

恒河流域地下水As中毒的特征 及其对中国区域生态地球化学评价的启示

成杭新¹, 王文栋², 赵传冬¹, 刘英汉¹, 庄广民¹, 喻劲松³, 王晓丽³

CHENG Hangxin¹, WANG Wendong², ZHAO Chuandong¹,

LIU Yinghan¹, ZHUANG Guangmin¹, YU Jinsong³, WANG Xiaoli³

1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000;

2. 河北省地勘局测绘院, 河北 廊坊 065000;

3. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

1. *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, Hebei, China;*

2. *Institute of Surveying and Mapping, Hebei Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Langfang 065000, Hebei, China;*

3. *School of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

摘要:恒河流域地下水As中毒事件始于20世纪80年代。通过对恒河流域地下水As中毒例案的时空演变、生态效应和成因的分析,指出中国正在开展的区域生态地球化学评价应从恒河流域As中毒事件中吸取教训,尤其应关注中国长江流域发现的Cd异常带。沿江各省应有全局观念,把长江流域作为一个整体,开展Cd异常的区域生态地球化学评价。

关键词:As中毒; 恒河流域; Cd异常; 长江流域; 中国

中图分类号:P593;P595

文献标识码:A

文章编号:1671-2552(2005)08-0694-06

Cheng H X, Wang W D, Zhao C D, Liu Y H, Zhuang G M, Yu J S, WANG X L. Groundwater arsenic poisoning of the Ganges drainage basin and its lesson to regional ecological geochemical assessment in China. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(8):694-699

Abstract: Groundwater arsenic poisoning in the Ganges drainage basin was found in the 1980s. Through a case study of the time-space evolution, ecological effects and causes of arsenic poisoning in the Ganges drainage basin, the authors point out that the regional ecological geochemical assessment now being carried out in China should learn a lesson from arsenic poisoning in the Ganges drainage basin, and especially we should pay attention to the Cd anomaly distribution along the Yangtze River, China. The relevant provinces along the Yangtze River should be considered as a whole in regional ecological geochemical assessment on Cd anomalies.

Key words: Arsenic poisoning; Ganges drainage basin; Cd anomaly; Yangtze River, China

全球约有20次地下水As污染的报道,其中有4次发生在亚洲,分别为孟加拉国^[1-6]、印度西孟加拉邦^[7-10]和中国内蒙古、新疆、台湾^[15,16]。孟加拉国和印度西孟加拉邦的恒河中下游地区地下水As中毒由于涉及人数最多,已引起国际社会的广泛

关注,是人类历史上一次最严重的集体中毒事件。本文通过对孟加拉国和印度西孟加拉邦地下水As中毒事件的简要介绍,希望能对中国正在开展的区域生态地球化学评价思路有所启迪。

收稿日期:2004-12-07;修订日期:2005-05-16

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(G1999045707)、国土资源部地质调查项目(200420130002;200414200011)资助。

作者简介:成杭新(1964-),男,博士,教授级高级工程师,从事生态地球化学与铂矿地球化学勘查研究。E-mail:hangxin@vip.sina.com

1 恒河流域地下水As中毒的时空变化特征

恒河发源于喜马拉雅山南坡,全长2700 km,流域面积 $106 \times 10^4 \text{ km}^2$,途经印度、孟加拉与布拉马普特拉河(中国境内的雅鲁藏布江)—贾木纳河汇合,由恒河口进入孟加拉湾。

有关恒河流域As中毒事件的最早报道是1976年发生在恒河源头昌迪加尔(Chandigarh)地区的中毒事件,但1976—1982年间,未在其他地区发现As中毒现象。从1983年开始,恒河流域As中毒涉及的村庄和人数逐年增加,空间上表现为从恒河流域的下游地区逐步向中游地区直至全流域发展。主要事件包括:1983年在印度西孟加拉邦Barasat和Baruipur地区相继发现As中毒,涉及3个村庄;1995年As中毒速度显著增加,印度西孟加拉邦有405个村庄、孟加拉国也有3个村庄发生As中毒;到1998年在西孟加拉邦已有836个村庄发生As中毒,孟加拉国则有492个村庄发生As中毒。从2001年起,As中毒现象从空间上发生变化,2001年以前As中毒主要出现在恒河下游的西孟加拉邦和孟加拉国,2001年在尼泊尔新发现7个地区发生As中毒,2002年在恒河中游比哈尔邦的Bhojpur地区出现As中毒,2003年As中毒由比哈尔邦蔓延到北方邦,在Ballja地区发现As中毒,2004年又在布拉马普特拉河上游的Dhemaji地区发现As中毒,已显示出恒河全流域As中毒的态势(图1)。

2 恒河流域地下水As含量变化特征

世界卫生组织(WHO)给出的引用水As卫生标准的推荐值小于 10×10^{-6} ,最大限制值卫生标准为 50×10^{-6} ^[17,18]。表1示出的是恒河流域数十万口水井中As含量的统计数据,从表1中

不难看出,无论是恒河下游的孟加拉国还是恒河中上游的印度北方邦、比哈尔邦、Jharkhand、西孟加拉邦,已有40%~50%的水井中As含量超过 10×10^{-6} ,有近30%的水井As含量超过了世界卫生组织有关饮用水As最大限制值的标准。

表2示出的是印度西孟加拉邦South 24-Parganas, Jaynager地区1995年和2000年同一水井2次取样的As含量值。从表中可以看到,在5年时间内,井水中的As含量普遍升高10~20倍,类似的现象在西孟加拉邦North 24-Parganas, Basirhat地区也得到验证(图2)。

“化学定时炸弹——Chemical Time Bombs, CTBs”是近年提出的一个新学术用语,指一连串事件导致土壤及沉积物中储存的化学物质由于环境的缓慢改变而活动化,从而发生延缓而突发的有害效应^[19-22]。恒河流域的As中毒现象与近年提出的化学定时炸弹概念极其一致,推测目前恒河流域地下水As中毒正处在化学定时炸弹的爆发阶段。

3 恒河流域地下水As中毒的生态效应

As中毒的疾病症状包括皮肤受损、各种癌症等。对印度西孟加拉邦和孟加拉国As中毒地区的调查显示(表3),印度西孟加拉邦和孟加拉国饮用含As地下水引起的As中毒已产生十分显著的生态效应,在尿、人发、指甲和皮肤中已测出了高含量的As,其中孟加拉国As超标程度明显高于印度的西孟加拉邦。

迄今为止,还没有恒河流域As中毒的确切人数,据Chowdhury等^[13]1999年对印度西孟加拉邦和孟加拉国的详细调查,初步估计西孟加拉邦As中毒的人数为7990万人,孟加

表1 恒河流域印度和孟加拉国地下水中的As含量(据Chakraborti, 2004)

Table 1 Arsenic concentrations in groundwater of India and Bangladesh in the Ganges drainage basin

含量特征 / $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	印度北方邦		印度比哈尔邦		印度Jharkhand		印度西孟加拉邦		孟加拉国	
	样品数	%	样品数	%	样品数	%	样品数	%	样品数	%
<3	781	32.49	4433	46.19	501	48.93				
3~9	263	10.94	1326	13.82	207	20.21				
>10									21721	43
10~50	495	20.59	1633	17.02	121	11.82				
>50							33480	24.8	13892	27.5
51~99	186	7.74	669	6.97	46	4.49				
100~299	316	13.14	1010	10.52	68	6.64				
300~499	171	7.11	305	3.18	50	4.88				
500~699	83	3.45	118	1.23	19	1.86				
700~1000	68	2.83	50	0.52	8	0.78				
>1000	41	1.71	53	0.55	4	0.39				
累计	2404	100.0	9597	100.0	1024	100.0	135000		50515	
WHO标准						10 $\mu\text{g/L}$				
WHO限制标准						50 $\mu\text{g/L}$				

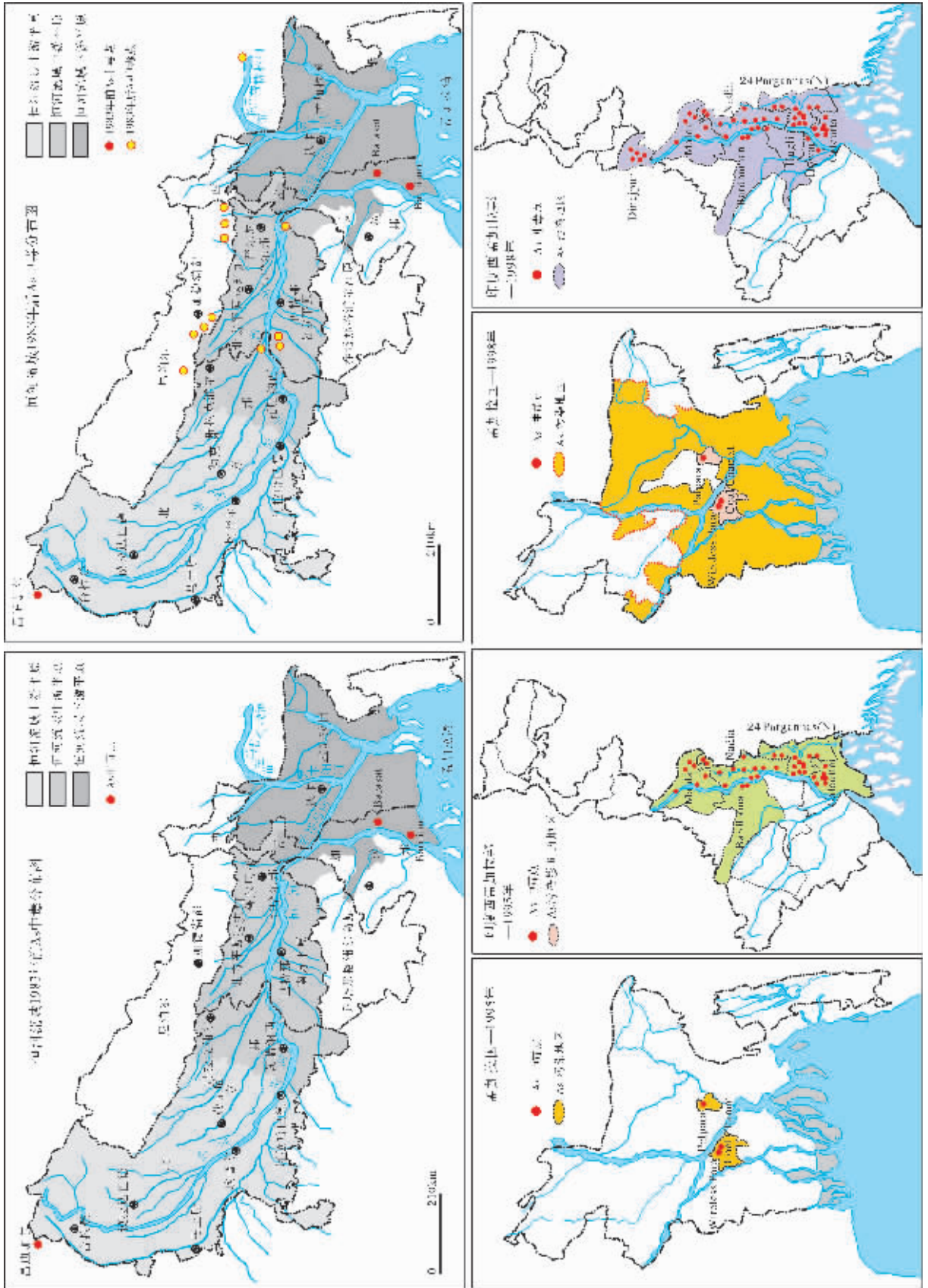


图1 恒河流域地下水As中毒时空演变图 Fig.1 Time-space evolution of groundwater arsenic poison in the Ganges drainage basin

表2 印度西孟加拉邦South 24-Parganas, Jaynager地区不同年份同一水井As含量对比(据Chakraborti, 2004)

Table 2 Comparison of As contents in the same hand tube well in different years in South 24-Parganas, Jaynager, West Bengal, India

样号	As/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	As/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
J-2	50	218
J-3	<10	130
J-18	27	201
J-19	<10	277
J-33	<10	193
J-34	42	126
J-44	<10	159
J-50	<10	207
采样时间	1995年5月6日	2000年7月15日

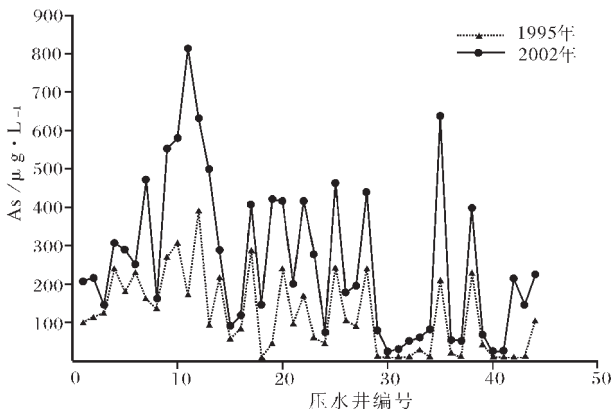


图2 印度西孟加拉邦Basirhat地区不同年份同一压水井中As含量对比(据Chakraborti,2004)

Fig.2 Comparison of As contents in the same hand tube well in different years in North 24-Parganas, Basirhat, West Bengal, India

表3 印度西孟加拉邦和孟加拉国As中毒的生态效应^[33]

Table 3 Ecological effects of As poisoning in West Bengal, India, and Bangladesh

参数	尿/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$		人发/ 10^{-9}		指甲/ 10^{-9}		皮肤/ 10^{-9}	
	西孟加拉邦	孟加拉国	西孟加拉邦	孟加拉国	西孟加拉邦	孟加拉国	西孟加拉邦	孟加拉国
样品数	9795	1043	7135	3332	7381	3321	165	373
平均值	180	495	1480	4050	4560	9250	6820	5730
最大值	3147	3086	20340	28060	44890	79490	1550	53300
最小值	10	24	180	280	380	260	1280	600
中位数	115	302	1320	2490	3870	6740	4460	4800
标准离差	268	493	1550	4040	3980	8730	4750	9790
高于正常/毒理(人发)的百分比/%	89	95	57	81.2	83	93.7	—	—

注:尿中As的正常变化值为5~40 $\mu\text{g}/\text{d}$;人发中As的正常变化值为80 $\times 10^{-9}$ ~250 $\times 10^{-9}$,病理指标值为1000 $\times 10^{-9}$;指甲中As的正常值为430 $\times 10^{-9}$ ~1080 $\times 10^{-9}$;还没有皮肤中As的指标值

拉国有4270万人出现不同程度的As中毒特征(表4),而对比哈尔邦、北方邦等新近发现的As中毒地区,还无法估计具体的As中毒人数。但据查科拉伯蒂的估计,目前比哈尔邦境内的As中毒现象仅是冰山一角。由于恒河流域As中毒已经蔓延到整个恒河河谷直至喜马拉雅山脉,相关地区共居住有5亿人,因此As的扩散范围较人们此前想像的要广阔得多。

4 恒河流域地下水As中毒的主要成因

恒河-布拉马普特拉河流域面积148 $\times 10^4\text{km}^2$,输沙量为16.70 $\times 10^8\text{t/a}$,恒河平原沉积物主要源自喜马拉雅南坡。20世纪80年代,一些科学家认为地下水是替代已污染地表水的安全可靠的饮用水来源,并在恒河流域施工了大量水井替代地表饮用水,导致恒河流域爆发大规模的地下水As中毒事件。

自然界As通常与铜、铅、金等金属矿伴生,主要以4种氧化物方式存在,即 As^{3+} 、 As^0 、 As^{3+} 和 As^{5+} ,其中 As^{3+} 是剧毒元素^[23]。

目前对恒河流域As释放的机理主要有3种认识,即氧化机制、还原机制、有机碳-细菌还原机制^[5, 6, 14, 23-31]。但不论何种机制,均认为喜马拉雅南坡大量富含As的残坡积物,在剥蚀营力作用下,其As主要来自自然源,使恒河平原淤泥等沉积物中富含As,并大量溶解于地下水。

5 对中国区域生态地球化学评价的启示

中国地质调查局起草的《农业地质调查规划要点》已经国土资源部审查批准,于2004年1月正式颁布。《规划要点》显示,将在中国沿海经济带(一带)、东北经济区(一区)、长江中下游流域和黄河中下游流域(两域)共计260 $\times 10^4\text{km}^2$ 的国土面积上开展农业地质调查工作^[32],并针对各自的区域地球化学问题,进行区域生态地球化学评价^[36-38]。

初步调查结果显示,从长江源头的沱沱河至宜昌的上游地区、从宜昌至湖口的中游地区和湖口以下的下游地区,沿江和两岸平原区出现宽度达几十至数百公里、贯穿全流域的

表4 印度西孟加拉邦和孟加拉国As中毒的地区和人数^[13]

Table 4 Numbers of areas and populations of arsenic poisoning in West Bengal, India, and Bangladesh

国家和地区	孟加拉国	印度西孟加拉邦
面积/km ²	148393	891924
人口/万人	12000	6800
地区	64	18
As含量大于50mg/L的地区数	42	9
As中毒的面积/km ²	92106	38865
有As中毒特征的人数/万人	7990	4270
As中毒的地区数	25	7

Cd等重金属异常带^[39,40]。

尽管到目前为止,还不知道长江流域是否存在区域性或流域性的Cd生态危害,但从恒河流域As中毒事件中不难看出,恒河流域是印度文明的发源地,20世纪80年代前,该地区从未发生过As中毒等生态环境事件。当饮用水方式由地表水改为地下水后,出现了人类历史上最严重的集体As中毒事件。

Cd属于积蓄性的有毒元素,引起慢性中毒的潜伏期可达10~30年之久。农作物对Cd吸收和累积的显著特点表现为,有时作物生长尚未受到影响,而农产品含Cd已大大超过卫生标准几倍甚至十几倍^[41],Cd污染极其严重时,可形成流域性的Cd公害病,如日本富山县通川流域由Cd引起的痛痛病(骨痛病)就是典型例案之一^[42]。因此,尽管中国目前还未发现区域性或流域性Cd生态事件,但对长江流域Cd异常的潜在危害应有足够的思想准备,对Cd异常的形成机理、生态危害应尽快开展研究,不能等到出现问题时再进行研究,到时就像现在的恒河流域As中毒事件,为时已晚。

恒河流域的地下水As中毒事件是从恒河下游开始爆发的,现正在向恒河中游地区蔓延,As的主要来源为喜马拉雅南坡的各种富As风化物。已有资料初步显示,中国长江流域的Cd异常与恒河流域的As异常形成相类似,长江流域内存在多个规模巨大的Cd地球化学块体,有充足的自然源Cd。因此,长江流域各省在开展区域生态地球化学评价时,应有全局观念,只有这样才有可能查清Cd异常形成的机理,从而为将来提出阻断Cd来源的措施提供依据。

近几年内蒙古、山西、新疆、宁夏、吉林等地新发现饮用高As地下水致病的问题,受影响人口约200万人。目前中国地表水污染较严重,许多地方,特别是北方缺水地区,正在大量开采地下水供饮用和灌溉,多目标调查的浅成地下水成果也已显示,部分地区地下水As已严重超标。因此建议对正在饮用地下水的地区开展As风险评价。

致谢:文中许多最新资料承蒙印度Jadavpur大学Dipankar Chakraborti教授提供,在此深表谢意!

参考文献:

- [1]Dhar R K, Briswas B K, Samanta G, et al. Groundwater arsenic calamity in Bangladesh[J]. *Curr. Sci.*, 1997, 73(1):48-59.
- [2]Biswas B K, Dhar R K, Samanta G, et al. Detailed study report of Samta, one of the arsenic-effected villages of Jessore District, Bangladesh[J]. *Curr. Sci.*, 1998, 74(2):134-135.
- [3]Nickson R, McArthur J M, Burgess W, et al. Arsenic poisoning of Bangladesh groundwater[J]. *Nature*, 1998, 395: 338.
- [4]Alam M G, Allinson G, Stagnitti F, et al. Arsenic contamination in Bangladesh groundwater: a major environmental and social disaster[J]. *Int. J. Environ. Health Res.*, 2002, 12(3):235-253.
- [5]Harvey C F, Swartz C H, Badruzzaman A B, et al. Arsenic mobility and groundwater extraction in Bangladesh [J]. *Science*, 2002, 298(5598):1602-1606.
- [6]Tareq S M, Safiullah S, Anawar H M, et al. Arsenic pollution in groundwater; a self-organizing complex geochemical process in the deltaic sedimentary environment, Bangladesh [J]. *Sci. Total Environ.*, 2003, 313(1-3):213-226.
- [7]Chatterjee A, Das D, Mandal B K, et al. Arsenic in groundwater in six districts of West Bengal, India: the biggest arsenic calamity in the world. Part I: Arsenic species in drinking water and urine of the affected people[J]. *Analyst*, 1995, 120: 643-650.
- [8]Das D, Chatterjee A, Samanta G, et al. Arsenic in groundwater in six districts of West Bengal, India: the biggest arsenic calamity in the world. Part II: Arsenic concentration in drinking water, hair, nail, urine, skin-scale and liver tissue (biopsy) of the affected people[J]. *Analyst*, 1995, 120: 917-924.
- [9]Bagal P, Kaiser J. India's spreading health crisis draws global arsenic experts[J]. *Science*, 1996, 274: 174-175.
- [10]Das D, Samanta G, Mandal B K, et al. Arsenic in groundwater in six districts of West Bengal, India[J]. *Environ. Geochem. Health*, 1996, 18:5-15.
- [11]Mandal B K, Chowdhury T R, Samanta G, et al. Impact of safe water for drinking and cooking on five arsenic affected families for 2 years in West Bengal, India[J]. *Sci. Total Environ.*, 1998, 218:185-201.
- [12]Acharyya S K, Chakraborty P, Lahiri S, et al. Arsenic poisoning in the Ganges delta[J]. *Nature*, 1999, 401: 545.
- [13]Chowdhury U K, Biswas B K, Chowdhury T R, et al. Groundwater arsenic contamination in Bangladesh and West Bengal, India[J]. *Environ. Health Perspect.*, 2000, 108(5): 393-397.
- [14]Islam F S, Gault A G, Boothman C, et al. Role of metal-reducing bacteria in arsenic release from Bengal delta sediments [J]. *Nature*, 2004, 430(6995): 68-71.
- [15]Lian F W, Jian Z H. Chronic arsenism from drinking water in some area of Xiangjiang, China[A]. In: Nriagu J O ed. *Arsenic in the environment. Part II: human health and ecosystem effects* [C]. New York: John Wiley and Sons Inc., 1994. 159-172.

- [16]Yeh S. Relative incidence of skin cancer in Chinese in Taiwan; with special reference to arsenical cancer [J]. Natl Cancer Inst Monogr, 1963, 10:81-107.
- [17]WHO. Guideline for drinking water quality, Vol. 1 and 2[S]. Geneva; World Health Organization, 1984.
- [18]WHO. Guideline for drinking water quality, Recommendation, Vol. 1 (2nd ed)[S]. Geneva; World Health Organization, 1992.41.
- [19]Stigliani W M. Chemical time bombs: definition, concepts and examples[M]. Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis,1991.1-23.
- [20]Stigliani W M,Doelman P,Salomons W,et al. Chemical time bombs: predicting the unpredictable [J]. Environment,1991,33: 4-30.
- [21]Hesterberg H, Stigliani W M, Imeson A C. Chemical time bombs:linkages to scenarios of socioeconomic development [M]. Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis, 1992.1-28.
- [22]Konsten C J M,ter Meulen-Smidt G R B, Stigliani W M,et al. Summary of the workshop on delayed effects of chemicals in soils and sediments (chemical time bombs),with emphasis on the Scandinavian region[J].Applied Geochemistry,1993,2:295-299.
- [23]Oremland R S, Stolz J F. The ecology of arsenic [J]. Science, 2003, 300(5621):939-944.
- [24]Bhattacharyya R, Chatterjee D, Nath B, et al. High arsenic groundwater: mobilization, metabolism and mitigation—an overview in the Bengal Delta Plain [J]. Mol. Cell Biochem., 2003, 253(1-2):347-55.
- [25]Pande S, Deshpande L, Kaul S. Laboratory and field assessment of arsenic testing field kits in Bangladesh and West Bengal, India[J]. Environ. Monit. Assess., 2001, 68(1):1-18.
- [26]Niggemyer A, Spring S, Stackebrandt E, et al. Isolation and characterization of a novel As(V)-reducing bacterium; implications for arsenic mobilization and the genus *Desulfotobacterium*[J]. Appl. Environ. Microbiol., 2001, 67(12):5568-5580.
- [27]Nikolaidis N P, Dobbs G M, Chen J, et al. Arsenic mobility in contaminated lake sediments [J]. Environ. Pollut., 2004, 129 (3):479-487.
- [28]Kenneke J F, Weber E I. Reductive dehalogenation of halomethanes in iron-and sulfate-reducing sediments. 1. Reactivity pattern analysis [J]. Environ. Sci. Technol., 2003, 37(4): 713-20.
- [29]Maity S, Chakravarty S, Thakur P, et al. Evaluation and standardisation of a simple HG-AAS method for rapid speciation of As(III) and As(V) in some contaminated groundwater samples of West Bengal, India [J]. Chemosphere, 2004, 54(8):1199-206.
- [30]Hassan M M, Atkins P J, Dunn C E. The spatial pattern of risk from arsenic poisoning: a Bangladesh case study [J]. J. Environ. Sci. Health, 2003, 38(1):1-24.
- [31]Hoque B A, Hoque M M, Ahmed T, et al. Demand-based water options for arsenic mitigation: an experience from rural Bangladesh [J]. Public Health, 2004,118(1):70-77.
- [32]Ghosh A K, Bhattacharyya P, Pal R. Effect of arsenic contamination on microbial biomass and its activities in arsenic contaminated soils of Gangetic West Bengal, India [J]. Environ. Int., 2004, 30(4):491-499.
- [33]Serre M L, Kolovos A, Christakos G, et al. An application of the holistochastic human exposure methodology to naturally occurring arsenic in Bangladesh drinking water [J]. Risk. Ana., 2003, 23(3):515-528.
- [34]Abedin M J, Cresser M S, Meharg A A, et al. Arsenic accumulation and metabolism in rice [J]. Environ. Sci. Technol., 2002, 36(5):962-968.
- [35]王平,奚小环.全国农业地质工作的蓝图——“农业地质调查规划要点”评述 [J].中国地质,2004,31(增刊):11-14.
- [36]杨忠芳,成杭新,陈玉龙,等.进入21世纪的勘查地球化学:对生态地球化学的展望 [J].地学前缘,2004,11(2):600-605.
- [37]奚小环.生态地球化学与生态地球化学评价 [J].物探与化探,2004, 24(1):7-15.
- [38]成杭新,杨忠芳,赵传冬,等.区域生态地球化学预警:问题与讨论 [J].地学前缘,2004,11(2):608-615.
- [39]成杭新,杨忠芳,奚小环,等.长江流域沿江Cd异常源追踪与定量评估的研究框架 [J].地学前缘,2005,12(1):261-272.
- [40]成杭新,杨忠芳,奚小环,等.长江流域沿江Cd异常源追踪与追源的战略与战术 [J].第四纪研究,2005,25(3):285-291.
- [41]谢学锦,程志中,成杭新.应用地球化学在中国发展的前景 [J].中国地质,2004,31(增刊):16-29.
- [42]Nomiyama K. Renal effects of cadmium [A]. In: Nriagu J O ed. Cadmium in the environment [C]. New York: Wiley, 2002. 643-689.