
苏州市高新区北部地下水重金属污染 特征及健康风险评估¹

林雪峰^{1,2}, 李勇¹, 孟无霜¹, 吴丛杨慧², 冒学宇^{1,2}

(1. 苏州科技大学, 江苏 苏州 215000;

2. 苏州市宏宇环境科技股份有限公司, 江苏 苏州 215100)

【摘要】以苏州市高新区北部区域地下水为研究对象,对区域内17个地下水监测点位进行采样,检测地下水样品中的pH以及砷、镉、铜、汞、铅、镍、六价铬的浓度值,利用单因子指数法和污染指数对检测结果进行评价,并采用风险评估模型进行健康风险评估。结果表明,研究区域内的地下水7种重金属平均含量均未超过ID类标准的限值,部分采样点存在重金属污染,但总体上污染程度较轻,且研究区域942%的地下水样品健康风险总值低于最大可接受值,对当地居民的健康的不利影响较小。

【关键词】苏州市高新区;地下水;重金属;健康风险评估

【中图分类号】X523 **【文献标志码】**A **【文章编号】**1007-7545(2021)03-0174-06

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.03.026

重金属对人体有害,在生物体内累积到一定程度会造成慢性中毒,持久性强,很难降解^[1-3],目前较为关注的一般是指As、Cd、Cu、Hg、Pb、Ni以及Cr等。地下水埋藏较深,自净能力弱,重金属一旦流入河流,污染就会迅速扩散,且地下水的污染很难预警。地下水是一种重要的战略资源,所以对地下水资源进行评价和管理有非常重大的现实意义^[4-6]。

近年来,国内外已经有非常多的学者对地下水的各方面进行了研究。ZHANG等^[7]研究发现,珠江三角洲83%的地下水水质良好,可饮用,岩溶含水层中的地下水的水质优于粒状含水层和承压含水层,是可饮用的。EMMANUEL等^[8]使用水化学,基于GIS的克里格插值法和多元统计方法对伏尔塔盆地北部边缘地区地下水样品进行了地球化学表征和评估。KHAIWAL等^[9]收集了昌迪加尔市的80个不同地点和不同深度的地下水样本并进行了水源识别和健康风险评估。MATTIA等^[10]提出了冰河沉积物中水相含水层几何重构和水动力参数化的一般方法,并将其应用到三维区域地下水流动模型中,并且发现校准的三维有限元地下水模型可以量化区域尺度上水文地质预算的主要组成部分,以及不同水文地质层单位之间的流动。本文从苏州市高新区北部区域内17个地下水监测点位进行采样,检测地下水样品中的pH以及砷、镉、铜、汞、铅、镍、六价铬的浓度值,利用单因子指数法和污染指数对检测结果进行评价,并采用风险评估模型进行健康风险评估。

¹收稿日期:2020-11-11

基金项目:科技部水体污染控制与治理科技重大专项项目(2017ZX07205-02)

作者简介:林雪峰(1995-),男,江苏盐城人,硕士研究生;**通信作者:**李勇(1969-),男,教授

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

采样区域处于江苏省苏州市高新区的北部区域，东部地势高，西部地势低，平均海拔高度为 5m，土壤性质较黏，地质比较稳定。研究区域东北与相城区毗邻，西部与东渚镇隔河相望，南部与浒光运河相连，水网密布，土地肥沃。

1.2 地下水样品的采集与分析

地下水样品主要来自潜水，井深为 4.5~6m。采用 RTK 中海达 5 代机设备对监测点位进行定位，采用 Geoprobe 钻机对地下水采样点钻孔，测量水位与井深，然后洗井，进行现场 pH 测试，基本理化性质达到稳定后采集 17 组地下水样品，采样点见图 1。同时采集现场的平行样，以保持结果的准确性。

pH 是现场检测，次数要至少连续三次以上，测得的 pH 的误差范围达到稳定标准 ± 0.1 以后方可停止。采集到的地下水样品放入 250mL 聚乙烯瓶中，加入适量硝酸，并将 pH 调到 2 以下。用便携式 pH 计来测试 pH，用分光光度法测定铬，电感耦合质谱法来检测砷、镓、铜、铅、镉，原子荧光法来测定汞。



图 1 采样点位分布图

2 样品测定结果及评价

2.1 地下水重金属含量特征

研究区域内 17 个地下水采样点的 7 种重金属测试结果如表 1 所示。可以发现，7 种重金属全部检出，砷、镉、铜、铅、汞、镓、六价铬的检出率分别为 76.5%、29.4%、76.5%、41.5%、23.5%、70.6%、5.9%，研究区域的东部汞、六价铬均未检出，其余均有检出。重金属元素含量平均值是镍 > 铜 > 砷 > 铅 > 铬 (VI) > 镉 > 汞。

表 1 地下水重金属含量统计

重金属名称	砷	镉	铜	铅	汞	镍	铬(VI)
最大值/ $(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	49.6	1.4	103	62.4	0.7	103	51
最小值/ $(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	ND*	ND*	ND*	ND*	ND*	ND*	ND*
平均值/ $(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	5.22	0.17	7.89	4.5	0.056	7.99	3

检出率/%	76.4	29.4	76.4	41.4	23.5	70.5	5.9
标准/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	10	5	1000	10	1	20	50
检出限/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.12	0.05	0.08	0.09	0.04	0.06	4

注：*ND 表示低于检测限值

从实验室分析结果来看，17 个采样点的 PH 在 6.6-8.13, 平均值为 7.43。对照《地下水质量标准》(GB14848—2017)^[11], 可以发现 14 个采样点位符合 III 类水标准，其中 7, 8, 9 这三个地下水采样点 As、Cd、Cu、Hg、Pb、Ni、Cr(M) 均未检出，17 个采样点中 Cu、Cd、Hg 检测值均超出 III 类水标准，As 元素的超标率为 11.7%，Pb、Ni、Cr(M) 的超标率均为 5.8%。6 号地下水采样点 As 浓度为 0.049mg/L, 符合 IV 类水标准，12 号地下水采样点 As 浓度为 0.012mg/L、Ni 浓度为 0.103mg/L、Cr(M) 浓度为 0.051mg/L, 符合 V 类水标准，13 号地下水采样点由于铅浓度为 0.062mg/L, 符合 IV 类水标准。

2.2 监测结果评价

2.2.1 单因子指数法评价

单因子指数评价方法是将地下水采样点中的各种污染因子实际浓度检测值与评价标准进行逐一对比，通过对比结果可很明显地看出地下水样品中哪些因子超标，还可以看出哪些因子是主要的污染因子^[12]，计算公式如下：

$$P_i = C_i / S_i$$

式中： P_i 是污染物的标准评价指数； C_i 是地下水采样点污染物的实际检测值； S_i 是污染物评价标准浓度。水质污染指数评价标准^[13]如下： $P_i \leq 1$ 非污染、 $1 < P_i \leq 2$ 轻度污染、 $2 < P_i \leq 3$ 中度污染、 $P_i > 3$ 严重污染。

由于 pH 和重金属污染物不同，是一个范围值。所以 pH 的标准指数用下面公式来计算：

$$P_i = (7.0 - \text{pH}) / (7.0 - \text{pH}_{\text{sd}}) \quad (\text{pH} \leq 7.0 \text{ 时})$$

$$P_i = (\text{pH} - 7.0) / (\text{pH}_{\text{su}} - 7.0) \quad (\text{pH} > 7.0 \text{ 时})$$

式中： P_i 是 pH 的标准指数；pH 是地下水采样点的实际检测值； pH_{sd} 为 pH 采用标准的下限值； pH_{su} 为 pH 采用标准的上限值。

根据计算所得的污染指数可以发现(总体数据见表 2), 在 17 个采样点位当中，6 号地下水采样点砷的单因子指数为 4.96, 大于 3, 存在严重污染；12 号地下水采样点的砷单因子指数为 1.25, 铬单因子指数为 1.02, 属于轻度污染，镍的单因子指数为 5.15, 属于严重污染，是主要的重金属污染因子，这是由附近金属工厂导致的；13 号地下水采样点铅的单因子指数为 6.24, 属于严重污染。这些点位已经产生了一定程度上的污染，需要引起一定的重视。

表 2 标准评价指数

污染物标准	砷	镉	铜	铅	汞	镍	铬
评价指数							
最大值	4.96	0.28	0.103	6.24	0.7	5.15	1.02
最小值	0.006	0.005	0.00004	0.0045	0.02	0.0083	0.04
平均值	0.524	0.039	0.0079	0.45	0.071	0.404	0.097

但是由于该评价方法计算比较简单，只是对单个污染因子进行了评价，所以最终结果不能客观反应当地地下水的整体质量情况，甚至可能会有相当大的偏差，所以，我们还需要计算综合的污染指数^[13]。

2.2.2 分级评分叠加指数法

利用地下水采样点的各项检测值计算得来的各点、各项目的标准污染指数，赋分评价(表 3),然后加权^[14-15]。污染指数 $P_i=F_1+F_2+F_3+F_4+F_5+F_6+F_7$, 这样我们可以得到每个采样点的污染指数，然后对照区域水质结果修正表(表 4),可以发现采样点的污染程度以及水质类别。

经过一系列计算之后，除了 6, 12, 13 号地下水采样点位的单因子污染指数大于 1，其余所有采样点的单因子污染指数均小于等于 1,可以得到除这三个地下水采样点以外，其余各点的 P_i 值均为 7,对照区域水质结果修正表可发现，各项组分均未超过标准值。5 号地下水采样点位砷的污染指数 $1 < P_i \leq 5$, 所以砷因子评分为 100, 即 5 号点的 P_i 值为 106 ($100 < P_i \leq 10^4$)。受到了一定程度上的轻污染。12 号地下水采样点位的砷的污染指数 $1 < P_i \leq 5$, 镍的污染指数 $5 < P_i \leq 10$, 铬的污染指数 $1 < P_i \leq 5$, 所以 12 号地下水采样点的 P_i 值为 10204 ($10^4 < P_i \leq 10^6$)，属于中污染，且重金属污染种类较多。13 号地下水采样点铅的污染指数 $5 < P_i \leq 10$, 所以它的污染指数为 10006 ($10^4 < P_i \leq 10^6$)，属于中污染。

表 3 赋分评价表

P_i	$P_i \leq 1$	$1 < P_i \leq 5$	$5 < P_i \leq 10$	$10 < P_i \leq 50$	$P_i > 20$
单点各因子评分 F	1	100	10^4	10^6	10^8

表 4 区域水质结果修正表

P_i 值	与标准值相比较	污染程度
$1 < P_i \leq 100$	各项组分均未超过标准值	I, 未受污染
$100 < P_i \leq 10^4$	各组分中至少有一项是标准值的 1~5 倍	II, 轻污染
$10^4 < P_i \leq 10^6$	各组分中至少有一项是标准值的 5~10 倍	III, 中污染
$10^6 < P_i \leq 10^8$	各组分中至少有一项是标准值的 10~50 倍	IV, 重污染
$P_i > 10^8$	各组分中至少有一项是标准值的 50 倍以上	V, 严重污染

3 健康风险评估

3.1 健康风险计算方法

90%重金属元素都是通过饮用途径被人体摄入的，所以本研究只考虑饮用途径对当地居民的健康评估^[16-18]。健康风险总值是通过非致癌化学物质总值加上致癌化学物质总值得来的^[19]。本研究中 Cr、As、Cd 属于化学致癌物质，Pb、Cu、Hg、Ni 属于非化学致癌物质^[20-21]。

3.2 确定模型参数

$$CDI = W \times C_i / A$$

致癌物: $R_i=1-\exp(-\text{CDI}\times Q_i)/L$

非致癌物: $R_j=\text{CDI}/L$

$R=\sum (R_i+R_j)$

式中: CDI 为成人每天污染物的摄入量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$); W 为成人每天的饮水量, $W=2.2\text{L}/\text{d}$; A 为成人人均体重, $A=643\text{kg}$; C_i 是通过饮用被人体摄入的重金属污染物质量浓度 (mg/L); R_i 是化学致癌污染物 j 的健康危害风险值; R_j 为化学非致癌污染物 j 的健康危害风险值; Q_i 为化学致癌污染物 i 通过饮用进入人体的致癌强度系数 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$), Cr、As、Cd、Pb、Cu、Hg、Ni 分别取 4.1、15、6.1、0.0014、0.005、0.003、0.02 $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{d})^{[22-24]}$; L 是苏州居民人平均寿命, $L=76\text{a}$ 。

从表 5 可以发现, 通过饮用方式进入人体中的非致癌污染物年均危险范围是 $0\sim 9.27\times 10^{-5}$; 致癌物年平均危险风险范围是 $0\sim 1.81\times 10^{-4}$; 重金属由饮用途径进入人体总的风险范围为 $0\sim 274\times 10^{-4}$ 。

ICRP 提出的年最大可接受值^[25]为 5.0×10^{-5} , 研究区域内有且仅有 12 号地下水采样点的健康危害风险值为 $274\times 10^{-4}\text{a}^{-1}$, 超过此值, 剩余 16 个地下水采样点的风险总值均小于最大可接受水平。USEPA 规定, 小型人群能接受的风险总值^[26]为 $10^{-5}\sim 10^{-4}\text{a}^{-1}$ 。17 个地下水采样点中, 有 10 个采样点的总值大于 10^{-5}a^{-1} , 其中有且仅有一个采样点大于 10^{-4}a^{-1} 。

表 5 非化学致癌物和化学致癌物的
健康危害风险值/ a^{-1}

点位	非化学致癌物	化学致癌物	R
1	1.12548E-06	1.17448E-05	1.28703E-05
2	1.06245E-06	7.05091E-06	8.11336E-06
3	6.88794E-07	3.12961E-05	3.19849E-05
4	1.18851E-06	1.81527E-05	1.93412E-05
5	1.27855E-06	4.21379E-05	4.34165E-05
6	1.90431E-06	3.34517E-05	3.53560E-05
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	155225E-05	1.55225E-05
11	3.54301E-06	2.23055E-05	2.58485E-05
12	9.27396E-05	1.81784E-04	2.74524E-04
13	3.9797E-05	a295E-06	4.30926E-05
14	2.78219E-06	5.7387E-06	8.52089E-06
15	6.93296E-06	1.46653E-05	2.15983E-05
16	1.05615E-06	8.77582E-06	9.83197E-06
17	1.39109E-06	4.38864E-06	5.77974E-06
最大值	9.27396E-05	1.81784E-04	2.74524E-04
最小值	0	0	0
平均值	9.14648E-06	2.35476E-05	3.26941E-05

4 结论

1) 17个地下水采样点As、Cd、Cu、Hg、Pb、Ni、Cr(M)七种重金属元素全部检出,平均浓度均符合《地下水质量标准》(GB 14848—2017)中的Ⅲ类水要求,有3个采样点水质类别超过了Ⅲ类水,超标率为17.6%,重金属元素的浓度平均值镍>铜>砷>铅>铬>镉>汞。

2) 研究区域地下水重金属污染指数均值为As(0.524)>Pb(0.45)>Ni(0.404)>Cr(0.097)>Hg(0.071)>Cd(0.039)>Cu(0.0079),其中As、Pb、Ni、Cr(V)存在点源污染,Cd、Cu、Hg无污染。6号地下水采样点由于As污染指数为4.96,属于轻污染;12号地下水采样点由于As、Ni、Cr污染指数分别为1.25,5.15,1.02,属于中污染;13号采样点由于Pb污染指数为6.24,大于5属于中污染。研究区域的地下水水质整体良好,但是个别采样点的个别重金属元素含量出现了超标,需要引起一定的重视。

3) 研究区域内的致癌物As、Cd、Cr(V)和非致癌物Pb、Ni、Hg、Cu均低于最大可接受水平,致癌物As的健康风险值大于Cr(M)和Cd。且研究区域内河流众多,应当把重金属As放在首位,优先治理,避免在饮用途径中对人类身体健康产生伤害。

参考文献

[1] ZHANG Y, LI F D, LI J, et al. Spatial distribution, potential sources, and risk assessment of trace metals of groundwater in the North China Plain [J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2015, 21(3) : 726-743.

[2] 刘菲, 王苏明, 陈鸿汉. 欧美地下水有机污染调查评价进展[J]. 地质通报, 2010, 29(6) : 907-917.

LIU F, WANG S M, CHEN H H. Progress in investigation and evaluation of groundwater organic pollution in Europe and America [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(6) : 907-917.

[3] 曾妍妍, 周殷竹, 周金龙, 等. 地下水水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.

ZENG Y Y, ZHOU Y Z, ZHOU J L, et al. Groundwater Hydrology [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009.

[4] WONGSASULUK P, CHOTPANIARAT S, SIRIWONG W. Heavy metal contamination and human health risk assessment in drinking water from shallow groundwater wells in an agricultural area in Ubon Ratchathani province, Thailand [J], Environmental Geochemistry and Health, 2014, 36(1) : 169-182.

[5] 朱青青, 王中良. 中国主要水系沉积物中重金属分布特征及来源分析[J]. 地球与环境, 2002, 40(3) : 305-313.

ZHU Q Q, WANG Z L. Distribution characteristics and sources of heavy metals in main stream sediments of China [J]. Earth and Environment, 2002, 40(3) : 305-313.

[6] 魏亚强, 陈坚, 文一, 等. 中国地下水污染模拟预测标准体系研究现状[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(11) : 1387-1392.

WEI Y Q, CHEN J, WEN Y, et al. Research status of groundwater pollution simulation and prediction standard system in China [J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41(11) : 1387-1392.

[7] ZHANG F G, HUANG G X, HOU Q X, et al. Groundwater quality in the Pearl River Delta after the rapid expansion

of industrialization and urbanization: Distributions, main impact indicators, and driving forces[J]. Journal of Hydrology, 2019, 22(4) : 143-171.

[8]D S, MAHAMUDA A, MUSAH S Z, et al. Hydro geochemical characterization and assessment of groundwater quality in the Kwahu-Bombouaka Group of the Voltaian Supergroup, Ghana [J]. Journal of African Earth Sciences, 2020, 22(1) : 26-43.

[9]KHAIWAL R, PARTEEK S T, SAHIL M, et al. Evaluation of groundwater contamination in Chandigarh: Source identification and health risk assessment[J]. Environmental Pollution, 2019, 12(3): 112-143.

[10]MATTIA D C, ROBERTA P, GIOVANNI B, et al. A regional-scale conceptual and numerical groundwater flow model in fluvio-glacial sediments for the Milan Metropolitan area [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2020, 21(3) : 26-43.

[11]国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 地下水质量标准(GB/T14848—2017) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Management Committee. Ground water Quality Standard (GB/T 14848 — 2017) [S]. Beijing:Standards Press of China, 2017.

[12]韩君, 徐应明, 温兆飞, 等. 重庆某废弃电镀工业园农田土壤重金属污染调查与生态风险评价[J]. 环境化学, 2014, 33(3):432-439.

HAN J, XU Y M, WEN Z F, et al. Investigation and ecological risk assessment of heavy metal pollution in agriculture soil of an abandoned electroplating industrial park of Chongqing, China[J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(3) : 432-439.

[13]张毅博, 赵剑斐, 黄涛, 等. 基于地统计分析的老旧工业园农田区域地下水重金属空间分布及风险评价[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(12): 258-264.

ZHANG Y B, ZHAO J F, HUANG T, et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in groundwater of old industrial park based on geostatistical analysis[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(12): 258-264.

[14]张静, 王建英, 郑春丽, 等. 北方某稀土尾矿库周边地下水污染特征与评价[J]. 稀土, 2018, 39(1): 41-49.

ZHANG J, WANG J Y, ZHENG C L, et al. Characteristics and evaluation of groundwater pollution around a rare earth tailings pond in North China [J]. Chinese Rare Earths, 2018, 39(1) : 41-49.

[15]李立军, 马力, 张晶, 等. 吉林省松原市地下水污染评价及污染因素分析[J]. 地球学报, 2014, 35(2):156-162.

LI L J, MA L, ZHANG J, et al. Evaluation of groundwater pollution and analysis of pollution factors in Songyuan city, Jilin province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35(2):156-162.

-
- [16]韩国睿. 成都某地区地下水环境健康风险评估研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- HAN G R. Study on environmental health risk assessment of ground water in a certain area of Chengdu[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [17]隋文斌. 地下水环境健康风险评估方法与实例分析[D]. 长春: 长春工业大学, 2012.
- SUI W B. Study on groundwater environmental health risk assessment method and case analysis [D]. Changchun: Changchun University of Technology ,2012.
- [18]LUO X S, DING J, XU B, et al. Incorporating bio accessibility into human health risk assessments of heavy metals in urban park soils [J]. Science of the Total Environment,2012,424(4) : 88-96.
- [19]毛宽振. 典型矿区地下水重金属关联特征及污染风险评估[D]. 石家庄: 石家庄经济学院, 2014.
- MAO K Z. Association characteristics and pollution risk assessment of heavy metals in groundwater in typical mining areas of Changchun University of Technology[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Institute of Economics, 2014.
- [20]张越男, 李忠武, 陈志良, 等. 大宝山尾矿库区及其周边地区地下水重金属健康风险评估研究[J]. 农业环境科学学报,2013, 32(3):587-594.
- ZHANG Y N, LI Z W, CHEN Z L, et al. Study on health risk assessment of heavy metals in groundwater of Dabaoshan tailings reservoir and its surrounding areas[J]. Journal of Agricultural Environmental Sciences, 2013, 32(3):587-594.
- [21]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): 1330-1339.
- DUAN X L, WANG Z S, LI Q, et al. Study on health risk of heavy metal exposure in water based on measured parameters[J]. Environmental Science,2011, 32(5):1330-1339.
- [22]任晓霞, 张鸣之, 韩明伟, 等. 咸阳市地下水饮用水源地的水环境评价[J]. 环境工程, 2019, 37(4) :17-21.
- REN X X, ZHANG M Z, HAN M W, et al. Water environment assessment of groundwater source in Xianyang city [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(4): 17-21.
- [23]张芳, 常春平, 李静, 等. 胶东半岛农村地区地下水重金属健康风险评估——以山东省莱阳市为例[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(9):180-186.
- ZHANG F, CHANG C P, LI J, et al. Health risk assessment of heavy metals in groundwater in rural areas of Jiaodong peninsula: A case study of Laiyang city, Shandong province[J]. Environmental Science and Technology, 2013, 36(9) : 180-186.
- [24]徐魁伟, 高柏, 刘媛媛, 等. 某铀矿山及其周边地区地下水重金属健康风险评估[J]. 有色金属(冶炼部分), 2017(8): 66-70.

XU K W, GAO B, LIU Y Y, et al. Health risk assessment of heavy metals in groundwater of a uranium mine and its surrounding areas[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy) ,2017(8): 66-70.

[25]王兵. 铬渣堆场周边土壤中重金属污染及风险评估[J]. 有色金属(冶炼部分),2018(4):81-86.

WANG B. Pollution and risk assessment of heavy metals in soil around chromium slag yard [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy) ,2018(4): 81-86.

[26]李志刚,周志华,李少艾,等. 深圳市大气中多环芳烃的污染特征与来源识别[J]. 中国环境科学,2011,31(9): 1409-1415.

LI Z G, ZHOU Z H, LI S A, et al. Pollution characteristics and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere of Shenzhen[J]. Chinese Environmental Science,2011,31(9): 1409-1415.