

宁波土壤中多环芳烃的健康风险评价

冯焕银^{1,2}, 傅晓钦¹, 赵倩¹, 高占国¹

(1.宁波市环境监测中心,浙江宁波 315010; 2.同济大学环境科学与工程学院,上海 200092)

摘要:以宁波地区土壤中多环芳烃的含量调查结果为基础,采用美国能源部风险评估信息系统的暴露量化方法和美国环保局健康风险评估手册的风险表征方法,评估了土壤中 16 种多环芳烃对户外劳动者的健康风险。结果表明,宁波户外劳动者由于土壤中多环芳烃引起的平均非致癌危害指数为 1.09×10^{-5} ,平均致癌风险值为 3.17×10^{-7} ,可判定对人体健康的危害较小。宁波地区致癌多环芳烃含量最高暴露点致癌风险值为 1.45×10^{-6} ,没有超过致癌风险水平上限(10^{-4}),说明致癌风险尚在可接受范围内。多环芳烃中苯并(a)芘对综合致癌风险贡献最大,贡献率高达 65.6%,应注意防范土壤中该污染物引起的健康危害。宁波户外劳动者受到的非致癌危害和致癌风险主要由直接摄入途径和皮肤接触途径贡献,两种途径对非致癌危害和致癌风险贡献率分别达到 89%和 100%,呼吸摄入引起的非致癌危害和致癌风险则相对较小。

关键词:多环芳烃;健康风险评价;土壤

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)10-1998-07

Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Ningbo Area, China

FENG Huan-yin^{1,2}, FU Xiao-Qin¹, ZHAO Qian¹, GAO Zhan-guo¹

(1.Environmental Monitoring Centre of Ningbo, Ningbo 315010, China; 2.College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the monitoring data of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils from 134 sampling points located in Ningbo, health risk assessment of PAHs for outdoor workers was evaluated, using the method of exposure assessment of Risk Assessment Information System from USA Energy Department and risk equation of Human Health Evaluation Manual of USEPA. The results showed that PAHs in the soils had little risk on human health, since the average noncancer hazard index and the average cancer risk for outdoor workers was 1.09×10^{-5} and 3.17×10^{-7} respectively; and the cancer risk of maximum exposure to carcinogenic PAHs for the workers was 1.45×10^{-6} , which was less than the upper limit of acceptable cancer risk of 10^{-4} . However, great attention to the benzo(a) pyrene and dibenzo(a, h) anthracene pollution in the soil should be paid because their contribution rates to the total cancer risk were 65.6% and 20%. Direct ingestion and dermal contact pathways mainly contributed to the noncancer hazard and cancer risk to the outdoor workers, by the reason of their high contribution rates for the noncancer hazard and cancer risk which were as high as 89% and nearly 100% respectively, while direct inhalation pathway relatively brought about very low risk for health.

Keywords: polycyclic aromatic hydrocarbons; health risk assessment; soils

多环芳烃 (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是指 2 个或 2 个以上的苯环以稠环和非稠环形式相连接的化合物,是一类广泛存在于环境中的持久性有机污染物,具有强烈的致癌、致畸和致突变性。

它的环境污染已经成为世界各国面临的重大环境与公共健康问题之一,其对土壤的污染问题尤为突出^[1]。土壤中多环芳烃主要来自大气沉降、污水灌溉、污泥农用等^[2],其可通过不同的暴露途径在体内积聚,最终威胁人类健康。利用环境健康风险评价(HRA)判定污染土壤是否需要修复或进行再次开发活动日前已成为一个新的研究领域,受到人们的普遍关注^[3-4]。

收稿日期:2011-03-28

作者简介:冯焕银(1979—),女,浙江慈溪人,学士,工程师。

E-mail:kate8240@126.com

已有研究者对宁波地区空气颗粒物及土壤中多环芳烃的含量和分布特征进行了初步分析^[5-6],但对于宁波地区土壤污染风险评价方面的研究还相对薄弱。本文依据宁波土壤调查结果,采用美国能源部风险评估信息系统 RAIS 的暴露量化方法和美国环保局健康风险评估手册的风险表征方法,评估宁波土壤中 PAHs 对人体健康造成的影响,供决策者考虑是否对土壤进行调查或修复。

1 样品采集与分析

土壤样品于 2008 年采自宁波地区 4 区 3 市 2 县的典型剖面 and 主剖面 53 个土壤环境背景点及 81 个土壤环境普查点,监测点位布置见图 1,土地类型为耕种用地。监测因子主要包括美国环保局优先控制的 16 种多环芳烃,测定方法参考美国 EPA8270D—2007 (半挥发性有机物的气相色谱-质谱法)。

2 暴露评估

2.1 暴露假设

调查的土地类型为耕种用地,相对应的暴露人群可能是农民等户外劳作者,本文主要考虑的暴露途径有 3 条:(1)在劳作过程中不慎摄入土壤;(2)土壤中有机污染物吸附在可吸入颗粒物进入大气,通过呼吸暴露于人群;(3)劳作中通过皮肤接触摄入土壤。本文对这 3 种途径开展了健康风险评价。

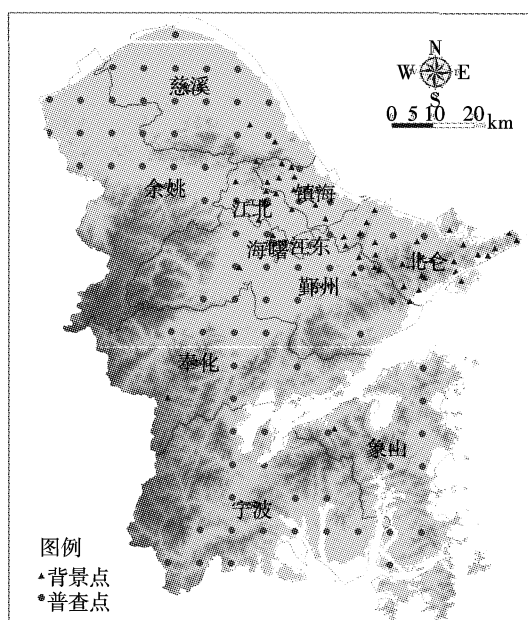


图 1 监测点位布置图

Figure 1 Map of sampling sites

2.2 暴露量化

本文采用美国能源部风险评估信息系统(RAIS)中暴露人群为户外劳作者的暴露量化方法^[7],各暴露途径污染物摄取量的计算式如下:

(1)经口直接摄入污染土壤。因不慎摄入土壤而摄入污染物 $CDI(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$ 可按下式计算:

$$CDI_{\text{直接摄入}} = \frac{CS \times IR_o \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (1)$$

(2)经呼吸摄入污染土壤。通过摄入土壤尘而摄入污染物 $CDI(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$ 可按下式计算:

$$CDI_{\text{呼吸摄入}} = \frac{CS \times ET \times EF \times ED \times IR_i \times (1/VF + 1/PEF)}{BW \times AT} \quad (2)$$

(3)皮肤接触摄入污染土壤。通过皮肤直接接触土壤,因皮肤吸收而摄入土壤污染物 $CDI(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1})$ 可按下式计算:

$$CDI_{\text{接触摄入}} = \frac{CS \times CF \times SA \times AF \times ABS_d \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (3)$$

式(1)、(2)、(3)中:CS为土壤中化学物质浓度, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;BW为平均体重, $8\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$;SA为可能接触土壤的皮肤面积,宁波地区6—9月天气较为炎热,最大暴露部位为头、手、手臂、小腿和脚,其男女平均暴露的表面积之和 $7\,475\text{ cm}^2$,其余月份暴露部位为头、手,其表面积之和为 $2\,045\text{ cm}^2$ ^[8];IR_o等9个参数名称和单位、取值等见表1^[9-13];VF为挥发系数,由化学物质的特性决定^[14-15],见表2。

2.3 毒性评估

毒性评估是指污染物引起暴露人群健康反应的各种证据,评估人群对污染物的暴露程度和产生负面效应发生率之间的关系。本文所涉及的16中PAHs是美国优先控制污染物,其中苯并(a)蒽、苯并(a)芘、蒽等7种均为B2类,为动物实验证据充分而人类证据不充分或无证据的可能致癌物质。根据化学物质对人体的致癌和非致癌毒性,萘、苊等9种非致癌物质的毒性评估采用参考剂量表述,苯并(a)蒽、苯并(a)芘等7种致癌物质的毒性评估采用致癌斜率因子表述。PAHs毒性评估参数(非致癌参考剂量 RfD 和致癌斜率因子 SF)来自美国风险综合信息系统 IRIS^[16]、美国国际环境评估中心 NCEA^[17]、健康影响评估概要表格 HEAST^[19]等;菲、苯并(ghi)芘的非致癌参考剂量参考^[10]。当某一具体的暴露途径没有可获得的毒性参数,采用外推法获得,计算公式如下^[19]:

$$RfD_{\text{ABS}} = RfD_o \times ABS_{\text{Cl}} \quad (4)$$

$$SF_{\text{ABS}} = SF_o / ABS_{\text{Cl}} \quad (5)$$

式中: RfD_{ABS} 、 SF_{ABS} 指皮肤接触的非致癌参考剂量和致癌斜率因子, RfD_o 、 SF_o 指经口暴露的非致癌参考剂量和致癌斜率因子, ABS_{GI} 指经肠胃吸收的污染物分数,多环芳烃的 ABS_{GI} 大于0.5^[20],保守取值为0.5。整理得出16种多环芳烃的毒性参数^[10,16-18,21]见表2。

2.4 风险表征

以人群暴露量为基础,进行健康风险评价,根据目标污染物的致癌性,对萘、苊等9种物质进行非致癌风险评价,对苯并(a)蒽、苯并(a)芘等7种物质进行致癌风险评价。

(1)非致癌风险通常用风险指数(HI)进行描述,它定义为平均到整个暴露作用期的平均每日单位体重摄入量与慢性参考剂量的比值,可用下式计算^[22-23]:

$$HI=CDI/RfD \quad (6)$$

式中: CDI 为长期日摄入量($mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$); RfD 为污染物的参考剂量($mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$)。

(2)致癌风险通常用风险值(Risk)表示,它定义为平均到整个生命期的平均每日单位体重摄入量与致癌斜率因子的乘积,表示暴露于该种物质而导致的一生中超过正常水平的癌症发病率,可用下式计算^[22-23]:

$$\text{低剂量暴露 } Risk = CDI \times SF \quad (7)$$

高剂量暴露 $Risk = 1 - \exp(-CDI \times SF)$ (致癌风险大于0.01时换用本式计算) (8)

式中: SF 为污染物的致癌斜率因子($mg^{-1} \cdot kg \cdot d$)。

当计算出多种物质多种途径的风险时,先分别把所有的非致癌风险和致癌风险算出来(不考虑它们之间的协同作用和拮抗作用),然后加和得到累积非致

表1 健康风险评价暴露参数

Table 1 Exposure parameters of health risk assessment

参数符号	暴露参数和单位	假定的暴露场合(户外劳作用地)	参数来源
IRo	土壤摄入频率/ $mg \cdot d^{-1}$	100	[11],参考农业用地
IRi	土壤尘的吸入频率/ $m^3 \cdot d^{-1}$	16	[13]、[8]
ED	暴露年限/a	24	[11],参考农业用地
EF	暴露频率/ $d \cdot a^{-1}$	250	[11],考虑实际参考工商业用地
CF	转换系数/ $kg \cdot mg^{-1}$	10^{-6}	[12]
AT	平均作用时间/d(非致癌:365×ED/致癌:365×70)	8 760/25 550	[12]
AF	土壤对皮肤的吸附系数/ $mg \cdot cm^{-2}$	0.1	[12],参考农民
$ABSd$	皮肤吸收系数	0.13	[10]

表2 目标污染物的VF、RfD和CSF值

Table 2 VF, RfD and CSF data of the objective contaminants

污染物名称	挥发因子(VF)	非致癌参考剂量/ $mg^{-1} \cdot kg \cdot d$			致癌斜率因子/ $mg^{-1} \cdot kg \cdot d$		
		经口暴露(RfD_o)	呼吸暴露(RfD_i)	皮肤接触(RfD_a)	经口暴露(SF_o)	呼吸暴露(SF_i)	皮肤接触(SF_a)
萘	6.259E+04	4.00E-02	8.57E-04	2.00E-02			
苊	1.483E+05	6.00E-02	3.00E-02	3.00E-02			
二氢苊	1.862E+05	6.00E-02	3.00E-02	3.00E-02			
芴	5.732E+05	4.00E-02	2.00E-02	2.00E-02			
菲	1.432E+06	3.00E-02	1.50E-02	1.50E-02			
蒽	8.763E+05	3.00E-01	1.50E-01	1.50E-01			
荧蒽	6.381E+05	4.00E-02	2.00E-02	2.00E-02			
芘	4.225E+06	3.00E-02	1.50E-02	1.50E-02			
苯并(a)蒽	1.060E+07				7.30E-01	3.10E-01	1.46E+00
蒾	3.061E+06				7.30E-03	3.10E-03	1.46E-02
苯并(b)荧蒽	5.236E+06				7.30E-01	3.10E-01	1.46E+00
苯并(k)荧蒽	4.454E+07				7.30E-02	3.10E-02	1.46E-01
苯并(a)芘	2.722E+07				7.30E+00	3.10E+00	1.46E+01
茚并(1,2,3-cd)芘	6.345E+07				7.30E-01	3.10E-01	1.46E+00
二苯并(a,h)蒽	1.157E+08				7.30E+00	3.10E+00	1.46E+01
苯并(ghi)芘	1.081E+08	3.00E-02	1.50E-02	1.50E-02			

癌危害指数、综合非致癌指数、累积致癌风险和综合致癌风险。

3 结果与讨论

3.1 宁波地区土壤中 PAHs 的测定结果

宁波地区 4 区 3 市 2 县表层土壤中 16 种 PAHs 实测浓度见表 3, 宁波地区土壤中 PAHs 含量范围为 2.8~4 167 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均含量为 221 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中奉化、余姚两地相对较高。宁波地区土壤单种 PAHs 含量及检出率见表 4, 菲、荧蒽、苯并(a)芘、苯并(ghi)芘、芘、蒾、苯并(b)荧蒽的含量相对较高, 毒性较强的苯并(a)芘、苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽

和茚并(1,2,3-cd)芘检出率分别为 95.2%、90.1%、99.1%、93.5%和 100%。

3.2 暴露量的计算结果

美国现行的健康风险评价导则指出在计算潜在风险时, 采用暴露点含量的上边界估计值, 以确保风险降到最低, 因此在计算污染物摄入量时, 污染物浓度选取算术平均值的 95% 置信上限含量值^[24-25]。结合上文暴露计算公式, 计算得到宁波户外劳作者在不同暴露途径下的污染物摄入量, 见表 5。

3.3 土壤中 PAHs 对人群的健康风险

根据风险表征方法, 分别计算 PAHs 单物质非致癌危害指数和致癌风险、多暴露途径同种物质累积非致癌危害指数和致癌风险、暴露途径多物质累积非致癌危害指数和致癌风险、综合非致癌危害指数和致癌风险, 计算结果列于表 6 和表 7。

(1) 根据 USEPA 的相关定义^[26], 对于非致癌风险, 当非致癌危害指数超过 1 时, 认为会对人体健康产生危害。土壤中 PAHs 的平均综合非致癌危害指数为 1.09×10^{-5} , 远远低于 1, 说明这些污染物不会对人群产生明显的非致癌健康危害, 需要指出的是无明显的非致癌影响并不是绝对无危害。此外, 萘通过呼吸途径的非致癌危害指数要比其他 PAHs 高出 2 到 5 个数量级, 菲、荧蒽、芘、苯并(ghi)芘通过经口途径和皮肤接触途径的非致癌危害指数要比其他 PAHs 高

表 3 土壤中 PAHs 的测定结果
Table 3 PAHs concentration in soils

市县	$\Sigma\text{PAHs}/\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	ΣPAHs 平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
江北	14~2 154	533
北仑	2.8~637	77.2
镇海	14~956	272
鄞州	16~1 865	387
余姚	48~4 167	479
慈溪	24~322	114
奉化	9.1~3 996	672
象山	19~386	142
宁海	11~356	96.5
宁波地区	2.8~4 167	221

表 4 土壤中单种 PAHs 的含量(W)及检出率

Table 4 The concentrations and detection rate of individual PAHs in soils

化合物	英文缩写	$W/\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$			95% 置信上限含量 值/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($n=134$)	检出率/%
		范围	中位数	平均值		
萘	Nap	Nd~26.8	1.51	2.30	2.82	76.7
苊	Any	Nd~155	5.48	13.6	17.6	69.8
二氢苊	Ane	Nd~414	2.76	13.6	20.5	49.6
芴	Fle	Nd~46	0.14	0.73	1.43	51.2
菲	Phe	Nd~1 121	7.18	24.6	41.3	99.6
蒽	Ant	Nd~395	0.78	6.21	12.2	78.0
荧蒽	Fla	Nd~559	10.2	31.7	43.1	99.6
芘	Pyr	Nd~599	4.61	18.9	30.4	95.7
苯并(a)蒽	Baf	Nd~420	5.74	17.8	26.4	90.1
蒾	Chr	Nd~575	4.27	19.4	29.2	82.3
苯并(b)荧蒽	Bbf	Nd~295	9.24	23.6	31.1	99.1
苯并(k)荧蒽	Bkf	Nd~282	2.83	10.5	15.3	93.5
苯并(a)芘	Bap	Nd~317	7.97	27.4	36.4	95.2
茚并(1,2,3-cd)芘	Iip	0.03~178	3.31	11.6	15.9	100
二苯并(a,h)蒽	Daa	Nd~124	3.04	8.60	11.5	93.5
苯并(ghi)芘	Bgp	Nd~724	5.41	21.2	33.0	81.4

注: Nd 为未检出。

表5 不同暴露途径污染物摄取量 CDI

Table 5 The intake dose (CDI) for different exposure pathways

污染物名称	非致癌效应摄入量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$			致癌效应摄入量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$		
	经口途径摄入量	皮肤接触摄入量	呼吸途径摄入量	经口途径摄入量	皮肤接触摄入量	呼吸途径摄入量
萘	3.22E-09	1.62E-09	9.73E-10	1.10E-09	5.54E-10	3.34E-10
蒽	2.01E-08	1.01E-08	4.11E-10	6.89E-09	3.46E-09	1.41E-10
二氢蒽	2.34E-08	1.17E-08	3.27E-10	8.02E-09	4.03E-09	1.12E-10
芴	1.63E-09	8.19E-10	1.06E-10	5.60E-10	2.81E-10	3.64E-11
菲	4.71E-08	2.37E-08	4.26E-11	1.62E-08	8.11E-09	1.46E-11
蒽	1.39E-08	6.99E-09	6.95E-11	4.77E-09	2.40E-09	2.38E-11
荧蒽	4.92E-08	2.47E-08	9.55E-11	1.69E-08	8.46E-09	3.27E-11
芘	3.47E-08	1.74E-08	1.45E-11	1.19E-08	5.97E-09	4.96E-12
苯并(a)蒽	3.01E-08	1.51E-08	5.79E-12	1.03E-08	5.18E-09	1.99E-12
蒽	3.33E-08	1.67E-08	1.99E-11	1.14E-08	5.73E-09	6.84E-12
苯并(b)荧蒽	3.55E-08	1.78E-08	1.17E-11	1.22E-08	6.11E-09	4.00E-12
苯并(k)荧蒽	1.75E-08	8.76E-09	1.41E-12	5.99E-09	3.00E-09	4.84E-13
苯并(a)芘	4.16E-08	2.09E-08	2.28E-12	1.42E-08	7.15E-09	7.83E-13
茚并(1,2,3-cd)芘	1.82E-08	9.11E-09	1.01E-12	6.22E-09	3.12E-09	3.45E-13
二苯并(a,h)蒽	1.31E-08	6.59E-09	5.72E-13	4.50E-09	2.26E-09	1.96E-13
苯并(ghi)芘	3.77E-08	1.89E-08	6.09E-13	1.29E-08	6.48E-09	2.09E-13

表6 目标污染物非致癌风险计算结果

Table 6 The non-carcinogenic health hazard index of the objective contaminants

户外劳作者暴露方式	经口途径	皮肤接触	呼吸途径	同种物质累积非致癌危害指数
萘	8.05E-08	8.08E-08	1.13E-06	1.29E-06
蒽	3.35E-07	3.36E-07	1.37E-08	6.85E-07
二氢蒽	3.90E-07	3.91E-07	1.09E-08	7.92E-07
芴	4.08E-08	4.10E-08	5.31E-09	8.71E-08
菲	1.57E-06	1.58E-06	2.84E-09	3.15E-06
蒽	4.64E-08	4.66E-08	4.63E-10	9.35E-08
荧蒽	1.23E-06	1.23E-06	4.77E-09	2.46E-06
芘	1.16E-06	1.16E-06	9.64E-10	2.32E-06
苯并(ghi)芘	1.26E-06	1.26E-06	4.06E-11	1.29E-06
暴露途径多物质累积非致癌危害指数	4.85E-06	4.87E-06	1.17E-06	—
综合非致癌危害指数		1.09E-05		—

出1到2个数量级。除萘外各暴露途径对非致癌危害指数的贡献按从大到小依次为经口直接摄入 \geq 皮肤接触 $>$ 呼吸摄入,非致癌危害主要由前两者途径贡献,贡献率达到89%。

(2)USEPA推荐一般可接受的致癌风险值为 10^{-6} ,可接受的致癌风险值上限为 10^{-4} ,若致癌风险小于 10^{-6} ,则认为是可以接受的,若致癌风险大于 10^{-4} ,则认为是不可接受的^[23]。宁波土壤中16种PAHs引起的平均综合致癌风险为 3.17×10^{-7} ,致癌风险较小。由表7可见,各暴露途径对致癌风险的贡献按从大到小依次为经口直接摄入 \geq 皮肤接触 $>$ 呼吸摄入,致癌风

险主要由前两者途径贡献,贡献率几乎达到100%;各种PAHs比较,苯并(a)芘、二苯并(a,h)蒽对综合致癌风险贡献较大,贡献率分别为65.6%、20.8%,蒽、苯并(k)荧蒽引起的致癌风险较小,对综合致癌风险的贡献基本可以忽略,可见苯并(a)芘、二苯并(a,h)蒽对健康产生的危害相对突出。

(3)本文用同样方法计算了调查样品中致癌污染物浓度最大值对应暴露点的摄取量及相应的致癌风险,致癌风险计算结果见表7,计算所得综合致癌风险值为 1.45×10^{-6} ,是一般可接受致癌风险值的1.45倍(10^{-6}),但没有超过致癌风险水平上限(10^{-4})。

表7 目标污染物致癌风险计算结果

Table 7 The carcinogenic risk of the objective contaminants

户外劳作者暴露方式	以95%置信上限含量值计算				以致癌污染物浓度最大值计算			
	经口途径	皮肤接触	呼吸途径	累积致癌风险	经口途径	皮肤接触	呼吸途径	累积致癌风险
苯并(a)蒽	7.54E-09	7.57E-09	6.15E-13	1.51E-08	1.05E-07	1.05E-07	6.15E-13	2.10E-07
蒽	8.34E-11	8.37E-11	2.12E-14	1.67E-10	1.64E-09	1.65E-09	2.12E-14	3.29E-09
苯并(b)荧蒽	8.89E-09	8.92E-09	1.24E-12	1.78E-08	6.27E-08	6.29E-08	1.24E-12	1.26E-07
苯并(k)荧蒽	4.37E-10	4.39E-10	1.50E-14	8.76E-10	8.07E-09	8.10E-09	1.50E-14	1.62E-08
苯并(a)芘	1.04E-07	1.04E-07	2.43E-12	2.08E-07	4.83E-07	4.85E-07	2.43E-12	9.68E-07
茚并(1,2,3-cd)芘	4.54E-09	4.56E-09	1.07E-13	9.10E-09	2.24E-08	2.25E-08	1.07E-13	4.49E-08
二苯并(a,h)蒽	3.29E-08	3.30E-08	6.08E-13	6.59E-08	3.97E-08	3.99E-08	6.08E-13	7.96E-08
多物质累积致癌风险	1.58E-07	1.59E-07	5.04E-12	—	7.23E-07	7.25E-07	5.04E-12	—
综合致癌风险		3.17E-07		—		1.45E-06		—

尽管部分污染物浓度较大的调查点其致癌风险仍在可接受范围内,但从安全角度应长期注意这些调查点土壤中 PAHs 的浓度值水平,以便及时采取土壤修复措施。

(4)因暴露特征参数大多采用国外现有的研究数据,不足以完全代表宁波地区的暴露特征,再者受到条件的限制,没有获得充分的污染物信息,所以风险评价结果存在着一定的不确定性。但通过对土壤中污染物的人群健康风险评价,仍可在一定程度上掌握各种污染物的危害程度和真实风险,为决策者考虑是否对土壤进行进一步调查或修复提供科学依据,也可对土地的未来开发利用类型和方式提供规划参考。

4 结论及建议

(1)宁波土壤中多环芳烃的平均综合非致癌危害指数为 1.09×10^{-5} , 平均综合致癌风险值为 3.17×10^{-7} , 可判定对人体健康的危害较小;致癌多环芳烃含量最高暴露点致癌风险值为 1.45×10^{-6} , 是一般可接受致癌风险值(10^{-6})的 1.45 倍,但没有超过致癌风险水平上限(10^{-4}),说明致癌风险仍在可接受范围内,但从安全角度考虑,应长期注意其 PAHs 浓度值水平,以及时采取土壤修复措施。

(2)苯并(a)芘、二苯并(a,h)蒽对综合致癌风险贡献相对其他 PAHs 污染物较大,贡献率分别为 65.6%、20.8%,应慎重决策苯并(a)芘、二苯并(a,h)蒽浓度分布较高的土壤区块的开发利用方式,并注意规避和减缓人群健康影响。

(3)宁波户外劳作者受到的非致癌危害和致癌风险主要由直接摄入途径和皮肤接触途径贡献,两种途径对非致癌危害和致癌风险贡献率分别达到 89%和

100%,呼吸摄入引起的非致癌危害和致癌风险则相对较小。

参考文献:

- [1] Barth J A C, Steidled, Kuntzd, et al. Deposition persistence and turnover of pollutants: First results from the EU project Aqua Terra for selected river basins and aquifer[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 376(1/3):40-50.
- [2] 占新华,周立祥.多环芳烃(PAHs)在土壤-植物系统中的环境行为[J].生态环境,2003,12(4):487-492.
ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang. Environmental behavior of PAHs in soil-plant system[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(4):487-492.
- [3] 李久海,董元华,曹志洪,等.慈溪市农田表层、亚表层土壤中多环芳烃(PAHs)的分布特征[J].环境科学学报,2007,27(11):1909-1914.
LI Jiu-hai, DONG Yuan-hua, CAO Zhi-hong, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in the surface and subsurface soils in Cixi County[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 27(11):1909-1914.
- [4] 赵沁娜,徐启新.城市土地置换过程中土壤多环芳烃污染的健康风险评价[J].长江流域资源与环境,2009,18(3):286-290.
ZHAO Qin-na, XU Qi-xin. On human health risk assessment of soil PAHs contamination during urban land replacement[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(3):286-290.
- [5] 曹云者,施烈焰,李丽和,等.浑蒲污灌区表层土壤中多环芳烃的健康风险评价[J].农业环境科学学报,2008,27(2):542-548.
CAO Yun-zhe, SHI Lie-yan, LI Li-he, et al. Health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils from Hunpu Wastewater Irrigated Area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2):542-548.
- [6] 陈奕扬,胡迪峰,翁燕波.宁波市颗粒物中多环芳烃浓度水平、分布及来源分析[J].中国环境监测,2006,22(2):59-61.
CHEN Yi-yang, HU Di-feng, WENG Yan-bo. The Research on the concentration, size distribution and source of PAHs in particulate in Ningbo[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2006, 22(2):59-61.
- [7] U S. The risk assessment information system. Tennessee: The Depart-

- ment of energy'(DOE's) risk ridge operations office(ORO)[EB/OL]. [2010-10-8]. http://rais.ornl.gov/tools/rais_chemical_risk_guide.html.
- [8] 王宗爽,段小丽,刘平,等.环境健康风险评价中我国居民暴露参数探讨[J].环境科学研究,2009,22(17):1164-1170.
WANG Zong-shuang, DUAN Xiao-li, LIU Ping, et al. Exposure factors of Chinese people in environmental health risk assessment[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(17): 1164-1170.
- [9] U S EPA. Soil Screening Guidance: User's guide[EB/OL]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response. OSWER No. 9355. 4-23, 1996a, 23. <http://www.epa.gov/superfund/resources/soil/ssg496.pdf>.
- [10] U S EPA. Risk assessment guidance for superfund. Volume I: Human health evaluation manual (Part A) interim final[EB/OL]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1989[2010-10-8]. <http://www.epa.gov/oswer/riskassessment/ragsa/index.htm>.
- [11] U. S. EPA. Human health evaluation manual, supplemental guidance: "Standard default exposure factors". OSWER Directive 9285. 6-03, 1991a: 15.
- [12] U S. EPA. Risk assessment guidance for superfund Volume I: Human health evaluation manual (Part E, Supplemental guidance for dermal risk assessment) Final. OSWER 9285. 7-02, 2004: 3-9-3-16.
- [13] USA EPA. US Environmental protection agency, exposure factors handbook[M]. Washington DC, 2009. EPA/600/r-091052A. 6-48.
- [14] U S EPA. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites[EB/OL], 2002[2010-10-8]. http://www.epa.gov/superfund/health/conmedia/soil/pdfs/ssg_main.pdf.
- [15] Dr. Steve Roberts. Technical report: Development of cleanup target levels (CTLs) for chapter 62-777, F. A. C[EB/OL]. 2005[2010-10-8]. <http://toxicology.ufl.edu/documents/TechnicalFeb05.pdf>.
- [16] U S EPA. Integrated risk information system[EB/OL]. <http://www.epa.gov/iris/index.html>.
- [17] U S EPA. USEPA's National center for environmental assessment. <http://www.epa.gov/ncea/>.
- [18] U S EPA. Health effects assessment summary table (HEAST). Published quarterly by the Office of Research and Development and Office of Solid Waste and Emergency Response[EB/OL]. <http://www.epa.gov/Ration/heat/index.html>.
- [19] U S EPA. Human health evaluation manual: Part E, supplemental guidance for dermal risk assessment[EB/OL]. Washington, DC, 2010.[2010-10-8]. <http://www.epa.gov/oswer/riskassessment/ragsa/pdf/chapter4.pdf>.
- [20] U S EPA. Risk assessment guidance for superfund Volume I: Human health evaluation manual (Part E, Supplemental Guidance for dermal risk assessment) final. Washington, DC, OSWER 9285. 7-02EP, 2004. 4-5-4-7. <http://www.epa.gov/oswer/riskassessment/ragsa/index.htm>.
- [21] 国家环境保护总局. HJ/T25-1999, 工业企业土壤环境质量风险评价基准[S]. 1998, 附录 A.
Ministry of Environmental Protection. HJ/T25-1999, Environmental quality risk assessment criteria for soil at manufacturing facilities[S]. 1998, Appendix A.
- [22] U S EPA. Human health evaluation manual: Part A, Risk assessment guidance for superfund [EB/OL]. Washington, DC, 2010.[2010-10-8]. <http://www.epa.gov/oswer/riskassessment/ragsa/pdf/ch8.pdf>.
- [23] 董继元,王式功,尚可政.黄河兰州段多环芳烃类有机污染物健康风险评价[J].农业环境科学学报,2009,28(9):1892-1897.
DONG Ji-yuan, WANG Shi-gong, SHANG Ke-zheng, Water environmental health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Lanzhou Reach of the Yellow River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(9): 1892-1897.
- [24] Eleonora Wcisfo, Dawn Ioven, Rafaf Kucharski. Human health risk assessment, case study: An abandoned metal smelter site in Poland[J]. *Chemosphere*, 2002, 47: 507.
- [25] 张瑜,吴以中,宗良纲,等. POPs 污染场地土壤健康风险评价[J].环境科学与技术,2008,31(7):135-140.
ZHANG Yu, WU Yi-zhong, ZONG Liang-gang, et al. Health risk assessment: Case study of a brownfield contaminated by POPs at Changzhou[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(7): 135-140.
- [26] U S EPA. Calculating upper confidence limits for exposure point concentrations, at hazardous waste sites[EB/OL]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response. OSWER 9285. 6-10, 2002. <http://www.epa.gov/oswer/riskassessment/pdf/ucl.pdf>.

致谢:感谢宁波市环境监测中心土壤调查组全体监测人员的辛勤劳动。