

# 石墨烯-磺胺嘧啶污染对小麦萌发的毒性效应

金彩霞,鲁艺杰,黄刘群,司晓薇,鲍林林,魏闪

(河南师范大学 环境学院;河南省环境污染控制重点实验室;  
黄淮水环境与污染防治教育部重点实验室,河南 新乡 453007)

**摘要:**通过植物生态毒理实验,研究了纳米材料石墨烯与典型抗生素磺胺嘧啶(SD)单一及复合污染对小麦的根伸长和芽伸长的影响.结果表明,SD 单一污染条件下,2 mg · L<sup>-1</sup> SD 促进小麦的根伸长和芽伸长,当质量浓度大于 10 mg · L<sup>-1</sup> 时,则对小麦发芽产生明显的抑制,抑制作用随着 SD 浓度的增加而增强.石墨烯单一污染作用下,促进了小麦的根伸长和芽伸长.石墨烯-磺胺嘧啶复合污染作用下,SD 在复合毒性中起主导作用,其复合污染效应同单一 SD 污染相似,在二者复合污染作用下,主要表现为协同作用,石墨烯增强了 SD 对小麦的毒性.

**关键词:**石墨烯;磺胺嘧啶;复合污染;生态毒性;种子萌发

**中图分类号:**X171.5

**文献标志码:**A

石墨烯(Graphene)是由 sp<sup>2</sup> 杂化形成的具有二维结构的新型纳米材料<sup>[1]</sup>.由于其具有较高的机械强度以及在光学、导电和电化学等方面的优异性能,被广泛应用于电子、医学、光学、食品生产包装、化妆品以及环境保护等多个行业<sup>[2-3]</sup>.石墨烯广泛使用所可能导致的生态环境问题引起了环境学界的普遍关注.目前见于报道的石墨烯生态效应研究主要集中在微生物、藻类和动物<sup>[4-6]</sup>等方面,但对农田作物生态毒理方面的研究相对不多<sup>[7]</sup>.相关研究表明,石墨烯使机体受损主要的原因,是其能导致细胞出现脂质过氧化<sup>[8]</sup>.石墨烯的浓度、暴露时间以及受胁迫植物的种类是影响其危害程度的重要因素<sup>[9]</sup>.

大量的抗生素被用于人和动物疾病的防治,在动物饲料中亦可通过添加抗生素提高饲料利用率<sup>[10]</sup>.但进入动物体内的抗生素大部分以原形或代谢物形式随粪尿排出体外,进入环境,对生态环境和人体健康构成威胁.磺胺类药物在我国的生产量和使用量均位于前列<sup>[11]</sup>,经动物排泄进入环境的原药及代谢产物,一般不容易被完全降解和转化,经各级生物和非生物的富集,对土壤和水体等生态环境产生影响,并最终通过食物链危害人体健康<sup>[12]</sup>,已在土壤、水体等多种环境介质中发现其残留.磺胺嘧啶(Sulfadiazine, SD)在磺胺类药物中因其使用量大而成为最具有代表性的药物.

随着石墨烯在生物医药领域的应用以及磺胺类抗生素的普及和巨大应用量,环境中势必会出现石墨烯-SD 复合污染.目前,关于石墨烯与 SD 的单一生态毒理效应已有相关研究<sup>[13-14]</sup>,但石墨烯-SD 复合污染的生态毒理效应还少见报道,因此,急需开展相关方面的研究.本文以小麦作为供试作物,研究了石墨烯和 SD 单一及复合污染对小麦发芽的影响,以期评估环境中石墨烯与 SD 的复合污染的生态风险提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

本实验中小麦种子购于北京开心农场种子公司.石墨烯分散液购于南京先丰纳米科技有限公司;SD,纯度为 99.9%,购于美国 Sigma 公司.

收稿日期:2018-09-25;修回日期:2018-11-26.

基金项目:国家自然科学基金(21107023);河南省高等学校青年骨干教师资助计划(2015GGJS-087);河南省科技攻关项目(162102310095;172102310243).

作者简介(通信作者):金彩霞(1976-),女,黑龙江延寿人,河南师范大学副教授,博士,研究方向为环境化学、生态毒理学,E-mail: jincaixia@htu.cn.

## 1.2 实验设计

选取大小均匀、籽粒饱满的小麦种子,置于体积浓度3%的 $H_2O_2$ 浸泡消毒10 min,用蒸馏水冲洗数次.在培养皿中加入一定浓度的石墨烯和SD溶液,将种子均匀置于培养皿中,恒温培养箱(25℃)暗光培养96 h. SD的质量浓度分别为0、2、5、10、20、50  $mg \cdot L^{-1}$ ,石墨烯的质量浓度分别为0、5、10、50、100、200  $mg \cdot L^{-1}$ ,两两复合,共计36个处理,以蒸馏水作为空白对照,每个处理重复3次.培养结束后,用去离子水冲洗干净,用吸水纸吸干植株表面水分,测定小麦的根长和芽长,并计算根长和芽长抑制率.抑制率(Inhibition rate, IR)按下式进行计算:  $IR = \frac{A - B}{A} \times 100\%$ ,式中:A为对照组根(芽)长,mm;B为处理组根(芽)长,mm.

## 1.3 实验数据分析

采用Excel 2013和SPSS 20.0对数据进行方差分析及回归分析.实验数据结果用平均数±标准误差(Mean±SD)表示.浓度组与对照组用最小显著差异法(LSD法)进行比较, $P < 0.05$ 为差异显著.

# 2 结果与讨论

## 2.1 SD对小麦根伸长和芽伸长的影响

SD单一污染对小麦根伸长、芽伸长的作用如表1所示.2  $mg \cdot L^{-1}$  SD对小麦的根伸长和芽伸长具有激活效应,能够刺激小麦根伸长和芽伸长,促进小麦的生长,当SD质量浓度超过10  $mg \cdot L^{-1}$ 时,则对小麦的根伸长和芽伸长产生抵制作用,且随着SD质量浓度的增加,抑制作用增强,实验结果与先前所见研究报道一致<sup>[15]</sup>.根(芽)长抑制率( $y$ )与SD浓度( $x$ )之间的拟合方程为 $y_{(根)} = 1.709x_{(SD)} - 7.131 (R^2 = 0.8257)$ 和 $y_{(芽)} = 1.4464x_{(SD)} - 0.5124 (R^2 = 0.8611)$ .由方程可知,小麦的根伸长和芽伸长抑制率与SD质量浓度成线性正相关,即随着SD质量浓度的增加,抑制率增大.根伸长、芽伸长抑制率与SD质量浓度具有较好的相关性( $R_{根}^2 = 0.8257, R_{芽}^2 = 0.8611$ ).小麦根伸长和芽伸长受到抑制,表明SD影响小麦的正常生长发育,其已受到SD的毒害影响.统计分析结果表明,不同质量浓度的SD对小麦根伸长和芽伸长的抑制率均达到极显著水平( $P < 0.01$ ).

表1 SD单一污染对小麦根伸长、芽伸长的影响

Tab.1 The effect of SD on root length and shoot elongation of wheat

指标/nm	SD质量浓度/( $mg \cdot L^{-1}$ )					
	0	2	5	10	20	50
根长	32.1±0.90 <sup>d</sup>	35.8±1.00 <sup>c</sup>	34.8±0.35 <sup>c</sup>	28.5±0.55 <sup>c</sup>	15.0±1.05 <sup>b</sup>	10.0±1.85 <sup>a</sup>
芽长	34.5±1.15 <sup>d</sup>	36.0±0.55 <sup>d</sup>	36.3±1.35 <sup>d</sup>	24.8±1.75 <sup>c</sup>	21.3±1.15 <sup>b</sup>	11.6±0.85 <sup>a</sup>

注:表中数据为Mean±SD,不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ ),下同.

在供试浓度范围内,低浓度SD促进小麦的生长,而较高浓度SD则对小麦发芽产生毒害效应,其产生毒害效应的作用机制可能与污染物和植物体内叶酸竞争有关.叶酸含量的高低关系到嘌呤的合成,而嘌呤是细胞脱落酸和分裂素的前体,因此,由于植物体内含有SD降低了植物对叶酸的吸收效率,从而影响其正常的生理功能<sup>[16]</sup>.此外,在实验中根的 $IC_{50}$ 值(根长抑制率达到50%时SD的质量浓度值)(39.28  $mg \cdot L^{-1}$ )比芽的值(45.29  $mg \cdot L^{-1}$ )低,说明根对外界污染的反应比芽更敏感.

## 2.2 石墨烯对小麦根伸长、芽伸长的影响

石墨烯对小麦根伸长和芽伸长的影响见表2.石墨烯对小麦根伸长和芽伸长均具有促进作用.分析表明,不同质量浓度石墨烯对小麦芽伸长的抑制率达到显著水平( $P < 0.05$ ),根伸长抑制率达到极显著水平( $P < 0.01$ ).在一定的质量浓度范围内,石墨烯对小麦发芽的促进作用随其浓度的增加呈现先下降后升高的趋势.回归方程为 $y_{(根)} = -0.0009x^2 + 0.0794x - 4.5043 (R^2 = 0.9683)$ 及 $y_{(芽)} = -0.0004x^2 + 0.0226x - 7.5132 (R^2 = 0.9358)$ .小麦的根伸长、芽伸长抑制率与石墨烯质量浓度具有很好的相关性( $R_{根}^2 = 0.9683, R_{芽}^2 = 0.9358$ ).

有研究表明,纳米材料对植物生长具有毒害作用<sup>[16]</sup>,也有研究表明,纳米材料对植物的生长具有促进作

用<sup>[17]</sup>,在本实验中,纳米材料对植物生长具有促进作用.在供试浓度范围内(0~200 mg·L<sup>-1</sup>),石墨烯单一污染对小麦根伸长和芽伸长均表现为促进作用,且随着质量浓度的升高,其促进作用先降低后升高.50 mg·L<sup>-1</sup>石墨烯,对小麦根生长的促进作用最小,仅为 0.1%,10 mg·L<sup>-1</sup>时,对小麦芽伸长促进作用最小,为 5.2%.低于或高于 10 mg·L<sup>-1</sup>时,随着石墨烯浓度的升高或降低,对小麦根/芽伸长的促进作用均增强,且在 200 mg·L<sup>-1</sup>时促进作用达到最大,分别为 25.1%和 20.5%.石墨烯可以促进小麦的根/芽伸长,可能是由于石墨烯具有较大的比表面积,吸附在种子表面后,能够通过刺激细胞的水蛋白通道促进细胞吸水,提高细胞的含水量,促进细胞内的各种代谢,从而刺激小麦的生长<sup>[18]</sup>.

表 2 石墨烯单一污染对小麦根伸长、芽伸长的影响

Tab.2 The effect of graphene on root length and shoot elongation of wheat

指标/mm	石墨烯质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )					
	0	5	10	50	100	200
根长	32.1±0.90 <sup>a</sup>	33.6±1.30 <sup>ab</sup>	33.5±0.25 <sup>ab</sup>	32.1±0.30 <sup>a</sup>	34.6±0.85 <sup>b</sup>	40.1±0.25 <sup>c</sup>
芽长	34.5±1.15 <sup>a</sup>	37.8±0.45 <sup>b</sup>	36.3±0.20 <sup>b</sup>	37.0±0.40 <sup>b</sup>	37.1±0.45 <sup>b</sup>	41.6±1.45 <sup>c</sup>

### 2.3 石墨烯-SD 复合污染对小麦根伸长、芽伸长的影响

由表 3~表 5 可知,石墨烯-SD 复合污染时,小麦的根伸长和芽伸长抑制率与 SD 浓度之间具有显著相关性( $P<0.01$ ),相关性分析可知,50 mg·L<sup>-1</sup>石墨烯,小麦根伸长和芽伸长抑制率与 SD 浓度之间的相关性相对较差( $R^2$  分别为 0.785 5,0.884 2),在其他复合浓度下,小麦根伸长和芽伸长抑制率与 SD 浓度之间均具有较好的相关性( $R^2\geq 0.917 8$ ).

表 3 石墨烯-SD 复合污染对小麦根伸长的影响

Tab.3 The effect of graphene-SD on root length of wheat

mm

SD 质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	石墨烯质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )				
	5	10	50	100	200
0	33.6±1.30 <sup>c</sup>	33.5±0.25 <sup>c</sup>	32.1±0.30 <sup>d</sup>	34.6±0.85 <sup>d</sup>	40.1±0.25 <sup>d</sup>
2	33.0±1.40 <sup>c</sup>	32.1±0.35 <sup>c</sup>	34.5±2.80 <sup>d</sup>	35.3±0.75 <sup>d</sup>	39.4±0.06 <sup>d</sup>
5	33.1±0.45 <sup>c</sup>	29.4±2.00 <sup>d</sup>	33.1±0.95 <sup>d</sup>	25.9±0.49 <sup>c</sup>	32.8±2.15 <sup>c</sup>
10	31.1±1.50 <sup>c</sup>	27.4±0.85 <sup>c</sup>	21.3±3.15 <sup>c</sup>	26.5±3.90 <sup>c</sup>	34.8±0.80 <sup>c</sup>
20	18.7±2.05 <sup>b</sup>	17.7±1.20 <sup>b</sup>	16.6±0.10 <sup>b</sup>	17.9±0.20 <sup>b</sup>	24.9±2.45 <sup>b</sup>
50	9.7±0.55 <sup>a</sup>	7.2±0.55 <sup>a</sup>	10.0±2.05 <sup>a</sup>	7.7±0.12 <sup>a</sup>	11.5±0.15 <sup>a</sup>

在复合污染胁迫下,SD 质量浓度为 2 mg·L<sup>-1</sup>时,石墨烯-SD 复合污染对小麦的根伸长和芽伸长具有激活效应,并且在石墨烯质量浓度为 200 mg·L<sup>-1</sup>达到最大,分别为 22.6%和 21.6%;SD 质量浓度为 5 mg·L<sup>-1</sup>,石墨烯质量浓度在 5 和 200 mg·L<sup>-1</sup>时促进小麦根伸长和芽伸长,而在 10 和 100 mg·L<sup>-1</sup>时对小麦的根伸长和芽伸长表现为抑制作用.SD 浓度在 10 mg·L<sup>-1</sup>时,石墨烯质量浓度在 200 mg·L<sup>-1</sup>时,对小麦根伸长有激活效应,在其他质量浓度下,对小麦根伸长和芽伸长表现为抑制作用.SD 质量浓度超过 20 mg·L<sup>-1</sup>,复合污染均表现为抑制作用,且随着 SD 质量浓度的增大,抑制作用增强,在 SD 质量浓度为 50 mg·L<sup>-1</sup>,石墨烯质量浓度为 10 mg·L<sup>-1</sup>时,对小麦的根伸长和芽伸长抑制率达到最大,分别为 77.7%和 69.4%.

石墨烯-SD 复合污染胁迫下,随着 SD 质量浓度的增大,其对小麦的根伸长和芽伸长的抑制率也相应增加,但随着石墨烯质量浓度的增加,对小麦的影响变化不显著,说明 SD 在复合毒性中起主导作用,但二者复合污染对小麦根伸长和芽伸长抑制率的影响比较复杂.复合污染条件下,在石墨烯和 SD 复合污染条件下(SD 质量浓度为 20 mg·L<sup>-1</sup>除外),对小麦根伸长和芽伸长的抑制表现为协同作用.纳米材料石墨烯的存在,增强了 SD 对小麦根伸长和芽伸长的毒性,这与 Hu X 等<sup>[19]</sup>研究氧化石墨烯提高了 As 的毒性,抑制小麦的生长的结果相似.目前,关于复合污染的作用机理报道的主要有竞争结合位点、影响生物酶的活性、干扰生物正常的生理过程、改变生物细胞结构和功能、螯合(或络合)作用和沉淀作用以及干扰生物大分子的结构和

功能等<sup>[20-23]</sup>.石墨烯具有较大的比表面积,可以吸附在种子表皮,刺激根细胞的水蛋白通道,促进细胞吸收水分和污染物;同时由于石墨烯具有较小的粒径,其可以通过细胞壁空隙进入植物根细胞并经导管转移到地上部,进入细胞时由于机械力破坏了细胞膜<sup>[6]</sup>,导致植物对SD的吸收量增大,从而抑制植物的生长,增强了SD的毒性,所以二者复合表现出协同效应.但是,纳米材料与SD对植物生长的作用机制比较复杂,其毒性与污染物本身的化学性质、浓度组合以及供试植物种类、环境等都有一定的关系,其作用机制有待更进一步的研究.

表4 石墨烯-SD复合污染对小麦芽伸长的影响

Tab.4 The effect of graphene-SD on shoot elongation of wheat

mm

SD质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	石墨烯质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )				
	5	10	50	100	200
0	37.8±0.45 <sup>de</sup>	36.3±0.20 <sup>d</sup>	37.0±0.40 <sup>e</sup>	37.9±0.45 <sup>f</sup>	41.6±1.45 <sup>e</sup>
2	40.2±1.80 <sup>e</sup>	38.7±1.40 <sup>d</sup>	37.2±0.14 <sup>e</sup>	40.8±1.27 <sup>e</sup>	42.0±7.85 <sup>e</sup>
5	36.0±0.30 <sup>d</sup>	30.8±1.95 <sup>c</sup>	33.6±3.32 <sup>d</sup>	31.7±2.76 <sup>d</sup>	35.5±4.45 <sup>d</sup>
10	31.6±3.50 <sup>c</sup>	31.5±0.45 <sup>c</sup>	25.8±1.48 <sup>c</sup>	29.5±0.35 <sup>c</sup>	32.0±0.78 <sup>c</sup>
20	23.3±1.60 <sup>b</sup>	24.2±2.80 <sup>b</sup>	22.9±1.34 <sup>b</sup>	25.8±0.42 <sup>b</sup>	25.9±3.96 <sup>b</sup>
50	12.9±0.10 <sup>a</sup>	10.5±0.65 <sup>a</sup>	13.4±1.20 <sup>a</sup>	11.9±0.07 <sup>a</sup>	13.6±1.27 <sup>a</sup>

表5 在相同石墨烯质量浓度作用下小麦根/芽伸长抑制率与SD的关系

Tab.5 The interaction of root length/shoot elongation and SD at the same concentration of graphene

石墨烯质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	回归方程	R <sup>2</sup>	P	IC <sub>50</sub>
0	$y_{(根)} = -0.000\ 9x^2 + 0.079\ 4x - 4.504\ 3$	0.968\ 3	<0.01	/
	$y_{(芽)} = -0.000\ 4x^2 + 0.022\ 6x - 7.513\ 2$	0.935\ 8	<0.05	/
5	$y_{(根)} = 1.611\ 1x - 6.295\ 6$	0.921\ 8	<0.01	34.94
	$y_{(芽)} = 1.568x - 10.74\ 6$	0.935\ 2	<0.01	38.74
10	$y_{(根)} = 1.610\ 6x + 1.062\ 1$	0.956\ 6	<0.01	30.38
	$y_{(芽)} = 1.539\ 1x - 5.472$	0.948\ 0	<0.01	36.04
50	$y_{(根)} = 1.498\ 1x + 1.987\ 4$	0.785\ 5	<0.01	32.05
	$y_{(芽)} = 1.308\ 7x + 0.180\ 6$	0.884\ 2	<0.01	38.07
100	$y_{(根)} = 1.568\ 3x + 2.154\ 3$	0.891\ 6	<0.01	30.50
	$y_{(芽)} = 1.506\ 4x - 7.238\ 8$	0.917\ 8	<0.01	38.00
200	$y_{(根)} = 1.710\ 9x - 19.07$	0.954\ 2	<0.01	40.37
	$y_{(芽)} = 1.554\ 5x - 13.43$	0.941\ 7	<0.01	40.80

### 3 结 论

在供试浓度范围内,单一石墨烯污染对小麦的根生长和芽伸长具有促进作用;SD单一污染在2 mg·L<sup>-1</sup>时,对小麦的根生长和芽伸长具有促进作用,当SD质量浓度超过10 mg·L<sup>-1</sup>时,对小麦的根生长和芽伸长均表现为抑制作用,且随着SD质量浓度的升高,抑制作用增强.石墨烯-SD复合污染处理下,SD在复合毒性中起主要作用.复合污染条件下,2 mg·L<sup>-1</sup>SD能够刺激小麦的根生长和芽伸长,当SD质量浓度超过10 mg·L<sup>-1</sup>,除石墨烯质量浓度在200 mg·L<sup>-1</sup>时,促进小麦的根生长,其他复合浓度下,均抑制小麦的根生长和芽伸长,且随着SD质量浓度升高,抑制率增大.通过对SD和石墨烯的联合毒性研究发现,在SD质量浓度为20 mg·L<sup>-1</sup>时,表现为拮抗作用;在SD其他浓度下,两者复合表现为协同作用.整体来说,石墨烯的存在,增强了SD对小麦的毒性.

### 参 考 文 献

- [1] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Electric field effect in atomically thin films[J]. Science, 2004, 306: 666-669.
- [2] Wang Y, Li Z, Hu D, et al. Aptamer/graphene oxide nanocomplex for in situ molecular probing in living cells[J]. Journal of the American

- Chemical Society, 2010, 132: 9274-9276.
- [3] Ji L, Chen W, Xu Z, et al. Graphene nanosheets and graphite oxide as promising adsorbents for removal of organic contaminants from aqueous solution[J]. *Journal of environmental quality*, 2013, 42(1): 191-198.
- [4] Yang K, Gong H, Shi X, et al. In vivo biodistribution and toxicology of functionalized nano-graphene oxide in mice after oral and intraperitoneal administration[J]. *Biomaterials*, 2013, 34(11): 2787-2795.
- [5] Nogueira P F M, Nakabayashi D, Zucolotto V. The effects of graphene oxide on green algae *Raphidocelis subcapitata*[J]. *Aquatic Toxicology*, 2015, 166: 29-35.
- [6] Akhavan O, Ghaderi E. Toxicity of graphene and graphene oxide nanowalls against bacteria[J]. *ACS nano*, 2010, 4(10): 5731-5736.
- [7] Begum P, Ikhtari R, Fugetsu B. Graphene phytotoxicity in the seedling stage of cabbage, tomato, red spinach, and lettuce[J]. *Carbon*, 2011, 49(12): 3907-3919.
- [8] Begum P, Fugetsu B. Induction of cell death by graphene in *Arabidopsis thaliana* (Columbia ecotype) T87 cell suspensions[J]. *Journal of hazardous materials*, 2013, 260: 1032-1041.
- [9] Maurer-Jones M A, Gunsolus I L, Murphy C J, et al. Toxicity of engineered nanoparticles in the environment[J]. *Analytical chemistry*, 2013, 85(6): 3036-3049.
- [10] Wu T, Li S F, Dai G, et al. Research process of veterinary drug residues of fluoroquinolones in animal food[J]. *China Animal Health*, 2012, 3: 19-22.
- [11] 金彩霞, 刘建军, 陈秋颖, 等. 兽药磺胺间甲氧嘧啶对土壤呼吸以及酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(2): 314-318.
- [12] 丁杰, 沙焕伟, 赵双阳, 等. 磁性氧化石墨烯/壳聚糖制备及其对磺胺嘧啶吸附性能研究[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(10): 3691-3700.
- [13] Li X, Yu H, Xu S, et al. Uptake of three sulfonamides from contaminated soil by pakchoi cabbage[J]. *Ecotoxicology and Environmental safety*, 2013, 92: 297-302.
- [14] 金彩霞, 毛蕾, 司晓薇. 3种磺胺类兽药单一及复合污染对不同作物根尖细胞的微核效应研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(4): 666-671.
- [15] Jin C, Chen Q, Sun R, et al. Eco-toxic effects of sulfadiazine sodium, sulfamonomethoxine sodium and enrofloxacin on wheat, Chinese cabbage and tomato[J]. *Ecotoxicology*, 2009, 18(7): 878-885.
- [16] 王超, 段链, 张宏伟. 汞、神、甲醛单一及复合污染对蚕豆根尖细胞微核的影响及污染评价[J]. *癌变·畸变·突变*, 2016, 28(5): 383-387.
- [17] 常海伟, 任文杰, 刘鸿雁, 等. 磺化石墨烯对小麦幼苗生长及生理生化指标的影响[J]. *生态毒理学报*, 2015, 10(4): 123-128.
- [18] Zhang M, Gao B, Chen J, et al. Effects of graphene on seed germination and seedling growth[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2015, 17(2): 1-8.
- [19] Hu X, Kang J, Lu K, et al. Graphene oxide amplifies the phytotoxicity of arsenic in wheat[J]. *Scientific reports*, 2014, 4: 1-10.
- [20] 宁黔冀, 刘梦璐, 杨洪. 氧化石墨烯/硝酸钙生物水凝胶体外生物相容性研究[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(3): 80-84.
- [21] Zhang M, Gao B, Chen J, et al. Effects of graphene on seed germination and seedling growth[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2015, 17(2): 1-8.
- [22] Barnes P, Fodey T L, Smyth W G, et al. Investigation of the role of environmental contamination in the occurrence of residues of the veterinary drug phenylbutazone in cattle[J]. *Food Additives & Contaminants Part A Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 2017, 34(4): 520-524.
- [23] 段伟艳, 杜永祥, 孟范平, 等. 氧化石墨烯对双壳类动物文蛤的亚致死毒性研究[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(7): 2755-2764.

## Effect of single and combined contamination of graphene and sulfadiazine on seed germination of wheat

Jin Caixia, Lu Yijie, Huang Liuqun, Si Xiaowei, Bao Linlin, Wei Shan

(School of Environment; Henan Key Laboratory of Environmental Pollution Control; Key Laboratory for Yellow River and Huaihe River Water Environment and Pollution Control, Ministry of Education, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

**Abstract:** Eco-toxicological test was carried out to investigate the effect of single/combined pollution of graphene and sulfadiazine (SD) on germination of wheat seeds. Under the single sulfadiazine exposure, it showed a stimulation effect to wheat at  $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , while it showed an inhibition effect to wheat when the concentration of SD was up to  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , and as the higher of SD's concentration, the stronger of the inhibition. It also showed a stimulation effect to wheat root length and shoot elongation under single graphene exposure. Under graphene and sulfadiazine combined pollution, SD plays a major role in the toxicity of compound, and the effects of the combined pollution were similar to the single SD pollution. The joint toxicity of the interaction of two pollutants was synergism, and the toxicity of SD to wheat was enhanced by graphene.

**Keywords:** graphene; sulfadiazine; combined contamination; ecotoxicity; seed germination

[责任编辑 赵晓华]