郭晓欣，张超艳，熊杰，等. 铬盐厂重金属生物可给性及健康风险研究[J]. 环境科学与技术，2024，47(S1)：175-180. Guo Xiaoxin，Zhang Chaoyan，Xiong Jie，et al. Bioaccessibility and health risk of heavy metals in a chromium salt plant[J]. Environmental Science & Technology，2024，47(S1)：175-180.

铬盐厂重金属生物可给性及健康风险研究

郭晓欣[1]，张超艳[1]，熊杰[1]，范婧婧[1,2]，周友亚[1*]
（1.生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心，北京 100012；
2.河北师范大学化学与材料科学学院，河北 石家庄 050024）

摘 要：文章以某铬盐厂污染土壤中的铬（Cr）、镍（Ni）、铜（Cu）、铅（Pb）为目标物，采用德国标准研究院体外法（DIN-19738），研究了不同进食状况对重金属生物可给性的影响；基于生物可给性，计算了经口摄入途径下场地超标污染物Cr的暴露量及人体健康风险。研究结果表明：场地土壤中检出的4种重金属只有Cr超标，浓度范围在9.06×10^3~8.07×10^4 mg/kg之间；Pb、Ni和Cr肠相中生物可给性低于胃相，而Cu肠相中生物可给性高于胃相；Cr和Ni在禁食下的生物可给性高于进食条件下的生物可给性，Pb和Cu则正好相反；基于生物可给性计算土壤中Cr暴露量和人体健康风险均有不同程度的降低。

关键词：重金属； 生物可给性； DIN体外法
中图分类号：X524 **文献标志码**：A **doi**：10.19672/j.cnki.1003-6504.2420.23.338 **文章编号**：1003-6504(2024)S1-0175-06

Bioaccessibility and Health Risk of Heavy Metals in a Chromium Salt Plant

GUO Xiaoxin[1]，ZHANG Chaoyan[1]，XIONG Jie[1]，FAN Jingjing[1,2]，ZHOU Youya[1*]
（1. Technical Centre for Soil, Agriculture and Rural Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China;
2. College of Chemistry and Material Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China）

Abstract: Taking chromium (Cr), nickel (Ni), copper (Cu), and lead (Pb) in the contaminated soil of a chrome salt factory as the target, the deutsches institut für normung (DIN-19738), the effects of different feeding conditions on the bioavailability of heavy metals were studied. Based on the bioavailability of Cr, human health risks under the oral intake exposure pathway were calculated. The results showed that only Cr was detected in the soil of the site, and the concentration ranged from 9.06×10^3 to 8.07×10^4 mg/kg; the bioavailability in the enteric phase was lower than that in the gastric phase for Pb, Ni and Cr, and higher than that in the gastric phase for Cu; the bioavailability in fasting was higher than that in feeding for Cr and Ni, and vice versa for Pb and Cu; and the bioavailability based on the bioavailability of Cr was higher than that of Cr and Ni in fasting, and vice versa for Cu. The opposite was true for Pb and Cu; Cr exposures and human health risks in soil based on bioavailability were reduced to varying degrees.

Key words: heavy metal; bioaccessibility; DIN *in vitro* method

工业企业生产与排放活动会产生大量含重金属的废水废渣，因其不易挥发在土壤中易累积造成污染[1-3]。土壤中的重金属通过人体手-口接触或食物链传递[4,5]对人体产生危害作用，如Pb干扰血红蛋白合成，Cr损害呼吸道及身体器官，Ni作为常见致敏金属引发过敏性皮炎等。经口摄入是重金属进入人体的主要途径[6]，研究表明儿童土壤摄入量达37~207 mg/d，成人土壤摄入量达23~625 mg/d[7]。美国环保署（EPA）根据有关研究提出儿童每日误食土壤的摄入量为200 mg/d，成人为100 mg/d，异食癖患者高达1 000~5 000 mg/d[8]。以往研究人员常基于土壤中重金属的总量评估其人体暴露风险，但实际上受土壤理化性质、重金属在土壤中的赋存形态、重金属赋存基质及人体消化代谢的影响[9-11]，重金属不能完全溶解被人体吸收[12,13]，因此基于土壤中重金属总量计算人体健康风险可能会偏高。为解决这一问题，研究人员提出了基于模拟人体胃肠消化过程的生物可给性测试，并以污染物生物可给性浓度作为暴露浓度开展健康风

《环境科学与技术》编辑部：（网址）http://fjks.chinajournal.net.cn（电话）027-87643502（电子信箱）hjkxyjs@vip.126.com
收稿日期：2023-02-27；修回2023-05-10
基金项目：国家自然科学基金项目（41977377）；国家重点研发计划（土壤专项）项目（2018YFC1803001）
作者简介：郭晓欣（1992-），女，工程师，硕士，研究方向为污染场地调查及风险评估，（电子信箱）guoxx2017@126.com；*通讯作者，（电子信箱）zhou_yy69@163.com。

险评估[14-16]。目前常用体外法来模拟人体消化器官及消化环境测定重金属从基质(如土壤、食物等)释放到胃肠液中的量,通过测定释放量与总量的比值,预测土壤中重金属的生物可给性(亦称生物利用度)[17,18],常见的体外法有IVG(*in vitro* gastrointestinal)、SBET(simplified bioaccessibility extraction test)等。

近几年大量科研工作者通过体外法研究土壤中重金属生物可给性:Pelfrêne等[19]采用UBM法评估了冶炼厂附近农田表层土壤中胃阶段Cd、Pb和Zn的生物可给浓度平均值分别为总浓度的82%、55%和33%,肠阶段3种重金属的生物利用度分别降低至45%、20%和10%;Schroder等[20]采用IVG体外法测定了土壤中Pb的生物可给性,探究了面团添加对Pb的生物可给性影响,结果发现较之不添加面团(胃:32.2%,肠:1.06%),添加面团会降低胃肠相中Pb的生物可给性(胃:23.0%,肠:0.56%);钟茂生等[21]使用UBM法研究了大连和株洲土样中Pb的生物可给性,由于胃相较低的pH,Pb在胃相的生物可给性明显高于肠相;Li等[22]采用4种体外法(UBM、SBRC、IVG和PBET)测定了土壤中镉(Cd)的生物可给性,在考虑生物可给性的情况下镉的风险将减少43%;Luo等[23]基于SBET法获取了城市土壤中多种金属(Cd、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb和Zn)的生物可给性系数并进行人体健康风险评估,结果表明区分土地利用类型基于生物可给性计算土壤重金属的健康风险会更加客观。周友亚课题组[24,25]使用德国标准研究院颁布的生物可给性测试方式(DIN)研究了多个焦化厂土壤中多环芳烃的生物可给性,研究结果表明考虑生物可给性后多环芳烃的人体健康明显降低。DIN法[26]可适用于重金属和多环芳烃生物可给性的测试,为了进一步验证DIN法对重金属污染物的适用性,本研究拟选择某铬盐污染场地进行相关研究。

铬污染地块在我国是一类非常典型的污染地块[27,28]。虽六价铬的毒性远大于三价铬,但三价铬与六价铬可以相互转换[29],故基于土壤中总铬进行研究更加客观。本研究将采用DIN法对某铬盐污染场地土壤中Cr、Ni、Cu和Pb进行生物可给性测试,研究不同进食情况对重金属生物可给性的影响;基于重金属Cr生物可给性计算场地土壤重金属暴露剂量及人体健风险,为科学评估土壤中重金属人体健康风险评估提供实验支撑。

1 实验方法

1.1 场地概述

实验土壤来自某铬盐化工厂(以下简称"铬盐厂"),该厂成立于1976年,主要从事铬盐生产活动,2014年停产,占地面积约158 793.33 m^2,未来拟规划为工业用地,属于《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600-2018)[30]中规定的第二类用地类型。

1.2 样品采集及预处理

使用木铲采集不同点位0~20 cm表层土壤(其中S1~S5点位分别位于闲置空地、煤场(图1)。软水处理车间、浸取车间、铬渣库;S6、S7点位于地块主生产区;S8、S9位于办公区和桶库泵房区)。土壤经处理后用于土壤理化性质测定、消解试验及重金属生物可给性研究。

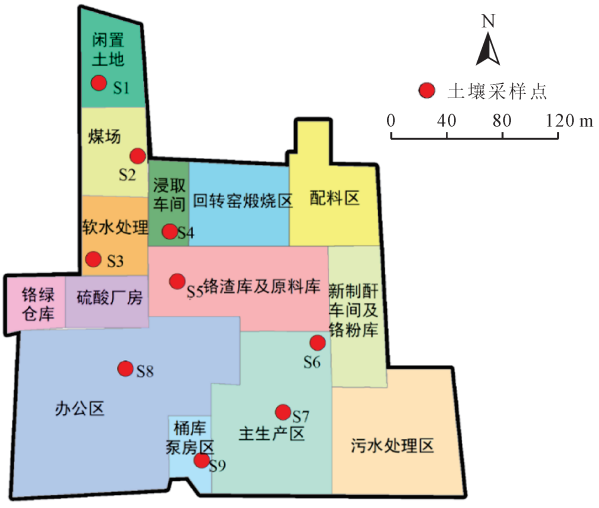


图1 场地采样点位布设

1.3 实验材料与方法

1.3.1 实验材料

生物试剂:胃蛋白酶(Pepsin)、胰酶(Pancreatin)、胆盐(Bile)均为猪源;黏蛋白(Mucin),猪源;胰蛋白酶(Trypsin),牛源。无机试剂:碳酸氢钠、氯化镁、氯化钠、氯化钾、氯化钙、磷酸二氢钾(至少为分析纯);浓盐酸(优级纯);高氯酸(分析纯);硝酸(分析纯);氢氟酸(优级纯)。其他:尿素(优级纯)、雀巢奶粉、苹果。

1.3.2 生物可给性试验方法

采用DIN法测试土壤中重金属生物可给性,消化液成分及方法参数如表1所示。

胃相(gastric phase,GP):将土壤与模拟胃液(配比见表1)混合于容器中,加入5 g奶粉模拟食物对提取过程的影响。用10% HCl溶液调节模拟胃相的初始pH为2,每30 min监测一次pH值,使胃液pH维持在2~4,若有偏离用10% HCl溶液或固体$NaHCO_3$粉末调节,在37 ℃恒温下震荡2 h。取胃阶段的反应液,在7 000 r/min离心15 min,过0.22 μm滤膜,4 ℃保存待测。

肠相(intestinal phase,IP):胃相提取完成后,加入

表1　模拟胃肠液的配制及提取条件

消化部位	无机试剂	生物试剂	pH	固液比	提取时间
胃相	NaCl，2.9 g·L^{-1} KCl，0.7 g·L^{-1} KH_2PO_4，0.27 g·L^{-1}	Pepsin，1.0 g·L^{-1} Mucin，3.0 g·L^{-1}	2~4	1∶50	2 h
肠相	KCl，0.3 g·L^{-1} $CaCl_2·2H_2O$，0.5 g·L^{-1} $MgCl_2·6H_2O$，0.2 g·L^{-1} Urea（有机物），0.3 g·L^{-1}	Bile，9.0 g·L^{-1} Pancreatin，9.0 g·L^{-1} Trypsin，0.3 g·L^{-1}	7.5	1∶100	3 h

等体积的模拟肠液，用固体$NaHCO_3$粉末调节pH至7.5至肠相环境，每15 min监测一次使pH稳定在7.5±0.2，37 ℃恒温震荡3 h。取肠阶段的反应液，在7 000 r/min离心15 min，过0.22 μm滤膜，4 ℃保存待测。

1.4　数据处理

1.4.1　重金属可给性

土壤重金属在模拟胃相或肠相的生物可给性（Bio）计算公式如下：

$$C_{Bio}=(C\times V)/m \quad (1)$$

$$Bio=C_{Bio}/C_o\times 100\% \quad (2)$$

式（1）、（2）中，C_{Bio}为土壤重金属在胃或肠阶段的溶解量，mg/kg；C为重金属在模拟胃液或肠液中的浓度，mg/L；V为模拟胃液或肠液的体积，L；m为试验的土壤量，kg；Bio为土壤重金属在模拟胃相或肠相中的生物可给性，%；C_o为土壤中重金属的总量，mg/kg。

1.4.2　风险评估

对于以经口摄入为主要暴露途径的重金属，其土壤暴露量及致癌风险计算方法如下：

经口摄入土壤途径致癌效应的土壤暴露量：

$$OISER_{ca}=\frac{OSIR_a\times ED_a\times EF_a}{BW_a\times AT_{ca}}\times ABS_o\times 10^{-6} \quad (3)$$

经口摄入土壤途径的致癌风险：

$$CR_{ois}=OISER_{ca}\times C_{sur}\times SF_o \quad (4)$$

式中，$OISER_{ca}$为经口摄入土壤暴露量（致癌效应），kg（土壤）/（kg（体重）·d）；CR_{ois}为经口摄入土壤途径的致癌风险，无量纲；C_{sur}为表层土壤中污染物浓度，mg/kg；其他相关参数见表2。ABS_o为经口摄入吸收因子，当以土壤中污染物全量进行风险评估时，根据国家导则HJ 25.3−2019[31]规定ABS_o=1，当采用生物可给性作为评估因子时，ABS_o在数值上等于Bio。

表2　风险评估参数及推荐数值

序号	参数	定义	单位	第二类用地推荐值	数据来源
1	SF_o	经口摄入致癌斜率因子	mg·kg^{-1}·d^{-1}	0.5	
2	$OSIR_a$	成人每日摄入土壤量	mg	100	HJ 25.3−2019[31]
3	AT_{ca}	致癌效应平均时间	d	27 740	
4	ED_a	成人暴露期	a	25	
5	ABS_o	经口摄入吸收因子	无量纲	−	−
6	EF_a	成人暴露频率	d·a^{-1}	250	HJ 25.3−2019[31]
7	BW_a	成人体重	kg	61.8	

2　结果与讨论

2.1　场地污染特征

通过消解试验测定了9个土壤样品中Cr、Ni、Cu、Pb的总浓度，测试结果如表3所示。实验结果表明，所测土壤中重金属Cr超出《北京市场地土壤环境风险评价筛选值》（DB11/T 811−2011）[32]中工业/商服用地筛选值，而Ni、Cu、Pb含量均未超过GB 36600−2018[30]中的第二类筛选值。

表3　试验土壤重金属含量与相关数值　(mg/kg)

重金属	实测范围	筛选值	筛选值来源
Cr	9.06×10^3~8.07×10^4	2 500	DB11/T 811−2011
Ni	30.6~662	900	
Cu	37.3~213	18 000	GB 36600−2018
Pb	18.0~76.0	800	

2.2　重金属生物可给性

4种重金属胃肠相生物可给性如图2所示。结果表明，胃相中土壤Cr、Ni、Cu、Pb的生物可给性范围分别为2.10%~74.60%、8.20%~40.94%、1.95%~24.32%、0.30%~10.98%。肠相中Cr、Pb和Ni的生物可给性均低于胃相中的，3种重金属在肠相中的生物可给性范围分别为1.19%~48.89%、0.01%~4.03%、0.43%~22.49%；而Cu在肠相中的生物可给要高于胃相中的生物可给性，其范围在7.48%~63.02%之间。

重金属Cr、Pb和Ni在胃相中的生物可给性高于肠相可能是胃、肠相pH环境不同导致。模拟胃相的强酸环境有利于土壤重金属溶出；而肠相的弱碱性环境与溶解的金属离子发生化学反应，以沉淀的形式再

次被固定，从而降低生物可给性。Oomen等[33]用5种不同的方法测试土壤中重金属生物可给性时发现，尽管不同方法间参数存在差异，但胃相pH较低的体外法对应的重金属生物可给性明显较高。Li等[34]研究发现，肠相中的弱碱性环境可能导致重金属在肠相发生共沉淀或再吸附，进而降低重金属的生物可给性。Cu在肠相阶段的生物可给性高于胃相阶段，这是因为Cu^{2+}与胃液中的胃蛋白酶形成比较稳定的络合物，使Cu^{2+}在胃液中的溶液度低于肠液，生物可给性降低[35,36]。

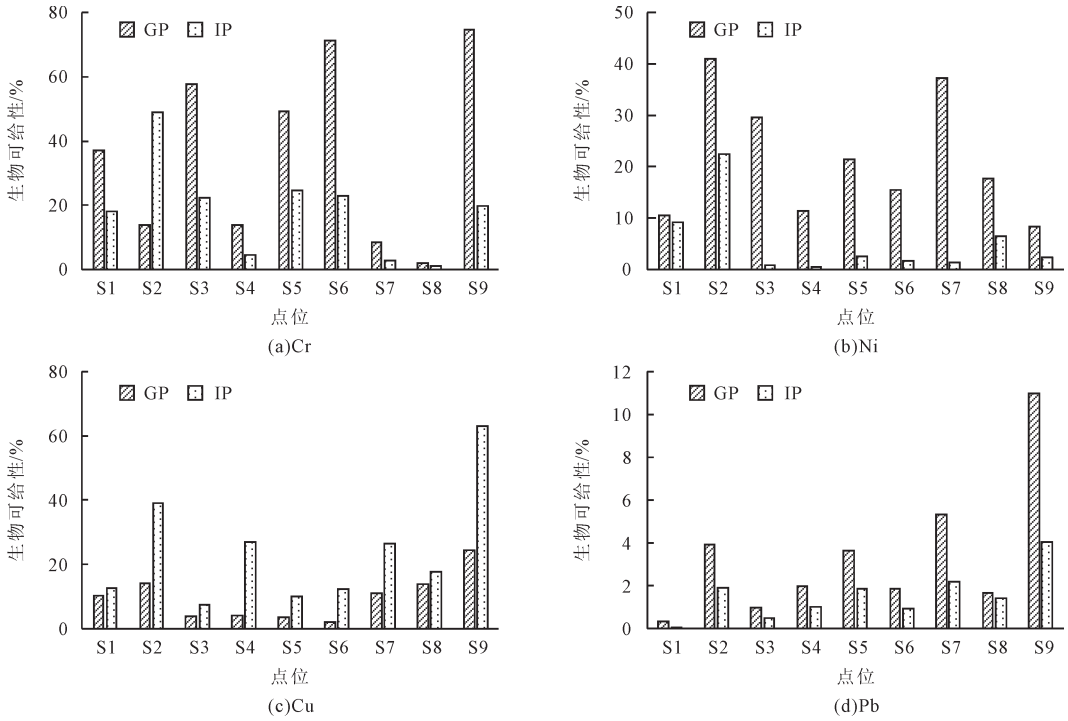


图2 4种重金属在胃肠相的生物可给性

2.3 进食情况对重金属生物可给性的影响

选取S9点位土样作为实验土壤，在添加奶粉、苹果和禁食情况下研究4种重金属的生物可给性情况，结果如表4所示。结果表明，重金属Cr和Ni在不同进食情况下的生物可给性大小为禁食>奶粉>苹果。这可能是由于空腹时溶液基质简单，金属溶解后能够稳定存在，而添加食物的情况下，溶液基质相对复杂，可能存在重金属与溶液中共存成分进一步反应，以吸附或共沉淀形式降低其在溶液中的生物可给性。Cr和Ni在进食奶粉和苹果2种情况下生物可给性的差异可能与食物成分有关，奶粉中蛋白质对金属离子可以吸附络合，促进金属从土壤中解析，使其生物可给性略大于添加水果的可给性。

重金属Pb和Cu均在添加奶粉时生物可给性最大，可能是奶粉中的蛋白质对土壤中Cu和Pb的络合作用促使金属蛋白络合物的形成，使Cu和Pb的生物可给性大于添加苹果和禁食的情况。添加苹果和禁食对Cu和Pb生物可给性影响不同。根据Irving-Willimas序列，Pb离子络合力低于Cu离子，而苹果中富含—OH和—COOH等官能团的维C、多酚、苹果酸等物质可与Cu离子络合，提高Cu的生物可给性，因此，在添加水果的情况下Cu的生物可给性较高，而禁食状态下生物可给性较低。

表4 不同进食情况下S9点位4种重金属的生物可给性 (%)

进食情况	BioCr	BioNi	BioCu	BioPb
奶粉	74.60	8.20	63.02	10.98
苹果	67.57	6.11	56.74	0.03
禁食	77.53	8.45	54.62	0.06

2.4 土壤中重金属Cr的暴露量及风险计算

基于总量和生物可给性使用污染场地暴露评估模型和人体健康风险评估模型计算土壤中Cr(仅计算场地超标污染物)的暴露量和致癌风险，结果如表5所示。结果表明，基于生物可给性计算Cr的土壤暴露量和致癌风险均有不同程度的降低，其中土壤暴露量可降低1~2个数量级；致癌风险可降低1个数量级。基于重金属生物可给性进行健康风险评估，可在一定程度上克服现有技术导则计算健康风险过于保守的问题。

表5　重金属Cr的土壤暴露量与致癌风险

点位	土壤暴露量/(mg·kg^{-1}·d^{-1})		致癌风险	
	ABS_o=1	ABS_o=Bio	ABS_o=1	ABS_o=Bio
S1	3.65×10^{-7}	1.35×10^{-7}	1.47×10^{-2}	5.45×10^{-3}
S2	3.65×10^{-7}	5.11×10^{-8}	6.76×10^{-3}	9.48×10^{-4}
S3	3.65×10^{-7}	2.10×10^{-7}	1.23×10^{-2}	7.06×10^{-3}
S4	3.65×10^{-7}	5.08×10^{-8}	1.93×10^{-3}	2.69×10^{-4}
S5	3.65×10^{-7}	1.80×10^{-7}	1.03×10^{-2}	5.08×10^{-3}
S6	3.65×10^{-7}	2.60×10^{-7}	6.09×10^{-3}	4.34×10^{-3}
S7	3.65×10^{-7}	3.09×10^{-8}	3.30×10^{-3}	2.79×10^{-4}
S8	3.65×10^{-7}	7.66×10^{-9}	8.42×10^{-3}	1.77×10^{-4}
S9	3.65×10^{-7}	2.72×10^{-7}	1.65×10^{-3}	1.23×10^{-3}

3　结论

(1)因场地一直从事铬盐相关生产活动,土壤受重金属Cr污染较严重,其浓度范围在9.06×10^{3}~8.07×10^{4} mg/kg之间,超过第二类建设用地土壤污染风险筛选值。

(2)因Cr、Ni和Pb受胃液的酸性环境影响较大,使其在胃相中的生物可给性均高于肠相;重金属Cu受肠液成分影响,其生物可给性在肠相中显著高于胃相。

(3)重金属Cr和Ni在禁食下的生物可给性最大;进食情况下,添加奶粉的生物可给性大于添加苹果的生物可给性,符合禁食>奶粉>苹果的顺序。重金属Pb和Cu均在添加奶粉时生物可给性最大;苹果和禁食对两者生物可给性影响差异不大。

(4)基于生物可给性计算土壤中Cr的暴露量及健康风险会更客观,可在一定程度上克服现有技术导则基于重金属总量计算风险偏高的问题。

[参考文献]

[1] Ji W C, Yang T T, Ma S, et al. Heavy metal pollution of soils in the site of a retired paint and ink factory[J]. Energy Procedia, 2012,16:21-26.

[2] Li Z Y, Ma Z W, van der Kuijp T J, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment[J]. The Science of the Total Environment, 2014,468/469:843-853.

[3] Zhang W G, Feng H, Chang J N, et al. Heavy metal contamination in surface sediments of Yangtze River intertidal zone: an assessment from different indexes[J]. Environmental Pollution, 2009,157(5):1533-1543.

[4] Liu B L, Ai S W, Zhang W Y, et al. Assessment of the bioavailability, bioaccessibility and transfer of heavy metals in the soil-grain-human systems near a mining and smelting area in NW China[J]. The Science of the Total Environment, 2017,609:822-829.

[5] Huang B, Shi X Z, Yu D S, et al. Environmental assessment of small-scale vegetable farming systems in peri-urban areas of the Yangtze River Delta Region, China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006,112(4):391-402.

[6] 丁国玉,张斌,万正茂,等. 场地健康风险评估及生物可给性的应用[J]. 环境科学与技术, 2014,37(S1):372-376.
Ding Guoyu, Zhang Bin, Wan Zhengmao, et al. Site health risk assessment and application of bioavailability[J]. Environmental Science & Technology, 2014,37(S1):372-376.

[7] Davis S, Mirick D K. Soil ingestion in children and adults in the same family[J]. Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology, 2006,16(1):63-75.

[8] USEPA. Exposure Factors Handbook Chapter 5-Soil and Dust Ingestion[M]. National Center for Environmental Assessment Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency. 2017.

[9] Pu X Z, Lee L S, Galinsky R E, et al. Evaluation of a rat model versus a physiologically based extraction test for assessing phenanthrene bioavailability from soils[J]. Toxicological Sciences: an Official Journal of the Society of Toxicology, 2004,79(1):10-17.

[10] 周国华. 土壤重金属生物有效性研究进展[J]. 物探与化探, 2014,38(6):1097-1106.
Zhou Guohua. Recent progress in the study of heavy metal bioavailability in soil[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014,38(6):1097-1106.

[11] 徐笠,陆安祥,王纪华,等. 食物中重金属的生物可给性和生物有效性的研究方法和应用进展[J]. 生态毒理学报, 2017,12(1):89-97.
Xu Li, Lu Anxiang, Wang Jihua, et al. Research methods and application progress of bioavailability and bioavailability of heavy metals in food[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017,12(1):89-97.

[12] Li H B, Zhao D, Li J, et al. Using the SBRC assay to predict lead relative bioavailability in urban soils: contaminant source and correlation model[J]. Environmental Science and Technology, 2016,50(10):4989-4996.

[13] Gu Y G, Gao Y P, Lin Q. Contamination, bioaccessibility and human health risk of heavy metals in exposed-lawn soils from 28 urban parks in Southern China's largest city,

Guangzhou[J]. Applied Geochemistry, 2016,67:52-58.

[14] Adetunde O T, Mills G A, Olayinka K O, et al. Bioaccessibility-based risk assessment of PAHs in soils from sites of different anthropogenic activities in Lagos, Nigeria using the fed organic estimation human simulation test method[J]. Soil and Sediment Contamination, 2018,27(6):501-512.

[15] Tao S, Zhang D Y, Lu Y, et al. Mobility of polycyclic aromatic hydrocarbons in the gastrointestinal tract assessed using an *in vitro* digestion model with sorption rectification[J]. Environmental Science and Technology, 2010,44(14):5608-5612.

[16] Tarafdar A, Sinha A. Public health risk assessment with bioaccessibility considerations for soil PAHs at oil refinery vicinity areas in India[J]. The Science of the Total Environment, 2018,616/617:1477-1484.

[17] Assurance. Standard operating procedure for an *in vitro* bioaccessibility assay for lead and arsenic in soil[M]. 2008.

[18] 张东平,余应新,张帆,等. 环境污染物对人体生物有效性测定的胃肠模拟研究现状[J]. 科学通报, 2008,53(21):2537-2545.
Zhang Dongping, Yu Yingxin, Zhang Fan, et al. Current situation of gastrointestinal simulation research on the determination of bioavailability of environmental pollutants to human body[J]. Chinese Science Bulletin, 2008,53(21):2537-2545.

[19] Pelfrêne A, Waterlot C, Mazzuca M, et al. Assessing Cd, Pb, Zn human bioaccessibility in smelter-contaminated agricultural topsoils (northern France)[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2011,33(5):477-493.

[20] Schroder L, Basta N T, Casteel S W, et al. Validation of the *in vitro* gastrointestinal (IVG) method to estimate relative bioavailable lead in contaminated soils[J]. Journal of Environmental Quality, 2004,33(2):513-521.

[21] 钟茂生,赵莹,韩丹,等. UBM表征老化土壤中Pb的可给性及影响因素[J]. 中国环境科学, 2017,37(5):1866-1871.
Zhong Maosheng, Zhao Ying, Han Dan, et al. Bioaccessibility of Pb in aged soil characterized by UBM and its controlling factor[J]. China Environmental Science, 2017, 37(5): 1866-1871.

[22] Li S W, Sun H J, Li H B, et al. Assessment of cadmium bioaccessibility to predict its bioavailability in contaminated soils[J]. Environment International, 2016,94:600-606.

[23] Luo X S, Yu S, Li X D. The mobility, bioavailability, and human bioaccessibility of trace metals in urban soils of Hong Kong [J]. Applied Geochemistry, 2012, 27(5): 995-1004.

[24] 范婧婧,周友亚,王淑萍,等. 基于DIN测试的场地土壤PAHs生物可给性及健康风险研究[J]. 环境科学研究, 2020,33(11):2629-2638.
Fan Jingjing, Zhou Youya, Wang Shuping, et al. Bioaccessibility and health risk of PAHs in site soil based on DIN test [J]. Research of Environmental Sciences, 2020,33(11):2629-2638.

[25] 郭晓欣,范婧婧,周友亚,等. 焦化场地典型多环芳烃类污染物精细化风险评估[J]. 生态毒理学报, 2021,16(1):155-164.
Guo Xiaoxin, Fan Jingjing, Zhou Youya, et al. Refined risk assessment of typical polycyclic aromatic hydrocarbons in a coking site[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021,16(1): 155-164.

[26] DIN 19738-2017, Soil Quality Bioaccessibility of Organic and Inorganic Pollutants from Contaminated Soil Material [S]. Berlin:Deutsches Institut für Normung, 2017.

[27] Gao Y, Xia J. Chromium contamination accident in China: viewing environment policy of China[J]. Environmental Science and Technology, 2011,45(20):8605-8606.

[28] 黄顺红. 铬渣堆场铬污染特征及其铬污染土壤微生物修复研究[D]. 长沙:中南大学, 2009.
Huang Shunhong. Characteristics of Chromium Pollution at Chromium-Containing Slag Site and Chromium (Ⅵ) Bioremediation in the Contaminated Soil[D]. Changsha: Central South University, 2009.

[29] 蒋雄. 三价铬钝化膜为什么会产生六价铬[J]. 电镀与涂饰, 2008,27(12):23-24.
Jiang Xiong. Why trivalent chromium passivation film produces hexavalent chromium?[J]. Electroplating & Finishing, 2008,27(12):23-24.

[30] GB 36600-2018, 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].

[31] HJ 25.3-2019, 建设用地土壤污染风险评估技术导则[S].

[32] DB11/T 811-2011, 场地土壤环境风险评价筛选值[S].

[33] Oomen A G, Hack A, Minekus M, et al. Comparison of five *in vitro* digestion models to study the bioaccessibility of soil contaminants[J]. Environmental Science and Technology, 2002,36(15):3326-3334.

[34] Li H B, Cui X Y, Li K, et al. Assessment of *in vitro* lead bioaccessibility in house dust and its relationship to *in vivo* lead relative bioavailability[J]. Environmental Science and Technology, 2014,48(15):8548-8555.

[35] 李仪,章明奎. 三种模拟消化液对土壤重金属的提取性比较[J]. 中国环境科学, 2012,32(10):1807-1813.
Li Yi, Zhang Mingkui. Comparison of soil heavy metals extraction using three in-vitro digestion tests[J]. China Environmental Science, 2012,32(10):1807-1813.

[36] 张玉,熊杰,唐翠梅,等. 某污染场地土壤重金属生物可给性及其对修复目标的影响研究[J]. 中国氯碱, 2019(6):41-47.
Zhang Yu, Xiong Jie, Tang Cuimei, et al. Bioavailability of heavy metals in soil of a contaminated site and its impact on remediation target[J]. China Chlor-Alkali, 2019(6):41-47.