

# 基于健康风险评估的棕地再开发利用控规优化研究

邓一荣<sup>1,2,3</sup>, 刘丽丽<sup>1</sup>, 李韦钰<sup>1</sup>, 杨子鹏<sup>4</sup>, 肖荣波<sup>1</sup>, 彭平安<sup>2</sup>

(1. 广东省环境科学研究院 广东省污染场地环境管理与修复重点实验室, 广东 广州 510045;

2. 中国科学院广州地球化学研究所 有机地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 广东工业大学 环境科学与工程学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 随着产业转移政策的加快实施和城市化进程的不断深入, 其遗留的大量城市棕地在再开发利用过程中暴露出越来越多的土壤污染问题, 不合理的规划易导致人居环境健康安全及土壤修复成果过高问题。论文以南方某大型有机化工污染场地为例, 针对S1(修正前的土地利用规划)、S2(修正前的土地利用规划A)、S3(修正后的土地利用规划B)三种规划的暴露情景, 分析不同情景下场地土壤中苯污染的暴露途径并进行健康风险评估。结果表明, 不同用地规划的环境风险和土壤修复目标值存在差异。若能在棕地再开发利用过程中结合土壤污染情况, 对其控制性详细规划进行优化调整, 可减少其健康风险和修复费用, 有利于解决土壤修复成本过高的问题。

**关键词:** 棕地; 健康风险评估; 控制性详细规划; 城市更新

**中图分类号:** X323 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4407(2019)08-223-07

## Optimization for Regulatory Detailed Planning of Brownfield Redevelopment Based on Human Health Risk Assessment

DENG Yirong<sup>1,2,3</sup>, LIU Lili<sup>1</sup>, LI Weiyu<sup>1</sup>, YANG Zipeng<sup>4</sup>, XIAO Rongbo<sup>1</sup>, PENG Ping'an<sup>2</sup>

(1. Guangdong Key Laboratory of Contaminated Environmental Management and Remediation, Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou Guangdong 510045, China;

2. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Guangdong 510640, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. School of Environment Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510006, China)

**Abstract:** With the adjustment of industrial structure and the deepening of urbanization, more and more soil pollution problems have being exposed in the process of redevelopment of many urban brownfield sites. Exposure analysis and health risk assessment based on different scenarios, which included S1 (uncorrected land use planning), S2 (revised land use planning A) and S3 (revised land use planning B), were carried out for a large-scale site contaminated by benzene in southern China. The results showed that different land use planning resulted in different environmental risks and soil restoration target values. If the soil pollution could be considered in the redevelopment and utilization of the brownfield site and the regulatory detailed planning could be optimized, it would be beneficial to reduce human health risk and lower soil restoration expense.

**Key words:** brownfield site; health risk assessment; regulatory detailed planning; urban regeneration

## 1 引言

随着我国产业转移政策的实施和城市化进程的加快, 因工业企业关停并转而遗留的“棕地”(也称场地、污染地块)超 50 多万块, 这些地块呈多源、复杂、持久、面广、量大等特征, 对区域生态环境和人居环境安全和公众健康构成威胁<sup>[1-4]</sup>。《土壤污染防治行动计划》(简

称“土十条”, 国发(2016) 31 号), 环保部、住建部等四部委联合发布的《关于保障工业企业场地再开发利用环境安全的通知》(环发(2012) 140 号)等文件要求将建设用地土壤环境管理纳入城市规划和供地管理中, 污染场地的土地开发利用须符合土壤环境质量要求<sup>[5-6]</sup>。在当前我国城市建设用地供应已从以增量扩张为主转向盘

**基金项目:** 国家重点研发计划课题“大数据支持的场地污染风险管控技术、策略与应用研究”(2018YFC1800205); 国家重点研发计划课题“污染场地土壤及地下水原位采样技术规范编制与发展模式研究”(2018YFC1800806); 住建部科技研发项目“城市棕地再开发的环境风险与规划管控研究”(2015-K6-003)

**第一作者简介:** 邓一荣(1985—), 男, 广西桂林人, 博士研究生, 高级工程师, 注册环保工程师, 注册咨询工程师, 研究方向为土壤环境管理、土壤修复。E-mail: ecoyrdeng@163.com

活存量与做优增量并举的背景下,在再开发利用前,需要对场地进行健康风险评估,以量化场地污染对人体健康的影响,为促进棕地再开发利用、优化土地利用结构和棕地的修复管理提供技术支撑<sup>[7-13]</sup>。

目前,我国主要是基于土地未来规划用途进行人体健康风险评估,确定场地是否需要修复。这种基于风险的场地管理策略能得出更能针对场地自身情况并更具操作性的规划和修复方案<sup>[14-16]</sup>。但对于一些局部污染较重的大型污染场地,由于污染区域规划为如居住、学校等敏感用地类型,需制定较严的修复目标,导致治理的难度增大且周期变长,阻碍土地重新开发利用,并影响和压缩土地开发的利润空间<sup>[17]</sup>。在控制性详细规划编制阶段,考虑污染场地对人体健康的风险水平、危害途径,对用地规划进行相应调整,可在保证人体健康的前提下,减少场地修复成本<sup>[18]</sup>。本文以南方某大型化工污染场地有机污染土壤为例,结合《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3—2014)和国内较成熟的评价模型软件<sup>[19-20]</sup>,通过模拟不同土地再开发利用模式,分析不同情景下污染场地土壤中苯污染的暴露途径并进行健康风险评估,基于健康风险控制对城市遗留棕地再利用过程中的规划进行引导,提出基于风险管理的土地利用规划最佳方案,以期为国内类似棕地的风险评估及其控制性规划提供参考与借鉴。

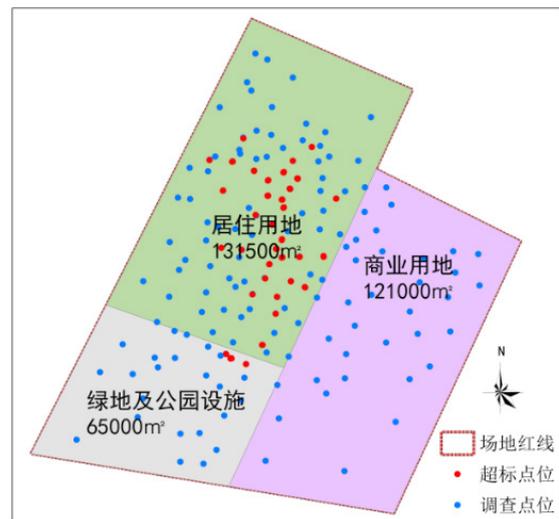
## 2 材料与方法

### 2.1 研究区域概况

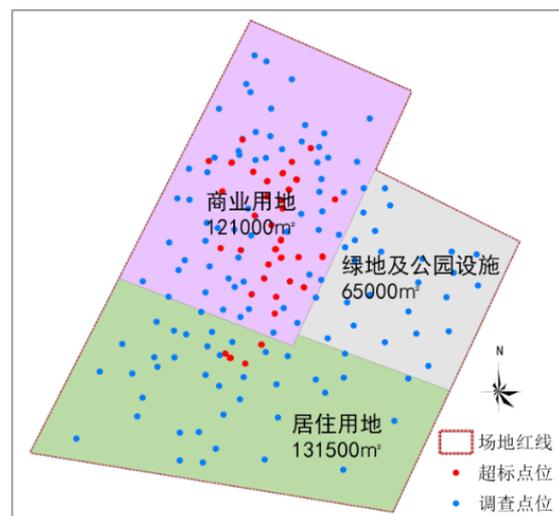
研究对象为我国南方某市郊区一大型有机化工污染场地,占地约 30 公顷。原企业始建于 1989 年,此前曾为农业用地和山地,主要原材料为原油。企业经过 20 年的运营后,于 2009 年停产,随后一直空置。该场地因被纳入城市“三旧”改造,用地性质将由工业用地规划为居住用地、商业用地和绿地,共包含三个功能区,其土地利用规划如图 1 所示。2015 年在该污染场地进行采样调查,布设 144 个土壤采样点,采样深度为 0~40 m,共采集土壤样品 621 个。污染场地内第四系(Q)土层按其成因自上而下分为人工填土层(Qm1)、冲积层(Qal)、残积层(Qel),下覆基岩为燕山期粗粒斑状花岗岩( $\gamma$ )。

### 2.2 规划情景分析

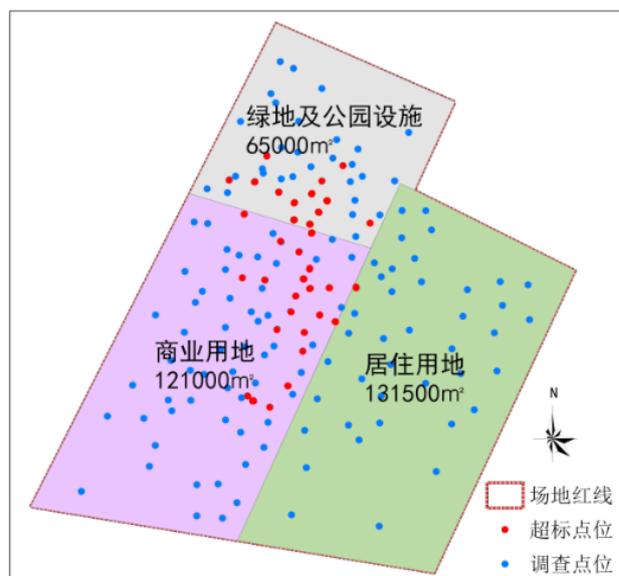
本次研究采用三种规划情景:S1(修正前的土地利用规划 I 类)情景、S2(修正后的土地利用规划 II 类)情景、S3(修正后的土地利用规划 III 类)情景。S2 和 S3 情景考虑场地的土壤污染情况,经场地环境详细调查后对场地的规划进行了修正与优化,在基本不影响场地整



(a) S1 (修正前的土地利用规划 I 类)



(b) S2 (修正后的土地利用规划 II 类)



(c) S3 (修正后的土地利用规划 III 类)

图1 基于控规层面的三种规划情景图

体的规划用途的情况下，对居住用地 A 区、公园绿地 B 区和商业用地 C 区所在位置进行调整，三种规划图分析如图 1 所示。

### 2.3 暴露途径与概念模型构建

规划为商业用地的区域视为非敏感性用地进行风险评估，居住用地视为敏感用地进行风险评估，公园绿地情景下的接触方式参照居住情景进行分析，但不考虑室内呼吸途径的风险。制定土壤与地下水风险控制值及风险表征的风险评估模型考虑的暴露途径见表 1。

表1 场地暴露途径（住宅用地）

暴露途径	居住用地	商业用地	绿化用地
土壤经口摄入	●	●	●
皮肤接触土壤	●	●	●
吸入室内土壤颗粒物	●	●	○
吸入室外土壤颗粒物	●	●	●
吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物途径	●	●	●
吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物途径	●	●	●
吸入室内空气来自下层土壤的气态污染物途径	●	●	○

注：●表示有该种暴露途径；○表示无该种暴露途径。

### 2.4 评估模型与参数取值

为简化计算，本次健康风险评估只考虑土壤中苯对人体的致癌风险，且暂不考虑地下水对人体的健康风险。采用《污染场地风险评估技术导则》（HJ 25.3—2014）推荐的风险计算模型进行风险评估。

经口摄入土壤途径中污染物的致癌风险( $CR_{OIS}$ )：

$$CR_{OIS} = OISER_{ca} \times C_{sur} \times SF_o \quad (1)$$

皮肤接触土壤途径中污染物的致癌风险( $CR_{DCS}$ )：

$$CR_{DCS} = DCSER_{ca} \times C_{sur} \times SF_d \quad (2)$$

吸入土壤尘途径中污染物的致癌风险( $CR_{PIS}$ )：

$$CR_{PIS} = PISER_{CR} \times C_{sur} \times SF_i \quad (3)$$

吸入室外空气中气态污染物途径的致癌风险( $CR_{loV}$ )：

$$CR_{loV} = (loVER_{ca1} \times C_{sur} + loVER_{ca2} \times C_{sub}) \times SF_i \quad (4)$$

吸入室内空气气态污染物途径的致癌风险( $CR_{liV}$ )：

$$CR_{liV} = liVER_{ca1} \times C_{sub} \times SF_i \quad (5)$$

单一土壤污染物经所有暴露途径的致癌风险( $CR_n$ )：

$$CR_n = CR_{OIS} + CR_{DCS} + CR_{PIS} + CR_{loV} + CR_{liV} \quad (6)$$

修复目标值的计算：

$$RCVS_n = \frac{A}{\frac{OISER_{ca} \times SF_o + DCSER_{ca} \times SF_d + (PISER_{CR} + loVER_{ca1} + loVER_{ca2} + liVER_{ca1}) \times SF_i}{CR}} \quad (7)$$

其中： $C_{sur}$ 、 $C_{sub}$  依次为表层土壤和下层土壤中污染物

浓度(mg/kg)； $SF_o$ 、 $SF_d$ 、 $SF_i$  依次为经口摄入、皮肤接触、呼吸吸入的致癌斜率因子(mg/(kg·d)<sup>-1</sup>)； $OISER$ 、 $DCSER$  依次为经口摄入、皮肤接触对应的土壤暴露量(kg/(kg·d))，计算公式按用地规划的方式分为敏感用地暴露评估模型和非敏感用地暴露评估模型，详见《污染场地风险评估技术导则》（HJ 25.3—2014）推荐公式； $loVER_{ca1}$ 、 $loVER_{ca2}$ 、 $liVER_{ca1}$  依次为表层土壤室外蒸气、下层土壤室外蒸气、下层土壤室内蒸气对应的土壤暴露量(kg/(kg·d))。 $RCVS_n$  为土壤中苯的修复目标值(mg/kg)； $ACR$  为土壤中致癌风险可接受水平，值为  $1 \times 10^{-6}$ 。人体暴露参数、气象参数和建筑物参数采用《污染场地风险评估技术导则》（HJ25.3—2014）的推荐参数。场地土壤和地下水参数主要以调查实测数据为主，场地参数如表 2 所示。

表2 土壤和地下水参数

参数名称	符号	单位	取值	来源
表层污染土壤层厚度	d	m	8.0	现场实测
土壤中总孔隙体积比	$\theta$	无量纲	5.02E-01	土壤实测
包气带孔隙水体积比	$\theta_{ws}$	无量纲	4.60E-01	土壤实测
包气带孔隙空气体积比	$\theta_{as}$	无量纲	4.19E-02	土壤实测
土壤容重	$\rho_b$	g/cm <sup>3</sup>	1.36	土壤实测
包气带土壤有机碳质量分数	foc	无量纲	3.74E-03	土壤实测

## 3 结果与讨论

### 3.1 污染数据的基本统计

场地土壤受苯污染严重，最大检出浓度为 860 mg/kg，样品超过筛选值的数量为 111 个(表 3)。从变异系数来看，苯的变异系数为 7.27，这说明污染物在场地中都有很大的空间变异性，样点含量在场地中的分布很不均匀，污染累积情况受场地历史生产背景影响较大，导致苯的浓度数据具有很高的偏倚性。苯的浓度数据统计特征表明，苯的污染分布明显受场地的历史生产、管理、车间布局 and 人为干扰等因素的影响，其统计特征不同于一般面源污染，在进行空间分布预测、污染范围确定等工作时，要深入考虑数据的统计特征，以降低计算结果的不确定性。国内研究<sup>[21-22]</sup>也表明，污染物浓度差异较大会对统计分析和推断产生影响。

### 3.2 不同用地类型的主要暴露途径分析

对居住用地、商业用地和公园绿地的各暴露途径贡献率进行计算，结果如表 4 所示，可知在绿化用地中主要暴露途径为经口摄入，而住宅和商业区的主要暴露途径为吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物途径。这是因为对于苯等挥发性有机物污染场地，污染物主要通过蒸气入侵的方式与受体接触，之后在受体的呼吸作用下进入人体内继而健康造成危害；当规划为居住和商业

表3 场地土壤中苯的检测结果统计表

点位总数	样品总数	检出样品数	最大值/(mg/kg)	最小值/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)	标准偏差	变异系数	土壤筛选值/(mg/kg)	超过筛选值的样品数
144	524	161	860	0.06	20.3613	80.017	7.27	0.064	111

用地时, 建筑位于污染土壤及地下水的垂直上方, 污染物通过在分子扩散作用依次通过土层及建筑物底板进入室内空间与受体接触<sup>[23]</sup>, 而根据如图 2 构建的概念模型图可知, 公园绿地中可不考虑室内呼吸途径的风险。因此, 对于超标严重的区域, 若能够根据污染物的主要暴露途径, 对用地规划进行调整, 可降低区域污染物的危害水平。

### 3.3 风险评估结果

基于保守考虑, 以土壤中污染物的最大检出值作为其暴露点浓度进行致癌风险评估, 三种情景下土壤中苯的最大浓度及其致癌风险评估结果见表 5。结果表明, 该场地土壤中的苯对未来场地使用者的致癌风险高于可接受风险水平, 但三种情景下的最大致癌风险水平不同, S1 和 S2 情景下, 场地最大致癌风险浓度位于居住用地, 分别为 4.78E-03 和 1.11E-03; S3 情景下, 场地最大致癌风险位于公园绿地区, 为 2.27E-04, 较 S1、S2 开发情景低。不同规划情景下超标点位的数量如图 3 所示, S3 开发情景超标点位的总数为最少, S1 数量最多。可见, 若能够

表4 不同用地方式的各暴露途径的贡献率

暴露途径	用地方式		
	居住	绿化	商业
经口摄入	1.55	82.87	2.02
吸入室内土壤颗粒物	0.00	—	0.01
吸入室外土壤颗粒物	0.00	0.05	0.00
吸入室外空气中来自表层土壤的气态污染物途径	0.21	11.36	0.52
吸入室外空气中来自下层土壤的气态污染物途径	0.11	5.72	0.27
吸入室内空气来自下层土壤的气态污染物途径	98.12	—	97.19

结合场地污染情况适当调整规划, 可降低该区域的最大致癌风险、超标率与超标范围。这是因为在迁移模型选定的情况下, 在同一场地内水文地质参数和人体参数差别不大, 而不同用地类型的受体和暴露途径不同, 对场地的风险评估结果和修复目标值的确定产生了较大影响。

### 3.4 修复土方量和修复费用对比

以表 5 中计算的修复目标为基准, 采用 ArcGIS 软件对 0~4 m 的土壤进行污染空间插值, 同时根据采样点的监测结果及场地现场实际情况对插值结果进行适当

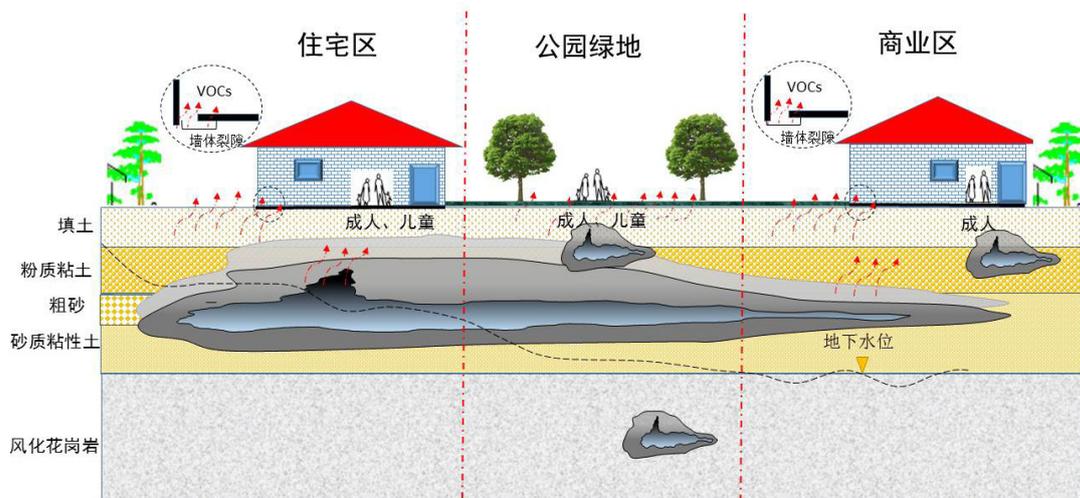


图2 场地概念模型图

表5 风险评估结果

风险评估结果	S1 情景			S2 情景			S3 情景		
	A 区	B 区	C 区	A 区	B 区	C 区	A 区	B 区	C 区
暴露浓度/(mg/kg)	860	—	199	199	860	—	13.1	199	860
经口摄入	7.42E-05	—	1.72E-05	1.72E-05	1.98E-05	—	1.13E-06	4.58E-06	7.42E-05
吸入室内土壤颗粒物	2.12E-07	—	0	4.90E-08	1.08E-07	—	3.22E-09	2.49E-08	0
吸入室外土壤颗粒物	4.41E-08	—	1.02E-08	1.02E-08	2.24E-08	—	6.71E-10	5.19E-09	4.41E-08
吸入下层土壤室内蒸气	4.69E-03	—	0	1.08E-03	9.54E-04	—	7.14E-05	2.21E-04	0
吸入表层土壤室外蒸气	1.02E-05	—	2.35E-06	2.35E-06	5.07E-06	—	1.55E-07	1.17E-06	1.02E-05
吸入下层土壤室外蒸气	5.12E-06	—	1.18E-06	1.18E-06	2.61E-06	—	7.80E-08	6.03E-07	5.12E-06
总致癌风险	4.78E-03	—	2.07E-05	1.11E-03	9.82E-04	—	7.28E-05	2.27E-04	8.95E-05
修复目标值/(mg/kg)	0.18	0.88	9.61	0.18	0.88	9.61	0.18	0.88	9.61

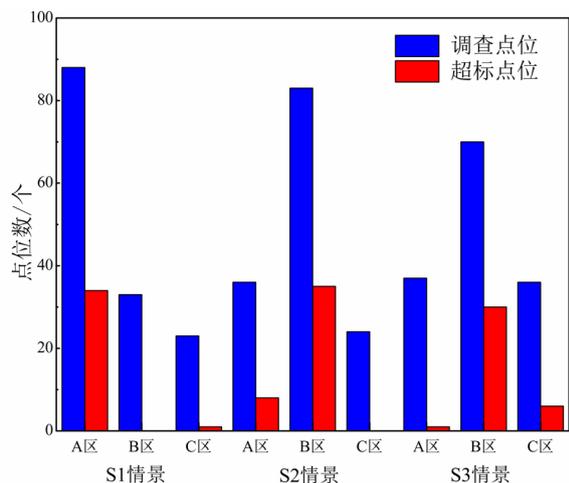


图3 不同规划情景下超标点位统计

修正，最终获取场地中0~4 m需修复土壤所在区域、面积以及相应的土方量。插值结果如图4、图5、图6所示。根据图4、图5、图6的插值结果，计算不同层土壤的修复量，在第一种开发情景下，修复土方量为54 410 m<sup>3</sup>，第二种开发情景下修复土方量为38 362 m<sup>3</sup>，第三种开发情景下修复土方量为33 396 m<sup>3</sup>，见表6。

对该场地不同土质苯污染土壤修复技术可行性测试结果表明，该场地0~4 m以内土壤采用常温解析技术可以满足要求，修复成本大约为400元/m<sup>3</sup>，根据可行技术的单位修复成本及对应的修复土方量可大致估算苯污染土壤的直接修复费用。其中，情景1模式下，修复成本约为2 176万元；情景2开发模式下，修复成本约为1 534万元，相对于情境1可降低修复成本642万元、29.50%；情景3开发模式下，修复成本约为1 336万元，

表6 不同开发情景下修复土方量的估算

开发情景	情景1		情景2		情景3	
	0~2	2~4	0~2	2~4	0~2	2~4
修复深度/m	0~2	2~4	0~2	2~4	0~2	2~4
修复土方量/m <sup>3</sup>	26 162	28 248	19 084	19 278	16 242	17 154
总土方量/m <sup>3</sup>	54 410		38 362		33 396	

相对情境1可降低修复成本840万元、38.60%。由此可见，本研究所选取的苯污染场地，若能够结合场地污染情况适当调整规划，将带来较大的经济效益。

## 4 结论与启示

### 4.1 不同用地规划，污染物的主要暴露途径和环境风险存在差别

居住和商业用地的主要暴露途径为吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物途径，而绿化用地中由于一般没有室内呼吸途径的风险，主要暴露途径为经口摄入。因此，对于超标严重区域，若能够根据污染物的主要暴露途径适当调整用地方式，可减少场地内污染物的危害水平。

S1和S2规划情景下，场地最大致癌风险分别为4.78E-03和1.11E-03，场地最大致癌风险位于公园绿地区，为2.27E-04，且S3开发情景超标点位的总数为最少。由此可看出，若能够结合场地污染情况适当调整规划，对场地污染严重的区域进行规划调整可降低该区域的最大致癌风险、超标率与超标范围。

### 4.2 棕地的再开发利用控规需结合土壤污染调查结果，有利于降低修复成本

采用ArcGIS软件对0~4 m的土壤进行污染空间插值，计算场地0~4 m需修复土壤所在区域、面积以及相应的土方量。在第一种开发情景下，修复土方量为

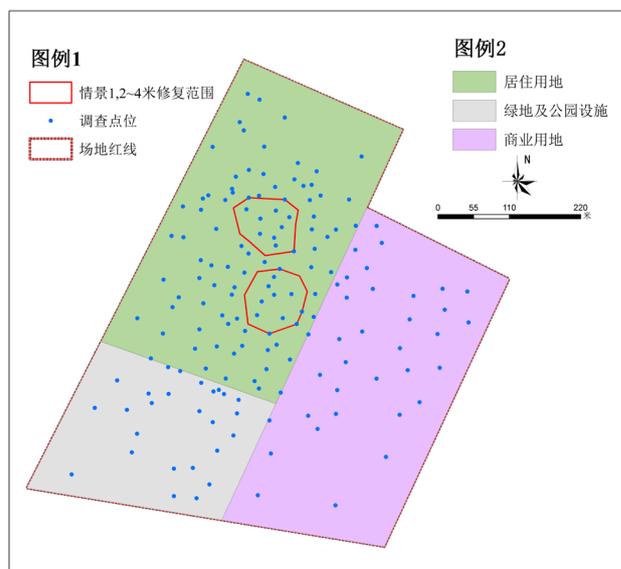
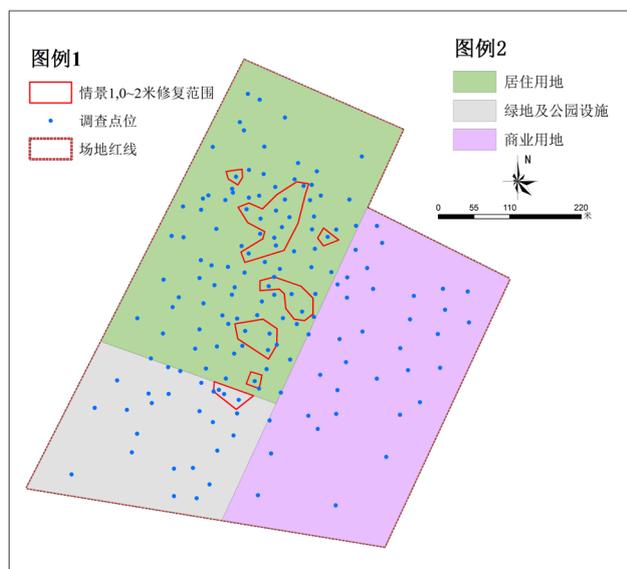


图4 S1规划情景下0~4米修复范围

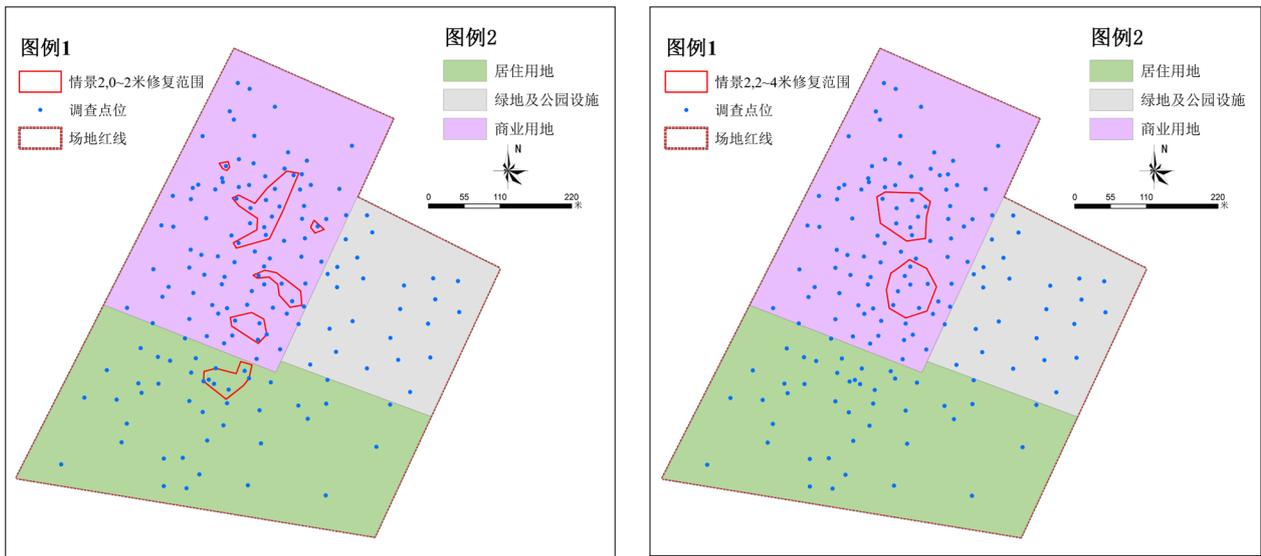


图5 S2规划情景下的0~4米修复范围

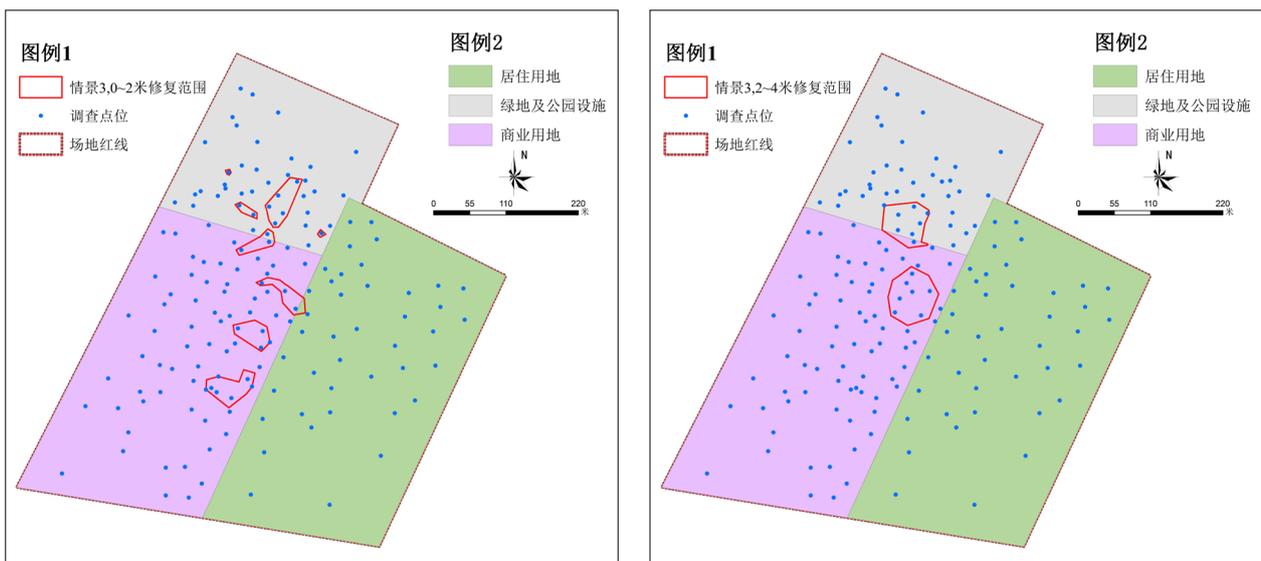


图6 S3规划情景下的0~4米修复范围

54 410 m<sup>3</sup>, 修复成本约为 2 176 万元; 第二种开发情景下修复土方量为 38 362 m<sup>3</sup>, 修复成本约为 1 534 万元, 可降低修复成本 29.50%; 第三种开发情景下修复土方量为 33 396 m<sup>3</sup>, 修复成本约为 1 336 万元, 可降低修复成本 38.60%。由此可见, 若能够结合场地污染情况适当调整规划, 将带来较大的经济效益。

因此, 与常规地块中“自上而下”的目标设定模式不同, 城市棕地的再开发利用须结合地块的土壤与地下水污染特征、地形地貌等采用“自下而上”或“上下结合”的规划策略, 在空间分区和时间维度上对控制性详细规划层面进行精细化设计, 将大大有利于场地的风险管控及后续的场地修复改造。[2]

参考文献:

- [1] 骆永明. 中国污染场地修复的研究进展、问题与展望[J]. 环境监测管理与技术, 2011 (3): 1-6.
- [2] 陈梦航. 我国工业污染场地土壤与地下水重金属修复技术综述[J]. 中国科学院院刊, 2014 (3): 327-335.
- [3] 邓一荣, 林挺, 肖荣波, 等. EKR-PRB耦合技术在污染场地修复中的应用研究进展[J]. 环境工程, 2015 (10): 152-157.
- [4] Wang L, Peng L, Xie L, et al. Compatibility of surfactants and thermally activated persulfate for enhanced subsurface remediation [J]. Environmental science & technology, 2017, 51(12): 7055-7064.
- [5] 王慧, 江海燕, 肖荣波, 等. 城市棕地环境修复与再开发规划的国际经验[J]. 规划师, 2017 (3): 19-24.
- [6] 吴俭, 邓一荣, 肖荣波, 等. 当前我国污染地块环境管理

- 存在的问题与对策探析[J]. 环境监测管理与技术, 2018 (3): 1-3.
- [7]Maqsood I, Li J B, Huang G H, et al. Simulation-based risk assessment of contaminated sites under remediation scenarios, planning periods, and land-use patterns—A Canadian case study [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2005, 19(2): 146-157.
- [8]张丽娜, 姜林, 钟茂生, 等. 基于用地规划的大型污染场地健康风险评估[J]. 环境科学研究, 2015 (5): 788-795.
- [9]谷庆宝, 侯德义, 伍斌, 等. 污染场地绿色可持续修复理念、工程实践及对我国的启示[J]. 环境工程学报, 2015 (8): 4061-4068.
- [10]Han Q Y, Zhu Y M, Ke G Y, et al. An ordinal classification of brownfield remediation projects in China for the allocation of government funding [J]. *Land Use Policy*, 2018, 77: 220-230.
- [11]Ren W X, Xue B, Geng, Y, et al. Inventorying heavy metal pollution in redeveloped brownfield and its policy contribution: Case study from Tiexi District, Shenyang, China [J]. *Land Use Policy*, 2014, 38(2): 138-146.
- [12]余勤飞, 侯红, 吕亮卿, 等. 工业企业搬迁及其对污染场地管理的启示——以北京和重庆为例[J]. 城市发展研究, 2010, 17 (11): 95-100.
- [13]龙涛. 基于风险管控的污染地块修复模式概述[J]. 环境保护科学, 2016 (4): 36-39.
- [14]Rizzo E, Pesce M, Pizzol L, et al. Brownfield regeneration in Europe: Identifying stakeholder perceptions, concerns, attitudes and information needs [J]. *Land Use Policy*, 2015, 48: 437-453.
- [15]Green T L. Evaluating predictors for brownfield redevelopment [J]. *Land Use Policy*, 2018, 73: 299-319.
- [16]周聪惠, 成玉宁. 城市重度污染场地修复与改造的景观策略——以美国超级基金项目为例[J]. 城市发展研究, 2015 (9): 1-8.
- [17]Wu Q Y, Zhang X L, Liu C H, et al. The de-industrialization, re-suburbanization and health risks of brownfield land reuse: Case study of a toxic soil event in Changzhou, China [J]. *Land Use Policy*, 2018, 74: 187-194.
- [18]勇应辉, 许博涵, 王新军, 等. 结合控制性详细规划指标的城市场污染土壤修复[J]. 城市发展研究, 2014 (2): 91-97.
- [19]陈梦航. 污染场地健康与环境风险评估软件 (HERA) [J]. 中国科学院院刊, 2014 (3): 344, 335, 399.
- [20]生态环境部. 污染场地风险评估技术导则 (HJ 25.3—2014) [S]. 2014.
- [21]武晓峰, 谢磊, 赵洪阳. 土壤及地下水污染点不同暴露途径的健康风险比较[J]. 中国环境科学, 2012 (2): 345-350.
- [22]Fan C, Wang G S, Chen Y C, et al. Risk assessment of exposure to volatile organic compounds in groundwater in Taiwan [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(7): 2165-2174.
- [23]湛宏伟, 陈鸿汉, 刘菲, 等. 污染场地健康风险评估的实例研究[J]. 地学前缘, 2006 (1): 230-235.

(责任编辑: 冯胜军)

(上接170页)

(4)本研究中的建设期调价模型设计理念可类比至运营期, 即运营期调价机制触发时仅对覆盖运营成本的部分予以相应调整。☒

#### 参考文献:

- [1]周兰萍, 张留雨. PPP助力污水垃圾处理市场化——财政部等四部委455号文解读[J]. 城市建设, 2017 (18): 48-50.
- [2]Zhang S, Chan A P C, Feng Y B, et al. Critical review on PPP research—A search from the Chinese and international journals [J]. *International Journal of Project Management*, 2016, 34(4): 597-612.
- [3]逯元堂, 高军, 陈鹏. 落实《水污染防治行动计划》投融资思路与建议——对《水污染防治行动计划》的解读[J]. 环境保护科学, 2015 (3): 53-56.
- [4]Choi J H, Chung J, Lee D J. Risk perception analysis: Participation in China's water PPP market [J]. *International Journal of Project Management*, 2010, 28(6): 580-592.
- [5]Ke Y, Wang S Q, Chan A P C, et al. Understanding the risks in China's PPP projects: Ranking of their probability and consequence [J]. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2011, 18(5): 481-496.
- [6]邓小鹏, 熊伟, 袁竞峰, 等. 基于各方满意的PPP项目动态调价与补贴模型及实证研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009 (6): 1252-1257.
- [7]栾珺. 公式调整法和基准比价法结合的PPP项目调价研究[J]. 中国工程咨询, 2017 (2): 35-36.
- [8]孙庭. PPP模式中的调价机制研究[J]. 中国工程咨询, 2016 (11): 34-35.
- [9]张丹青. PPP项目价格调整机制研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2015.
- [10]王洪强, 张梦情, 程敏. PPP项目动态调价机制与利益相关方敏感性研究——以污水处理PPP项目为例[J]. 价格理论与实践, 2017 (8): 148-151.
- [11]高华, 孙赵航天, 程风华. 污水处理PPP项目价格形成与动态调整机制研究[J]. 价格理论与实践, 2016 (11): 130-133.
- [12]陈明道. PPP模式下污水处理厂调价机制研究[J]. 价值工程, 2018 (1): 68-71.
- [13]周丽媛. 垃圾焚烧发电PPP项目政府补贴价格决策模型研究[J]. 经济研究参考, 2017 (44): 30-34.

(责任编辑: 张海艳)