

常乐稀土复合肥对玉米(*Zea mays* L.)的细胞毒性和遗传毒性效应

屈艾^{1,*}, 薄军^{1,2}, 李宗芸¹, 高宽场¹, 孙玲¹, 胡文静¹, 仇敬运¹

1. 徐州师范大学生命科学学院 环境毒理研究室, 徐州 221116

2. 厦门大学海洋与环境学院, 厦门 361005

摘要: 为了研究常乐稀土多元复合肥对主要农作物——玉米 (*Zea mays* L.) 是否产生细胞毒性和遗传毒性效应, 采用不同梯度质量浓度的稀土复合肥溶液对玉米进行处理, 观察其根尖生长状况, 统计分析细胞死亡率、微核率、有丝分裂指数以及对细胞 DNA 的损伤情况. 结果表明, 质量浓度为 $10\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下时, 常乐稀土复合肥能够促进玉米根尖的生长, $100\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上时抑制根尖生长; 随着试验浓度的递增, 细胞死亡率、微核率、DNA 损伤率逐渐上升并具有正相关性, 表现出明显的剂量-效应关系, 而有丝分裂指数却随着浓度的增加逐渐下降. 以上结果表明, 常乐稀土复合肥对玉米确有一定的细胞毒性和遗传毒性效应, 其细胞毒性阈值和遗传毒性阈值皆为 $100\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

关键词: 稀土复合肥; 玉米; 微核; 有丝分裂指数; DNA 损伤

文章编号: 1673-5897(2007)1-057-06

中图分类号: R99, TQ44

文献标识码: A

A Study on the Cytotoxic and Genotoxic Effects of Rare Earth Multi-element Compound Fertilizer (RE-MECF) on *Zea mays* L.

QU Ai^{1,*}, BO Jun^{1,2}, LI Zong-yun¹, GAO Kuan-chang¹, SUN Ling¹, HU Wen-jing¹, QIU Jing-yun¹

1. School of Life Science, Xuzhou Normal University, Xuzhou 221116

2. School of Ocean and Environment, Xiamen University, Xiamen 361005

Received 29 December 2006

accepted 12 January 2007

Abstract: The root tips were treated with different concentrations of Rare Earth Multi-element Compound Fertilizer (RE-MECF) in order to evaluate the effect on maize in terms of the growth of root-tip, the mortality, the frequency of micronucleus (FMN), mitosis index (MI) and DNA damage. The results indicated that the dosage below $10\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (expressed by concentration of RE-MECF) could accelerate the growth of root tips of *Zea mays* L., but the groups which were treated by the dosages above $100\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ were repressed. The mortality, frequency of micronucleus (FMN) and DNA damage increased while mitosis index (MI) decreased with increasing concentrations, from which, the dosage-effect relationship was clearly demonstrated. These results suggested that the RE-MECF had certain cytotoxic and genotoxic effect, and that the cytotoxic and genotoxic threshold dosages were both $100\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Keywords: RE-MECF; *Zea mays* L.; micronucleus; mitosis index; DNA damage

收稿日期: 2006-12-29 录用日期: 2007-01-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 30470421); 江苏省高等学校自然科学基金项目 (No. D180215)

作者简介: 屈艾 (1950—) 女, 教授, 硕士生导师; * 通讯作者 (Corresponding author), Tel: 0516-83500326; E-mail: Quai@xznz.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

1 引言 (Introduction)

稀土多元复合肥 (Rare earth multi-element compound fertilizer, RE-MECF) 在我国农、林、牧业生产中的广泛使用, 客观上提高了农作物的产量和品质、畜禽的生长速度 (熊炳昆等, 2001)。有学者研究了稀土元素镧对人肝细胞株 7701 的增殖和蛋白质表达的影响后认为: 尽管低浓度的 La^{3+} 对细胞具有明显的增殖作用, 但增殖细胞中蛋白质的表达和正常细胞的蛋白质表达却有明显的差异, 暗示在稀土促进增殖下的细胞可能并非正常 (刘会雪等, 2004)。关于单一稀土元素对动植物生理、生化的影响已有报道 (史萍等, 2004; 李晓滨等, 1999), 但 RE-MECF 对植物的遗传毒性作用报道不多。生产中施加 RE-MECF 后, 玉米苗期根系和地上部分稀土含量存在明显的剂量-吸收关系 (徐星凯等, 2001)。稀土元素还可以通过食品、农畜产品等途径间接地进入人体并积聚在肝、脾、骨骼中 (丁桂树等, 1984)。RE-MECF 是否会给人体健康带来危害至今还不清楚, 但已有资料报道农用稀土常乐在 $2.5\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 剂量下可不同程度地通过大鼠胎盘屏障引起胚胎的肝细胞和发育中的红细胞 DNA 损伤 (周莉等, 2004)。所以, 以作为食用和饲用的玉米为检测毒性效应的实验材料更具有现实意义。本文采用微核测试技术 (Micronucleus test, MNT)、单细胞凝胶电泳技术 (SCGE) 等, 研究 RE-MECF 对玉米的细胞毒性和遗传毒性效应, 以期对 RE-MECF 的科学利用提供依据。

2 材料与方 法 (Materials and methods)

2.1 材料

玉米 (*Zea mays* L.), 澄海 9 号品种 (购于徐州两山口种子站) 子一代品系; 稀土多元复合肥: 市售常乐系列, 含有镧、铈、镨、钕等多种硝酸稀土元素 (无具体含量, 内蒙古包头市若而斯复合肥厂生产)。

2.2 溶液配制

RE-MECF 溶液 分别称取一定质量的 RE-MECF 用双蒸水定容至 10^4 、 10^3 、500、100、10、 $1.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 6 个梯度浓度。

NaN_3 溶液 双蒸水配制成 $10\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaN_3 作为阳性对照 (CK^+)。

2.3 实验分组

共分为 8 组, 即稀土浓度组 (6 个浓度梯度)、阳性对照和阴性对照 (双蒸水 CK^-)。

2.4 方法与技术

2.4.1 实验处理

选取生长良好、长度相似的玉米幼苗分别置于盛有上述各组溶液的小烧杯中, 于 26℃ 恒温培养 6h 后彻底清洗, 在双蒸水中修复培养 24h 备用。

2.4.2 制片与镜检

剪下处理的幼苗根尖, 新配卡诺固定液固定 6h, 再用质量浓度为 $36.5\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 HCl 62℃ 下处理 12min 左右, 双蒸水洗净 HCl , 改良苯酚品红染色, 常规制片, LEICA DMRA2 显微镜观察和拍照。每组至少观察 1000 个细胞, 重复 3 次, 按 Kihlman (1986) 的标准鉴定微核, 每 1000 个细胞中的微核数用微核千分率 (Frequency of micronucleus, FMN) 表示; 统计分裂期细胞数, 计算有丝分裂指数 (Mitosis index, MI) (在一个细胞群体中, 处于有丝分裂期的细胞占总细胞的百分数称为有丝分裂指数。有丝分裂指数值越高, 说明细胞分裂越快, 反之越慢)。有丝分裂指数可以作为指示细胞生长状况和细胞周期的重要指标。

2.4.3 苔盼兰法检测玉米根尖细胞原生质体死亡率

取处理后长约 0.3cm 的根尖, 剪碎后加适量体积比为 1:1 的纤维素酶和果胶酶溶液, 于 28℃ 酶解、过滤, 然后 $2000\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 5min, 收集原生质体, 并立即用 0.5% 苔盼兰染色 5min, 迅速在普通光镜下观察统计。死细胞被染成蓝色, 活细胞拒染而呈无色透明状。随机选择 10 个视野, 统计活细胞数 (M) 和死细胞数 (N), 计算细胞死亡率 R , $R = [N / (M + N)] \times 100\%$, 再将各组死亡率与阴性对照相比得到相对细胞死亡率。

2.4.4 玉米根尖细胞核提取及单细胞凝胶电泳

细胞核提取采用 Liu 等 (1994) 的方法稍加改进, 即液氮研磨、低温下 NIB (细胞核提取缓冲液) 提取的方法。单细胞凝胶电泳技术 (SCGE) 参照 Koppen 等 (1996) 的实验方法, 略加改进。

2.5 数据处理

采用 SPSS 11.5 统计分析软件进行方差分析和 t 检验.

3 结果与分析 (Results and analysis)

3.1 RE-MECF 对玉米根尖生长的影响

观察玉米根尖生长发现: 当 RE-MECF 浓度为 $1\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 玉米生长状况与阴性对照组基本没有差异; $10\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度下能较大地促进根尖生长, 但是随着浓度的逐渐升高 (100 、 500 、 $10^4\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 玉米根尖生长明显受到抑制, 根尖变的粗细不均、弯曲, 颜色逐渐变黄、发黑, 因纤维化增强而使根尖

组织变硬; 当达到 $10^4\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 根尖生长几乎完全被抑制, 显示出生长过程中的“低促高抑”作用. 水解过程中发现, 随着浓度的递增, 根尖的水解效果变差, 压片时细胞不易分散而易聚集, 细胞核深染、变形、核出芽及核碎裂 (见图 1-1、6、7、9)、核仁和核质不清晰、核质颗粒减少甚至消失等. 分析认为, $10\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度的 RE-MECF 对玉米根尖生长不但没有表现出毒性作用反而刺激根尖的生长; 从浓度为 $100\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 并逐渐升高时, RE-MECF 对根尖细胞表现出毒作用, 表明当浓度大于 $100\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时 RE-MECF 对玉米根尖具有一定细胞毒性, 亦即细胞毒性阈值浓度为 $100\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

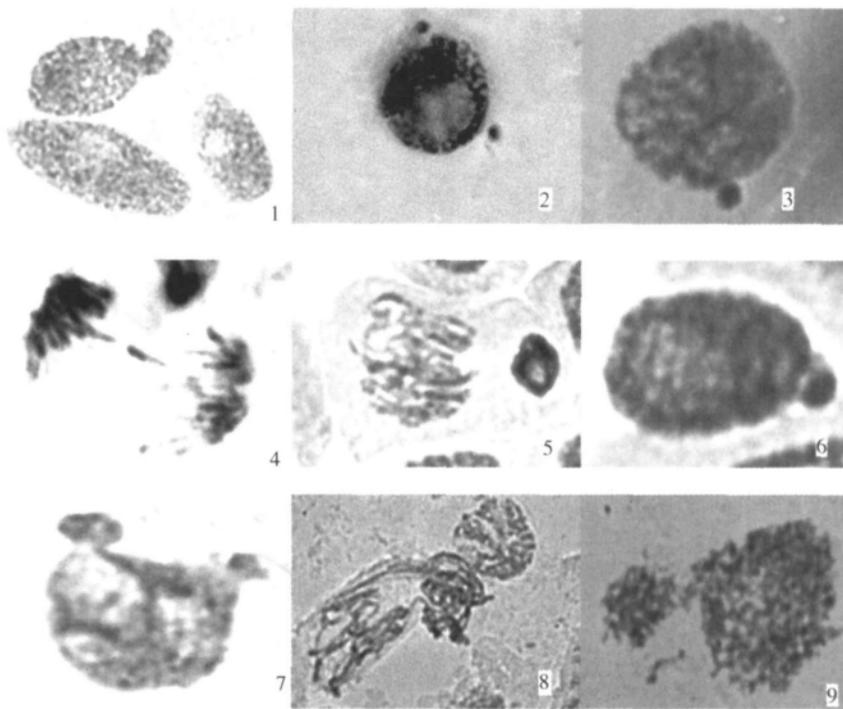


图 1 稀土多元复合肥对玉米根尖的细胞毒性和遗传毒性 ($\times 100$) (1:核质溢出;2:间期双微核;3:间期单微核;4:后期桥断片;5:中期微核;6,7:核出芽异常;8:染色体粘连;9:核破裂)

Fig.1 Cytotoxic and genotoxic effects of RE-MECF to *Zea mays* L. ($\times 100$)

3.2 玉米根尖细胞原生质体苔盼兰法统计死亡率

将表 1 中的 1~6 号实验所得细胞原生质体经苔盼兰染色后的死亡情况进行统计, 发现细胞死亡率随着 RE-MECF 浓度的升高逐渐升高, 亦表明 RE-MECF 具有一定的细胞毒性. 其细胞相对死亡率变化趋势如图 2 所示.

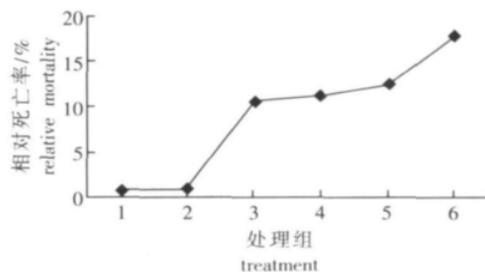


图 2 不同 RE-MECF 浓度处理后的细胞原生质体相对死亡率

Fig.2 The relative mortality of different groups treated by different levels of RE-MECF

3.3 RE-MECF 对玉米根尖细胞的微核效应

RE-MECF 对玉米根尖细胞微核效应如表 1 所示. 与阴性组比较, $1\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组微核率无明

显差异, $10\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时因无细胞毒性并能刺激根尖生长故表现出微核率降低; 在 $10\sim 500\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度范围内, 微核率随 RE-MECF 浓度升高而增加, 呈现出明显的剂量-效应关系, $100\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $500\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 与阴性对照组相比差异均极显著 ($p<0.01$); 当浓度升高到 $10^3\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $10^4\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 因细胞毒作用增强致使微核率显著下降, 与阴性对照比较分别为差异极显著 ($p<0.01$) 和差异显著 ($p<0.05$)。镜检结果还显示, 一定浓度 RE-MECF 能诱发玉米根尖细胞产生单、双微核、染色体粘连、断片、多极化等染色体损伤现象 (图 1-2、3、4、5、8)。表明, 在一定浓度范围内, RE-MECF 对玉米根尖细胞核、染色体均造成损伤、形成微核及染色体变异, 具有一定的遗传毒性效应, 遗传毒性阈值为 $100\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

表 1 稀土复合肥料对玉米根尖 FMN、MI 的影响

Table 1 The effect of RE-MECF on the FMN, MI of Zea mays L.

编号 No.	浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) Concentration	统计细胞数 Number of cells scored	微核率 Frequency of micronucleus	有丝分裂指数 Mitosis index
1	阴性对照 CK	3023	3.31 ± 0.87	85.56 ± 6.14
2	1	3012	2.99 ± 0.57	89.63 ± 3.62
3	10	3015	1.66 ± 0.67	90.88 ± 2.12
4	100	3086	$15.54 \pm 2.20^{**}$	$29.18 \pm 0.82^{**}$
5	500	3028	$55.46 \pm 2.66^{**}$	$10.29 \pm 0.32^{**}$
6	10^3	3120	$20.54 \pm 0.41^{**}$	$8.84 \pm 1.94^{**}$
7	10^4	3015	$6.30 \pm 1.45^*$	$8.96 \pm 1.53^{**}$
8	阳性对照 CK ⁺	3047	$34.15 \pm 2.80^{**}$	$59.76 \pm 6.22^*$

注: * 表示与阴性对照比较差异显著 (t 检验, $p<0.05$); ** 表示与阴性对照比较差异极显著 (t 检验, $p<0.01$)

表 2 稀土复合肥料对玉米根尖细胞 DNA 损伤的指标

Table 2 Indices of DNA damage in maize cells of roots in vivo induced by RE-MECF

编号 No.	浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) Concentration	头长/cm Head length	尾长/cm Tail length	拖尾率/% Percentage of tailed cells	DNA 损伤率/% Ratio of DNA damage
1	阴性对照 CK	7.31 ± 0.54	4.15 ± 0.50	8.25	
2	10	7.49 ± 1.24	3.98 ± 0.52	9.75	0
3	100	$5.21 \pm 0.93^*$	$7.49 \pm 1.72^{**}$	35.75	9.76
4	500	$4.38 \pm 0.52^{**}$	$10.12 \pm 1.03^{**}$	71.25	20.97
5	10^3	$3.96 \pm 0.98^{**}$	$11.25 \pm 2.06^{**}$	79	24.65
6	10^4	6.87 ± 1.35	4.82 ± 0.34	31.05	1.96
7	阳性对照 CK ⁺	$4.48 \pm 2.31^{**}$	$10.41 \pm 3.93^{**}$	77	23.03

注: * 表示与阴性对照比较差异显著 (t 检验, $p<0.05$); ** 表示与阴性对照比较差异极显著 (t 检验, $p<0.01$)

3.6 SCGE 实验结果与微核率、有丝分裂指数之间的相关性

由表 3 可以看出, 在 $100\sim 10^4\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度范围内: 1) 彗星尾长、拖尾率与细胞微核率之间存在

3.4 RE-MECF 对玉米根尖细胞有丝分裂指数的影响

由表 1 可知, RE-MECF 浓度 $10\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时可以促进玉米根尖的生长, 而当浓度 $100\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时却抑制其生长; 其中在 100 、 $500\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度下, 有丝分裂指数和阴性对照组比较差异极显著 ($p<0.01$); 在 10^3 、 $10^4\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度时与阴性对照组相比虽然差异也为极显著 ($p<0.01$), 但有丝分裂指数值却迅速下降, 这种情况与微核率在高浓度下降低的结果相一致。表明: 外源性化合物的遗传毒性只有经过细胞分裂周期过程才能表现出来 (段昌群等, 1995), 没有经过细胞分裂, 即使毒性很强的遗传毒物, 也无法用染色体畸变、微核等细胞遗传学手段进行监测。

3.5 RE-MECF 诱导的 DNA 损伤及剂量-效应关系

实验中阴性对照的细胞几乎没有出现拖尾现象; $10\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度下细胞核出现拖尾的现象也较少, 绝大多数细胞核完整、呈圆形; 除 $10^4\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度外, 在 $100\sim 10^3\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内各浓度组的细胞核均出现 DNA 断裂, 形成桔红色荧光头部和彗星状尾部, 随着浓度的递增拖尾率增高、拖尾长度增加、各组平均头长均小于阴性对照组。表明: 随着 RE-MECF 浓度的增加, DNA 受损的细胞数增加, 受伤程度加重, 呈现剂量-效应关系。将各浓度组的彗星头长、尾长与阴性对照组比较, 均出现显著性或极显著性差异。各浓度组细胞的彗星头长、尾长、拖尾率及 DNA 损伤率见表 2。

正相关性 (r 分别为 0.833 、 0.742), 表明: 随着彗星尾长及拖尾率的增加 DNA 损伤加重, 细胞微核率也相应上升; 2) 彗星尾长、拖尾率以及细胞微核率与有丝分裂指数之间存在负相关性 (r 分别为-

表 3 SCGE 实验结果与微核千分率、有丝分裂指数之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of the results of SCGE, FMN and MI

	头长 Head length	尾长 Tail length	拖尾率 Percentage of tailed cells	微核率 Frequency of micronucleus	有丝分 裂指数 Mitosis index
头长 Head length		-0.974**	-0.968**	-0.700	0.669
尾长 Tail length			0.967**	0.833	-0.715
拖尾率 Percentage of tailed cells				0.742	-0.770
微核率 Frequency of micronucleus					-0.569
有丝分裂指数 Mitosis index					

注: ** 表示与阴性对照比较差异极显著, $p < 0.01$

0.715、-0.770、-0.569), 表明: RE-MECF 诱导的 DNA 损伤会影响根尖细胞分裂, 使分裂的细胞数减少, 分裂速度变慢。

4 讨论 (Discussion)

4.1 玉米可以作为植物检测材料

由于植物检测技术具有快速、灵敏、培养操作简便等特点, 并与动物实验结果在终点反应的指示本质上具有一致性, 因此被普遍用作检测外源化合物毒性的材料 (Grant et al., 1999; Ma, 1999), 如蚕豆、紫露草、洋葱、大麦等。有资料表明, 当 NaN_3 达到 $1\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时玉米的微核率与阴性组比较差异极显著 (崔文峰等, 2005), 而以蚕豆为材料, 则 NaN_3 达到 $16\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上时才与阴性组有显著差异 (Zhang et al., 2002), 仅就此而言, 作为微核检测材料, 玉米比蚕豆更敏感。玉米还具有易培养、根系发达、染色体数目少、处理简单等特点, 因此玉米可以作为检测外源化合物遗传毒性的实验材料。

4.2 关于 RE-MECF 的“低促高抑”现象形成机制

本文研究中的“低促高抑”现象, 在被处理根尖的生长状况、细胞死亡率以及有丝分裂指数等指标的变化上都有相应的表现, 此结果与其他报道一致 (程上穆等, 2003; 屈艾等, 2001; 2004): 即适当浓度的稀土元素具有促进动、植物生长发育的作用, 当超过一定剂量时, 动、植物生长反而受到抑制和毒害。这种现象可能是由生物体内多种

机制产生的, 比如生长、发育的调节机制、机体内自由基消长的调节机制、有关酶活性的调节机制等等, 均有待人们深入研究。另外, 文中的相关性分析也进一步说明 DNA 损伤越严重, 细胞微核率越高、有丝分裂的细胞数量就越少。

4.3 关于 RE-MECF 的细胞毒性和遗传毒性效应

利用玉米研究常乐稀土复合肥的细胞毒性和遗传毒性, 无论是在亚细胞水平上的细胞核损伤 (微核形成等), 还是在分子水平上的遗传物质 DNA 损伤 (彗星细胞形成), 均说明常乐稀土复合肥提高了玉米的诱变机率, 确有一定的致突变性。据资料报道, 稀土在土壤中可以累积, 不论是土施还是喷施稀土肥料, 稀土元素均可以通过植物根系或叶片进入植物体内, 并以较快的方式分配到各器官部位 (徐星凯, 2005)。由此推测, 稀土肥料的施用也可能使生态系统中其他动、植物诱变率提高, 如此会产生何种生物效应、后果如何至今还不甚清楚。有研究表明, 稀土可不同程度地蓄积在动物或人类的骨骼、大脑、肾脏、睾丸等器官中 (陈祖义, 2002), 甚至可以影响大鼠胎仔。通过对生长在稀土区儿童智商调查 (从自产粮、菜、肉等 15 种主要日常食物计算稀土元素的日摄入量, 值得注意的是食物中有 13 种是植物) 研究表明, 稀土区儿童在智商均数、记忆力、注意力和推理能力方面显著低于对照区, 说明稀土影响了大脑发育及功能, 提示稀土对大脑有毒性作用, 可能干扰了大脑正常的生理生化过程使智商下降 (朱为方等, 1996)。上述稀土对环境、生态和人类的影响以及近期和远期的生物学效应问题, 亦即稀土农用安全性的问题, 确是一个值得关注、亟待深入研究的问题。

通讯作者简介: 屈艾 (1950—) 女, 江苏省人, 教授, 硕士生导师, 长期从事遗传毒理学和环境毒理学的研究, 已在中文核心期刊等上发表论文 50 余篇。Tel: 0516-83500326; E-mail: Quai@xzu.edu.cn.

References

- Cui W F, Li Z Y, Bo J, Qu A, Wang X Q. 2005. Effects of Ce^{4+} on micronucleus and mitosis in root tip cell of maize (*Zea mays* L.) [J]. Journal of Xuzhou Normal University (Natural Science Edition), 23 (1): 65-67 (in Chinese)
- Cheng S M, Zhou Y, Tang H L. 2003. Effect of injecting DyCl_3 liquid on the blood of rats [J]. Chinese Rare Earths, 24 (1): 71-73 (in Chinese)

- Chen Z Y. 2002. Accumulation of rare earth in visceraes of animal and internal radiation [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 20: 176- 180(in Chinese)
- Ding G S, Ma H C. 1984. Effect of rare earths in biology[J]. Environmental Science, 5(2) : 7- 9(in Chinese)
- Duan C Q, Wang H X. 1995. Cytogenetical toxic effects of heavy metals on *Vicia faba* and in Quires into the *Vicia*-Micronucleus [J]. Acta Botanica Sinica, 37(1) : 14- 24(in Chinese)
- Grant W F. 1999. Higher plant assays for the detection of chromosomal aberrations and gene mutations-a brief historical background on their use for screening and monitoring environmental chemicals[J]. Mutat Res, 426: 107- 112
- Kihlman B A. 1986. Handbook of mutagenicity test procedures (2nd) [M]. London: Elsevier, 531- 554
- Koppen G, Verschaeve L. 1996. The alkaline comet test on plant cells: a new genotoxicity test for DNA strand breaks in *Vicia faba* root cells[J]. Mutation Res, 360: 193- 200
- Liu H X, Yang X D, Wang K. 2004. Effect of lanthanum on proliferation and protein expression of liver cell line 7701 [J]. Journal of The Chinese Rare Earth Society, 22(4) : 435- 437(in Chinese)
- Li X B, Zhou A R, Yu W H, Chen X A. 1999. The effect of cerium compounds on two cell lines: human lung cancer cells and human Gastric Carcinoma cells BGC-823 [J]. Chinese Journal of Biochemistry and Molecular Biology, 15(4) : 651- 654(in Chinese)
- Liu Y, Whittier R F. 1994. Rapid preparation of megabase plant DNA from nuclei in agarose plugs and microbeads[J]. Nucleic Acids Res, 22: 2168- 2169
- Ma T H. 1999. The international program on plant bioassays and the report of the follow-up study after the hands on workshop in China[J]. Mutat Res, 426: 103- 106
- Qu A, Wang C R, Bo J. 2004. Research on the cytotoxic and genotoxic effects of rare-earth element holmium to *Vicia faba* [J]. Hereditas, 26(2) : 196- 201(in Chinese)
- Qu A, Li Z Y, Zhu W Z, Zhu M M, Wang X Q, Wen H Y, Wang C R. 2001. Genetic toxicity research on rare earth multi-element compound fertilizer and three kinds of rare earth elements [J]. Hereditas, 23(3) : 243- 246(in Chinese)
- Shi P, Zeng F L, Deng R W. 2004. Effect of lanthanum on permeability and membrane lipid composition in cucumber seedling leaves [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 22(2) : 272- 274(in Chinese)
- Xiong B K, Zhang S R, Guo B S. 2001. Application of rare earths in agriculture: review and prospect over the past thirty years[C]. BaoTou(in Chinese)
- Xu X K, Wang Z J, Zhu W Z, Liu Y. 2001. Distributions of individual rare earths in maize seedling after application of mixed rare earths or lanthanum[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 19(5) : 451- 455(in Chinese)
- Xu X K. 2005. Research advances in the behavior and fate of rare earth elements in soil-plant systems [J]. Journal of Agro-Environment Science, 24: 315- 319(in Chinese)
- Zhang Z Y, Wang Y Q, Li F L, Xiao H Q, Chai Z F. 2002. Distribution characteristics of rare earth elements in plants from a rare earth ore area [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 252(3) : 461- 464
- Zhou L, Li S L, Chen H, Huang K X, Nie Y X. 2004. Effects of mixed rare earth Changle on DNA damage of embryo cell of pregnancy rat [J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 22(3) : 390- 392(in Chinese)
- Zhu W F, Xu S Q, Zhang H, Shao P P, Wu D S, Yang W J, Feng J. 1996. A survey on the children intelligence in rare earth area[J]. Chinese Science Bulletin, 41(10) : 914- 916

中文参考文献

- 丁桂树, 马惠昌. 1984. 稀土对生物的影响 [J]. 环境科学, 5(2) : 7- 9
- 崔文峰, 李宗芸, 薄军, 屈艾, 王秀琴. 2005. Ce⁴⁺对玉米根尖细胞微核及有丝分裂的影响 [J]. 徐州师范大学学报(自然科学版), 23(1) : 65- 67
- 程上穆, 周莹, 唐洪林. 2003. 氯化镉溶液对大鼠血液的影响 [J]. 稀土, 24(1) : 71- 73
- 陈祖义. 2002. 稀土的动物脏器蓄积与射线的内照射 [J]. 中国稀土学报, 20: 176- 180
- 段昌群, 王焕校. 1995. 重金属对蚕豆的遗传毒理作用和对蚕豆根尖微核技术的探讨 [J]. 植物学报, 37(1) : 14- 24
- 刘会雪, 杨晓达, 王夔. 2004. 镧对肝细胞株 7701 的增殖和蛋白质表达的影响 [J]. 中国稀土学报, 22(4) : 435- 437
- 李晓滨, 周爱儒, 俞文华, 陈兴安. 1999. 稀土化合物氯化亚铈对人肺癌细胞 PG、人胃癌细胞 BGC-823 的作用 [J]. 中国生物化学与分子生物学报, 15(4) : 652- 654
- 屈艾, 汪承润, 薄军. 2004. 稀土元素钆对蚕豆的细胞毒性和遗传毒性研究 [J]. 遗传, 26(2) : 196- 201
- 屈艾, 李宗芸, 朱卫中, 朱明明, 王秀琴, 温洪宇, 汪承润. 2001. 稀土多元复合肥料和三种稀土元素的遗传毒性研究 [J]. 遗传, 23(3) : 243- 246
- 史萍, 曾福礼, 邓汝温. 2004. 镧对黄瓜幼苗叶片细胞透性及膜脂的影响 [J]. 中国稀土学报, 22(2) : 272- 274
- 熊炳昆, 张世荣, 郭伯生. 2001. 稀土农用: 三十年的回顾与展望 [C]. 2001 年全国稀土农用工作会议. 包头
- 徐星凯, 王子健, 朱望钊, 刘琰. 2001. 混合稀土和镧施加后苗期玉米体内稀土元素分布的剂量/效应关系研究 [J]. 中国稀土学报, 19(5) : 450- 455
- 徐星凯. 2005. 稀土元素在土壤-植物系统中行为与归宿的研究 [J]. 农业环境科学学报, 24: 315- 319
- 周莉, 李树蕾, 陈辉, 黄可欣, 聂毓秀. 2004. 混合稀土常乐对孕鼠胚胎细胞的 DNA 损伤作用 [J]. 中国稀土学报, 22(3) : 390- 392
- 朱为方, 徐素琴, 张辉, 邵萍萍, 伍东森, 杨文教, 冯嘉. 1996. 稀土区儿童智商调查研究-I 赣南稀土区生物效应研究 [J]. 科学通报, 40(10) : 914- 916