

采用健康风险评估模型研究场地土壤有机污染物 环境标准取值的区域差异及其影响因素

曹云者¹, 韩梅¹, 夏凤英^{1,2}, 颜增光¹, 周友亚¹, 郭观林¹, 李发生¹

(1.中国环境科学研究院土壤污染与控制研究室, 北京 100012; 2.北京工商大学化学与环境工程学院, 北京 100048)

摘要:前人研究及国外已有标准表明,一些有机污染物的土壤环境标准的区域差异显著。我国的土壤环境标准正在酝酿之中,研究土壤环境标准的区域差异及其影响因素十分必要。本文选择了取自我国不同地区的13种典型土壤,以萘为例,应用RBCA模型估算了非致癌危害商为1的目标风险水平下,土壤环境中污染物的最高限值,并对取值区域差异的影响因素进行了探讨。结果表明,不同地区土壤中萘的最高限值差异显著,住宅用地萘的最高限值范围为370~1400 mg·kg⁻¹,工业用地限值范围为610~4100 mg·kg⁻¹。不同地区土壤中萘的最高限值差异最高可达3.8~6.7倍。土壤质地和有机质含量是影响最高限值取值的两种主要因素。随着土壤质地粘粒含量的增加,最高限值取值增加,达到一定程度后保持不变或略有降低;随着有机质含量的增加,最高限值取值呈增大趋势,但也有某些情况下,有机质含量增加到一定程度后最高限值趋于稳定。该结果预示了某些有机污染物的土壤环境标准取值受区域变异的影响较大,在标准制修订过程中对此需适当加以考虑。

关键词:萘;多环芳烃;土壤标准;RBCA模型;区域差异

中图分类号:X-651 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)02-0270-06

Regional Variance and Its Influencing Factors in Deriving Standard Values of Organic Pollutants in Soil: A Case Study Based on Human Health Risk Assessment Modeling Approach

CAO Yun-zhe¹, HAN Mei¹, XIA Feng-ying^{1,2}, YAN Zeng-guang¹, ZHOU You-ya¹, GUO Guan-lin¹, LI Fa-sheng¹

(1.Department of Soil Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2.College of Chemical and Environmental Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: Researches and foreign standards clearly illustrated that standards for some organic pollutants in soil varied largely due to regional factors. The current standards of soil environmental quality in China haven't included many organic pollutants yet, and the revision of standards is under discussion. Naphthalene is one of the kinds of all 16 prior PAHs, which is more frequently detected and heavily polluted in contaminated site monitoring. In this study, 13 kinds of typical soil samples from different areas in China were taken, and the maximum tolerable values with an acceptable risk of hazard quotient of 1 for naphthalene in these soils were derived based on RBCA model. Regional variances of the maximum tolerable values for Naphthalene in these soils were discussed. The results showed that, the maximum tolerable values of naphthalene in soils from different areas differed significantly. The range of maximum tolerable values for naphthalene in residential land use was from 370 to 1400 mg·kg⁻¹, and was from 610 to 4100 mg·kg⁻¹ for industrial land use. The maximum tolerable values of naphthalene in different areas varied from 3.8 to 6.7 times. Soil texture and organic matter content were the two main factors which influence the maximum tolerable value of naphthalene. The maximum tolerable values of naphthalene firstly increased as the increases of content of clayey particles in soil, and remain unchanged or decreased slightly when the content of clayey particles increased to a certain extent. The maximum tolerable values of naphthalene also increased with the increase of organic matter content in soil, except for some circumstances, the maximum tolerable values of naphthalene went to a peak value and then keep stable when organic matter content in soil reached a certain level. These results indicated that the soil environmental quality standards of some organic pollutants may have a large regional variation, and this variation should be taken into account during development and revision of the soil environmental quality standards in China.

Keywords: Naphthalene; PAHs; soil standards; RBCA model; regional variance

收稿日期:2009-09-08

基金项目:环保公益性行业科研专项(200709033);科技部社会公益研究专项(2005DIB3J161)

作者简介:曹云者(1972—),女,博士,副研究员。

通讯作者:李发生 E-mail:lifs@craes.org.cn

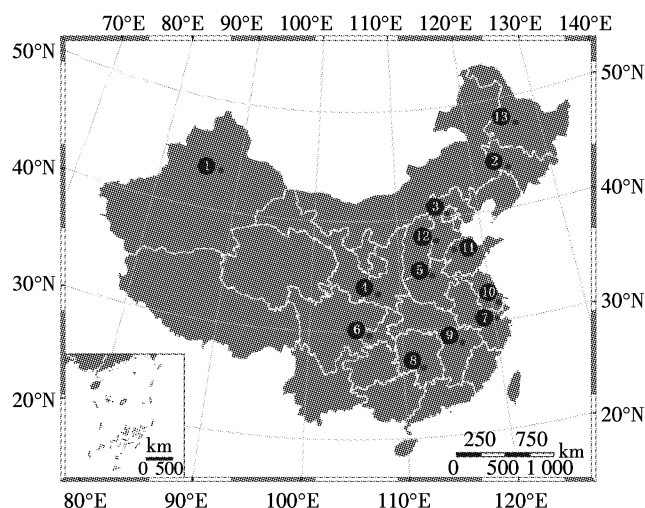
我国长期以来一直沿用 1995 年颁布实施的《土壤环境质量标准》，该标准在保护我国土壤环境方面一直起着非常重要的作用。然而,由于历史条件的局限性,该标准仅涵盖了 8 种重金属和 2 种农药类污染物,关于大多数有机污染物尚未建立相关标准。近年来,由于土壤污染的形势发生了很大的变化,有机污染物已经成为一类重要的有代表性的土壤污染物^[1],在有些区域土壤有机污染已经危及到地下水的安全^[2-6]。因此,有机污染物标准的缺失已经成为目前污染场地评价和修复的瓶颈问题^[7],建立关于土壤有机污染物的标准的需求已经十分迫切,许多学者和专家纷纷呼吁制定新的适应当前土壤污染形势的土壤环境质量保护标准并进行了有关探讨^[8-13]。在探讨中,一些专家普遍认识到土壤性质中质地、有机质等因素对污染物活性、迁移转化规律影响很大^[9,14],直接影响土壤标准的定值。特别是我国幅员辽阔,气候特征、地理和地质条件差别很大,土壤类型众多,土壤性质十分复杂多样,在标准制修订时建议考虑该因素。但是,在实际操作中,却因缺乏有关基础研究资料而难以在标准中有所反映^[9]。研究一些国家已颁布实施的相关标准也证实,土壤中一些有机污染物的标准或指导限值因土壤性质不同而有较大的差异,主要是与土壤质地、有机质含量等密切相关^[15-17]。

本文以多环芳烃萘为例进行研究。多环芳烃是一类常见的土壤有机污染物,其中萘是污染场地检出率和含量较高的多环芳烃之一。如王学军等^[18]分析了天津市 6 种土地利用类型(污灌农田、普通农田、山区、荒地、油田和城市绿地)表土中多环芳烃的含量,发现所有土地利用类型 16 种 PAHs 组分中含量最高的组分都是萘;余莉莉等^[19]对珠江三角洲 76 个表层土壤样品中 16 种优控 PAHs 的含量进行了分析,发现萘是主要的组分,占 PAHs 总量的 44.4%;杨国义等^[20]对珠江三角洲典型区域 260 个农业土壤样品中多环芳烃的含量分布的研究表明,萘的检出率为 97.7%。本研究采用模型推导方法,对我国不同地区的多种土壤中一定目标风险水平下萘的最高限值的差异及其影响因素进行了研究,以期对我国土壤中有机污染物标准的制修订研究有所启发。

1 材料与方法

1.1 典型土壤的选取

本研究选择了取自我国不同省份的 13 种典型土壤,其地理分布如图 1 所示。



1.新疆乌鲁木齐 2.吉林公主岭 3.北京昌平 4.陕西杨凌 5.河南郑州 6.重庆北碚 7.浙江杭州 8.湖南祁阳 9.江西进贤 10.江苏常熟 11.山东禹城 12.河北栾城 13.黑龙江海伦

1. Wulumuqi, Xinjiang 2. Gongzhuling, Jilin 3. Changping, Beijing 4. Yangling, Shaanxi 5. Zhengzhou, Henan 6. Beibei, Chongqing 7. Hangzhou, Zhejiang 8. Qiyang, Hunan 9. Jinxian, Jiangxi 10. Changshu, Jiangsu 11. Yucheng, Shandong 12. Luancheng, Hebei 13. Hailun, Heilongjiang

图 1 取自不同省份的 13 种典型土壤的地理分布

Figure 1 Geological distribution of 13 typical soil types used in this study

这些土壤基本上覆盖了我国大部分地区,东部地区样品分布较多,西部地区土壤样品分布较少。土壤类型涉及黑土、黄土、红壤、潮土、褐潮土、紫色土、灰漠土和水稻土等 8 种。每种土壤样品的主要性质及当地气候特征见表 1。

1.2 模型方法

1.2.1 模型及其计算方法

本研究采用当今国际上应用最广的 RBCA 模型 (Version 2.0 版本) 获取萘的土壤标准。该模型是美国 GSI (Groundwater Services, Inc.) 公司根据美国材料与试验协会 ASTM (American Society for Testing and Materials) 颁布的针对土壤地下水污染治理的 RBCA (Risk-based Corrective Action) 准则开发的,在世界范围内得到广泛应用,目前被很多国家或地区用于制定基于风险的土壤评价或修复标准。

因人体通过经口和吸入途径接触萘的致癌性数据尚不充分^[21],目前 UEEPA 并不计算萘的致癌标准值, RBCA 模型中也仅计算萘非致癌情况下的土壤标准,模型中物质非致癌条件下的土壤标准计算公式如 (1)~(5) 所示。

$$RBSL_{\text{oral}} = \frac{THQ \times Rf \times D_{\text{oral}} \times BW \times AT_n \times 365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}}{EF \times ED \times IR_s \times RBA \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{mg}^{-1}} \quad (1)$$

表 1 我国 13 种典型土壤的主要性质及当地气候特点

Table 1 Main characters of 13 typical soil types in China and local climate characteristics

编号	省份	土壤类型	土壤质地	SOM/%	pH	年平均 气温/℃	降雨量/ cm·a ⁻¹
1	新疆	灰漠土	粘质壤土	0.72	7.69	7	15
2	吉林	黑土	壤质粘土	2.38	6.72	3	50
3	北京	褐潮土	砂质壤土	1.13	7.28	11.7	62.31
4	陕西	黄土	粉质粘土	1.64	7.59	8.5	45.16
5	河南	潮土	砂质壤土	1.20	7.02	14.5	60
6	重庆	紫色土	粘土	1.13	7.26	18	120
7	浙江	水稻土	粘质壤土	1.85	6.81	16.9	150
8	湖南	红壤	粘土	1.74	5.00	16.6	135
9	江西	红壤	粘土	0.81	6.39	18	164
10	江苏	水稻土	粘土	2.62	7.61	15.4	160.6
11	山东	潮土	砂质粘壤土	1.28	8.21	12.3	65.28
12	河北	褐潮土	砂质粘壤土	1.38	8.12	11.5	65
13	黑龙江	黑土	粘土	5.74	7.04	3	50

$$RBSL_{Dermal} = \frac{THQ \times RfD_{Oral} \times BW \times AT_n \times 365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}}{EF \times ED \times SA \times M \times RBAF_d \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{mg}^{-1}} \quad (2)$$

$$RBSL_{Outdoor} = \frac{THQ \times RfC_{Inhal} \times AT_n}{EF \times ED \times (VF_{ss} + PEF)} \quad (3)$$

$$RBSL_{Indoor} = \frac{THQ \times RfC_{Inhal} \times AT_n \times 365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}}{EF \times ED \times VF_{seep}} \quad (4)$$

$$RBSL_{Inhal} = \left(\frac{1}{RBSL_{Outdoor}} + \frac{1}{RBSL_{Indoor}} \right)^{-1} \quad (5)$$

上列各式中: $RBSL$ 指基于风险的土壤标准, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; THQ 指目标非致癌危害商, 无量纲; RfD 指参考剂量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 因皮肤接触途径下的毒理学参数尚不明确, 故其参考剂量采用经口摄入途径下的数据; RfC (Reference concentration) 指参考浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 下标 Oral、Dermal、Outdoor、Indoor 及 Inhal 分别表示经口摄入、皮肤接触、室外吸入、室内吸入及总吸入途径; BW 指受体重, kg ; AT_n 指平均时间 (非致癌物质), a ; EF 指暴露频率, $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$; ED 指暴露持续时间, a ; IR 指土壤摄入速率, $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$; $RBAF$ 指生物相对吸收因子, 无量纲; SA 指皮肤暴露面积, $\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$; M 指土壤皮肤吸附因子, $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$; $RBAF_d$ 指皮肤吸收因子, 无量纲; VF_{ss} 指土壤-空气挥发因子, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3} - \text{air} / \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} - \text{soil}$; PEF 指颗粒物排放因子, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3} - \text{air} / \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} - \text{soil}$; VF_{seep} 指土壤-地下空间挥发因子, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3} - \text{air} / \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} - \text{soil}$ 。

1.2.2 情景设置

本研究选择计算住宅和工业两种典型用地萘的土壤标准, 其中住宅用地不考虑植物吸收途径。因萘

主要通过吸入、食入、经皮吸收等途径侵入生物体内而产生危害, 故将萘的暴露途径设为吸入、经口摄入、皮肤接触方式, 其中吸入途径包括室内和室外吸入两方面。

1.2.3 模型关键参数

除土壤性质参数和场地参数外 (表 1), RBCA 模型输入参数还包括建筑物参数、暴露因子、毒理学参数等。本研究参数设置主要参考国内相关研究^[11, 22-23], 部分无法参考国内相关研究的参数, 采用美国环保署相关数据或 RBCA 模型缺省值。萘的毒理学参数采用美国环保局 1998 年公布的数据^[21]。可接受的目标风险水平设置为萘的非致癌危害商等于 1。

1.2.4 模型模拟方法

本研究中, 除土壤性质参数和场地参数外, 其余参数 (建筑物参数、暴露因子和毒理学参数等) 全部保持一致。我国 13 种典型土壤中萘的最高限值的估算均采用实际测定的土壤和场地参数 (表 1)。讨论土壤质地或有机质含量对限值的单因素影响时, 自变量采用的参数为虚拟值, 并对除该因素以外的其他参数进行了固定化处理, 如在研究土壤质地的影响时, 将土壤 pH 统一设定为 7, 有机质含量设定为 1.5% (取表 1 所列 13 种土壤有机质含量平均值的近似值); 在研究土壤有机质含量的影响时, 将土壤 pH 统一设定为 7, 土壤质地分别设定了壤土和粘土两种情况 (表 1 所列 13 种土壤的质地类型中壤土和粘土几乎各半)。单因素模拟模型实验中气候参数全部采用北京地区参数。

2 结果与讨论

2.1 基于模型的典型土壤中萘的最高限值估算结果

我国 13 种典型区域土壤住宅和工业用地萘的标准值计算结果见图 2。由图 2 可见, 工业用地萘的最高限值普遍高于住宅用地, 这与国内外相关标准和有关研究结果一致^[11, 13, 18-20]。我国不同区域萘的土壤标准差异很大, 黑龙江黑土中萘的土壤限值最高, 北京褐潮土中限值最低, 不同地区土壤中萘的最高限值差异最高可达 3.8~6.7 倍。最高限值的变化范围住宅用地为 370~1 400 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 工业用地为 610~4 100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。为检验本研究估算的土壤最高限值的合理性, 将本研究结果与加拿大、英国、澳大利亚、新西兰以及我国香港等 5 个国家或地区公布的萘的相关土壤标准值进行了比较 (图 3)。由图 3 可知, 国外住宅用地萘的土壤相关标准范围为 0.6~182 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 工业用地萘的标准范围为 22~8 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。该结果说明本研究估算

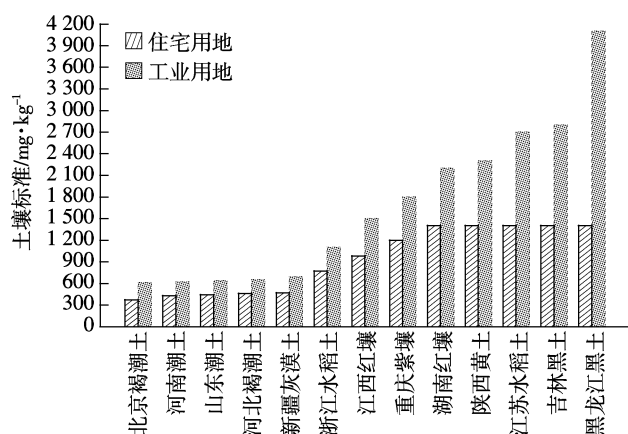


图2 模型估算的我国13种典型土壤中萘的最高限值

Figure 2 Maximum tolerable concentrations of Naphthalene calculated by models in 13 typical soils

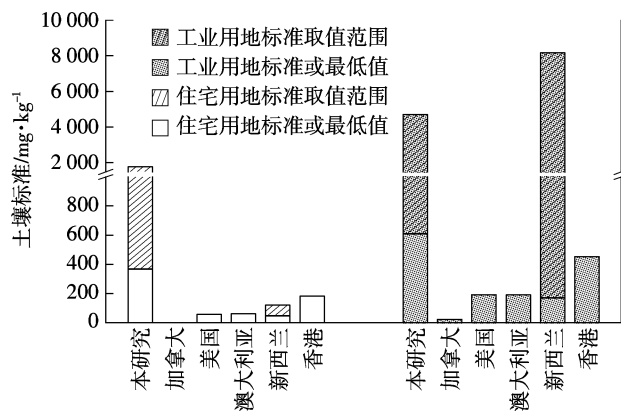


图3 本研究结果与其他国家或地区萘的相关土壤标准值的比较

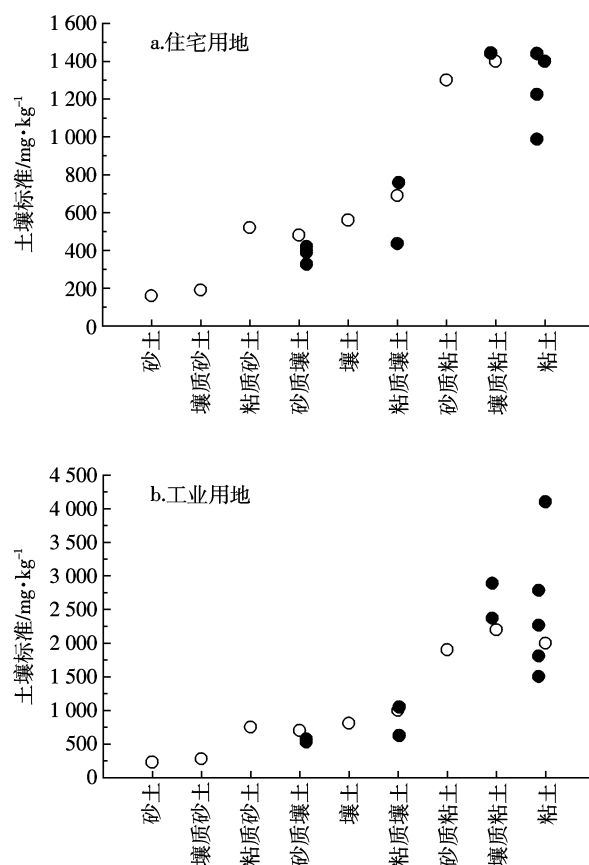
Figure 3 Comparison among results from this study and standards in other countries (regions)

的土壤中萘的最高限值与其他国家标准的变化范围基本吻合,有一定的合理性。

2.2 土壤质地对萘标准的影响

根据美国试验与材料学会 (American Society for Testing and Materials, ASTM) 关于土壤质地的分类,将土壤分为砂土、壤质砂土、粘质砂土、砂质壤土、壤土、粘质壤土、砂质粘土、壤质粘土和粘土共9种质地。图4显示了模拟条件下该质地分类中不同土壤质地对萘的土壤标准值的影响。

由图4可看出,在土壤其他性质和场地条件一定的条件下 (pH=7, SOM=1.5%, 场地条件采用北京参数), 萘土壤环境标准取值与土壤质地有较好的正相关关系,尽管在个别区间有一定波动。随着土壤质地由砂逐渐变粘,住宅和工业用地方式下萘的土壤标准变化基本一致,即随着土壤质地变粘,萘的标准值先



○ 模拟结果:土壤质地单因素影响(SOM=1.5%) ● 13种典型土壤

图4 土壤质地对萘在土壤中的最高限值的影响

Figure 4 Impact of soil texture on maximum tolerable values of Naphthalene in soil

增大,直到土壤质地达到某一粘性(对于住宅用地为砂质粘土,工业用地为壤质粘土)时,萘的土壤标准保持不变或略有下降。这主要是因为萘属于强挥发性物质(亨利常数为 $2 \times 10^{-2} \gg 10^{-5}$),因而空气暴露途径下进入人体的量较高,风险很大,大部分情况下萘的土壤标准由空气吸入途径决定,而经口摄入途径和皮肤接触途径等对萘的标准取值影响很小。

随着土壤质地粘性增加(粘粒含量增加),土壤对萘的吸附性增强,因此,降低了其暴露量和风险,标准取值可能因此而放宽。从采用实际参数计算的我国13种典型地区土壤的标准取值随土壤质地的变化来看,也基本上符合这一规律。不同的是我国典型地区土壤的标准取值受多种因素的影响,除了土壤质地之外,还受到有机质含量以及场地条件(气候因素,如年平均气温和降雨量等)的影响。土壤质地对土壤中污染物最高限值取值的影响主要是由于土壤质地不同而导致多个土壤参数(土壤孔隙率、土壤容重、土壤容

积含水率、容积气体量和土壤蒸汽渗透率等)的差异,从而导致污染物在土壤各相间分配的不同,进而影响暴露的风险,最终影响最高限值的取值。质地相同但有机质含量不同的土壤中萘的最高限值差异最高可达 $420 \sim 2\,600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (分别对应于住宅用地和工业用地)。

2.3 土壤有机质含量对萘标准的影响

根据文献,有机质含量在不同土壤中差异很大,高的可达 20%以上(如泥炭土),低的不足 0.5%(如一些漠境土和砂质土壤)。我国土壤表层有机质含量范围通常在 5%以下^[24]。根据表 1 可知,本研究选取的我国 13 种土壤的有机质含量变化范围在 0.72%~5.74%之间。图 5 显示了该变化范围内的土壤有机质含量对萘的土壤环境标准取值的影响。在土壤有机质单因素的影响条件下(其他条件保持不变,设定 $\text{pH}=7$,质地分别为壤土和粘土,场地条件采用北京参数),土壤中萘的环境标准取值随着有机质含量的增加而提高,基本呈正相关关系。形成这一规律的主要原因与土壤质地的影响类似,即随着土壤有机质含量增加,土壤对

萘的吸附性增强,降低了其暴露量和风险,标准取值可能因此而放宽。住宅用地类型条件下,土壤质地为粘土时,土壤有机质含量增加到一定程度(1.5%左右)时,最高限值的取值不再随有机质含量的增加而增加,而是呈现稳定趋势。具体原因有待进一步研究。用实际参数计算的我国 13 种典型地区土壤的标准取值均与相应质地条件下的变化规律基本吻合。有机质含量相同但质地不同的土壤中萘的最高限值差异最高可达 $830 \sim 1\,190 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (分别对应于住宅用地和工业用地)。

3 结论

(1)非致癌危害商为 1 的目标风险水平下,基于模型估算的萘的土壤环境标准为:住宅用地萘的最高限值范围为 $370 \sim 1\,400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,工业用地限值范围为 $610 \sim 4\,100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。该标准水平与其他国家或地区的类似标准基本相当。

(2)不同地区土壤中萘的最高限值差异显著,不同地区土壤中萘的最高限值差异最高可达 3.8~6.7 倍。该结果预示了某些有机污染物的土壤环境标准取值受区域变异的影响较大,在标准制修订过程中需适当加以考虑。

(3)土壤质地和有机质是影响最高限值取值的两种主要因素。随着土壤质地粘粒含量的增加,最高限值取值增大,达到一定程度后保持不变或略有降低。随着有机质含量的增加,最高限值取值呈增大趋势,但也有某些情况下,有机质含量增加到一定程度后最高限值趋于稳定。土壤质地和有机质含量对萘的土壤环境标准取值的影响可能主要与有机污染物在土壤中的吸附行为有关。

参考文献:

- [1] 林玉锁. 土壤环境安全及其污染防治对策 [J]. 环境保护, 2007(1): 35-38.
LIN Yu-suo. Soil environment safety and the measures of pollution prevention[J]. *Environmental Protection*, 2007(1): 35-38.
- [2] 刘 慧, 朱伏峰, 徐晓白, 等. 吹扫-捕集气质联用法测定北京郊区土壤中挥发性有机物 [J]. 复旦学报(自然科学版), 2003, 42(6): 856-860.
LIU Hui, ZHU You-feng, XU Xiao-bai, et al. Preliminary estimation of volatile organic compounds in soils from Beijing suburban by purge-and-trap/GC/MS [J]. *Journal of FUDAN University (Natural Science)*, 2003, 42(6): 856-860.
- [3] 范亚维, 周启星. BTEX 的环境行为与生态毒理 [J]. 生态学杂志, 2008, 27(4): 632-638.

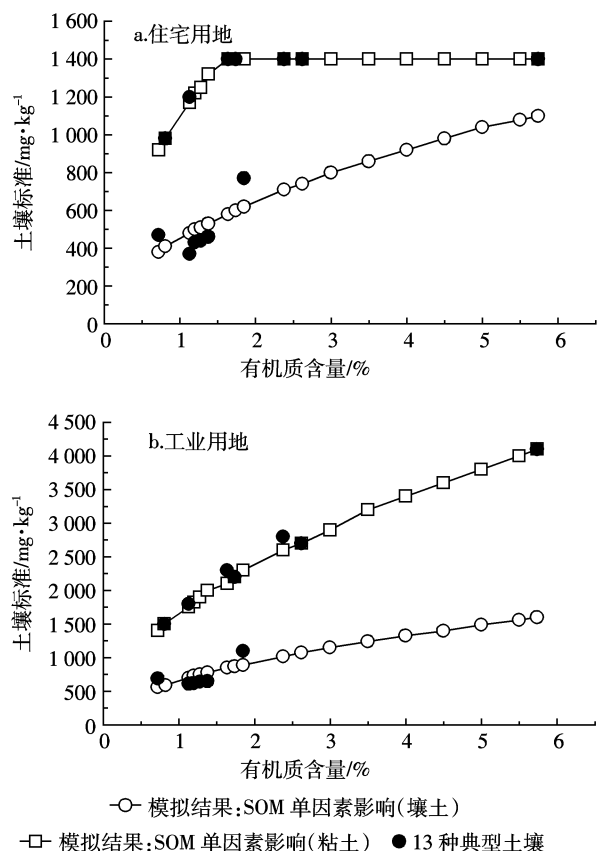


图 5 土壤有机质含量对土壤萘标准的影响

Figure 5 Impact of SOM on soil standard of Naphthalene

- FAN Ya-wei, ZHOU Qi-xing. Research advances on environmental behavior and ecological toxicology of BTEX[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(4):632-638.
- [4] 杨国栋, 吴 毅, 马小东, 等. 焦化厂周围农业土壤中芳烃类物质的污染状况[J]. 农业环境保护, 2000, 19(2):93-95.
- YANG Guo-dong, WU Tao, MA Xiao-dong, et al. Determination and evaluation of aromatic pollutants in the cultivated soils surrounding a coal gasification plant [J]. *Agro-Environmental Protection*, 2000, 19(2):93-95.
- [5] 李建三, 吴祖煜, 陈 彬, 等. 工业废弃场地再开发的环境评估[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(6):54-57.
- LI Jian-san, WU Zu-yu, CHEN Bin, et al. Environmental site assessment for brown-field redevelopment [J]. *Environmental Science and Management*, 2007, 32(6):54-57.
- [6] 李凌波, 林大泉, 曾向东, 等. 某石油化工厂有机污染物的表征[J]. 石油学报, 2001, 17(4):87-96.
- LI Ling-bo, LIN Da-quan, ZENG Xiang-dong, et al. Characterization of organic contamination at a petrochemical site [J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2001, 17(4):87-96.
- [7] 晁 雷, 周启星, 陈 苏. 建立污染土壤修复标准的探讨 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(2):331-334.
- CHAO Lei, ZHOU Qi-xing, CHEN Su. An approach to the establishment of remediation standards for contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(2):331-334.
- [8] 王国庆, 骆永明, 宋 静, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究 I. 国际动态及中国的修订考虑[J]. 土壤学报, 2005, 42(1):666-673.
- WANG Guo-qing, LUO Yong-ming, SONG Jing, et al. Study on soil environmental quality guidelines and standards I. International trend and suggestions for amendment in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1):666-673.
- [9] 夏家淇, 骆永明. 关于土壤污染的概念和 3 类评价指标的探讨[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(1):87-90.
- XIA Jia-qi, LUO Yong-ming. Definition and three evaluation guidelines of soil contamination [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(1):87-90.
- [10] 李志博, 骆永明, 宋 静, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究 II. 污染土壤的健康风险评估[J]. 土壤学报, 2006, 43(1):143-149.
- LI Zhi-bo, LUO Yong-ming, SONG Jing, et al. Study on soil environmental quality guidelines and standards II. Health risk assessment of polluted soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1):143-149.
- [11] 周启星. 污染土壤修复标准建立的方法体系研究 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(2):316-320.
- ZHOU Qi-xing. Methodology of enacting standards for remediation of contaminated soils [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(2):316-320.
- [12] 陈 华, 刘志全, 李广贺. 污染场地土壤风险基准值构建与评价方法研究[J]. 水文地质工程地质, 2006(2):84-88.
- CHEN Hua, LIU Zhi-quan, LI Guang-he. A study of the establishment and evaluation method of the soil risk guideline of contaminated sites [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2006(2):84-88.
- [13] 臧振远, 李培中, 宋 云, 等. 场地环境评价中标准应用问题研究 [J]. 环境与可持续发展, 2008(1):22-24.
- ZANG Zhen-yuan, LI Pei-zhong, SONG Yun, et al. A study on standard applications in site environmental assessment[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2008(1):22-24.
- [14] 段华波, 黄启飞, 王 琪, 等. 土壤有机物污染控制标准制订的方法学研究[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(1):70-73.
- DUAN Hua-bo, HUANG Qi-fei, WANG Qi, et al. Methodology for enacting pollution control standard of organic pollutants for contaminated soils[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2007, 29(1):70-73.
- [15] CCME (Canadian Council of Minister of the Environment). Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health, Summary tables, update 2004.
- [16] NZME (Ministry for the Environment, New Zealand). Guideline for Assessing and Managing Petroleum Hydrocarbon Contaminated Sites in New Zealand, Ministry for the Environment, New Zealand, August 1999.
- [17] EA (The Environment Agency). Soil Guideline Values for Ethyl benzene Contamination, Science Report SGVs 16, December 2004.
- [18] 王学军, 任丽然, 戴永宁, 等. 天津市不同土地利用类型土壤中多环芳烃的含量特征[J]. 地理研究, 2003, 22(3):360-365.
- WANG Xue-jun, REN Li-ran, DAI Yong-ning, et al. Contents of PAH compounds in different types of soils in Tianjin area [J]. *Geographical Research*, 2003, 22(3):360-365.
- [19] 余莉莉, 李 军, 刘国卿, 等. 珠江三角洲表层土壤中的多环芳烃[J]. 生态环境, 2007, 16(6):1683-1687.
- YU Li-li, LI Jun, LIU Guo-qing, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils of the Pearl River Delta, south China [J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(6):1683-1687.
- [20] 杨国义, 张天彬, 高淑涛, 等. 珠江三角洲典型区域农业土壤中多环芳烃的含量分布特征及其污染来源 [J]. 环境科学, 2007, 28(10):2350-2354.
- YANG Guo-yi, ZHANG Tian-bin, GAO Shu-tao, et al. Source and distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in the Pearl River Delta[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(10):2350-2354.
- [21] USEPA (U. S. Environmental Protection Agency). Toxicological review of naphthalene, In Support of Summary Information on the Integrated Risk Information System (IRIS). Washington, DC. August 1998.
- [22] 罗启仕, 李小平, 耿春女, 等. 上海建设用地土壤指导限值及其应用研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5):1952-1957.
- LUO Qi-shi, LI Xiao-ping, GENG Chun-nü, et al. Derivation of soil guideline values and their application in management and remediation of contaminate urban land in Shanghai[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(5):1952-1957.
- [23] 施烈焰, 曹云者, 张景来, 等. RBCA 和 CLEA 模型在某重金属污染场地环境风险评价中的应用比较[J]. 环境科学研究, 2009, 22(2):241-247.
- SHI Lie-yan, CAO Yun-zhe, ZHANG Jing-lai, et al. Comparison of application of RBCA and CLEA model for health risk assessment of a heavy metal contaminated site[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(2):241-247.
- [24] 朱祖祥. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1983.
- ZHU Zu-xiang. Soil[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1983.