氧化石墨烯对银白杨扦插苗生长的影响*

曹慧芬[1]，张 晓[2]，赵建国[2**]，王海雁[2**]，贾海宽[3]，姚建忠[4]，石源睿[1]，
边 涛[1]，张颖颖[1]，刘 霞[1]

(1.山西大同大学生命科学学院，山西 大同 037009；2.山西大同大学炭材料研究所，山西 大同 037009；
3.红花尔基林业局国家樟子松良种基地，内蒙古 呼伦贝尔 021112；
4.山西省桑干河杨树丰产林实验局，山西 大同 037006)

摘要：为了研究石墨烯的生物效应，为其在林业生产应用提供指导.本文以银白杨(*Populus alba* L.)扦插苗为实验材料，采用室内盆栽方式，在土壤中施加不同质量浓度(0、10、20、50和100 mg/L)氧化石墨烯(GO)溶液后，分析植株生长情况、叶片光合荧光参数、根系形态和土壤肥力变化情况.与0相比，10、20、50和100 mg/L GO溶液处理后扦插苗地上部分株高和新生茎叶的质量分别增加了16.6%～62.1%和34.4%～61.7%(t=−6.13～−1.82，P<0.05)，根部质量、总长度、总表面积、总投影面积和总体积分别增加了30.6%～126.1%、25.6%～124.0%、21.3%～113.4%、21.2%～119.3%和12.5%～112.5%(t=−6.35～−0.68，P<0.05)，土壤有效磷质量分数分别提高了19.8%～57.4%(t=−1.25～0.78，P<0.05).土壤中施加GO溶液后，银白杨扦插苗地上部分、根系及土壤肥力近似以浓度依赖的方式得到提升.因此，推测GO溶液主要通过提高土壤肥力和改善根系生长状态促进银白杨扦插苗的生长.

关键词：氧化石墨烯；银白杨；扦插苗；根系形态；光合荧光；土壤肥力
中图分类号：S718 **DOI**：10.19789/j.1004-9398.2021.03.006

0 引 言

作为一种新型纳米材料，石墨烯因良好的理化性质已被广泛应用于多个领域，包括储能、纳米电子设备和电池、生物医学、生物传感器、细胞成像、药物输送和组织工程等[1-3].与上述领域相比，石墨烯及其衍生物在农林业领域的应用才刚刚开始，当前研究热点主要集中在其对植物的生物效应方面.石墨烯及其衍生物对不同植物的生物效应研究，不仅能为理解其生物效应提供新的证据，也将推动其在农林业领域的应用.

已有研究表明石墨烯的生物效应与其理化性质、作用物种、浓度和处理时间密切相关[4].水培条件下，低浓度磺化石墨烯(sulfonated graphene，SGO)处理可以促进小麦(*Triticum aestivum* L.)根系的生长[5]；水培条件下，1～2 g/L氨基化石墨烯(amine-functionalized graphene，G-NH_2)溶液处理可以促进小麦种子萌发和根系生长[6]；液体培养基中，20 mg/L氧化石墨烯(graphene oxide，GO)处理烟草(*Nicotiana tabacum* L.)幼苗35 d，可以促进其根系生长[7]；土壤中，50 mg/L GO溶液处理可以促进菠菜(*Spinacia oleracea* L.)和细香葱(*Allium ascalonicum* L.)等植物的种子萌发[8]；固体培养基条件下，不同质量浓度石墨烯溶液可以促进欧洲山杨(*Populus tremula* L.)扦插苗生根和根系生长[9]；固体培养基条件下，2 mg/L的石墨烯溶液可以促进树莓(*Rubus idaeus* L.)组培苗根系及地上部分的生长[10]；土壤中，50 mg/L石墨烯溶液处理可以促进白榆(*Ulmus pumila* L.)扦插苗的地上和根系的生长[11]；土壤中，50和200 mg/L石墨烯溶液处理可以促进陆地棉(*Gossypium hirsutum* L.)和长春花(*Catharanthus roseus* L.)植株生长，并能缓解盐胁迫和干旱胁迫对

收稿日期：2020-08-07
* 山西省基础研究计划项目(201901D211437)；山西省高等学校科技创新项目(2020L0467)；2018年山西省科技成果转化引导专项项目(201804D131041)；山西省优秀归国人才科研活动基金项目(2016-14)；山西大同大学博士启动经费(2018-B-13)；大学生创新创业训练计划项目(XDC2019237)
** 通信作者：jgzhaoshi@126.com；why7135280@126.com

2种植物生长的伤害[12]. 石墨烯促进植物生长的机制可能与提高水分的运输效率[8]、改善土壤养分利用[13]等机制相关. 除了以上正效应外,也有很多研究表明高浓度石墨烯或GO溶液处理后,可以对甘蓝(*Brassica oleracea* L.)[14]、番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)[14]、红莴菜(*Senecio fuluipes* L.)[14]、烟草[7]、小麦[6]、油菜(*Brassica napus* L.)[15]和水稻(*Oryza. sativa* L.)[16]等植物的生长产生不良反应.

GO是石墨烯主要的修饰类型,含有大量的羧基、羰基、环氧基和羟基等含氧亲水官能团[17]. 这些官能团使GO在具备石墨烯的独特理化性质外,同时赋予了其更高的表面活性和更好的生物相容性,且易于组装和功能化[8].

银白杨(*Populus alba* L.)属杨柳科落叶乔木,广泛分布于我国东北、华北和西北等地区,具有树形高大、根系发达、耐寒、耐旱和耐盐碱的特点,是用于土壤改良、防风固沙的重要树种[18-21]. 目前,在林业生产过程中,银白杨主要通过扦插繁殖,在成活后进行移栽[18],研究改善扦插苗生长的技术手段对银白杨的生产具有重要意义.

为全面解析GO溶液对不同植株生长的影响,本研究以银白杨扦插苗为材料,分析GO处理后,扦插苗地上和地下器官的生长情况,并从光合作用、根系生长状态和土壤养分等方面解释GO影响银白杨扦插苗生长的作用机制.

1 材料和方法

1.1 实验材料

供试银白杨枝条由山西省桑干河杨树丰产林实验局提供,选取当年生直径0.8 cm左右的枝条,剪成长度为20.0 cm插穗. 土壤养分分析所用试剂均购自浙江托普云农科技股份有限公司;实验用水(H_2O)为去离子水;GO分散液为本实验室合成. 本研究于2020年1—8月在山西大同大学炭材料研究所植物生长室完成.

1.2 实验设计

将5组(每组10株,共50株)银白杨枝条插入50 mg/L的ABT1生根粉溶液中,浸泡深度约5 cm,浸泡时间为2 h. 然后将其插入由草炭土、蛭石和珍珠岩按照体积比为2∶1∶1的比例混合而成的实验土中,实验土提前用质量浓度为0、10、20、50和100 mg/L的GO溶液浇透. 将扦插苗转移入培养室中,继续培养,培养室光照周期为8 h黑暗、16 h光照,温度为23℃,湿度为50.0%. 每10 d用100 mL H_2O或同体积不同GO质量浓度的溶液浇灌1次. 培养60 d后,进行植物性状分析. 实验重复3次.

1.3 测定方法

1.3.1 生长发育分析

将银白杨扦插苗从土壤中取出,用自来水将根上附着的土冲洗干净,滤纸吸干表面水分. 卷尺测量新生枝条的长度,将枝条上新长出的茎叶及根系剪下,分别在电子天平上称质量. 取5株植物的平均值进行分析.

1.3.2 根系形态分析

将洗净土的根系在水中尽量分开,并利用扫描仪(Epson公司)扫描. 利用根系分析系统(WinRHIZO)对根总长度、总表面积、总投影面积和总体积进行分析. 取5株植物的平均值进行分析.

1.3.3 叶片光合荧光测定

利用德国WALZ公司PAM-2500便携式调制叶绿素荧光仪测定光系统II(PSII)最大光化学效率(F_v/F_m)、PSII实际光化学效率(YII)、光化学淬灭系数(qP)和非光化学淬灭(NPQ),测定部位为叶片中部,尽量避开大的叶脉位置,测定时间为19∶00—22∶00[22]. 其中,F_v/F_m为PSII的内在效率[23],YII为PSII实际光化学效率[24],qP为PSII吸收的光能进行光化学电子传递的部分[25],NPQ为PSII吸收的以热形式耗损的光能部分[22]. 每个处理测量5株植株,每株植株测2片树叶.

1.3.4 土壤养分分析

土壤肥力是影响植物生长的重要因素,为了分析GO溶液促进银白杨扦插苗生长的机制,利用浙江托普云农科技股份有限公司生产的TPY-8A型土壤养分速测仪测定土壤肥力的含量,包括土壤中铵态氮(N)、有效钾(K)和速效磷(P). 除去银白杨根系周围浮土,以5点取样法取盆内土壤. 将土壤样品充分混合后晾干24 h,经1 mm筛子过筛后,分别进行样品测量. 每个处理测3个样品.

1.4 统计分析

数据以$\bar{x}\pm s$表示. 利用SPSS.22.0软件进行不同质量浓度间独立样本t检验. $P<0.05$为差异有统计学意义.

2 实验结果

2.1 地上部分生长状态

不同GO质量浓度溶液处理后的银白杨扦插苗

的生长状态和详细统计数据如图1和表1所示.随着GO质量浓度的增加,银白杨扦插苗地上部分株高和质量逐渐增加,对应株高为(12.08±0.83)~(19.58±0.82)cm,地上部分质量(3.37±0.36)~(5.45±0.71)g.与0相比,10、20、50和100 mg/L GO溶液处理后,扦插苗地上部分株高显著增加了16.6%、32.1%、60.6%和62.1%(t=−1.82、−2.66、−5.04和−6.13,P<0.05),而新生茎叶的质量显著增加了34.4%、39.8%、52.2%和61.7%(t=−3.14、−2.75、−4.33和−4.55,P<0.05).



图1　不同质量浓度GO溶液处理后银白杨扦插苗植株形态
(a)0;(b)10 mg/L;(c)20 mg/L;(d)50 mg/L;(e)100 mg/L

表1　不同质量浓度GO溶液处理后银白杨扦插苗地上部分生长情况

质量浓度/(mg·L^{-1})	株数	株高/cm	质量/g
0	5	12.08±0.83	3.37±0.36
10	5	14.09±1.72^{a}	4.53±0.53^{b}
20	5	15.96±2.39^{a}	4.71±0.76^{b}
50	5	19.40±1.34^{a}	5.13±0.61^{b}
100	5	19.58±0.82^{a}	5.45±0.71^{b}

注:与0相比,^{a}t=−1.82、−2.66、−5.04和−6.13,^{b}t=−3.14、−2.75、−4.33和−4.55,P<0.05.

2.2　根部生长发育状态

不同GO质量浓度溶液处理后,银白杨扦插苗的根部质量、总长度、总表面积、总投影面积和总体积详细结果列于表2.整体分析,这5个参数均表现出不同程度的提高,处理后,根部质量为(1.57±0.09)~(3.55±0.71)g,总长度为(139.05±14.00)~(311.47±8.57)cm,总表面积为(16.61±2.43)~(35.44±3.20)cm^2,总投影面积为(5.29±0.77)~(11.60±1.02)cm^2,总体积为(0.16±0.05)~(0.34±0.07)cm^3.与0相比,10、20、50和100 mg/L GO溶液处理后,扦插苗根部质量分别增加了30.6%、39.5%、73.9%和126.1%(t=−3.96、−4.87、−5.67和−4.77,P<0.05),总长度分别增加了25.6%、34.1%、78.2%和124.0%(t=−4.23、−4.31、−6.33和−6.18,P<0.05),总表面积分别增加了21.3%、53.8%、72.2%和113.4%(t=−2.54、−2.95、−5.92和−6.35,P<0.05),总投影面积分别增加了21.2%、51.4%、83.2%和119.3%(t=−2.34、−2.85、−4.92和−5.56,P<0.05),总体积分别增加了12.5%、37.5%、87.5%和112.5%(t=−0.68、−1.64、−2.77和−3.73,P<0.05).

2.3　扦插苗叶片光合荧光

不同GO质量浓度溶液处理后,银白杨扦插苗叶片光合荧光参数统计结果如表3所示,F_v/F_m、YII、qP和NPQ值分别为(0.782±0.003)~(0.794±0.006)、(0.685±0.009)~(0.708±0.017)、(0.913±0.007)~(0.933±0.019)和(0.224±0.018)~(0.235±0.025).与0相比,其他浓度对应的银白杨扦插苗叶片的4个光合荧光参数差异无统计学意义(P>0.05).

2.4　土壤肥力

不同GO质量浓度溶液处理后,土壤中N、P和K结果如表4所示,随着GO质量浓度的增加,土壤的有效肥力在增加,其中,N、P和K质量分数分别为(10.02±0.81)~(11.89±1.34)、(2.58±0.21)~(4.06±0.11)和(78.90±1.11)~(84.60±5.09)mg/kg.与0相比,10、20、50和100 mg/L GO溶液处理后,P质量分数分别提高了19.8%、44.6%、49.2%和57.4%(t=0.14、0.78、−0.30和−1.25,P<0.05);N和K质量分

表2　不同GO质量浓度溶液处理后银白杨扦插苗根部生长发育情况

质量浓度/(mg·L^{-1})	株数	质量/g	总长度/cm	总表面积/cm^2	总投影面积/cm^2	总体积/cm^3
0	5	1.57±0.09	139.05±14.00	16.61±2.43	5.29±0.77	0.16±0.05
10	5	2.05±0.19^{a}	174.68±4.13^{b}	20.15±0.99^{c}	6.41±0.32^{d}	0.18±0.01^{e}
20	5	2.19±0.13^{a}	186.51±12.95^{b}	25.55±4.86^{c}	8.01±1.40^{d}	0.22±0.04^{e}
50	5	2.73±0.22^{a}	247.76±26.25^{b}	28.60±0.99^{c}	9.69±0.27^{d}	0.30±0.02^{e}
100	5	3.55±0.71^{a}	311.47±8.57^{b}	35.44±3.20^{c}	11.60±1.02^{d}	0.34±0.07^{e}

注:与0相比,^{a}t=−3.96、−4.87、−5.67和−4.77,^{b}t=−4.23、−4.31、−6.33和−6.18,^{c}t=−2.54、−2.95、−5.92和−6.35,^{d}t=−2.34、−2.85、−4.92和−5.56,^{e}t=−0.68、−1.64、−2.77和−3.73,P<0.05.

表3 不同质量浓度GO溶液处理后银白杨扦插苗叶片光合荧光参数

质量浓度/(mg·L^{-1})	株数	F_v/F_m	YII	qP	NPQ
0	5	0.792±0.010	0.703±0.018	0.930±0.011	0.234±0.013
10	5	0.783±0.007	0.690±0.014	0.926±0.005	0.235±0.025
20	5	0.791±0.012	0.707±0.022	0.932±0.016	0.224±0.018
50	5	0.794±0.006	0.708±0.017	0.933±0.019	0.233±0.006
100	5	0.782±0.003	0.685±0.009	0.913±0.007	0.229±0.018

注:F_v/F_m为光系统II(PSII)最大光化学效率;YII为PSII实际光化学效率;qP为光化学淬灭系数;NPQ为非光化学淬灭.

数有所增加,但结果差异无统计学意义(P>0.05).

表4 不同GO质量浓度溶液处理后土壤肥力结果

mg/kg

质量浓度/(mg·L^{-1})	株数	铵态氮	有效磷	速效钾
0	3	10.69±1.22	2.58±0.21	82.73±4.91
10	3	10.55±1.06	3.09±0.29[a]	83.61±1.76
20	3	10.02±0.81	3.73±0.08[a]	78.90±1.11
50	3	11.01±1.46	3.85±0.33[a]	83.24±3.14
100	3	11.89±1.34	4.06 ±0.11[a]	84.60±5.09

注:与0相比,[a]t=0.14、0.78、−0.30和−1.25,P<0.05.

3 讨 论

在0~100 mg/L质量浓度范围内,经GO溶液处理后,银白杨扦插苗地上部分的株高和质量与根部的质量、总长度、总表面积、总投影面积和总体积的生长状态,均呈现出随着质量浓度的增加而增加,且随着质量浓度的进一步增加,增长速度逐渐降低,即生长表现为浓度依赖的正效应.对于地上部分株高和质量而言,其增长呈先快递增加后趋于平缓,因此可以推测,100 mg/L接近于促进地上部分生长的最佳质量浓度.对于根部而言,其5个参数的生长状态均呈随质量浓度增加而增加的趋势,且目前数据表现出有望随质量浓度的增加继续增加的状态,即在质量浓度>100 mg/L的某一范围内,仍表现为增加状态.与其他4个根部参数相比,根总长度的促进效果最为显著.与地上部分相比,GO溶液对根部生长的促进效应更为显著.植物根长的增加使植物根系可以接触更深更远的区域,更好地获取水分和养分,从而更好地适应复杂的外界环境.本研究与土壤中石墨烯处理可以促进白榆扦插苗[11]、陆地棉和长春花的根系和地上部分的生长[12],固体培养基中石墨烯处理可以促进欧洲白杨组培苗[9]和树莓组培苗[10]根系生长的研究结果一致,说明一定浓度的石墨烯或其衍生物可以促进特定物种的生长.

光合作用是植物生长的基础,是植物能量的来源.植物光合作用的检测可采用光合荧光参数、光合速率和Rubisco酶活性等不同指标.其中,光合荧光参数主要表征植物光量子吸收为特征的光反应过程,而光合速率主要表征CO_2吸收为特征的暗反应过程.前者具有快速、灵敏等优点,更能反映植物光合"内在性"的特点.本文主要通过对叶片光合荧光参数进行分析,包括F_v/F_m、YII、qP和NPQ,数据分析表明,这4个参数并未随着GO质量浓度的增加而呈增加趋势,与增长趋势相比,其更大程度是呈下降趋势.由于本研究植物生长在室内,室内光源条件具有均一、稳定和可控的优点,但是不能完全模拟户外光照状况.因此,进一步的田间实验和更多的检测参数对于完整分析GO的生物效应非常必要.

对于土壤肥力的分析,本文考察的土壤数据包括N、P和K.随着GO质量浓度的增加,N质量分数呈先降低后增加的趋势,P质量分数呈正效增加趋势,K质量分数呈先增加后降低再增加趋势.当GO质量浓度较低时,土壤的有效肥力(N和K)会存在降低,当GO质量浓度≥50 mg/L时,土壤的有效肥力均高于未添加时的有效肥力.推测原因,当土壤中不添加GO溶液时,植株周边土壤的肥力是呈消耗状态的,即不断从土壤中转入植株体内;当添加GO溶液后,GO分子表面具有大的π电子共轭结构和负电荷,因共轭效应和电荷吸引作用会分别对一定分子大小的阴粒子和阳粒子有吸引作用,起到富集阴、阳离子的效果,从而促进植株生长.从化学角度推测,当GO质量浓度较低时,其富集速度小于植株的消耗速度,因此,土壤肥力呈下降趋势;当GO质量浓度增加时,其富集速度增加,且大于植株的消耗速度,此时,土壤肥力会增加.植株的生长也与土壤中微生物息息相关,如土壤中的P分为无机磷和有机磷,无机磷大多以难溶性P形式存在,土壤无机磷的利用需要溶磷的微生物参与,而有机磷的利用

需要降解微生物的参与[26],同时,GO溶液的施加也会影响土壤微生物的群落[27],进而影响无机磷与有机磷之间的转化,因此,有关GO溶液如何影响土壤肥力,进而影响植株的生长机制,还需要进一步的深入实验分析.

4 结 论

本文通过不同质量浓度的GO溶液处理银白杨扦插苗,通过观察植株的生长状态及表现,得出银白杨扦插苗的生长发育对一定质量浓度的GO溶液为浓度依赖的正效应.GO溶液对银白杨扦插苗地上部分、根系部分和土壤肥力均起到了一定的促进作用.鉴于本文GO质量浓度研究结果仅统计到100 mg/L,之后随着GO质量浓度的增加,其生物效应是否会表现为负效应还需要进一步研究.

参 考 文 献

[1] VOCHITA G,OPRICA L,GHERGHEL D,et al. Graphene oxide effects in early ontogenetic stages of *Triticum aestivum* L. seedlings[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2019,181:345-352.

[2] ZHAO J G,GUO Y,LI Z P,et al. An approach for synthesizing graphene with calcium carbonate and magnesium[J]. Carbon,2012,50(13):4939-4944.

[3] 邓燕萍,杨达,乔洪舰,等. 石墨烯/TiO_2复合材料光催化降解模拟染料废水的研究[J]. 首都师范大学学报(自然科学版),2019,40(4):28-32.

[4] WANG Q H,LI C,WANG Y,et al. Phytotoxicity of graphene family nanomaterials and its mechanisms:a review[J]. Frontiers in Chemistry,2019,7:00292.

[5] 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.

[6] CHEN J,YANG L,LI S,et al. Various physiological response to graphene oxide and amine-functionalized graphene oxide in wheat (*Triticum aestivum*) [J]. Molecules,2018,23(5):1104.

[7] JIAO J Z,YUAN C F,WANG J,et al. The role of graphene oxide on tobacco root growth and its preliminary mechanism [J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology,2016,16(12):12449-12454+12456.

[8] HE Y J,HU R R,ZHONG Y J,et al. Graphene oxide as a water transporter promoting germination of plants in soil[J]. Nano Research,2018,11(4):1928-1937.

[9] 姚建忠,张占才,薛斌龙,等. 石墨烯对欧洲山杨组培苗不定根表观形态影响作用的研究[J]. 山西大同大学学报(自然科学版),2018,34(5):1-4.

[10] 胡晓飞,赵建国,高利岩,等. 石墨烯对树莓组培苗生长发育影响[J]. 新型炭材料,2019,34(5):447-454.

[11] 张晓,曹慧芬,赵建国,等. 石墨烯对白榆扦插苗生长和生理生化特征的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2020,40(4):97-103.

[12] PANDEY K,ANAS M,HICKS V,et al. Improvement of commercially valuable traits of industrial crops by application of carbon-based nanomaterials[J]. Scientific Reports,2019,9(1):19358.

[13] 隋祺祺,焦晨旭,乔俊,等. 石墨烯溶胶配施化肥对土壤中养分流失的影响[J]. 水土保持学报,2019,33(1):39-44.

[14] BEGUM P,IKHTIARI R,FUGETSU B. Graphene phytotoxicity in the seedling stage of cabbage,tomato,red spinach,and lettuce[J]. Carbon,2011,49(12):3907-3919.

[15] CHENG F,LIU Y F,LU G Y,et al. Graphene oxide modulates root growth of *Brassica napus* L.and regulates ABA and IAA concentration[J]. Journal of Plant Physiology,2016,193:57-63.

[16] ZHANG P,GUO Z L,LUO W H,et al. Graphene oxide-induced pH alteration,iron overload,and subsequent oxidative damage in rice (*Oryza.sativa* L.):a new mechanism of nanomaterial phytotoxicity[J]. Environmental Science and Technology,2020,54:3181-3190.

[17] NAZRI F,JAFARIRAD S,MOVAFEGHI A,et al. Toxicity of microwave-synthesized silver-reduced graphene oxide nanocomposites to the microalga *Chlorella vulgaris*:comparison with the hydrothermal method synthesized counterparts[J]. Journal of Environmental Science and Health (Part A),2020,55(6):639-649.

[18] 王媛媛,侯潇棐,李永霞,等. ABT 2号生根粉对西藏不同地区银白杨扦插生根及生长的影响[J]. 种子,2019,38(3):73-76.

[19] 李慧,陈晓阳,李云,等.银白杨叶片不定芽再生影响因素的研究[J].北京林业大学学报,2004,26(3):46-50.
[20] 张俊,李晓飞,李建贵,等.干旱荒漠区银白杨树干液流动态[J].生态学报,2013,33(18):5655-5660.
[21] 李赟,郭倩,王君,等.秋水仙碱诱导银白杨花粉染色体加倍及其细胞学效应研究[J].核农学报,2014,28(5):749-756.
[22] 车永梅,唐静,陈康,等.一氧化氮对盐胁迫下玉米幼苗叶绿素荧光参数和光合特性的影响[J].玉米科学,2009,17(3):91-94.
[23] MAXWELL K,JOHNSON G. Chlorophyll fluorescence:a practical guide[J]. Journal of Experimental Botany,2000,345(51):659-668.
[24] 姬拉拉,刘筱,王锐洁,等.遮阴和施氮对金荞麦生长和光合荧光特性的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2019,39(5):23-31.
[25] 张守仁.叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J].植物学通报,1999(4):3-5.
[26] 张宝贵,李贵桐.土壤微生物在土壤磷有效化中的作用[J].土壤学报,1998,35(1):104-111.
[27] 李丽娜,滕应,任文杰,等.石墨烯施用后对土壤酶活性及土壤微生物群落的影响[J].土壤,2016,48(1):102-108.

Effects of graphene oxide on the growth of *Populus alba* L.cutting plantlets

CAO Huifen[1], ZHANG Xiao[2], ZHAO Jianguo[2], WANG Haiyan[2], JIA Haikuan[3], YAO Jianzhong[4], SHI Yuanrui[1], BIAN Tao[1], ZHANG Yingying[1], LIU Xia[1]

(1. College of Life Science, Shanxi Datong University, Datong Shanxi 037009; 2. Institute of Carbon Materials Science, Shanxi Datong University, Datong Shanxi 037009; 3. National Fine Variety Base of *Pinus sylvestris* var. in Honghuaerji Forestry Bureau, Hulunbeir Inner Mongolia, 021112; 4. Sangganhe Test Bureau of Poplar High-yield Forest of Shanxi, Datong Shanxi 037006)

Abstract: In order to study the biological effect of graphene, and provide guidance for its application in forestry production. In this paper, *Populus alba* L. cutting plantlet was selected as material for indoor potted experiment to analyze the biomass, the photosynthetic fluorescence parameters of leaves, root morphology and soil fertility after different mass concentrations (0, 10, 20, 50 and 100 mg/L) of graphene oxide (GO) solution treatment in the soil. Compared with 0, the height of cutting plantlets and the mass of new stems and leaves of the 10, 20, 50 and 100 mg/L GO solutions increased by 16.6%-62.1% and 34.4%-61.7% respectively (t=−6.13-−1.82, P<0.05). The root mass, total root length, total surface area, total projected area and total volume increased by 30.6%-126.1%, 25.6%-124.0%, 21.3%-113.4%, 21.2%-119.3% and 12.5%-112.5% respectively (t=−6.35-−0.68, P<0.05), soil available phosphorus content increased by 19.8%-57.4% (t=−1.25-0.78, P<0.05), respectively. After GO solution was applied to the soil, the growth state of the aerial part and root system and soil fertility was improved in an approximate concentration-dependent manner. Therefore, it was speculated that GO solution promoted the growth of silver aspen cuttings mainly by improving soil fertility and root growth state.

Keywords: graphene oxide; *Populus alba* L.; cutting plantlets; root morphology; photosynthetic fluorescent; soil fertility

(责任编辑:王 媛)