

大同盆地高砷地下水系统沉积物环境磁学特征

谢先军, 王焰新, 苏春利, 刘怀庆, 段萌语, 张宏达

中国地质大学环境学院及教育部生物地质与环境地质重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 为了研究高砷含水层沉积物中砷与磁性矿物的关系, 对大同盆地高砷地区含水层钻孔样品进行了环境磁学和地球化学分析, 结果表明亚铁磁性矿物是决定含水层沉积物磁性特征的主要磁性矿物. 通过对比砷和磁性参数在垂向上的变化趋势发现, 高砷含量往往对应着低的饱和等温剩磁(SIRM)值, 揭示出砷和顺磁性矿物之间也存在联系. 沉积物砷含量与磁性参数的相关系数均小于0.5($\alpha=0.05$), 表明砷和亚铁磁性矿物及不完整反铁磁性矿物之间不存在明显的联系. 在所有磁性参数中磁化率(χ)和砷含量之间相关性最显著, 相关系数均在0.4($\alpha=0.05$)左右, 低的相关系数与亚铁磁性矿物和不完整反铁磁性矿物对顺磁性矿物的稀释有关. 该地区高砷地下水的形成可能与水铁矿及纤铁矿等砷的赋存矿物在还原条件下的还原溶解有关.

关键词: 大同盆地; 砷; 地下水系统; 沉积物; 环境磁学.

中图分类号: X143; P33

文章编号: 1000-2383(2008)01-0117-07

收稿日期: 2007-03-26

Environmental Magnetic Properties of Sediments of High Arsenic Groundwater System, Datong Basin

XIE Xian-jun, WANG Yan-xin, SU Chun-li, LIU Huai-qing, DUAN Meng-yu, ZHANG Hong-da

School of Environmental Studies & MOE Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The purpose of the study is to test the possible relationship between magnetic parameters and arsenic in high arsenic aquifer sediment. Magnetic and geochemical study on core sediments from Datong basin suggests that the dominant magnetic mineral is ferrimagnetic. Magnetic measurements and arsenic concentration analysis were carried out to understand the distribution characteristics of magnetic parameters and arsenic in sediments. All core samples with high arsenic content have low saturation isothermal remnant magnetism (SIRM) values, indicating the correlation between arsenic and paramagnetic mineral. The correlation factors between arsenic content and magnetic parameters are very low ($R^2 < 0.5$, $\alpha = 0.05$), but the magnetic susceptibility (χ) is better correlated than the other magnetic parameters with correlation factor of about 0.4 ($\alpha = 0.05$). The low correlation between magnetic proxies and arsenic content is attributed to the dilution of paramagnetic minerals by the ferrimagnetic and anti-ferromagnetic minerals. The occurrence of As-rich groundwater in this region may be due to dissolution of As-bearing Fe mineral (e. g. γFeOOH , $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) and subsequent arsenic release.

Key words: Datong basin; arsenic; groundwater system; sediment; environmental magnetism.

0 引言

大同盆地浅层高砷地下水的过度开发利用, 给当地居民的生活与健康带来了严重的影响(王敬华等, 1998; 郭华明等, 2003). 与大同盆地类似, 在我国

台湾、新疆、内蒙(Smedley and Kinniburgh, 2002; Smedley *et al.*, 2003)等地及世界其他一些地区如越南(Berg *et al.*, 2001)、柬埔寨(Polya *et al.*, 2003, 2005)、印度和孟加拉国(Nickson *et al.*, 1998, 2000; Smith *et al.*, 2000; Smedley and Kinniburgh, 2002)等也发现了高砷地下水的存在. 前

人对高砷地下水进行了广泛的研究,并对高砷地下水的成因机制提出了不同的假说(Das *et al.*, 1996; Nickson *et al.*, 1998, 2000; Dowling *et al.*, 2002; Harvey *et al.*, 2002; McArthur *et al.*, 2004; Horneman *et al.*, 2004; Islam *et al.*, 2004),但仍存有争议.有关高砷地下水的成因尽管存在不同的模型,但普遍认为沉积物中铁的氧化物/氢氧化物对高砷地下水的形成有着重要的作用,如含砷的 Fe(III)氧化物/氢氧化物在还原条件下发生还原溶解,而释放出砷(Nickson *et al.*, 1998, 2000; Bhattacharyya *et al.*, 2003; McArthur *et al.*, 2001, 2004; Dowling *et al.*, 2002; Anawar *et al.*, 2003; Akai *et al.*, 2004; Swartz *et al.*, 2004; Zheng *et al.*, 2004; Harvey *et al.*, 2005; Klump *et al.*, 2006).

沉积物中铁的氧化物主要有赤铁矿($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$)、针铁矿(αFeOOH)、纤铁矿(γFeOOH)、磁赤铁矿($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$)、磁铁矿(Fe_3O_4)和水铁矿($5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)等不同的类型(张卫国等,2003).不同类型的铁的氧化物其地球化学性质不一样,从环境磁学角度来看,上述铁的氧化物的磁学特征是不一样的,室温下磁铁矿和磁赤铁矿属亚铁磁性特征,赤铁矿和针铁矿属不完整反铁磁性,纤铁矿和水铁矿属于顺磁性.因此,根据磁性测量,可以提取有关不同铁的氧化物的信息.

环境磁学,自 20 世纪 70 年代发展以来,在环境、海洋、湖泊许多领域得到了广泛的发展,特别是在环境科学领域,如:沈明洁等(2006)用环境磁学方法对北京东郊土壤剖面的重金属污染进行了研究;王学松和秦勇(2006)用环境磁学方法对徐州城市表层土壤中的硫进行了研究.目前,有关对高砷地区沉积物环境磁学的研究报导很少,仅见 Horneman *et al.* (2004)对孟加拉国高砷地区沉积物进行了磁化率的研究.因此,本文拟在对大同盆地高砷地区沉积物作详细的环境磁学研究的基础上,结合沉积物化学分析,对沉积物中砷的赋存及高砷地下水的形成做进一步的探讨.

1 样品采集与分析

分别于 2005 年 8 月和 2006 年 5 月,在大同盆地采集了 ZK-01、ZK-02、ZK-03 和 ZK-04 四个钻孔沉积物样芯.采样点选取在高砷地下水地区,该地区

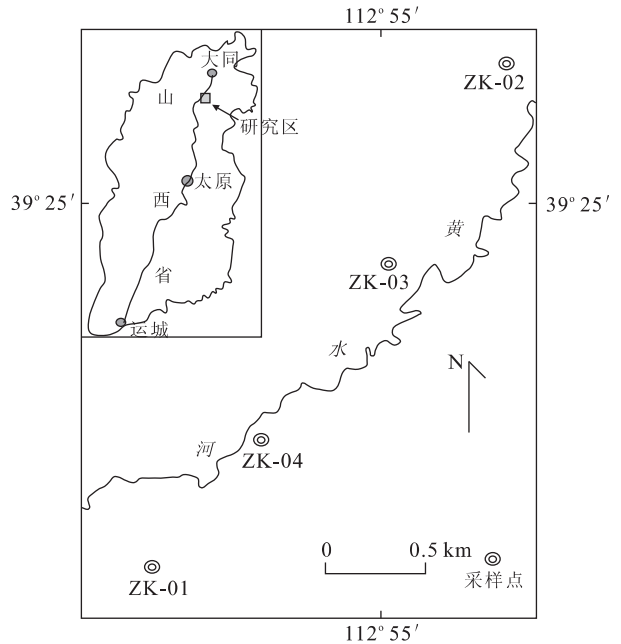


图 1 采样点位置图

Fig. 1 Sample sites

地下水中砷的含量高达 $1\,499\ \mu\text{g}/\text{L}$ (苏春利, 2006),远远的高于世界卫生组织给定的 $10\ \mu\text{g}/\text{L}$ 的标准(WHO, 1996).

采样点之间间距在 1 000 m 左右(图 1),沉积物钻芯样密封在 PVC 管桶内,用石蜡密封,以防样品氧化,密封样品在 $4\ ^\circ\text{C}$ 冷藏保存.样品带回实验室后,在实验室进行分割,作进一步分析,将所得沉积物样品自然晾干用研钵分散进行磁学分析.以上所有操作均在氮气保护下进行,以减少空气对样品的氧化.

对所有样品,使用 HKB-3 型磁化率仪测定了质量磁化率 χ ;使用 TDS-1 型脉冲磁化仪在 1 T 的磁场下获得等温饱和剩磁(SIRM);在 300 mT 的磁场强度下获得了等温剩磁($\text{IRM}_{300\text{mT}}$),以及其比值 $F_{300\text{mT}}$.以上获得的剩磁采用 SMD-88 型旋转磁力仪测量.并计算了单位质量磁化率 χ 、SIRM、HIRM、 $F_{300\text{mT}}$ 、 SIRM/χ 等参数.根据磁学测试结果,选取有代表性的样品进行了剩磁随磁场强度变化曲线的测定.

沉积物样品自然干燥后,经磨细 <100 目,按 US EPA 方法(US EPA, 2001),在 $95\ ^\circ\text{C}$ 分别用 1:1 HNO_3 和 1:4 HCl 对样品进行消化和溶解,再加少量高氯酸蒸干溶液,最终将样品溶解于 5% 的硝酸溶液,采用原子荧光分光光度计对砷含量进行了测定.

表 1 大同盆地不同采样点沉积物的环境磁学参数与砷含量统计

Table 1 Statistic of environmental magnetic parameters and arsenic concentrations of core samples from Datong basin

钻孔		$SIRM(A/m^2 \cdot kg^{-1})$	$IRM(A/m^2 \cdot kg^{-1})$	$F_{300mT}(\%)$	$HIRM$	$\chi(kg/m^3)10^{-8}$	As(mg/kg)
ZK-01	AV	0.030	0.028	91	0.002	220	24.91
	MIN	0.006	0.005	66	0.001	69	3.35
	MAX	0.063	0.059	96	0.004	419	124.16
ZK-02	AV	0.053	0.051	93	0.002	221	10.87
	MIN	0.004	0.003	78	0.000	50	5.76
	MAX	0.276	0.273	99	0.004	555	28.60
ZK-03	AV	0.035	0.033	93	0.002	231	12.19
	MIN	0.010	0.009	66	0.001	161	5.02
	MAX	0.095	0.093	98	0.012	316	32.21
ZK-04	AV	0.033	0.031	93	0.002	206	9.90
	MIN	0.004	0.004	83	0.000	53	4.17
	MAX	0.081	0.079	97	0.003	348	18.54

以上所有分析均在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质教育部重点实验室完成。

2 结果与讨论

由表 1 和图 2 可见,与磁性矿物含量有关的参数的变化存在一定的差异,既存在同一点上的垂向变化也表现出不同采样点之间的差异。如 χ 的变化于 $53 \sim 555 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^3$ 之间,其变化达到 10 倍,但对 ZK-03 而言,其最大值和最小值非常接近,而 F_{300mT} 各采样点,除个别样品外,其值相差不大,表明各采样点沉积物的磁学性质既有共性也存在差异。

2.1 磁性矿物

F_{300mT} 是样品在 300 mT 磁场中磁化后所携带剩磁与饱和等温剩磁的比值,反映了样品中亚铁磁性矿物(如磁铁矿)与不完整反铁磁性矿物(如赤铁矿、针铁矿)的相对比例(张卫国和愈立中,2002),它随着不完整反铁磁性矿物贡献的增加而下降。从表 1 可以看出,研究的 4 个沉积物钻孔样品中,ZK-01 除了 26.7 m 处的一个样品 F_{300mT} 为 66% 外,其他样品 F_{300mT} 值达到了 84%~96%;ZK-02 所有的样品均具有较高的 F_{300mT} 值,主要集中在 81%~99% 之间;ZK-03 除 31 m 处的一个样品外,其他样品 F_{300mT} 均大于 90%,最高可达到 98%;ZK-04 相比较前 3 个钻孔,所有的样品 F_{300mT} 值较为稳定主要集中在 89%~97% 之间。 F_{300mT} 的值表明,所有样品除极少数样品外,经 300 mT 磁场磁化后,样品所携带的剩磁已接近饱和,揭示出沉积物样品中亚铁磁性矿物(如磁铁矿、赤铁矿及钛铁矿等)主导了样

品的磁性特征,但同时存在不完整的反铁磁性和顺铁磁性物质的贡献。

图 3 揭示了典型样品的 IRM 随磁场强度变化的曲线特征。其中 SZ-08 和 SZ-14 取自 ZK-01,深度分别为 12.6 m 和 22 m;DY-01 取自 ZK-03,深度为 5.4 m;SHX-14 取自 ZK-04 取样深度为 34.1 m。SZ-08 和 DY-01 样品呈棕黄色,显示了相对氧化的环境,而 SZ-14 和 SHX-14 均呈灰黑色,代表了相对还原的环境。并且,SZ-14 具有高的砷含量,SZ-08 砷的含量则很低,其余 2 个样品砷含量在前两者之间。由图 1 可以看出 SZ-08、SHX-14 及 DY-01 三个样品 IRM 随外加磁场的增加迅速增大,也表明样品磁性主要为亚铁磁性矿物贡献;而 SZ-14 样品当外加磁场增加时,其 IRM 增加相对缓慢,表明不完整的反铁磁性矿物(如针铁矿和赤铁矿)对其磁性的贡献明显加强。

2.2 沉积物环境磁学特征的垂向变化

沉积物钻孔 ZK-01、ZK-02、ZK-03 和 ZK-04 磁性特征的垂向变化见图 2。质量磁化率(χ)通常被用来粗略的估算样品中含铁矿物特别是亚铁磁性矿物含量,饱和等温剩磁($SIRM$)主要与样品稳定单畴的磁铁矿含量有关,硬剩磁($HIRM$)则可以作为不完整反铁磁性矿物含量的度量。因此,质量磁化率(χ)和等温剩磁($SIRM$)通常反应了样品中磁性矿物的含量,但与 χ 相比较, $SIRM$ 不受顺磁性矿物的影响(Thompson and OldFeld., 1986),4 个沉积物钻孔样品的 χ 与 $SIRM$ 在垂向上的变化趋势高度一致(图 2),表明 χ 主要是由亚铁磁性矿物贡献。4 个采样点的 χ 及 $SIRM$ 在垂向上均出现较大的变

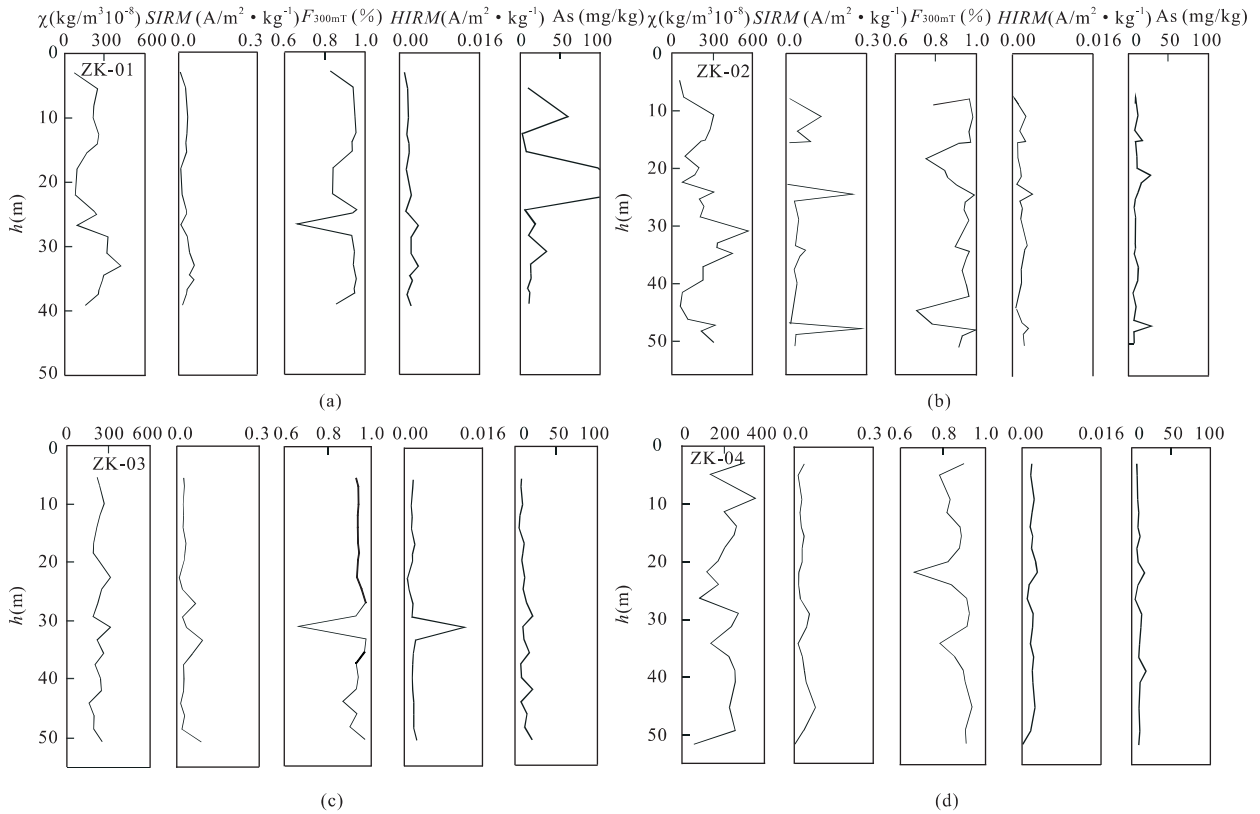


图 2 沉积物钻孔样品磁学参数及砷含量的垂向变化

Fig. 2 Vertical variations of magnetic parameters and arsenic concentration for core sediments

化,说明亚铁磁性矿物含量随深度的变化有很大的差异.与前两者相比,4个采样点的 $HIRM$ 变化趋势不尽相同:ZK-01点, $HIRM$ 随着深度的增加逐渐增大,但增幅不大,表明不完整反铁磁性矿物含量在垂向上变化不大;ZK-03点的 $HIRM$ 随着深度变化不大,仅在 30 m 前后出现一个峰值,说明在此深度反铁磁性矿物含量急剧增加;ZK-02 和 ZK-04 点, $HIRM$ 随深度增加出现一定的波动,但变化不大,这意味着在上述两采样点反铁磁性矿物含量随深度变化不明显.4个采样点的 F_{300mT} 总体上随深度的变化不大,仅在局部出现了低谷,如 ZK-01 的 26.7 m 处和 ZK-03 点的 31 m 处的 F_{300mT} 值均为 0.66,这说明在上述样点附近不完整反铁磁性矿物或顺磁性矿物含量急剧增加,但 $HIRM$ 在垂向上变化不大表明, F_{300mT} 的降低不是由于反铁磁性矿物而是顺磁性矿物含量增加导致的.

2.3 沉积物砷含量与磁性特征的关系

本次研究沉积物样品中砷的含量为 8.38 ~ 154.46 mg/kg,其中 50% 的样品砷含量低于现代松散沉积物中平均砷含量 10 mg/kg (Smedley and

Kinniburgh, 2002). 图 3 还显示了沉积物样品中砷含量在垂向上的变化.对比磁性参数曲线,可以发现砷的含量与磁性参数的垂向变化差别较大,仅仅和磁化率具有一定的相似性.此外,相关性研究也表明,沉积物的砷含量和磁性参数之间的相关性很弱 ($R^2 < 0.5$, $\alpha = 0.05$),以 ZK-01 为例,沉积物砷的含量和磁化率、硬剩磁、 F_{300mT} 、等温剩磁及饱和等温剩磁的相关系数分别为:0.4、0.001、0.085、0.1 和 0.1.但是通过对比磁性参数和砷含量在垂向的变化曲线,可以发现高砷点对应的一般是 $SIRM$ 低值的点,这表明砷在沉积物中的赋存和亚铁磁性和不完整反铁磁性矿物无关,而是和铁的顺磁性矿物(如钛铁矿、纤铁矿)有关.沉积物中砷含量和磁性参数的相关性也证明了这一点,砷含量和硬剩磁、等温饱和剩磁及等温剩磁无明显的相关性表明其与亚铁磁性矿物和不完整反铁磁性矿物的含量无关;而磁化率与砷的含量的弱相关性说明与砷的赋存与顺铁磁性矿物有关,弱的相关性表明顺铁磁性矿物含量很低,其对磁性的贡献受到亚铁磁性矿物和反铁磁性矿物的稀释.

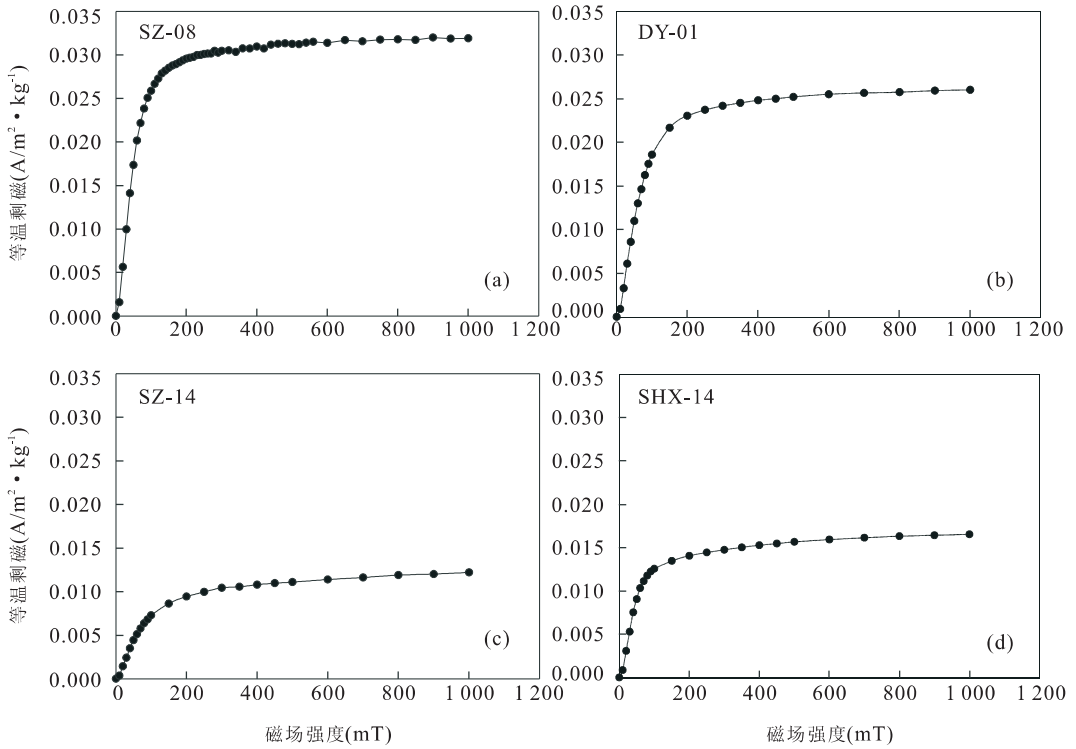


图 3 典型样品等温剩磁随磁场变化曲线

Fig. 3 IRM versus magnetic field curves of typical core sediments

3 结论

通过对大同盆地高钾地区沉积物的环境磁学研究表明,亚铁磁性矿物是决定沉积物磁性特征的主要磁性矿物,但同时也存在反铁磁性和顺铁磁性矿物的贡献。总体上,研究内的沉积物中磁性矿物的含量变化不大;沉积物中钾的赋存与亚铁磁性和不完全反铁磁性矿物无关,而与顺磁性矿物(如水铁矿和纤铁矿)有关;磁化率与钾的弱相关性主要是由于亚铁磁性矿物和不完全反铁磁性矿物对顺铁磁性矿物的稀释引起。该地区高钾地下水的形成可能与水铁矿及纤铁矿等钾的赋存矿物在还原条件下的还原溶解有关。

References

Akai, J., Izumi, K., Fukuhara, H., et al., 2004. Mineralogical and geomicrobiological investigations on groundwater arsenic enrichment in Bangladesh. *Applied Geochemistry*, 19; 215–230.

Anawar, H. M., Akai, J., Komaki, K., et al., 2003. Geochemical occurrences of arsenic in groundwater of Bangladesh; Sources and mobilisation processes. *Journal of*

Geochemical Exploration, 77; 109–131.

Berg, M., Tran, H. C., Nguyen, T. C., et al., 2001. Arsenic contamination of groundwater and drinking water in Vietnam: A human health threat. *Environmental Science and Technology*, 35; 2621–2626.

Bhattacharyya, R., Chatterjee, D., Nath, B., et al., 2003. High arsenic groundwater; Mobilization, metabolism and mitigation—An overview in the Bengal delta plain. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 253; 347–355.

Das, D., Samanta, C., Mandal, B. K., et al., 1996. Arsenic in groundwater in districts of West Bengal, India. *Environmental Geochemistry and Health*, 18; 5–15.

Dowling, C. B., Poreda, R. J., Basu, A. R., et al., 2002. Geochemical study of arsenic release mechanisms in the Bengal basin groundwater. *Water Resources Research*, 38; 1–18.

Guo, H. M., Wang, Y. X., Li, Y. M., 2003. Analysis of factor resulting in anomalous arsenic concentration in groundwater of Shanyin, Shanxi Province. *Environmental Science*, 24(4): 60–67 (in Chinese with English abstract).

Harvey, C. F., Swartz, C. H., Badruzzaman, A. B. M., et al., 2002. Arsenic mobility and groundwater extraction in Bangladesh. *Science*, 298; 1602–1606.

- Harvey, C. F., Swartz, C. H., Badruzzaman, A. B. M., et al., 2005. Groundwater arsenic contamination in the Ganges delta; Biogeochemistry, hydrology, human perturbations and human suffering on a large scale. *Comptus Rendus Geoscience*, 337: 285—296.
- Horneman, A., Van Geen, A., Kent, D. V., et al., 2004. Decoupling of As and Fe release to Bangladesh groundwater under reducing conditions. Part I; Evidence from sediment profiles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 3459—3473.
- Islam, F. S., Gault, A. G., Boothman, C., et al., 2004. Direct evidence of arsenic release from Bengal sediments mediated by indigenous metal-reducing bacteria. *Nature*, 430: 68—71.
- Klump, S., Kipfer, R., Cirpka, O. A., et al., 2006. Groundwater dynamics and arsenic mobilization in Bangladesh assessed using noble gases and tritium. *Environmental Science and Technology*, 40: 243—250.
- McArthur, J. M., Banerjee, D. M., Hudson-Edwards, K. A., et al., 2004. Natural organic matter in sedimentary basins and its relation to arsenic in anoxic groundwater: The example of West Bengal and its worldwide implications. *Applied Geochemistry*, 19: 1255—1293.
- McArthur, J. M., Ravenscroft, P., Safiullah, S., et al., 2001. Arsenic in groundwater: Testing pollution mechanisms for sedimentary aquifers in Bangladesh. *Water Resources Research*, 37: 109—117.
- Nickson, R. T., McArthur, J. M., Burgess, W. G., et al., 1998. Arsenic poisoning of Bangladesh groundwater. *Nature*, 395: 338.
- Nickson, R. T., McArthur, J. M., Ravenscroft, P., et al., 2000. Mechanism of arsenic release to groundwater, Bangladesh and West Bengal. *Applied Geochemistry*, 15: 403—413.
- Polya, D. A., Gault, A. G., Bourne, N. J., et al., 2003. Coupled HPLC-ICP-MS analysis indicates highly hazardous concentrations of dissolved arsenic species are present in Cambodian well waters. *Royal Society of Chemistry Special Publication*, 288: 127—140.
- Polya, D. A., Gault, A. G., Diebe, N., et al., 2005. Arsenic hazard in shallow Cambodian groundwaters. *Mineralogical Magazine*, 69: 807—823.
- Shen, M. J., Hu, S. Y., Blaha, U., et al., 2006. Magnetic responses to heavy metal pollution and its statistic significance for site 722 soil vertical profile in eastern Beijing. *Earth Science—Journal of University of Geosciences*, 31(3): 399—404 (in Chinese with English abstract).
- Smedley, P. L., Kinniburgh, D. G., 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17: 517—568.
- Smedley, P. L., Zhang, M., Zhang, G., et al., 2003. Mobilisation of arsenic and other trace elements in fluvio-lacustrine aquifers of the Huhhot basin, Inner Mongolia. *Applied Geochemistry*, 18: 1453—1477.
- Smith, A. H., Lingas, E. O., Rahman, M., 2000. Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh; A public health emergency. *Bulletin of the World Health Organisation*, 78: 1093—1103.
- Su, C. L., 2006. Regional hydrogeochemistry and genesis of high arsenic groundwater at Datong basin, Shanxi Province, China [Dissertation]. China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Swartz, C. H., Blute, N. K., Badruzzaman, B., et al., 2004. Mobility of arsenic in a Bangladesh aquifer: Inferences from geochemical profiles, leaching data and mineralogical characterisation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 4539—4557.
- Thompson, R., Oldfeld, F., 1986. Environmental magnetism. Allen and Unwin, London, 1—227.
- US EPA., 2001. Method 200. 9: Trace elements in water, solids and biosolids by stabilized temperature graphite furnace atomic absorption spectrometry. EPA-821-R-01-011, U. S. A. .
- Wang, J. H., Zhao, L. S., Wu, Y. B., 1998. Environmental geochemical study on arsenic in arseniasis areas in Shanyin and Yingxian, Shanxi Province. *Geoscience*, 12(2): 243—248 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. S., Qin, Y., 2006. Relation between sulfur and magnetic parameters in Xuzhou urban topsoils and its environmental significance. *Environmental Herald*, 24(7): 48—50 (in Chinese with English abstract).
- World Health Organization (WHO), 1996. Guidelines for drinking water quality., 2nd ed., Health criteria and other supporting information, vol. 2., Geneva, Switzerland.
- Zhang, W. G., Yu, L. Z., 2002. Relationship between granularity and magnetic properties in intertidal sediments of the Yangtze Estuary, China. *Science in China (Series D)*, 32(9): 783—792 (in Chinese).
- Zhang, W. G., Yu, L. Z., Lu, M., 2003. Relationship between iron oxides and magnetic properties in intertidal sediments of the Yangtze Estuary, China. *Chinese Journal of Geophysics*, 46(1): 79—85 (in Chinese with English abstract).

Zheng, Y., Stute, M., Van Geen, A., et al., 2004. Redox control of arsenic mobilisation in Bangladesh groundwater. *Applied Geochemistry*, 19: 201–214.

附中文参考文献

郭华明,王焰新,李永敏,2003. 山阴水砷中毒区地下水砷的富集因素分析. *环境科学*, 24(4): 60–67.

沈明洁,胡守云,Blaha, U., 等,2006. 北京西郊 722 土壤垂向剖面重金属污染的磁学响应及其统计意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(3): 399–404.

苏春利,2006. 大同盆地区域水文地球化学与高砷地下水成因研究[博士学位论文]. 武汉:中国地质大学.

王敬华,赵伦山,吴悦斌,1998. 山西山阴、应县一带砷中毒区砷的环境地球化学研究. *现代地质*, 12(2): 243–248.

王学松,秦勇,2006. 徐州城市表层土壤中硫与环境磁学参数的关系及其环境意义. *环境导报*, 24(7): 48–50.

张卫国,愈立中,2002. 长江口潮滩沉积物的磁学性质及其与粒度的关系. *中国科学(D辑)*, 32(9): 783–792.

张卫国,愈立中,陆敏,2003. 长江口潮滩沉积物氧化铁与磁性特征和的关系. *地球物理学报*, 46(1): 79–85.