纳米氧化铁与氧化剂对多环芳烃污染农田  
土壤修复和蔬菜健康风险的影响＊

周佳靖】 柳修楚】 郭 瑾】 陈小宇】 柴 超】 葛 蔚羿

(1.青岛农业大学资源与环境学院，山东 青岛266109 ；.青岛农业大学生命科学学院，山东 青岛266109)

摘要采用纳米氧化铁和氧化剂(过硫酸钠.II2O2)联合技术修复多环芳烃(PAIIs)污染农田土壤，分析纳米氧化铁与氧化剂 联合修复对小白菜***(Brassica chmensis*** L.)生长、PAIIs富集的影响，并进行健康风险评估。结果表明：1)纳米氧化铁(2.0 g/kg)和 112。2( g/kg)联合修复对土壤、小白菜中PAHs的去除效果最好，土壤中PAHs去除率可达32.9%,小白菜地下部和地上部PAHs 去除率分别为38.8%和38.9%。()纳米氧化铁和过硫酸钠联合修复对小白菜生长存在抑制作用。(3)经纳米氧化铁(2.0 g/kg)单 独修复或纳米氧化铁(.0 g/kg)和112。2( g/kg)联合修复后，小白菜地上部中PAHs对青少年和女性老年人的潜在致癌风险不再 存在。

关键词 纳米氧化铁 过硫酸钠 H2O2 多环芳烃 修复 风险

D0l：10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.02.016

**Effects of nano-Fe**2 **O**3 **and oxidants on soil remediation and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbon in vegetable from contaminated farmland** *ZHOU Jiajing1 ,LIU Xiuchu1 ,GUO Jin1 , CHEN Xiaoyu1 , CHAI Chao1 ,GE Wei2. (-.College of Resorrces and Environment ^Qingdoo Agricultural University ^Qingdao Shandong* 266109 ；*2.College of Life Selenees , Qingdao Agricultural Univer shy , Qingdao Shandong* 266109)

**Abstract**: Remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated farmland soil by nano-ferric oxide combined with oxidants (sodium persulfate, H2 O2) was studied. The effects of nancrferric oxide combined with oxidant on the growth and PAHs accumulation of pakchoi *(Brassica chinensis* L.) were analyzed,and the health risk was assessed. The results showed that： (1) the combined remediation of nano-ferric oxide (2.0 g/kg) and H2O2 (2 g/kg) had the best effect on the removal of PAHs in soil and pakchoi. The removal rate of PAHs in soil was 32.9 % , and the reduction rates of PAHs in the underground and aboveground parts of pakchoi were 38.8% and 38.9% , respectively. (2) The combined remediation of nano-ferric oxide and sodium persulfate inhibited the growth of pakchoi. (3) Afternano-ferricoxide(2.0g/kg)aloneornano-ferricoxide (2.0 g/kg) combined with H2O2 (2g/kg), therewasnothepotentialcarcinogenicriskofPAHsintheabovegroundpartsofpakchoitoteen-agersandfemaleseniors.

**Keywords**: nano-ferric oxide； sodium persulfate； H2 O2 ; polycyclic aromatic hydrocarbons； remediation； risk

第一作者:周佳靖，女，1996年生，硕士研究生，主要从事土壤修复研究。＃通讯作者。

\*山东省自然科学基金资助项目(No.ZR2020MD107、No.ZR2017MC068)。

多环芳烃(PAHs)是环境中最普遍的有机污染物 之一1,具有较高的遗传毒性与致癌性⑵。PAHs溶 解性较差，极易附着于土壤颗粒，因此土壤是PAHs 的主要载体［3］。由于难降解的特性,使其在土壤中不 断积累，并可通过食物链进入人体并富集⑷。

由于焦化厂、发电厂等企业的排放,其周边农田 土壤中PAHs污染越来越严重旧。已有研究表明, 在中国农田土壤中,16种PAHs为3. 3〜2 750 mg/kg6。目前，PAHs污染的农田土壤主要以生 物修复技术为主，但生物修复耗时较长，易受环境因 素影响。 化学氧化修复具有耗时短和效率高的特 点，在国内外已获得广泛的运用。 常用的氧化剂有

H2O2、Fenton试剂及过硫酸盐等7。过硫酸盐通 过活化作用致使本身的一O—O—断裂产生具有强 氧化性的硫酸根自由基， 然后通过电子转移方式与 目标污染物发生反应，从而降解目标污染物［8］。 赵 丹等⑼证实，过硫酸钠对PAHs有良好的氧化去除 效果。H2O2可催化产生• OH氧化降解有机污染 物，王春艳等［10］发现，随着H2O2处理剂量的增加， 菲和芘的去除率提高。 纳米矿物材料由于具有巨大 的表面积、超强的吸附螯合能力和光催化活性，近几 年在有机污染修复中受到关注。 司雄元［11］发现，土 壤中添加纳米矿物可提高对多氯联苯的吸附。 此 外，半导体纳米氧化铁还可作为光催化剂，利用太阳 光可进行有机物的降解**［**12**］0**

目前，对于PAHs污染土壤的修复研究中，多是 以活化过硫酸钠和类Fenton试剂进行化学修复，采 用纳米矿物与氧化技术结合修复PAHs重度污染农 田土壤以及修复过程中对蔬菜的影响方面的研究相 对较少**。**因此，本研究以热电厂附近的PAHs污染 农田土壤为对象**，**采用纳米氧化铁和低浓度氧化剂 联合技术**，**考察修复效果以及该技术对蔬菜生长**、** PAHs富集的影响，为PAHs污染农田土壤修复及 蔬菜中 PAHs 的污染控制提供科学依据**。**

**1**材料与方法

1.1主要供试材料

2017年3月采集某热电厂附近的PAHs污染 农田土壤**，**去除大块石砾**、**植物根茎**，**过筛后自然风 干**。**土壤类型为棕壤，pH为5.6**,**有机质为14.1 g/kg,PAHs 为 2 438 gg/kg**，**其中低环（2 〜4 环**）、** 高环（5〜6环）PAHs分别为2 324、106 gg/kg**。**根 据 MALISZEWSKA KORDYBACH 等「13〕建立的标 准，土壤中16种PAHs＜200 gg/kg则可认为是无 污染，200〜600 gg/kg为轻度污染，600〜1 000 gg/kg为中度污染**，**＞1 000 gg/kg为重度污染**。**因 此**，**该土壤为重度污染土壤**。**

H2O2、过硫酸钠、纳米氧化铁均为商业产品**。**

1. 实验过程

称取3.5 kg供试土壤，按照表1将不同试剂与 土壤充分混合均匀后置于盆中**，**浇灌蒸馏水使土壤 充分湿润，播撒小白菜*（Brassica chinensis* L.）种子**。** 待小白菜长出2〜3 片叶子后间苗**，**每盆保留10 株**。** 在小白菜生长期间，每隔两天浇灌200 mL蒸馏水**，** 每个处理设置3个重复**。**待小白菜出苗35 d后，将 小白菜挖出**，**对其株高进行测量**，**对每株小白菜地上 部与地下部分别进行称重**、**冷冻干燥**，**研磨充分后取 一定量样品对小白菜各部位进行PAHs测定，同时 测定各处理土壤中 PAHs 含量**。**

表1不同处理的试剂及其施加量

Table 1 The reagent of different treatment and its dosage g/kg

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 处理 | 纳米氧化铁 | 过硫酸钠 | H2O2 |
| 对照处理（CK） | 0 | 0 | 0 |
| 处理1 | 2.0 | 0 | 0 |
| 处理2 | 1.0 | 0 | 0 |
| 处理3 | 0.5 | 0 | 0 |
| 处理4 | 2.0 | 2 | 0 |
| 处理5 | 0.5 | 2 | 0 |
| 处理6 | 2.0 | 0 | 2 |
| 处理7 | 0.5 | 0 | 2 |

1. 测定方 法

取2 g 土壤样品于玻璃离心管中，加入二氯甲 烷超声萃取1 h,4 000 r/min离心10 min,取萃取液 3 mL 过无水硫酸钠和硅胶层析柱净化**，**并用15 mL 二氯甲烷/正己烷（体积比1 : 1**）**溶液洗脱，收集滤 液至旋转蒸发瓶中浓缩至近干**，**最后用甲醇定容至 2 mL,并通过0.22 gm有机滤膜后用于后续测定**。** 蔬菜中PAHs的提取与净化方法参考文献［14**］。**

土壤与蔬菜中PAHs提取后均采用高效液相色 谱紫外**/**荧光检测器串联的方法检测美国优先控制 的16种PAHs**［**15**］，**配有SPD-2A紫外检测器、RF- 10AXL荧光检测器、CTO-20A柱温箱、LC-20AT 低压四元梯度泵、①4. 6 X 250 mm Inertsil ODS-P PAHs专用反相色谱柱**。**流动相为甲醇-水**，**紫外和 荧光均采用波长切换，流速1 mL/min**，**柱温40 °C**，** 进样量20 gL**。**各PAHs均采用五点校准曲线，校 准曲线的相关系数均大于0.999**。**

1. 质量保 证

通过空白实验**、**基质加标和双平行样控制数据 质量**。** 空白中未检出目标化合物**。** 采用双平行样对 所有样品进行分析**，**萘回收率为62.0％**，**其余15 种 PAHs回收率均为86.0% ±15.0%，相对标准偏差 为0.6％〜12.4％**。** 每10 个样品做1 次标准曲线**，** 确定仪器的稳定性和校准曲线**。**

1. 致癌风险评价

PAHs相对苯并（a）芘的毒性当量因子通常被 用来计算PAHs的健康风险，将其他PAHs转化为 苯并（a）芘的毒性当量因子**。**采用美国环境保护署 推荐的终生致癌风险*（ILCRs）*评价小白菜地上部中 PAHs对人体的潜在致癌风险**［**16**］，**计算见式（1**）［**17**］，** 本研究各参数取值参考文献**［**18**］。**

*ILCRs* = *Ci* X *TEFi X Cf X IR X EF X ED X SFXCF/CBWXAT）* （1）

式中：*C,*为PAHs质量浓度，gg/kg；*TEF,*为毒性当 量因子*Cf*为蔬菜湿质量和干质量之间的转化系 数，小白菜取值为0.093*IR*为小白菜摄取量，g/d， 男性儿童**（**4〜10 岁**）、**男性青少年**（**11〜17 岁**）、**男性 成年人**（**18〜60 岁**）、**男性老年人**（**＞60 岁**）、**女性儿 童**、**女性青少年**、**女性成年人**、**女性老年人分别为 95.4**、**146.0**、**173.0**、**155.0**、**99.7**、**132.0**、**157.0**、**135.0 g/d；*EF*为暴露频率，d/a,取365 d/a；*ED*为暴露时 间**，**，根据各类人群物理活动和暴露场景有所不同**，** 儿童、青少年、成年人、老年人分别为7、7、43、10 a**；** *SF*为致癌斜率因子,kg **•** d/mg**，**取7.3 kg **•** d/mg**；***CF*为转化因子，mg/ng,取10\_6 mg/ng； *BW*为体 重，kg,儿童、青少年、成年人、老年人分别为23.6、 48.0、62.0、62.0 kg；*AT* 为平均寿命，d,取 27 740 d。

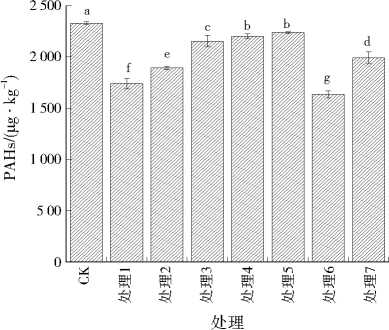
1. 数据处理

利用最小显著差法对不同处理中土壤和小白菜 中 PAHs 含量 进 行 方 差 分 析，利 用 Spearman 方 法 进行相关性分析。

**2** 结 果与讨 论

2.1 不同处理对土壤中 PAHs 及其去除率的影响

由图 1 可 见，处 理 1 〜7 土 壤 中 PAHs 为 1 636-2 238 gg/kg,均低于 CK（2 338 gg/kg）,其 中处理6 最低。 处理1〜3 土壤中 PAHs 随纳米氧 化铁施加量的减少而增加，且3 个处理之间存在显 著差异，表明在一定范围内，纳米氧化铁施加量越 多，去除PAHs作用越显著。这可能是由于纳米氧 化铁是一种光催化剂，对紫外和可见光具有良好的 吸收效应，PAHs在阳光照射下发生直接光降解行 为［19］。 纳米氧化铁施加量越多，比表面积越大，其 表面受光激发产生的光生电子－空穴对也就越多，进 而其光催化氧化速率越快，PAHs去除率越高。孙 楠［20］的研究也验证了随纳米氧化铁含量的增加，邻 苯二甲酸二丁酯降解效率提高。



注：不同字母表示差异显著（***p***<0.05）,图2和图3同。

图1不同处理下土壤中PAHs质量浓度

Fig.1 Mass concentration of PAHs in soil under different treatments

处理6 土壤中 PAHs 低于处理7，说明纳米氧 化铁施加量越多，去除PAHs的效果越明显。处理

6、7 相应与处理1、3 对比可见，纳米氧化铁联合 H2O2后土壤中PAHs显著降低。这可能是由于氧 化铁在光照射下与吸附在催化剂表面的OH\_或 H2O反应，形成具有强氧化性的• OH,进而与目标 物发生反应，纳米氧化铁施加量越高，反应越强烈。

处理4、5 土壤中PAHs较高，说明施加过硫酸 钠对土壤中 PAHs 的去除效果较差。 王思齐［21］研 究发现，纳米FesO』和过硫酸盐为2 ： 1（摩尔比，下 同）时苯酚去除率接近100.0% ,1 : 1时苯酚去除率 达到93.5%。YAN等〔22〕发现，纳米Fe3O4和过硫酸 盐为2 : 1（摩尔比）时可将水中0.06 mmol/L磺胺间 甲氧嘧啶完全降解。 本研究中纳米氧化铁和过硫酸 钠联合作用后PAHs的去除效果较差，可能是在土 壤这一介质中，施加氧化剂后纳米氧化铁释放的 Fe3+较难被还原成Fe2+，不能有效活化过硫酸盐, 同时也降低了其催化性能，导致去除效果较差。 此 外，有研究表明，PAHs由于其自身性质易被土壤吸 附而难以被洗脱，在氧化处理PAHs污染土壤的过 程中，污染物在土壤有机质或固体颗粒物上的吸附 直接影响其氧化速率［23］。 本研究中纳米氧化铁极 强吸附PAHs的能力会阻碍过硫酸钠的氧化速率， 这也是PAHs含量高的一个重要因素。

不同处理下土壤中 PAHs 的去除率见表2。 CK通过自然衰减，PAHs去除率达到4.4% ；处理6 对PAHs的去除效果最好，去除率可达32.9%。处 理1〜7对土壤中低环PAHs的去除效果优于高环。 不同环数的PAHs分子结构不同［24］,能与氧化剂发 生不同的反应，低环PAHs在土壤中易挥发和分解, 而高环PAHs的脂溶性较强，容易被土壤颗粒吸附, 在土壤中的残留度高，较难去除［25］，且苯环越多，分 子量越大，越不易被降解。 本研究与黎舒雯等［26］的 研究结果一致。

2.2不同处理对小白菜中PAHs及其去除率的影响

由图2 可见：各处理小白 菜地下部和地上部中 PAHs 含量呈现相同规律； 处理1〜7 小白菜中 PAHs均低于CK；处理6小白菜中PAHs最低，地 下部和地上部PAHs分别为783.348 gg/kg。处理 4和处理6、处理5和处理7之间小白菜中PAHs含 量均存在显著差异，说明相同施加量的纳米氧化铁与不同的氧化剂联合使用的效果是不同的**，**过硫酸 钠处理效果比H2O2差**。**处理1〜3中，随纳米氧化 铁施加量的降低**，**小白菜中 PAHs 显著升高**。** 焦海 华等**［**27**］**研究发现**，** 土壤中 PAHs 含量高**，** 蔬菜中 PAHs 含量也增加**。** 本研究与此研究结果一致**。**

| 目标物 | CK | 处理1 | 处理2 | 处理3 | 处理4 | 处理5 | 处理6 | 处理7 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 低环 PAHs | 4.3±0.4 | 28.6±3.5 | 22.5±3.3 | 11.7±1.4 | 9.7±0.8 | 8.2±0.7 | 32.8±2.7 | 18.6±1.1 |
| 高环 PAHs | 0.5±0.1 | 23.8±1.4 | 15.3±1.2 | 5.7±0.3 | 2.6±0.1 | 1.8±0.0 | 29.3±2.1 | 7.1±0.3 |
| PAHs | 4.4±0.2 | 28.6±1.3 | 22.4±1.8 | 11.7±1.5 | 9.7±1.1 | 8.2±0.9 | 32.9±2.4 | 18.4±1.7 |

表*2*不同处理下土壤中PAHs的去除率

Table 2 Removal rate of PAHs in soil under different treatments %

小白菜地下部中PAHs高于地上部，这是由 于在根毛细胞的作用下，土壤中PAHs进入植株**,** 一部分进入植株地上部的茎叶中**，**另一部分保留 在植株的根部并不断积累，土壤中PAHs被植株 吸收后主要富集在植物根部**。** 尹春芹等**［**28**］**发现**，** 蔬菜根和茎叶中的PAHs浓度低于土壤中，且根 部积累PAHs的浓度显著高于茎叶中，与本研究 结果一致**。**

与CK相比，不同处理下小白菜中PAHs的去 除率见表3**。**处理6中PAHs降低最明显，小白菜 地下部和地上部去除率分别为388%和389%**；**处 理4**、**5 对小白菜中 PAHs 的去除率最低**；**处理1〜3 中，随纳米氧化铁施加量的减少，小白菜中PAHs 的去除率降低**。**小白菜中高环PAHs的去除率总 体高于低环，这可能是由于小白菜中PAHs多以富 集低环PAHs为主，高环PAHs只占极少部分，因 此小白菜中高环PAHs去除率相对高**。**

23 不同处理对小白菜生长的影响

由图3可知**，**处理4**、**5的小白菜生长较差**，**株高 和生物量均最低**。** 这可能是由于过硫酸钠与土壤中 PAHs发生氧化还原反应的同时与土壤中有机质也 发生了氧化还原反应**，**破坏了土壤的结构**，**使土壤的 综合肥力下降**［**29**］，**导致小白菜的生长状况较差**。** 李 红兵**［**30**］**研究表明**，**施加过硫酸钠后氧化产生的硫酸 盐严重阻碍了黑麦草种子的萌发**，**且在黑麦草生长 过程中**，**其生物量与氧化前相比没有明显增加**。**

处理6**、**7的小白菜长势比处理4**、**5 好**，**可能是 由于研究区土壤pH为5.6,在酸性条件下H2O2反 应产生的**•** OH会氧化降解有机污染物**。**杨志峰 等**［**31**］**研究表明**，**土壤中芘浓度越高**，**辣椒的株高和 生物量越低**。**因此，施加H2O2降低土壤中PAHs 后有利于小白菜的生长**。**

处理1〜3 中**，**随纳米氧化铁施加量减少**，**小白 菜株高和生物量均降低**。** 表明纳米氧化铁施加量的 减少**，**土壤中 PAHs 提高**，** 进入小白菜内的 PAHs 升高**，**小白菜生长变差**。** 邢维芹等**［**32**］**研究表明 PAHs对冬小麦地上部的生长有影响**。**刘秀梅 等**［**33**］**发现**，**纳米氧化铁能促进铁在植株内由根部到 地上部的移动**，**有助于新生叶片对铁的吸收和利用 促进花生生长**。** 这也是施加纳米氧化铁后**，**处理1〜 3小白菜生长均好于CK的原因之一**。**

1>

g 寸 m

舸 闡

*盘总盘*

处理

(b)地上部

0000000

0000000

7 6 5 4 3 2 1

(Ga •翌)、SH^d

1>

不同处理下小白菜中PAHs质量浓度

g 寸 m

舸 闡 闡

处理

(a)地下部

图2

Jo

2(

Jo

0(

000

000

6 4 2

(昱-翌)IHVd

Fig2

MassconcentrationofPAHsinthepakchoiunderdi**f**erenttreatments

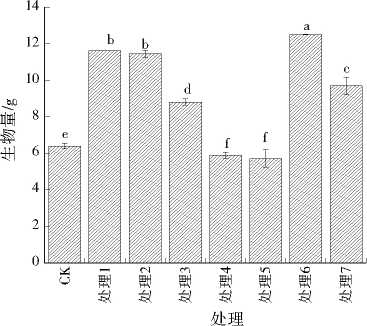
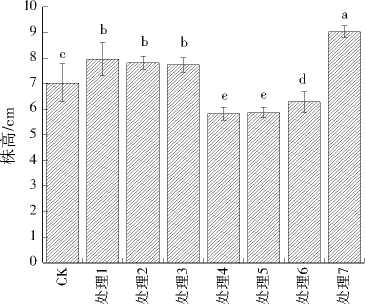
|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 低环 PAHs | 225±17 | 185±15 | 95±12 | 58±02 | 34±03 | 329±09 | 134±09 |
| 高环 PAHs | 369±01 | 339±01 | 292±02 | 279±08 | 175±09 | 453±08 | 309±11 |
| PAHs | 299±25 | 188±12 | 100±04 | 63±04 | 92±07 | 388±11 | 138±03 |
| 低环 PAHs | 321±09 | 268±18 | 163±16 | 140±04 | 68±02 | 411±19 | 236±18 |
| 高环 PAHs | 374±11 | 303±14 | 168±11 | 45±01 | 39±01 | 432±14 | 239±12 |
| PAHs | 322±17 | 269±25 | 163±27 | 138±10 | 46±01 | 389±22 | 236±12 |

表3 不同处理下小白菜中PAHs的去除率

Table3 RemovalrateofPAHsinthepakchoiunderdi**f**erenttreatments %

部位 目标物 处理 1 处理2 处理3 处理4 处理 5 处理 6 处理7

地下部 地上部



(a)株高 (b)生物量

图3不同处理下小白菜的株高及生物量

Fig.3 Plantheightandbiomassofpakchoiunderdi**f**erenttreatments

表4 不同处理下小白菜地上部中PAHs的*ILCRs*

Table 4 *ILCRs* of PAHs in aboveground parts of pakchoi under different treatment

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 性别 | 年龄段 | ***LCR***s/10-6 | | | | | | | |
| CK | 处理1 | 处理2 | 处理3 | 处理4 | 处理5 | 处理6 | 处理7 |
|  | 儿童 | 2.05 | 1.20 | 1.44 | 1.76 | 1.90 | 1.82 | 1.04 | 1.49 |
| 男 | 青少年 | 1.54 | 0.90 | 1.08 | 1.33 | 1.43 | 1.37 | 0.78 | 1.12 |
| 成年人 | 8.65 | 5.09 | 6.10 | 7.46 | 8.03 | 7.69 | 4.38 | 6.30 |
|  | 老年人 | 1.78 | 1.05 | 1.26 | 1.53 | 1.65 | 1.58 | 0.90 | 1.30 |
|  | 儿童 | 2.14 | 1.26 | 1.51 | 1.84 | 1.98 | 1.90 | 1.08 | 1.56 |
| 女 | 青少年 | 1.37 | 0.81 | 0.97 | 1.19 | 1.28 | 1.22 | 0.70 | 1.00 |
| 成年人 | 7.84 | 4.62 | 5.53 | 6.77 | 7.28 | 6.97 | 3.97 | 5.72 |
|  | 老年人 | 1.54 | 0.90 | 1.08 | 1.33 | 1.43 | 1.37 | 0.78 | 1.12 |

2.4 不同处理对健康风险的影响

由表4 可见：处理1〜3 中，随纳米氧化铁施加 量减少*,ILCRs*升高；处理6更有利于降低小白菜 地上部的潜在致癌风险，男性儿童、男性青少年、男 性成年人、男性老年人、女性儿童、女性青少年、女性 成年人、女性老年人的*ILCRs*分别为1.04X10「6、 0.78X10－6 、4.38X10－6 、0.90X10－6 、1.08X10－6 、

0.70X10—6、3.97X10—6、0.78X10—6 ,而处理 4 对小 白菜地上部潜在致癌风险降低程度较小；处理1〜7 中*ILCRs*均低于CK；成年人*ILCRs*远高于其他年 龄段。 一般认为,终身致癌风险低于10—6被认为没 有风险或风险可忽略,10—6〜10—4则被认为存在潜 在风险［34］。 经处理1 和处理6 修复后,小白菜地上 部中PAHs对青少年和女性老年人的潜在致癌风 险 不 再 存 在 。

**3** 结 论

(1)处理6对土壤、小白菜中PAHs的去除效 果最好，土壤中PAHs去除率可达32.9%，小白菜 地下部和地上部 PAHs 去除率分别为38.8%和

38.9%。土壤中低环 PAHs 的去除率高于高环 PAHs,小白菜中高环PAHs的去除率总体高于

低环。

1. 纳米氧化铁和过硫酸钠联合修复对小白菜 生长存在抑制作用,小白菜的株高和生物量均较低。
2. 成年人*ILCRs*远高于其他年龄段。经处 理1 和处理6 修复后,小白 菜地上部中 PAHs 对青 少年和女性老年人的潜在致癌风险不再存在。

参考文献：

1张羽.零价铁活化过硫酸钠降解土壤中多环芳烃[D].北京：中 国地质大学，2019.

「2] LI X N,SONG Y,WANG F,et al. Combined effects of maize straw biochar and oxalic acid on the dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons and microbial community structures in soil: a mechanistic study [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019,364：325—331.

「3]苑金鹏，王晓利，周家斌，等.济南市表层土壤中PAHs的分布、 来源及风险分析「J].环境化学,015,4(1):166-171.

「4] LIAO X Y,WU ZY,LI Y,et al.EHect of various chemical oxi- dationreagentsonsoilindigenous microbialdiversityinreme— diationofsoilcontaminatedbyPAHs「J].Chemosphere,2019, 226:483-491.

「] LIU X C,GE W,ZIIANG X M,et al. Biodegradation of aged polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soil by ***Para­coccus*** sp. LXC combined wth humic acid and spent mushroom substrate [J ]Journal of Hazardous Materials，2019，379： 120820．

1. CAI Q Y,MO C II,WU Q T,et al.The status of soil contami­nation by semivolatile organic chemicals (SVOCs) in China: a review[J] .ScienceoftheTotalEnvironment,2008,389(2／3)： 209-224.
2. 陈倩,蔡武,陈杰,等.不同化学氧化剂对土壤中多环芳烃的降 解效果「J]浙江大学学报,019,3(12):2437-2444.
3. LEMAIRE J, BUES M,KABECI【E T,et al. Oxidant selection totreatanagedPAHcontaminatedsoilbyinsituchemicalox- idation[J]．Journalof EnvironmentalChemical Engineering, 2013,1(4):1261-1268．
4. 赵丹,廖晓勇,阎秀兰,等．不同化学氧化剂对焦化污染场地多 环芳烃的修复效果:J].环境科学,011 ,2():857-863.
5. 王春艳，李晓亮，董芬，等.化学氧化修复PAHs污染土壤的性 质及毒性变化:J].北京化工大学学报(自然科学版)2012,9 (4):95-100．
6. 司雄元.纳米材料对PCB77的吸附与降解研究:D].合肥：安 徽农业大学,2011．
7. 程敬泉，高政，马惠卿，等.纳米氧化铁的制备及其应用:J].衡 水学院学报,2008,10(1):41-44．
8. MALISZEWSKA KORDYBACH B,SMRECZAKB,KLIMKOW- ICZPAWLAS A．Concentrations,sourcesandspatialdistribu- tionofindividualpolycyclicaromatichydrocarbons (PAHs) inagriculturalsoilsintheEasternpartoftheEU:polandasa casestudy[J]．Scienceofthe TotalEnvironment,2009,407 (12):3746-3753．
9. CHAI C,CHEN Q H, WU J,etalContamination,source identification,andriskassessmentofpolycyclicaromatichy- drocarbonsinthesoilsofvegetablegreenhousesinShandong, China[J]．Ecotoxicologyand Environmental Safety,2017, 142:181-188．
10. 高彦征,朱利中,凌婉婷,等．土壤和植物样品的多环芳烃分析 方法研究:J].农业环境科学学报,005 ,5(5):173-176.
11. NISBET I C,LAGOY P K.Toxic equivalency factors (TEFs) forpolycyclicaromatichydrocarbons (PAHs)[J]．Regulatory ToxicologyandPharmacology,1992,16(3):290-300．
12. 葛蔚,程琪琪,柴超,等．青岛市城郊蔬菜中多环芳烃污染特征 和健康风险评估:J].环境科学学报,017,7(12):4772-4778.
13. 殷婧,夏忠欢,周彦池,等．临汾市售蔬菜中多环芳烃污染特征 及致癌风险分析:J].生态毒理学报,016,1():265-271.
14. 邓南圣，吴峰.环境光化学:M].北京：化学工业出版社,003.

「20]孙楠.纳米Fe2O3的可控制备及其对DBP的光催化降解性能 研究「D].沈阳：东北大学,014.

：21]王思齐.过硫酸盐高级氧化法处理含酚废水的实验研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2017

1. YANJC,LEI M,ZHU L H,etalDegrdationofsulfamono- methoxinewithFe3O4 magneticnanoparticlesasheterogene- ousactivatorofpersulfate[J] Journalof Hazardous Materi- als,2011,186(2／3):1398-1404
2. 杨建刚,刘翔,余刚,等 非离子表面活性剂溶液中多环芳烃的 溶解特性[].环境科学,003,4(6):79-82.
3. DONG CD,LU YC ,CHANGJH,etalEnhancedpersulfate degradationofPAH-contaminatedsedimentsusing magnetic carbon microspheres as the catalyst substrate [J] Process SafetyandEnvironmentalProtection,2019,125:219-227
4. WATTSRJ,STANTONPC,HOWSAWKENGJMinerali- zationofa sorbed polycyclicaromatic hydrocarbon in two soilsusingcatalyzedhydrogenperoxide[J] WaterResearch, 2002,36(17):4283-4292
5. 黎舒雯,陆敏,刘敏,等 化学氧化剂对多环芳烃污染土壤的修 复效果研究[]•山东农业大学学报(自然科学版)，2016,47

(3):378-382

1. 焦海华,郭佳佳,张婧旻 种植油麦菜评价多环芳烃污染土壤 的农用风险[].环境科学,019,0():2460-2470.
2. 尹春芹,蒋新,杨兴伦,等 多环芳烃在土壤-蔬菜界面上的迁 移与积累特征[].环境科学，2008,29(11):3240-3245.
3. 邸莎,张超艳,严增光,等 过硫酸钠对我国典型土壤中多环芳 烃氧化降解效果的影响「J].环境科学研究，2018,31 (1)：95- 101

[0]李红兵.化学氧化结合黑麦草修复芘污染土壤实验研究[D]. 上海：上海大学,2015

「31]杨志峰，史衍玺.芘胁迫对辣椒生理指标的影响:J] 山东农业 科学,2006(4)20-22

1. 邢维芹,骆永明,吴龙华,等 多环芳烃对冬小麦早期生长的影 响研究[]• 土壤学报,008,5(6):1170-1173.
2. 刘秀梅,张夫道,冯兆滨,等 纳米氧化铁对花生生长发育及养 分吸收影响的研究「J].植物营养与肥料学报，2005,11 (4) 551-555
3. LIAO C M,CHANG K C Probabilisticriskassessmentfor personalexposuretocarcinogenicpolycyclicaromatichydro- carbonsinTaiwanesetemples[J]Chemosphere,2006,63(9)： 1610-1619

编辑：黄 苇 (收稿日期：2019-12-20)

(上接第222 页)

1. 柴育红,王明新,赵兴青 重工业区户外灰尘重金属含量水平 及其生态和健康风险评估[].环境化学，2019,38 (6)： 1375- 1384
2. 陈凤,董泽琴,王程程,等 锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属 污染状况及风险评价「J].环境科学,017,8(10)4360-4369.
3. 陈慧茹，董亚玲，王琦，等.重金属污染土壤中Cd、Cr、Pb元素 向水稻的迁移累积研究[]•中国农学通报，2015,31(12) 236-241
4. 徐兰,周敏,袁旭音,等 苏南区域农田土壤和大气颗粒中镉和 铅含量及对水稻的贡献研究「J].生态与农村环境学报,018, 34(3) 201-206
5. VOGELK,DROBNED D,REGVAR M,etalZn,CdandPb accumulationandarbuscularmycorrhizalcolonisationofpen- nycress ***Thlaspi praecox*** Wulf (Brassicaceae) from the vic- inityofaleadmineandsmelterinSlovenia[J] Environmental Po**l**ution,2005,133(2) 233-242
6. 蒋逸骏,胡雪峰,舒颖,等 湘北某镇农田土壤-水稻系统重金 属累积和稻米食用安全研究[]•土壤学报,017,4(2)410- 420
7. 朱姗姗,张雪霞,王平,等 多金属硫化物矿区水稻根际土壤中 重金属形态的迁移转化「J].农业环境科学学报,013,2(): 944-952
8. 钱建平,张力,陈华珍,等 桂林市菜地土壤-蔬菜系统汞污染 研究[]•地球化学,009,8():369-378.
9. LIU W X,LIUJ W,WU M Z,etalAccumulationandtrans- location of toxic heavy metals in winter wheat ***(Tribicum ass~ ium*** L. ) growing in agricultural soil of Zhengzhou, China [J] Bu**l**etinofEnvironmentalContaminationand Toxicolo- gy,2009,82：343-347
10. 徐琳娜,朱云,艾兰虹,等 苏南与苏北地产粳稻谷中铅和镉含 量的分析对比「J].粮食与饲料工业,014(10)19-21.
11. 宋雯,李优琴,吕康,等 江苏省稻米镉含量调查及其膳食暴露 评估[]•农业环境科学学报,016,5():886-893.
12. MASAYUKII,TAKAFUMIE,TERUOMIT,etalDietary cadmiumintakeinpo**l**utedandnon-po**l**utedareasinJapanin thepastandinthepresent[J]InternationalArchivesofOc- cupationalandEnvironmentalHealth,2004,77(4) 227-234

编辑：丁 怀 (收稿日期：2020-01-15)