

盐城滨海平原地下水质量现状及健康风险评价

付昌昌¹, 李向全¹, 张岩^{2,3}, 毛磊^{2,3}, 龚绪龙^{2,3}

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018; 3. 国土资源部地裂缝地质灾害重点实验室, 江苏 南京 210018)

摘要: 为了查明盐城滨海平原区地下水质量状况, 选择具有代表性的 267 个地下水井, 检测了 33 项化学指标, 利用单指标综合评价和影响因素识别相结合的方法研究了本区地下水的质量现状, 并同时给出毒理学指标的饮水途径健康风险以供参考。结果表明: 一般化学指标对本区地下水质量影响程度最高, 原生指标中钠离子、铁、锰、氯化物、溶解性总固体、碘化物、砷化物对超Ⅲ类水单指标贡献率超过 20%, 污染指标中氨氮贡献率最大, 为 8%, 重金属指标对区域地下水质量影响很小; 化学致癌物 As、Cd 和 Cr 中, As 的健康风险值最大, 各含水层所致健康危害风险值数量级在 $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{a}^{-1}$, 为研究区首要的环境健康风险管理控制指标; 化学非致癌物亚硝酸盐、硝酸盐、氟化物中, 氟化物的健康风险最大, 其数量级在 $10^{-8} \sim 10^{-6} \text{a}^{-1}$, 深层地下水和浅层地下水样品中超过 USEPA ($1 \times 10^{-4} \text{a}^{-1}$) 最大可接受风险的比例分别为 82% 和 88%; 重金属指标汞、锰、铜、锌和铅的健康危害风险值均较小, 绝大部分都低于 10^{-6}a^{-1} , 其中锰和铅的健康风险值相对较高。开展地下水质量和毒理指标的健康风险评价, 可为本区地下水资源的合理开采利用和保护提供参考。

关键词: 地下水质量; 毒理指标; 影响程度; 健康风险评价; 化学致癌物; 非化学致癌物; 风险指标; 盐城滨海平原
中图分类号: X824 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2017)05-0054-07

Groundwater quality evaluation and the health risk assessment of Yancheng Coastal Plain

FU Changchang¹, LI Xiangquan¹, ZHANG Yan^{2,3}, MAO Lei^{2,3}, GONG Xulong^{2,3}

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China; 2. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China; 3. Key Laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, Ministry of Land and resources, Nanjing 210018, China)

Abstract: To investigate the groundwater quality of Yancheng Coastal Plain, 33 chemical indexes were detected from the groundwater samples collected from 267 representative groundwater wells. Through the conjunctive use of the single factor comprehensive evaluation and the identification factor, the current status of groundwater quality was identified and the human health risk of toxicological indicators were given for references. Results showed that: the normal chemical index exerts the greatest influence on the quality of groundwater. According to IV – V class groundwater, and the total contribution rates of sodium, iron, manganese, chloride, total dissolved solids, iodide and arsenic, which are kinds of protogenetic component, are more than 20%. among all of the pollution indexes, the contribution rates of ammonia nitrogen is 8%, and the influence of heavy metals on the regional groundwater quality is negligible; the health risk of arsenic (As) is $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{a}^{-1}$, which is highest of three chemical carcinogens (As, Cd and Cr). As is the primary control index for environmental health risk management; Among the health risks of chemical non-carcinogens of NO_2^- , NO_3^- , F and five heavy metals (Hg, Mn, Cu, Zn, Pb), F has the highest health risk with the values within $10^{-8} \sim 10^{-6} \text{a}^{-1}$ and the maximum acceptable rates were 82% for the deep groundwater and 88% for the shallow groundwater beyond the USEPA standard ($1 \times 10^{-4} \text{a}^{-1}$). The health risk val-

收稿日期: 2017-05-20; 修回日期: 2017-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41502336); 中国地质调查局项目(121201106000161309)

作者简介: 付昌昌(1988-), 男, 河南商丘人, 硕士, 主要从事地下水循环与演化研究

通讯作者: 李向全(1966-), 男, 河北石家庄人, 博士, 研究员, 主要从事水文地质、地质灾害方面的研究工作。

ues of the five heavy metals all within the acceptable range (less than $1 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$) for the vast majority samples, except Mn and Pb has a relative high health risk values which still within the acceptable range ($1 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$). The study of groundwater quality and health risk assessment of toxicological index can provide references for exploitation, utilization and protection of groundwater resources.

Key words: groundwater quality; toxicological index; influence level; health risk assessment; chemical carcinogens; chemical nonk-carcinogens; risk index; Yancheng Coastal Plain

1 研究背景

盐城滨海平原地处中国东部沿海中部,近年来随着人口增加及工农业快速发展,地表水环境质量状况明显下降,埋藏于地下深处的孔隙承压水逐渐成为许多城镇的主要供水源^[1]。因此,了解本区地下水的状况及影响因素对于保障地区供水安全具有重要的现实意义。当前围绕该区域地下水质的研究,包括地下水水质控制因素^[2],埋深对水质的影响^[3]及地下水中盐分来源^[4]等,但是对本区地下水质量评价的研究很少。地下水质量评价方法较多,如单指标评价法^[5]、内梅罗指数法^[6]、模糊综合评判法^[7-8]、灰色聚类法^[9]、嫡权属性识别评价法^[10],这些方法虽然运用了许多数学概念,但评价结果的物理意义不明确。中国地质调查局开展的地下水污染调查工作,已完成我国东部主要平原地下水污染调查^[11],并针对人类活动较强和地下水利用率极高的华北平原,着重研究了地下水质量评价方法和影响因素的识别方法^[12]。该方法能够真实反映区域地下水质量,对区域经济发展具有重要指导意义。因此,本次研究采用该方法进行盐城滨海平原地下水质量评价和影响因素的识别。

地下水质量评价中往往体现不出差异巨大的不同性质指标,其结果容易产生严重歧义和误导,掩盖有毒有机物、重金属等对人体健康危害较大污染物的影响,所以非常有必要在水质评价结果的基础上,

补充毒理学指标和重金属指标饮水途径的健康风险。健康风险评价是环境风险评价的重要组成部分,是通过估算有害因子对人体产生不良影响概率,以评价暴露于该因子下人体健康所受的影响。其主要特点是以风险度作为评价指标,把环境污染程度与人体健康联系起来,定量描述污染物对人体产生的健康危害^[13],是很有现实意义的环境评价方法^[14]。评价污染物的健康风险有很多方法,其中美国环境保护局建议的四步法应用较为广泛^[15],该方法主要用于评价地下水中重金属和毒理化学指标与人体接触产生的健康风险^[16-17]。本文利用美国环境保护局的健康风险评价模型计算出毒理学指标和重金属指标的单人饮水途径健康风险水平。

2 研究区概况及水文地质条件

盐城市地处江淮平原东部,地理坐标介于 $32^{\circ}34' \sim 34^{\circ}28' \text{ N}$ 、 $119^{\circ}27' \sim 120^{\circ}54' \text{ E}$ 之间,总面积约 $1.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,该平原由近 2 000 ~ 3 000 a 来海水和河流不断冲积而成,区域内部水网密布,形成滨海水网平原地貌类型,至今仍在不断向海延伸。区内地势低平,从东南向西北缓缓倾斜。该区受季风气候控制,多年平均降水量为 1 009 ~ 1 072 mm,多集中在 6 ~ 9 月份,此期间降水量约占年降水量的 60% 以上。多年平均蒸发量为 951 ~ 1 120 mm。

研究区地下水主要赋存于松散沉积地层孔隙中,含水层顶板埋深在近地表以下 550 m 范围内(图 1)。

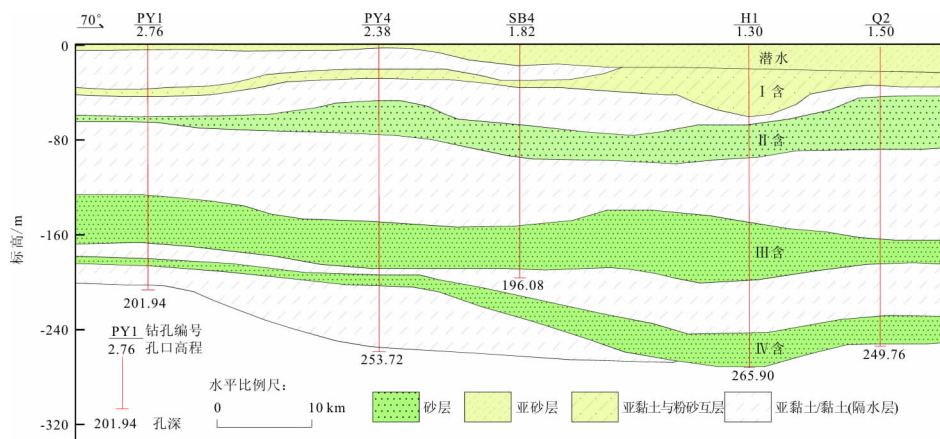


图1 研究区地下水埋藏条件示意图

含水层多为由粉细砂、砂或砾石组成的松散沉积层,含水量充沛,水量稳定。不同的含水层之间由黏土或淤泥质黏土层形成隔水层。根据沉积物时代、成因、地层结构以及水文地质特征,可将研究区内新近系-第四系含水层自上而下划分为浅层含水系统(包括潜水、第Ⅰ承压含水层组)和深层含水系统(包括第Ⅱ、第Ⅲ、第Ⅳ和第Ⅴ承压含水层组)。其中,浅层地下水补给来源有大气降水和地表水、农业灌溉水入渗补给,排泄为蒸发和开采利用;深层承压水则接受上部越流补给和西中部山体的侧向补给,主要排泄方式为人工开采。浅层地下水主要赋存在海相沉积地层中,水质较差,多为咸水或半咸水,开采利用较少。深层承压水主要赋存于由河湖沉积作用形成的中细砂及中粗砂中,分布广,富水性良好,水质优良,是目前区内地下水的主采层。

3 数据获取与处理

3.1 样品采集与测试

样品采样时间是2013年12月和2014年11月,共采集潜水样品67件,Ⅰ承压水7件,Ⅱ承压水66件,Ⅲ承压水73件,Ⅳ承压水样品27件和Ⅴ承压水样品27件。除Ⅰ承压样品外,其他各层地下水样品采集时按照剖面由内陆向海进行,基本控制全区,采样点地理位置图见图2。采样瓶为500 mL聚乙烯瓶,取样前先用去离子水清洗3次,在充分抽水洗井后进行取样,用待采水样清洗聚乙烯瓶2~3次,再取满水样,排出空气并封好瓶口,并于4 d内送至国土资源部南京矿产资源监督检测中心进行测试分析,测试化学指标为35项。

3.2 数据处理

(1) 地下水质量评价。单指标评价按指标值所在的指标限值区间确定地下水质量类别,不同地下水质量类别的指标限值相同时,从优不从劣。例:碘化物Ⅰ、Ⅱ类标准值均为0.04 mg/L,若水质分析结果为0.04 mg/L,应定为Ⅰ类,不定为Ⅱ类。综合评价是按单指标评价结果的最高类别确定,并指出最高类别的指标。例:某地下水样氯化物含量400 mg/L,这个指标属Ⅴ类,其余指标均低于Ⅴ类,则该地下水质量综合类别定为Ⅴ类。

(2) 健康风险评价。地下水中的污染物主要通过直接摄食和皮肤接触两种途径进入人体,其中饮水途径是人摄取水中污染物最主要方式,与此相比,其他途径的影响则可忽略不计^[18],因此本文仅选择饮水途径来估算人群暴露量,进而进行健康风险评

价。地下水中污染物区分为致癌物和非致癌物,因此,应当分别计算致癌物和非致癌物通过饮用水途径进入人体后所引起的健康风险。

非致癌物风险计算公式:

$$R'_i = \frac{ADD}{RfD} \times 10^{-6} \quad (1)$$

致癌物风险计算公式:

$$R_i = ADD \times q \quad (2)$$

式中: R'_i 为非致癌指标 i 的人体健康风险, a^{-1} ; R_i 为致癌指标 i 的人体健康风险, a^{-1} ; RfD 为参考剂量, $mg/(kg \cdot d)$; q 为由动物推算出来人的致癌强度系数, $[mg/(kg \cdot d)]^{-1}$; ADD 为污染物的日均暴露剂量, $mg/(kg \cdot d)$ 。

日均暴露剂量计算:

$$ADD = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (3)$$

式中: ADD 为污染物的日均暴露剂量, $mg/(kg \cdot d)$; C 为污染物的浓度, mg/L ; IR 为饮水摄入率, L/d , 建议值为成人 2.0 L/d ; EF 为暴露频率, d/a , 采用值为 365 d/a ; ED 为暴露持续时间, a , 采用值为 70 a ; BW 为体重, kg , 采用值为 60 kg ; AT 为平均时间, d 。致癌效应取值 70 $a \times 365 d/a$, 非致癌效应取值 30 $a \times 365 d/a$ 。

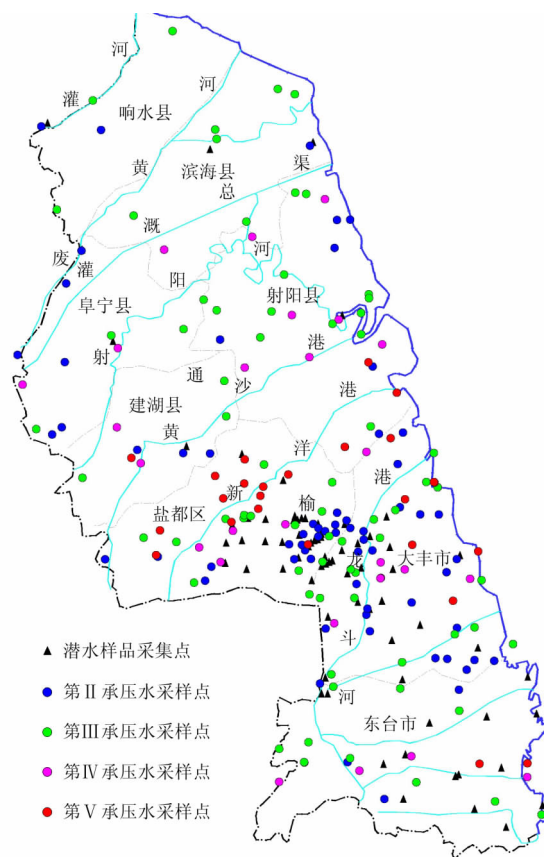


图2 采样点地理位置图

总健康风险计算公式:

$$R_T = \sum R'_i + \sum R_i \tag{4}$$

式中: R_T 毒理学指标总健康风险; $\sum R_i$ 为致癌指标总健康风险; $\sum R'_i$ 为非致癌指标总健康风险,由于非致癌毒理学指标的阈值效应,当其健康风险小于 10^{-6} 时,不参加叠加计算。

本研究中,在地下水中检测到的污染物共有 14 种,其中,As、Cd 和 Cr 为化学致癌物,亚硝酸盐、硝酸盐、氟化物、汞、Pb、Cu、Zn 和 Mn 为非致癌物^[13,17]。根据有关资料[13,17],查得与此次评价有关的参数见表 1。

表 1 饮水暴露途径下模型参数 q_i 和 ADD_i 值

化学 致癌物	$q_i /$ [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] ⁻¹	化学非 致癌物	$ADD_i /$ [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]
As	1.5	亚硝酸盐	1.6×10^{-1}
Cd	6.1	硝酸盐	1.6×10^0
Cr	41	氟化物	6.0×10^{-2}
		Hg	3.0×10^{-4}
		Pb	1.4×10^{-3}
		Mn	4.6×10^{-2}
		Cu	4.0×10^{-2}
		Zn	3.0×10^{-1}

对于化学致癌物,国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的对社会公众成员的最大可接受水平为 $5 \times 10^{-5} \text{a}^{-1}$,USEPA 的标准为 $1 \times 10^{-4} \text{a}^{-1}$,本文以 $1 \times 10^{-4} \text{a}^{-1}$ 作为化学致癌物的最大可接受风险水平。

对于化学非致癌物,英国皇家协会、荷兰建设环保局和瑞典环保局推荐的对社会公众成员的最大可接受水平均为 $1 \times 10^{-6} \text{a}^{-1}$,因此本文以 $1 \times 10^{-6} \text{a}^{-1}$ 作为化学非致癌物的最大可接受风险水平。

4 结果与讨论

4.1 地下水质量

采用单指标综合评价法评价结果表明,在盐城滨海平原浅层地下水的 74 个采样点中,I 至Ⅲ类地下水的采样点数占总采样点数的 7%,Ⅳ类地下水的采样点数占 49%,Ⅴ类地下水采样点数占 45%;在深层地下水的 193 个采样点中,I 至Ⅲ类地下水的采样点占 17%,Ⅳ类地下水的采样点数占 64%,Ⅴ类地下水的采样点数占 19%。

用分类指标计算盐城滨海平原地下水质量的影

响程度,影响程度即为地下水分类指标中某类水的个数与该类水参评总个数之比。地下水水质指标分为一般化学指标、无机毒理学指标和毒性重金属指标。其中,一般化学指标包括 pH、Fe、Mn、Cu、Zn、Al、氯化物、 SO_4^{2-} 、TH(总硬度)、TDS(总溶解性固体)、耗氧量、 NH_4^+ (氨氮)和 Na^+ ;无机毒理指标包括碘化物、氟化物、 NO_3^- 和 NO_2^- ;毒性重金属指标包括 As、Cd、 Cr^{6+} 、Pb 和 Hg。结果表明:影响程度最大的是“一般化学指标”,其中浅层地下水为 98.55%,深层地下水为 80.31%。其次是无机毒理学指标,浅层地下水为 39.13%,深层地下水为 29.02%。再者为毒性重金属指标,浅层地下水为 36.23%,深层地下水为 17.62%(图 3)。

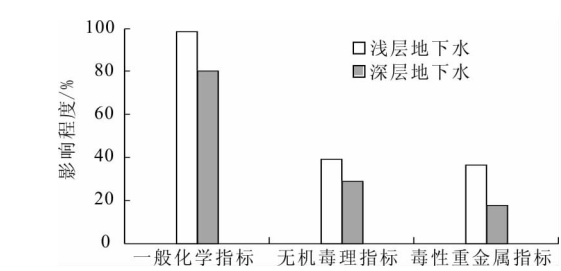


图 3 不同分类指标对华北平原地下水质量影响特征

为探求哪些指标对Ⅳ类、Ⅴ类地下水贡献较大,引入“超Ⅲ类水单指标贡献率”的概念,即地下水中某指标毒性程度达超Ⅲ类水个数与总超Ⅲ类水个数之比。在单指标对地下水质量影响中,存在两类指标,一类是地下水原生指标,另一类是人类活动导致的污染指标,包括“三氮”(硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮)和毒性重金属指标(镉、六价铬、铅、汞)。

在盐城滨海平原,浅层地下水的超Ⅲ类水单指标贡献率较大的是原生指标,包括:钠离子、铁、锰、砷、溶解性总固体、氯化物、碘化物、总硬度、硫酸盐和氟化物,它们的贡献率分别为 65%、48%、46%、36%、35%、30%、28%、26%、6% 和 4%。深层地下水的超Ⅲ类水原生单指标贡献率,分别为:钠离子 69%、铁和锰均为 35%、氯化物 29%、溶解性总固体 27%、碘化物 26%、砷 21%、氟化物 14%、总硬度 11%、硫酸盐 3%(图 4)。

在盐城滨海平原浅层地下水中,源自人类活动影响较大的污染指标有:氨氮、硝酸盐和亚硝酸盐(图 5(a)),它们的贡献率分别为 12%、4% 和 4%,铅的贡献率为 6%,镉、六价铬、汞的贡献率都为 0。在深层地下水中,源自人类活动影响较大的污染指标有:氨氮、硝酸盐和亚硝酸盐(图 5),它们的贡献率分别为 6%、3% 和 2%。铅的贡献率为 0.6%,

镉、六价铬和汞的贡献率都为 0。

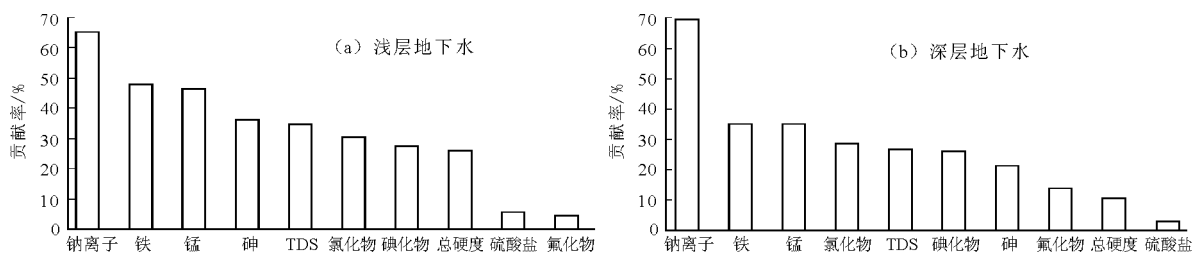


图 4 原生单指标对盐城滨海平原超Ⅲ类浅层地下水及超Ⅲ类深层地下水贡献率

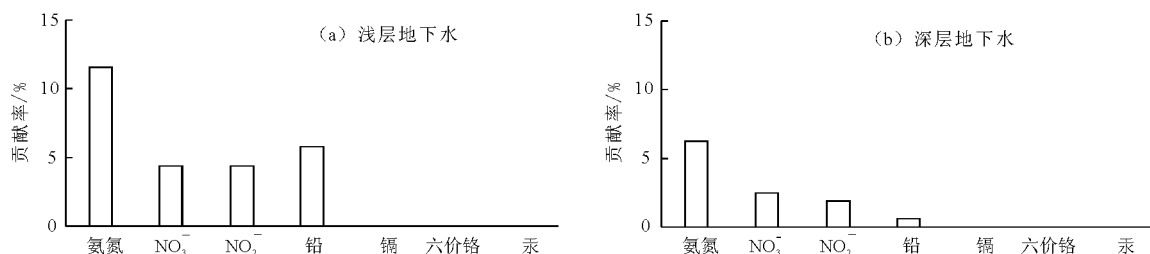


图 5 污染单指标对盐城滨海平原超Ⅲ类浅层地下水及超Ⅲ类深层地下水贡献率

4.2 毒理学指标健康风险评价

依据 GB/T 14848 - 2015《地下水质量标准》(报批稿)地下水质量指标及限值,对检测的 9 项毒理学指标进行质量类别判断,将毒理学指标中质量类别最高的作为评价的最终结果,其中 9 项指标分别为硝酸盐、亚硝酸盐、氟化物、汞、砷、硒、镉、铬(六价)和铅,评价结果见图 6,浅层地下水毒理学指标以Ⅲ级和Ⅳ级为主,所占比例分别为 44.59% 和 43.24%,其次为Ⅴ级,所占比例为 12.16%。深层地下水毒理学指标以Ⅲ级为主,所占比例为 56.48%,其次为Ⅳ级,所占比例为 36.79%,Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅴ级所占比例分别为 2.59%、0.52% 和 3.63%。

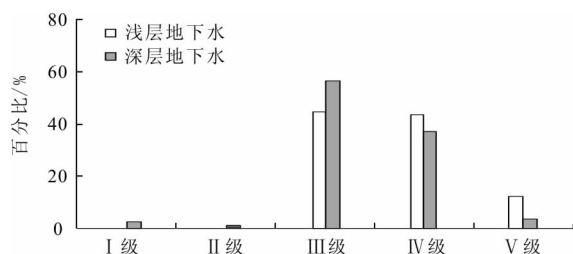


图 6 毒理学指标评价结果

化学致癌物 As、Cd 和 Cr 中,As 在各含水层水样中的健康危害风险值的数量级在 $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ a}^{-1}$,深层地下水样品的均值为 $3.42 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$,82% 的样品超过了 USEPA ($1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$) 最大可接受风险,浅层地下水样品的均值为 $5.01 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$,88% 的样品超过了 USEPA 最大可接受风险;Cd 在各含水层中

水样中的健康危害风险值的数量级在 $10^{-6} \sim 10^{-4} \text{ a}^{-1}$,深层地下水有 3 个样品超过了 USEPA ($1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$) 最大可接受风险,所占比例为 1.6%,浅层地下水有 2 个样品超过了 ($1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$) 的最大可接受风险,所占比例为 2.7%;Cr 在各含水层水样中的健康危害风险值的数量级均小于 10^{-6} a^{-1} 。砷是饮用水中一种重要的污染物,是少数几种会通过饮用水使人致癌的物质之一,在我国内蒙、山西以及台湾等地从流行病学调查已经无容置疑地证明对人体健康的危害^[19-21],而研究区化学致癌物 As、Cd 和 Cr 中,As 健康风险值最大,因此,应该作为优先污染物进行监测与控制。

化学非致癌物亚硝酸盐、硝酸盐、氟化物、汞、铅、锰、铜和锌在各含水层中通过饮水途径引起的健康危害风险情况见图 7 所示。从图 7 中可以看出,非致癌物的健康风险值明显小于致癌物的健康风险值,其中,氟化物的健康风险最大,数量级为 $10^{-8} \sim 10^{-5} \text{ a}^{-1}$,深层地下水均值为 $7.02 \times 10^{-7} \text{ a}^{-1}$,超过 10^{-6} a^{-1} 的样品数有 44 个,所占比例为 22.8%,浅层地下水均值为 $5.90 \times 10^{-7} \text{ a}^{-1}$,超过 10^{-6} a^{-1} 的样品数有 9 个,所占比例为 12.2%;其次为硝酸盐,数量级为 $10^{-10} \sim 10^{-5} \text{ a}^{-1}$,深层地下水超过 10^{-6} a^{-1} 的样品数有 4 个,所占比例为 2.1%,浅层地下水超过 10^{-6} a^{-1} 的样品数有 3 个,所占比例为 4.1%;对于亚硝酸盐,深层地下水超过 10^{-6} a^{-1} 的样品数有 1 个,所占比例为 0.5%,浅层地下水超过 10^{-6} a^{-1} 的样品数有 3 个,所占比例为 4.1%。重金属指标铅、锰、

铜和锌的健康风险值较小,绝大部分都低于 10^{-6} a^{-1} ,从均值看,这4种重金属在浅层和深层地下水中所致个人风险值大小次序均为: $\text{Mn} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cu}$,其中 Mn 为原生污染,通过饮水途径所致健康风险值超过 10^{-6} a^{-1} 的浅层和深层地下水的样品数分别有6个和4个。人为污染指标 Pb 、 Zn 、 Cu 和 Hg 中, Pb 所致健康风险值最大,超过 10^{-6} a^{-1} 的浅层和深层地下水样品数各有1个。

黄磊等^[22]对长江三角洲的杭嘉湖平原某区、高翔等^[23]分别对天津市宝坻区农村地下水进行了健康风险评价研究,结果表明重金属指标中通过饮水

途径所致的健康风险: $\text{Pb} > \text{Hg}$;林曼利等^[16]研究结果表明,皖北矿区地下水中 Cu 、 Zn 、 Pb 、 Ni 4种重金属, Pb 的健康风险值最大。可见,地下水的重金属指标中, Pb 所致的健康风险值较大。

各含水层地下水中毒理指标及部分重金属污染物通过饮水途径产生的总的健康危害风险与 USEPA 对照情况见图8所示,从图8中可以看出,各含水层总的健康风险值相似, As 通过饮水途径所致的健康风险在各含水层中都比较突出,应引起相关部门的重视。

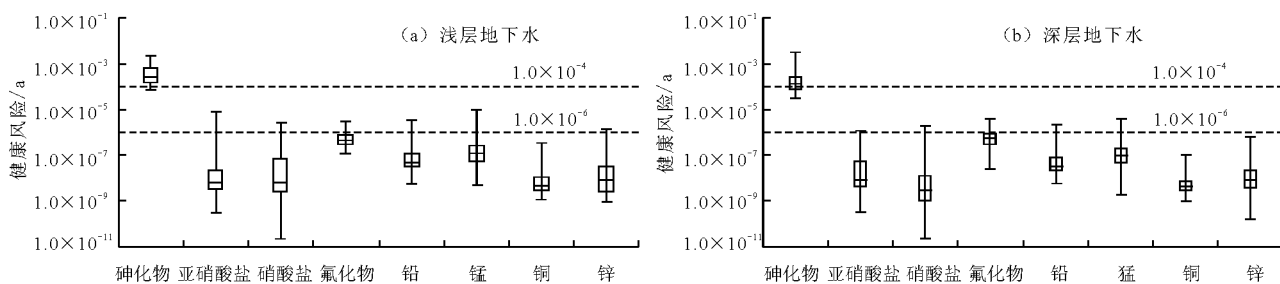


图7 饮水途径化学致癌物和化学非致癌物所致健康风险值

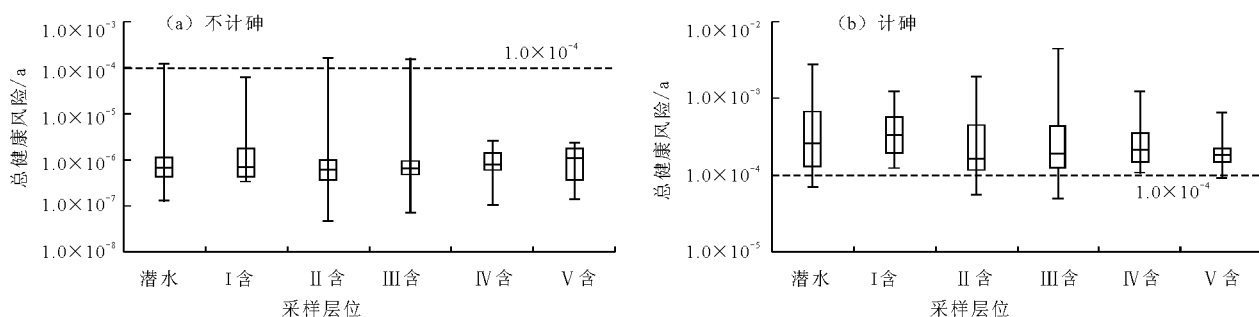


图8 各含水层的总健康风险值

5 结论

(1)盐城滨海平原地下水质量分析表明:一般化学指标对本区地下水质量影响程度最高;深层地下水原生指标钠离子、铁、锰、氯化物、溶解性总固体、碘化物和砷对超Ⅲ类水单指标贡献率较大,分别为69%、35%、35%、29%、27%、26%和21%;源自人类活动影响较大的污染指标有:氨氮、硝酸盐和亚硝酸盐,它们的贡献率分别为6%、3%和2%。铅的贡献率为0.6%,镉、六价铬和汞的贡献率都为0。浅层地下水原生指标钠离子、铁、锰、砷、溶解性总固体对超Ⅲ类水单指标贡献率较大,分别为65%、48%、46%、36%和35%;源自人类活动影响较大的污染指标有:氨氮、硝酸盐和亚硝酸盐,它们的贡献率分别为12%、4%和4%。铅的贡献率为6%,镉、

六价铬和汞的贡献率都为0。

(2)化学非致癌物亚硝酸盐、硝酸盐、氟化物、汞、锰、铜、锌和铅中,氟化物的健康风险最大,深层地下水和浅层地下水样品中超过 $1 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ 最大可接受风险的比例分别为22.8%和12.2%;其次为硝酸盐,深层地下水和浅层地下水样品中超过 $1 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ 最大可接受风险的比例分别为2.1%和4.1%。重金属指标汞、锰、铜、锌和铅的健康危害风险值均较小,绝大部分都低于 $1 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$,其中锰和铅的健康风险值相对较高。

(3)化学致癌物 As 、 Cd 和 Cr 中, As 的健康风险值最大,深层地下水和浅层地下水样品中超过 USEPA ($1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$) 最大可接受风险的比例分别为82%和88%;其次为 Cd , 深层地下水和浅层地下水样品中超过 USEPA 最大可接受风险的比例分别为

1.6%和2.7%;Cr在各含水层水样中的健康危害风险值的数量级均小于 $1 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ 。研究区化学致癌物As、Cd和Cr中,As健康风险值最大,因此,应该作为优先污染物进行监测与控制。

参考文献:

- [1] 黄敬军,陆华.江苏沿海地区深层地下水开发利用现状及环境地质问题[J].水文地质工程地质,2004,31(6):64-68.
- [2] 卞锦宇,方瑞.盐城市地下水水质控制因素分析[J].水文地质工程地质,2003,30(5):56-60.
- [3] 马钧霆,陈锁忠,何志超,等.盐城滨海冲积平原孔隙承压地下水埋深对水质的影响[J].生态学报,2017,37(5):1583-1594.
- [4] 张岩,付昌昌,毛磊,等.江苏盐城地区地下水水化学特征及形成机理[J].长江流域资源与环境,2017,26(4):598-605.
- [5] 王文强.综合指数法在地下水水质评价中的应用[J].水利科技与经济,2008,14(1):54-55.
- [6] 谷朝君,潘颖,潘明杰.内梅罗指数法在地下水水质评价中的应用及存在问题[J].环境保护科学,2002,28(1):45-47.
- [7] 徐健,吴玮,黄天寅,等.改进的模糊综合评价法在同里古镇水质评价中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2014,42(2):143-149.
- [8] 席文娟,金婧,钱会.改进模糊综合评价法在水质评价中的应用[J].水资源与水工程学报,2012,23(3):25-29.
- [9] 李亚松,张兆吉,费宇红,等.改进的灰色聚类法在地下水水质评价中的应用[J].水资源保护,2012,28(5):25-28.
- [10] 王鼎,董维红,张岩,等.开封南郊垃圾场地下水质量的熵权属性识别评价[J].水文地质工程地质,2012,39(2):94-99.
- [11] 文冬光,林良俊,孙继朝,等.中国东部主要平原地下水质量与污染评价[J].地球科学(中国地质大学学报),2012,37(2):220-228.
- [12] 费宇红,张兆吉,郭春艳,等.区域地下水质量评价及影响因素识别方法研究——以华北平原为例[J].地球学报,2014,35(2):131-138.
- [13] 段小丽,王宗爽,李琴,等.基于参数实测的水中重金属暴露的健康风险研究[J].环境科学,2011,32(5):1329-1339.
- [14] 程雅柔.贵阳市生活饮用水水质检测及健康风险评价[D].贵阳:贵州师范大学,2015.
- [15] 陈鸿汉,湛宏伟,何江涛,等.污染场地健康风险评价的理论和方法[J].地学前缘,2006,13(1):216-223.
- [16] 林曼利,桂和荣,彭位华,等.典型矿区深层地下水重金属含量特征及健康风险评价——以皖北矿区为例[J].地球学报,2014,35(5):589-598.
- [17] 许真,何江涛,马文洁,等.地下水质量指标分类综合评价方法研究[J].水文地质工程地质,2014,41(6):6-12.
- [18] Muhammad S, Shah M T, Khan S. Health risk assessment of heavy metals and their source apportionment in drinking water of Kohistan region, northern Pakistan [J]. Microchemical Journal, 2011, 98(2): 334-343.
- [19] 云奋,杨咪咪,马彩凤,等.大同市饮水型地方性砷中毒病区环境生态中砷暴露水平调查[J].卫生研究,2015,44(1):82-85.
- [20] 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.
- [21] 金银龙,梁超轲,何公理,等.中国地方性砷中毒分布调查协作组.中国地方性砷中毒分布调查(总报告)[J].卫生研究,2003,32(6):519-540.
- [22] 黄磊,李鹏程,刘白薇.长江三角洲地区地下水污染健康风险评价[J].安全与环境工程,2008,15(2):26-29.
- [23] 高翔,蒙海涛,易晓娟.天津市宝坻区农村地下水健康风险评价[J].环境科学与管理,2011,36(9):156-158.