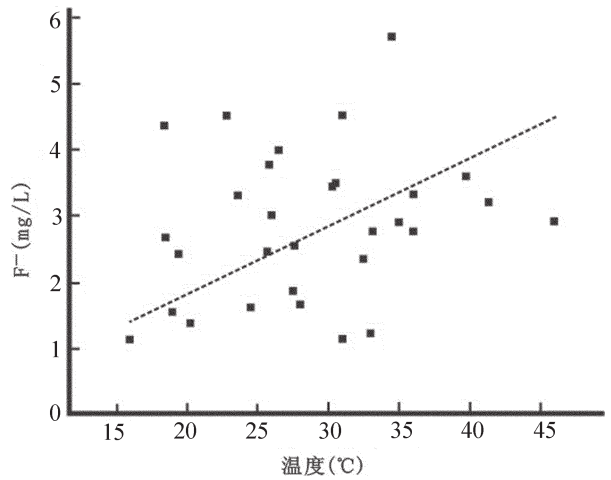


图7 贵德盆地地下水温度与氟离子含量关系曲线(据石维栋)  
 Fig.7 The curve between geothermal water temperature and fluoride content

程度。

高氟水的成因是多种因素共同作用的结果，在大同盆地，氟含量与地下水主要离子成分有一定的对应关系，即氟离子浓度先随 Na<sup>+</sup>/(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)的增加而增加，比值为 1 左右时氟离子含量达到最高，以后则逐渐稳定；氟离子浓度随 Cl<sup>-</sup>/(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)的增加而增加，但约达 25%以后则逐渐降低。分析表



明,在盆地地下水运移演化过程中,地下水对含氟矿物的溶解作用是导致氟含量增高的主导作用;蒸发浓缩作用对高氟水的形成和分布也具有重要的影响,一定程度的蒸发浓缩作用可促进地下水中氟的富集,但过度蒸发反而可以抑制氟含量的增加。

## 4 大骨节病区地质环境特点及其与大骨节病的关系

### 4.1 四川省阿坝州大骨节病区地质环境特点

(1)大骨节病重病区多位于高山草甸、河流中上游支沟沟谷、低洼潮湿地带或封闭、半封闭的区域。在重病区和中等病区沼泽均较发育,而且分布面积大,腐殖质及泥炭发育较厚;而在轻病区沼泽不甚发育,且分布面积较小。

(2)大骨节病区地层主要为三叠系砂板岩地层,前志留系—二叠系分布区病情较轻,灰岩地区为轻病、非病区。病区岩石的化学成分含量比非病区含量低,尤其是 Se、Zn、Cu、Mn、Mo 等元素差异较为明显,元素的贫乏,最终可能导致土壤、地下水和粮食中的同种元素相应偏低。

(3)重病区饮水水源多为径流途径较短的溪沟水、低洼地带浅层渗泉水或土井水,尤其水流滞缓的溪沟水,多流过地表的枯枝落叶层或腐殖质层,水源水质较差。而饮用泉水者病情相对较轻。

病区饮水水质绝大多数具有极低矿化度和偏酸性的水质特点,矿化度普遍小于 150 mg/L,腐殖酸总量则多高于 1 mg/L;非病区饮用水矿化度多为 300 mg/L,腐殖酸总量多小于 0.5 mg/L。患病率与饮水矿化度低表现出明显的负相关,与腐殖酸含量表现出正相关关系。

(4)病区饮用水中钙、镁、硒、氟含量较低,其中 Ca 含量均值为 25.3 mg/L,和文献报道的西藏大骨节病区饮用水数值接近 (25.8 mg/L);Mg 含量均值为 6.47 mg/L;若尔盖县病区硒小于 0.005 mg/L;饮用水源中氟离子含量普遍小于 0.2 mg/L。

(5)根据示范井水量、水质试验,适宜人畜饮用的地下水井深以 60~70 m 较适宜;如果井深小于 30 m,则水质矿化度较低,水量也不足;井深太大,水量增加不大,还可能带来 Fe 等离子含量偏高,甚至超标。

### 4.2 地质环境与大骨节病关系研究

大骨节病影响因素复杂,病因学说众多,主流学说有低硒说、有机物中毒说、食物真菌毒素说和 B19

微小病毒低硒条件下感染学说<sup>[8-10]</sup>,但至今尚无定论。

针对大骨节病多种不同的病因学说,通过全国大骨节病与地质环境关系对比研究认为,大骨节病受多因素复合作用影响、与地质环境密切相关,病因与元素缺乏或比例失调有关。

1)大骨节病与自然、地质环境密切相关,是与骨代谢有关的元素缺乏或比例失调有关的地方病,即水土病。

(1)大地构造及其塑造的地貌单元控制着病带的分布

大骨节病分布在中国从东北向西南的地带上,病区占据了基岩隆起的构造带,即山区和高原区,而病带内中新代沉降平原和盆地多为非病区或轻病区。病区地表及浅层地下水循环途径短、交替迅速,水文地球化学环境属各种化学元素的淋漓流失贫散区。与人类和生物生长息息相关的岩石、土壤、饮水、粮食均处于元素缺乏或比例失衡背景。如吉林省伊通河源于哈达岭西坡,自南向北经长春流入第二松花江。自上游低山丘陵区、中游到下游河谷平原区,其潜水水化学特征发生着规律性变化,矿化度由 185.6 mg/L→287.5 mg/L→861.5 mg/L,氟离子含量由 <0.1 mg/L→0.1~0.2 mg/L→0.2~1.5 mg/L。而其上游为大骨节病区,下游及闭流区为氟中毒病区,中游为非病区<sup>[11]</sup>。

(2)地层岩性是影响病带病区与轻、非病区分布的基本因素

四川阿坝地区大骨节病主要分布在三叠系砂板岩区,而灰岩、白垩系红色砾岩及前志留系变质岩为轻、非病区。从全国来看,大骨节病主要流行在地层岩性为中基性岩或基性喷出岩分布区和变质砂板岩分布区,集中分布在黄土高原风成黄土区,少量分布在各类基岩组成的山地和风沙覆盖的熔岩台地及毛乌素沙漠区。如陇东黄土高原,环县以东为大骨节病区,环县以西为非大骨节病病区,其同处黄土高原,地质环境差异主要在于环县以西有古近—新近系红层分布,致使岩土与水环境中矿物质含量增多,为高氟水与苦咸水区。

(3)微地貌单元及地下水补径排条件影响不同病情分布

微地貌条件影响地表产流和地下水补径排条件,制约着一定区域内水土盐运移,从而影响不同微地貌单元饮水和食粮中元素的多寡,进而影响着病

情轻重。黄土高原病区群众普遍认为大骨节病“塬上轻、塬边重”、“山上重、沟中轻”、沟谷“上游重、下游轻”等说法。如永寿县甘井乡陆家村位于塬边,全村一直饮用窖水,1977年检出率为50.9%,2007年7~16岁儿童检出率仍达5%,而塬下的店头乡樊家河村位于好畤河谷,两村相距不到1 km,居住饮食条件相同,该村一直饮用井水,为“安全岛”。

2) 饮水和食粮均为暴露因素,两者具有互补性。

食物真菌毒素说认为该病与饮水无关,而与食粮T2毒素中毒有关。大米不传病而谷物如青稞、玉米、小麦等传病,病区只要改吃大米即可除病<sup>[2]</sup>。但许多学者通过在黑龙江、吉林、内蒙古、甘肃、山西、陕西、山东等大骨节病区研究认为,该病与饮水水源及水质有关。饮食结构相同,饮用不同水源病情显著差异。如敦化市红石乡大兴川屯原为重病区,1982年儿童X线检出率为90.5%,1983年改饮深井水后,病情明显下降,至1990年儿童X线检出率仅为1.7%<sup>[13]</sup>。

通过国内外相关资料综合分析,结合阿坝州及陕北等对比研究,认为大骨节病是与岩、土、水、粮中元素缺乏或比例失调有关。饮食结构的调整、生活条件的改善和饮水水源的变化均可改变摄入人体的水、粮中与大骨节病有关的元素的多寡,从而改变病情。饮水和食粮均为暴露因素,两者具有互补性。

3) 大骨节病影响因素复杂,水、粮极低氟可能为致病因素、硒等元素贫乏或其他物质比例失调为影响因素

大骨节病主要分布在山岳高原,为水土中各种元素流失区,饮水中多种常量离子、矿化度、硬度、Se、I、F等微量元素偏低。平原、盆地及河谷区为各种元素汇聚区,为非病区。

医学研究表明,大骨节病是与影响软骨去骨和造骨骨代谢失衡有关的骨关节病。因此,尽管大骨节病区多种元素缺乏,但致病因素必定与骨代谢有关的元素缺乏及其相关元素的失衡有关。

全国大骨节病带与低硒自然景观带吻合较好,多年来低硒与大骨节病关系一直是研究的重点,比较一致的观点是低硒是影响病情的重要因素,但不是致病因素。

初步认为受地质环境与自然环境影响导致饮水、饮食低氟与大骨节病有关。其一,从全国宏观来看,大骨节病区与饮水低氟区基本吻合。黑龙江省、陕北黄土高原、川西高原和西藏皆为饮水低氟带,病区饮水

氟含量一般小于0.2 mg/L。其二,大骨节病区与地氟病没有交叉病区;其三,氟元素与成骨有关,具有一定医学意义。一方面氟可以促进骨基质的形成,另一方面,氟与钙结合形成骨盐,在人体摄入氟不足时影响钙质、磷质正常吸收和骨盐合成。鉴于大骨节病因的复杂性,此认识尚需通过工作进一步证实。

## 5 未来研究方向展望

### 5.1 高砷地下水研究

(1) 针对高砷地下水点状分布的特征,选择有代表性的小尺度流场,精细刻画含水层结构,开展水文地质和生物地球化学等多学科研究;监测低砷地下水井及有代表性的高砷地下水井,充分掌握高砷地下水化学特征的演化规律;利用已有或开发新的地下水砷含量预测模型,对国内潜在的高砷地下水区进行预测。

(2) 统一砷的形态及价态的分析方法,对腐殖酸成分用国际公认的先进方法深入研究,以提高数据的质量和可对比性。

(3) 以高砷地下水域为天然实验场,进行微生物高效修复技术研究;同时开发廉价高效的降砷材料与设备。

### 5.2 高氟地下水研究

(1) 针对不同地区相同氟含量地下水致病程度的差异,开展不同地质环境区高氟地下水氟与其他离子(包括有毒元素)的相互关系及其对其毒性的影响研究。

(2) 以多氟源调查为基础的地氟病区综合防治措施研究。

(3) 针对承压低氟水区发生次生氟污染问题,开展氟污染源及途径调查研究。

### 5.3 大骨节病与地质环境关系研究

针对大骨节病影响因素复杂,以地质环境背景差异为基础,以水文地球化学为主线开展工作,同时应关注其他专业领域的进展。

(1) 厘定大骨节病与地质环境基本要素的相关性及指标,研究各种学说所提及的大骨节病致病因子(如硒的缺乏、腐殖酸超标、低氟等)在当地环境中的赋存状态、运移变化规律,以及通过何种途径或方式来对人体造成影响。进而提出相应的病情防治方法,从根本上断绝大骨节病的致病环境对人的影响。

(2) 建立多部门的合作研究机制,从不同专业入

手,为促进该病的研究与防治提供有效的平台。

### 参考文献 (References):

- [1] 中华人民共和国地方病与环境图集 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.  
The Atlas of Endemic Diseases and Their Environments in the People's Republic of China [M]. Beijing: Science Press, 1985 (in Chinese).
- [2] 沈雁峰, 孙殿军, 赵新华, 等. 中国饮水型地方性砷中毒病区和高砷区水砷筛查报告[J]. 中国地方病学杂志, 2005, 24(2):172-175.  
Shen Yanfeng, Sun Dianjun, Zhao Xinhua, et al. Screening report in areas of endemic arsenism and high content of arsenic in China [J]. China Journal of Endemiology, 2005, 24(2):172-175(in Chinese).
- [3] 裴捍华, 梁树雄, 宁联元. 大同盆地地下水中砷的富集规律及成因探讨[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(4):65-69.  
Pei Hanhua, Liang Shuxiong, Ning Lianyuan. A discussion of the enrichment and formation of arsenic in groundwater in Datong Basin[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, 32(4):65-69(in Chinese with English abstract).
- [4] 杨素珍, 郭华明, 唐小惠, 等. 内蒙古河套平原地下水砷异常分布规律研究[J]. 地学前缘, 2008, 15(1):242-249.  
Yang Suzhen, Guo Huaming, Tang Xiaohui, et al. Distribution of abnormal groundwater arsenic in Hetao Plain, Inner Mongolia [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15 (1):242-249 (in Chinese with English abstract).
- [5] 郑宝山, 肖唐付, 李社红, 等. 医学地质学: 自然环境对公共健康的影响[M]. 北京: 科学出版社, 2009.  
Zhen Baoshan, Xiao Tangfu, Li Shehong, et al. Essentials of Medical Geology: Impacts of the Natural Environment on Public Health[M]. Beijing: Science Press, 2009(in Chinese).
- [6] 高存荣. 河套平原地下水砷污染机理的探讨 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(2):25-31.  
Gao Cunrong. Research on the mechanism of arsenic pollution in groundwater in the Hetao Plain, Inner Mongolia, China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1999, 10(2): 25-31(in Chinese with English abstract).
- [7] 孙崇仁, 喇继德, 李璋荣, 等. 青海省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.  
Sun Chongren, La Jide, Li Zhangrong, et al. Stratigraphy (Lithostratic) of Qinghai Province [M]. Wuhan: China University Geosciences Press, 1997(in Chinese).
- [8] 吴劲, 王志伦, 王红林, 等. 大骨节病病因研究进展 [J]. 中国地方病防治杂志, 2005, 20(6):343-346.  
Wu Jin, Wang Zhilun, Wang Honglin, et al. Progress of study on Kashin-Beck disease [J]. Chinese Journal of Endemiology, 2005, 20 (6):343-346 (in Chinese with English abstract).
- [9] 王志武. 中国大骨节病防治研究近 10 年进展和未来 10 年展望 [J]. 中国地方病学杂志, 2005, 24(6):591-592.  
Wang Zhiwu. Kashin-Beck disease control of china for nearly 10 years of progress and prospects over the next 10 years [J]. Chinese Journal of Endemiology, 2005, 24 (6):591-592 (in Chinese with English abstract).
- [10] 杨建伯. 大骨节病发病与流行的机制 [J]. 中国地方病学杂志, 1998, 17(4):201-206.  
Yang Jianbo. Kashin-Beck disease mechanisms and the prevalent [J]. Chinese Journal of Endemiology, 1998, 17 (4): 201-206 (in Chinese with English abstract).
- [11] 李端生. 低氟与大骨节病[M]. 长春: 吉林科学出版社, 2009.  
Li Duansheng. Low Fluoride and Kashin-Beck Disease [M]. Changchun: Jilin Science Press, 2009(in Chinese).
- [12] 杨建伯. 大骨节病病因研究[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1998.  
Yang Jianbo. Research on Cause of Kashin-Beck Disease [M]. Haerbin: Heilongjiang Science & Technology Press, 1998 (in Chinese).
- [13] 侯祥. 改换水质对大骨节病病情的影响 [J]. 中国地方病防治杂志, 1999, 14(2):92-93  
Hou Xiang. The impact of water improvement to Kashin-Beck disease [J]. Chinese Journal of Endemiology, 1999, 14(2):92-93(in Chinese).

## Research Progress and Prospect of Geological Environment in Main Endemic Disease Area

ZHANG Fu-cun<sup>1</sup>, WEN Dong-guang<sup>2</sup>, GUO Jian-qiang<sup>1</sup>,  
ZHANG Er-yong<sup>2</sup>, HAO Ai-bing<sup>2</sup>, AN Yong-hui<sup>1</sup>

(1. Center of Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding 071051, Hebei, China;

2. China Geological Survey, Beijing 100037, China)

**Abstract:** As the main endemic disease entities prevalent in China, endemic arsenism, fluorosis and Kaschin-Beck disease pose serious threat to people's health. The distribution and formation mechanism of high arsenic water and high fluorine water in main basin of North China, the characteristics of geological environment in Kaschin-Beck disease area and the research progress of the relationship between each other are summarized in this paper. Then, the research direction is indicated.

**Key words:** endemic disease; geological environment; high arsenic ground water; high fluorine water; Kaschin-Beck disease

---

**About the first author:** ZHANG Fu-cun, male, born in 1963, professor, mainly engages in the study of hydrogeology; E-mail: zhangfucun@sina.com.