2022, 35(6): 135-142
http://www.lykxyj.com

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.006.015

不同浓度石墨烯对杉木幼苗生长、根系形态及^{15}N 吸收利用的影响

彭婷婷[1,2,3]，魏永平[4]，章进峰[4]，张　筱[2]，陈洪华[4]，陈爱玲[2]，赵建国[5]，胡亚林[1,3]，曹光球[1,2,3*]

(1. 福建农林大学林学院 福建 福州　350002；2. 国家林业和草原杉木工程技术研究中心，福建 福州　350002；3. 林木逆境生理生态及分子生物学福建省高校重点实验室，福建 福州　350002；4. 福建省永安国有林场 福建 永安　366000；5. 山西大同大学炭材料研究所 山西 大同　037009)

摘要：［**目的**］探究石墨烯对杉木幼苗生长、根系形态及 N 素吸收利用的影响，为杉木高效培育奠定理论依据。［**方法**］以 1 年生杉木优良无性系“洋 061”为试验材料，采用盆栽试验及^{15}N 示踪技术，测定不同浓度石墨烯（0、20、25、30 mg·L^{-1}）处理的杉木幼苗生长、根系形态指标及^{15}N 分配率和利用率。［**结果**］在杉木幼苗的生长和根系形态指标中，除茎干质量和根体积外，其余指标均表现为 25 mg·L^{-1} 石墨烯浓度的处理最大，但各处理间差异不显著；杉木全株^{15}N 利用率表现为 25 mg·L^{-1}>20 mg·L^{-1}>30 mg·L^{-1}>CK1，^{15}N 分配在杉木幼苗各器官表现为叶 > 茎 > 根；根^{15}N 分配率、全株^{15}N 利用率与根系形态的相关性显示，除根长、根体积、根^{15}N 分配率与根直径呈负相关外，其他各指标间均呈极显著正相关。［**结论**］一定浓度的石墨烯有利杉木幼苗生长，并能促进 N 素吸收利用。

关键词：杉木；石墨烯；N 素利用率；^{15}N 示踪法

中图分类号：S723.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1001-1498(2022)06-0135-08

杉木（*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.）是我国南方最重要的速生用材树种。培育优质苗木是提高杉木林分质量的关键一环，施肥是培育优质苗木最重要的技术措施之一。目前针对杉木苗木施肥的研究主要集中在肥料种类选择[1-3]、施肥量[4-5]、施肥时间[6]以及施肥对土壤环境[7-10]、营养利用[5,10-11]和施肥利用率[12]等方面。此外，研究还发现不合理施肥会导致土壤 pH 值下降，造成土壤环境恶化和重金属积累等不良后果[13-14]。因此，制定科学合理的施肥措施促进苗木生长发育、提高肥料利用率，是目前林业经营过程中急需解决的技术难题之一。

石墨烯（Graphene）是一种以 sp^2 杂化连接碳原子紧密堆积成单层二维蜂窝状晶格结构的二维碳纳米材料，因其优异的光学、电气、力学特性，已在电子、生物医学、材料学、农业等领域得到较为广泛的应用[15]。石墨烯促进植物生长发育的机理已有较多研究。He 等[16]研究发现，氧化石墨烯可以将水分收集运输至种子从而促进种子萌发。石墨烯可以进入植物组织细胞，从而可以改变植物的代谢活动，促进植物各器官的生长发育[17-18]。杨士等[19]研究表明，生物炭负载氧化石墨烯材料可以通过提高土壤 pH 值以及通过表面络合和沉淀等作用来有效阻控重金属的迁移。Yin 等[20]研究也发现石墨烯可以缓解土壤重金属 Cd^{2+}对水稻芽和种子、根以及玉米幼苗生长的毒害效应。石墨烯在林

收稿日期：2022-03-25　　修回日期：2022-06-24
基金项目：国家重点研发计划项目（2021YFD2201302）
* 通讯作者: 曹光球，博士，副研究员，主要从事森林资源培育领域研究。E-mail：cncgq@126.com

业领域中的研究还处于起步阶段，姚建忠等[21]研究表明，3 mg·L^{-1} 石墨烯处理可以促进欧洲山杨（*Populus tremula* L.）根系生长，而 7.5 mg·L^{-1} 石墨烯处理对欧洲山杨的正常发育具有抑制作用。张晓等[18]研究表明，石墨烯处理可以促进白榆（*Ulmus pumila* L.）扦插苗叶、茎、根的生长。而有关石墨烯对杉木的影响研究尚未见相关报道。

^{15}N 示踪研究是根据^{15}N 丰度的变化研究氮素在生物体或环境中的运输转化规律[22]，可有效区别植株吸收 N 素的来源——新施 N 肥和土壤 N 库，是研究植物 N 素营养及分配状况、N 肥利用率以及 N 肥去向等方面的重要方法[23]。目前已有利用^{15}N 示踪法研究了毛竹[23] (*Phyllostachys edulis* (Carriere) J. Houzeau）、橡胶[24]（*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Muell. Arg.）、毛白杨[25] (*Populus tomentosa* Carrière）、楸树[26] (*Catalpa bungei* C. A. Mey.）等树种氮素吸收利用及分配情况和动态变化。有关采用^{15}N 示踪法探讨石墨烯施肥对杉木氮素的利用分配及利用率的影响研究尚未有报道。

为探讨石墨烯在林业施肥应用中的可行性，本研究以 1 年生杉木优良无性系“洋 061”作为试验材料，分析添加不同浓度石墨烯（0、20、25、30 mg·L^{-1}）对杉木幼苗生长、根系形态的影响；进一步利用^{15}N 示踪法分析杉木幼苗对氮素的吸收、利用和分配的变化，为革新杉木林传统施肥方式，提高施肥效率提供科学理论依据及技术支撑。

1 研究区概况

试验地位于福建省福建农林大学国家林业和草原杉木工程技术研究中心田间实验室室外大棚（26°05′ N，119°13′ E）。试验地属亚热带季风气候，气候适宜，温暖湿润，年平均气温 20～25 ℃。年平均日照时数 1 700～1 980 h，年平均降水量 900～2 100 mm，年相对湿度约 77%，无霜期达 326 d。

2 材料来源与方法

2.1 材料来源

供试苗木为福建省洋口国有林场生产的 1 年生杉木“洋 061”扦插苗，平均地径为 5.44±0.73 cm，平均苗高为 29.32±3.17 cm。盆栽桶深度为 24 cm，容量为 10 L。盆栽土壤为黄心土，其化学性质如下：全 C 3.38±0.01 g·kg^{-1}，全 N 0.42±0.01 g·kg^{-1}，全 P 0.07±0.01 g·kg^{-1}，全 K 5.01±0.13 g·kg^{-1}。石墨烯母液由山西大同大学赵建国教授课题组提供。试验复合肥为美国瑞恩集团公司生产，肥效为 N:P_2O_5:K_2O 比为 16∶16∶16。^{15}N 铵态氮肥采购自上海信裕生物科技有限公司，丰度为 99.12%。

2.2 试验设计

试验于 2020 年 5 月开始，2020 年 11 月结束。试验采用完全随机区组设计，3 个完全随机区组，每个区组 5 个处理（见表 1），每个处理每个重复种植 30 株苗，共 450 株苗。为保证苗木成活，苗木移栽 7 d 内于每天傍晚对土壤补充水分，使土壤含水量处于田间持水量水平。培养 7 d 后，根据天气和苗木生长实际情况进行定量水分补充。苗木缓苗 7 d 后，在苗木四周开 2 cm 沟，均匀施入 30 g 复合肥、10 mg 铵态氮同位素及不同浓度石墨烯溶液 500 mL。其中 CK2 处理只用于同位素计算。试验期间，每隔 2 个月测定 1 次苗高、地径等生长指标并记录苗木生长状况。

表 1 不同浓度石墨烯处理试验设计

Table 1 Different concentrations of graphene treatment

试验处理 Treatment	处理方式 Method of treatment
A1	石墨烯20 mg·L^{-1} + 复合肥30 g + ^{15}N铵态氮10 mg
A2	石墨烯25 mg·L^{-1} + 复合肥30 g + ^{15}N铵态氮10 mg
A3	石墨烯30 mg·L^{-1} + 复合肥30 g + ^{15}N铵态氮10 mg
CK1	复合肥30 g + ^{15}N铵态氮10 mg
CK2	复合肥30 g

2.3 测定方法

2.3.1 生长量及生物量测定 杉木苗高采用卷尺测定，地径采用游标卡尺测定。每个测试阶段各处理分别选取 3 株平均木，用自来水将苗木根部冲洗干净，再分别将苗木根、茎、叶分离，自然晾干后再置于烘干箱 75 ℃ 烘干至恒质量，称质量记录数据。根据苗木地上部分与地下部分的绝干生物量计算苗木根茎比。

2.3.2 根系形态测定 用剪刀将洗净后的苗木全部根系剪下并用吸水纸吸干水分；再将根均匀放入根系扫描仪（EPSON EU-88）进行根系扫描；最后在 WinRHIZO 分析系统内计算根长、根直径、

根体积和根表面积等数据指标。

2.3.3　^{15}N 同位素测定　将植物样品过筛后称取 4 mg 放入锡纸杯中进行包膜，将其包成正四方体放入酶标盒中备用，使用时放入 MAT-251（Finnigan，德国）稳定同位素质谱仪中进行测定，植株不同部位氮素积累量、氮素分配率、氮素利用效率等的计算参照文献 [27] 的方法，公式如下：

Ndff 为植株器官从肥料中吸收分配到的氮量对该器官全氮量的贡献率（%），它反映了植株器官对肥料氮的吸收征调能力

$$\text{Ndff} = \frac{\text{植物样品中}^{15}\text{N 丰度} - {}^{15}\text{N 自然丰度}}{\text{肥料中}^{15}\text{N 丰度} - {}^{15}\text{N 自然丰度}} \times 100\%$$

^{15}N 的分配率为各器官中^{15}N 占全株^{15}N 总量的百分率，反映了肥料^{15}N 在树体内的分布及其在各器官间迁移的规律。

$$^{15}\text{N 分配率} = \frac{\text{植株各器官吸收的氮量}}{\text{总吸收氮量}} \times 100\%$$

$$^{15}\text{N 利用率} = = \frac{\text{Ndff} \times \text{植株器官全氮量}}{\text{施肥量}} \times 100\%$$

2.4　数据处理与分析

原始数据采用 Excel 进行整理统计，采用 SPSS.23 软件对数据进行统计分析，对杉木幼苗生长指标、生物量指标、根系形态指标及^{15}N 吸收利用等数据进行单因素方差分析。根系形态、根^{15}N 分配率及全株^{15}N 利用率的相关性采用 Person 相关分析法。各指标数据的结果为平均值±标准差。

3　结果与分析

3.1　不同浓度石墨烯对杉木幼苗生长及生物量的影响

3.1.1　不同浓度石墨烯对杉木幼苗生长的影响

由表 2 可知，不同浓度石墨烯处理可在一定程度上促进杉木幼苗苗高和地径的生长，且随着培养时间延长，促进效应逐渐增大。与对照 CK1 相比，25 mg·L^{-1} 石墨烯处理的幼苗苗高和地径最大；培育 60、120、180 d 时，苗高分别提高了 9.30%、7.69%、3.26%，地径分别提高了 4.83%、3.91%、7.65%。方差分析结果表明，除 25 、30 mg·L^{-1} 石墨烯处理在培育 120 d 后苗高存在显著性差异（$P<0.05$）外，其他处理间差异均未达到显著水平。

3.1.2　不同浓度石墨烯对杉木幼苗生物量的影响

由表 2 可以看出，不同浓度石墨烯处理对杉木幼苗生物量的影响较为一致，除 20 mg·L^{-1} 石墨烯处理在茎干质量中表现为先降后增的趋势外，其余处理在根干质量、茎干质量、叶干质量中均表现为逐渐增长的趋势。培育 60 d 时，与对照 CK1 相比，25、30 mg·L^{-1} 石墨烯处理的根干质量分别增加了 7.56%、6.06%，20 mg·L^{-1} 石墨烯处理则显著增加了 45.45%；培养 120 d 时，25 mg·L^{-1} 石墨烯处理的叶干质量比对照 CK1 相比降低了 7.28%；

表 2　不同浓度石墨烯处理杉木幼苗生长和平均单株生物量

Table 2　Growth and biomass of Chinese fir at different concentrations of Graphene

指标 Index	试验处理 Treatment	培育时间 Incubation time/d		
		60	120	180
苗高 Hight/cm	A1	38.49±0.90 a	50.57±0.47 b	58.14±1.33 a
	A2	41.97±1.51 a	54.45±1.88 a	59.90±1.42 a
	A3	41.39±1.41 a	54.42±0.77 a	59.83±1.35 a
	CK1	38.40±2.53 a	50.56±1.63 b	58.01±0.70 a
地径 Ground diameter/mm	A1	6.02±0.29 a	8.20±0.38 a	8.39±0.23 a
	A2	6.29±0.23 a	8.51±1.03 a	9.01±0.37 a
	A3	6.02±0.04 a	8.25±0.29 a	8.52±1.07 a
	CK1	6.00±0.39 a	8.19±0.96 a	8.37±0.63 a
根干质量 Dry weight of root/g	A1	0.96±0.18 a	0.97±0.26 a	2.32±0.18 a
	A2	0.71±0.08 a	0.89±0.21 a	2.37±0.94 a
	A3	0.70±0.04 a	1.07±0.56 a	2.34±0.15 a
	CK1	0.66±0.12 b	0.88±0.04 a	1.71±0.83 a
茎干质量 Dry weight of stem/g	A1	5.80±0.39 a	5.62±1.48 a	8.92±1.07 a
	A2	4.76±1.04 a	5.72±0.27 a	8.43±1.49 a
	A3	4.56±0.83 a	6.24±0.26 a	8.25±0.18 a
	CK1	4.53±1.08 a	5.07±0.47 a	8.12±0.47 a
叶干质量 Dry weight of leaves/g	A1	6.56±0.57 a	9.60±2.26 a	10.45±0.73 a
	A2	6.06±1.10 a	8.02±0.60 a	12.04±0.82 a
	A3	5.23±0.91 a	9.42±1.80 a	10.85±1.65 a
	CK1	4.63±0.43 a	8.65±0.44 a	11.18±0.46 a
根茎比 Root-shoot ratio	A1	0.08±0.01 a	0.07±0.03 a	0.12±0.00 a
	A2	0.07±0.02 a	0.06±0.01 a	0.13±0.03 a
	A3	0.07±0.01 a	0.07±0.03 a	0.11±0.04 a
	CK1	0.07±0.01 a	0.06±0.01 a	0.09±0.04 a

注：不同小写字母表示相同天数下不同石墨烯处理的差异性（$P<0.05$）。A1、A2、A3、CK1分别代表浓度为20 mg·L^{-1}、25 mg·L^{-1}、30 mg·L^{-1}、0 mg·L^{-1}的石墨烯处理，下同。

Note: Different lowercase letters indicate differences in different graphene treatments on the same number of days ($P<0.05$). A1, A2, A3, CK1 represent a concentration of 20 mg·L^{-1}、25 mg·L^{-1}、30 mg·L^{-1}、0 mg·L^{-1} Graphene treatment, the same below.

培养 180 d 时，20 、30 mg·L^{-1} 石墨烯处理的叶干质量与对照 CK1 相比分别降低了 6.53%、2.95%。

3.1.3 不同浓度石墨烯对杉木幼苗根茎比的影响

由表 2 可知，不同浓度石墨烯处理对杉木幼苗根茎比的影响较为一致。根茎比介于 0.06～0.13 之间。除 30 mg·L^{-1} 石墨烯处理的根茎外，其余处理的根茎比均呈先降后增的趋势。培育 180 d 时，石墨烯处理的根茎比相比于对照分别增加了 33.33%、44.44%、22.22%，不同处理之间差异不显著。

3.2 不同浓度石墨烯对杉木幼苗根系形态的影响

由图 1 分析可知，同一石墨烯浓度处理下，随着培养时间的延长，除杉木幼苗根平均直径表现为下降趋势外，其他指标均表现为增长的趋势。不同石墨烯浓度处理下，同一培养时间杉木幼苗根长、根直径、根体积、根表面积等指标对石墨烯浓度的敏感性不同；就培养 60 d 而言，根长、根体积表现为随着浓度的增加呈逐渐降低的趋势，而根直径则表现为先增后降的趋势；培育 180 d 时，25 mg·L^{-1} 石墨烯处理的根长、根直径、根体积、根表面积与其他处理相比均为最大值。方差结果分析，各处理在杉木幼苗根系形态等指标中均不存在显著性差异。

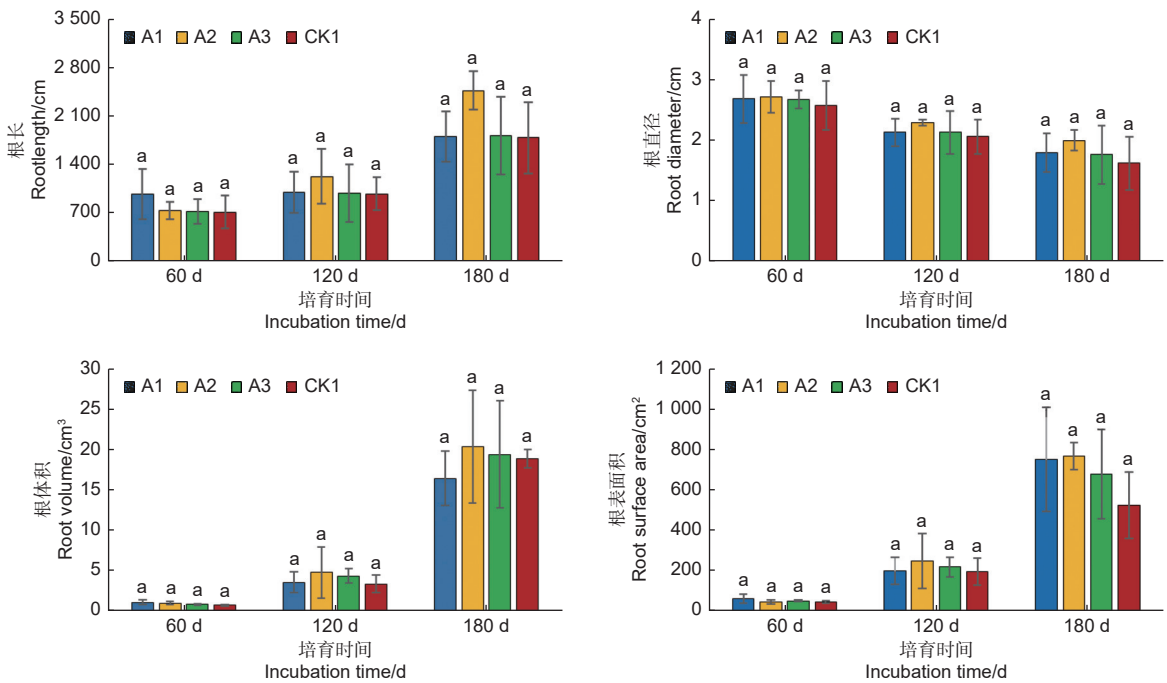

图 1 不同浓度石墨烯处理杉木幼苗根系形态

Fig. 1 Root morphology of Chinese fir at different concentrations of Graphene

3.3 不同浓度石墨烯对杉木幼苗各器官^{15}N 分配率及全株^{15}N 利用率的影响

3.3.1 不同浓度石墨烯对杉木幼苗各器官^{15}N 分配率的影响 由图 2 可以看出，不同处理对杉木幼苗各器官^{15}N 的分配率影响并不一致。综合来看，杉木幼苗各器官^{15}N 分配率表现为叶 > 茎 > 根。不同处理杉木幼苗叶^{15}N 分配率除在 30 mg·L^{-1} 石墨烯处理中随时间的增加呈增加趋势外，在其他不同处理中均呈先增后降趋势。叶^{15}N 分配率介于 63.67%～74.47% 之间，在不同培育阶段中的最大值分别出现在 A2、CK1、A3 处理中。与对照相比，不同处理杉木幼苗叶^{15}N 的分配率差异均未达到显著水平。

随培育时间的增加，不同处理杉木幼苗茎^{15}N 分配率均表现为下降趋势。茎^{15}N 分配率介于 16.97%～30.44% 之间。培育 60 d 后，20、25、30 mg·L^{-1} 石墨烯处理与对照相比茎^{15}N 分配率分别显著降低了 6.87%、20.07%、20.07%（P < 0.05）。

杉木幼苗根^{15}N 分配率随培育时间的增加均表现为先降后增的趋势。根^{15}N 分配率介于 4.70%～9.61% 之间。除 25 mg·L^{-1} 石墨烯处理根^{15}N 分配率在施肥后 60 d 较对照降低 18.51% 外，其余时间中均表现为石墨烯处理高于对照处理，但不同处

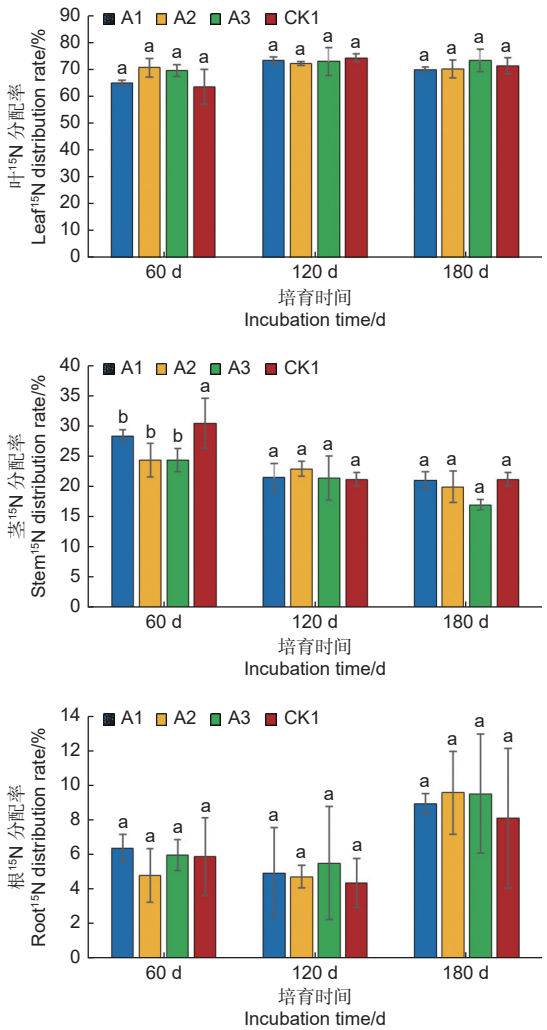

图 2　不同浓度石墨烯处理杉木幼苗各器官^{15}N 分配率

Fig. 2　^{15}N distribution rate of Chinese fir organ at different concentrations of Graphene

理间根^{15}N 分配率差异不显著。

3.3.2　不同浓度石墨烯对杉木幼苗全株^{15}N 吸收利用的影响　由表 3 可知，不同处理随培育时间的延长，杉木幼苗全株总氮量、^{15}N 吸收量、^{15}N 利用率均呈增加趋势。在培育 60 d 与 180 d 后，石墨烯处理下的杉木全株^{15}N 吸收量显著高于对照处理。180 d 后，20、25 mg·L^{-1} 石墨烯处理杉木全株^{15}N 利用率比对照显著增加了 77.78%、78.70%（$P < 0.05$），说明一定浓度的石墨烯能促进杉木幼苗对氮素的吸收，杉木幼苗^{15}N 利用率介于 0.32%～1.93% 之间，杉木幼苗对氮素的利用率不高。

3.4　杉木幼苗根系形态与根^{15}N 分配率与全株^{15}N 利用率的相关性

从表 4 可以看出，除根长、根体积、根^{15}N 分配率与根直径呈负相关外，其他各指标间均呈显著或极显著正相关。这说明根系形态与全株^{15}N 利用率有密切联系，全株^{15}N 利用率对杉木幼苗的根系形态影响较大。

4　讨论

4.1　不同浓度石墨烯处理下杉木幼苗的生长

本研究发现，石墨烯处理下杉木幼苗苗高、地径、根干质量、茎干质量和叶干质量均高于对照处理，且培育结束后，除茎干质量随石墨烯浓度的增加而降低外，其余生长指标均表现为 25 mg·L^{-1} > 30 mg·L^{-1} > 20 mg·L^{-1} > CK1，说明石墨烯对杉木

表 3　不同浓度石墨烯处理杉木幼苗全株^{15}N 吸收利用

Table 3　^{15}N absorption and utilization of Chinese fir at different concentrations of Graphene

培育时间 Incubation time/d	试验处理 Treatment	全株总氮量 Total nitrogen/mg	^{15}N吸收量 ^{15}N absorption/mg	全株^{15}N利用率 ^{15}N utilization/%
60	A1	236.43±24.85 a	0.05±0.01 a	0.49±0.05 a
	A2	210.56±43.21 a	0.05±0.01 a	0.50±0.11 a
	A3	201.21±41.64 a	0.05±0.01 a	0.48±0.10 a
	CK1	176.05±25.35 a	0.03±0.01 b	0.32±0.05 a
120	A1	288.03±23.28 a	0.12±0.01 a	1.20±0.08 a
	A2	312.19±88.99 a	0.13±0.04 a	1.29±0.37 a
	A3	291.71±53.43 a	0.12±0.02 a	1.19±0.22 a
	CK1	282.46±15.90 a	0.10±0.01 a	1.02±0.05 a
180	A1	387.67±60.80 a	0.19±0.03 a	1.92±0.29 a
	A2	382.94±29.17 a	0.19±0.02 a	1.93±0.16 a
	A3	394.98±49.32 a	0.15±0.02 a	1.48±0.20 b
	CK1	346.05±24.95 a	0.11±0.01 b	1.08±0.09 b

表 4 杉木幼苗根系形态、根^{15}N 分配率与全株^{15}N 利用率的相关性

Table 4 Correlation between root morphology, root ^{15}N distribution rate and ^{15}N utilization rate of Chinese fir

	根长 Root length	根直径 Root diameter	根体积 Root volume	根表面积 Root surface area	根^{15}N分配率 Root ^{15}N distribution rate	全株^{15}N利用率 ^{15}N utilization
根长 Root length	1					
根直径 Root diameter	-0.398*	1				
根体积 Root volume	0.806**	-0.536**	1			
根表面积 Root surface area	0.795**	0.518**	0.871**	1		
根^{15}N分配率 Root ^{15}N distribution rate	0.773**	-0.185**	0.714**	0.629**	1	
全株^{15}N利用率 ^{15}N utilization	0.724**	0.543**	0.706**	0.794**	0.405*	1

幼苗生长具有促进作用。Yin 等[20] 发现氧化石墨烯能促进水稻幼苗的生长；刘泽慧等[27] 研究发现，一定浓度的石墨烯能促进蚕豆幼苗的株高生长。以上研究说明，石墨烯对植物生长有促进作用，这与本研究结果一致。不同浓度石墨烯处理杉木幼苗根茎比大致表现为先降后增的趋势，说明石墨烯在杉木培育前期主要促进杉木地上部分的生长，培育 180 d 后，在促进地上部生长的同时，也相应促进地下部生长，使地上部与地下部趋于平衡。

4.2 不同浓度石墨烯处理下杉木幼苗的根系形态

根系直接从土壤中吸收营养，是决定杉木幼苗吸收能力的重要因素。有研究发现，石墨烯溶液可以改变植物的新陈代谢机制，从而促进植物器官的发育[28-30]。张晓等[30] 通过对促进玉米（*Zea mays* L.）生长的最佳石墨烯浓度（50 mg·L^{-1}）处理 48 h 后的根系 mRNA 进行转录组测序分析后发现，石墨烯可以影响玉米根系的有机物合成、转运和代谢过程，通过抑制玉米根系的乙烯信号促进玉米根系的生长，进而促进玉米地上部分的生长。本研究通过分析杉木幼苗根系形态指标发现，石墨烯处理可以促进杉木幼苗总根长、根体积和根表面积生长，石墨烯处理下的根系形态指标普遍高于对照处理，且总根长、根直径和根表面积均在 25 mg·L^{-1} 石墨烯处理下最高。但不同植物根系对石墨烯浓度的响应具有特异性，例如最适树莓[31]（*Rubus idaeus*）、水稻[32]（*Oryza sativa*）、蚕豆[27]（*Vicia faba*）、西梅[33]（*Prunus domestica*）苗木根系发育的石墨烯浓度分别为 2、5、25 和 33.3 mg·L^{-1}。

4.3 不同浓度石墨烯处理下杉木幼苗对氮素的吸收利用及分配

氮素是所有生物维持生活不可或缺的元素之一[34]。当土壤中氮素含量充足时有利于植物有机物质的形成，从而增加产量。相关研究表明，施氮肥显著提高了杉木无性系幼苗的生长以及生物量的积累[35]。本研究采用^{15}N 示踪法（铵态氮）分析添加石墨烯后杉木^{15}N 分配和吸收利用的变化，结果发现，培育结束后，根^{15}N 分配率表现为 25 mg·L^{-1} > 30 mg·L^{-1} > 20 mg·L^{-1} > CK1，茎^{15}N 分配率表现为 CK1 > 20 mg·L^{-1} > 25 mg·L^{-1} > 30 mg·L^{-1}，叶^{15}N 分配率表现为 30 mg·L^{-1} > CK1 > 25 mg·L^{-1} > 20 mg·L^{-1}，这说明石墨烯对杉木幼苗根部氮素的分配具有促进作用，对杉木幼苗茎部的分配具有抑制作用，而氮素在杉木幼苗叶部的分配会受石墨烯浓度的影响。另一方面，氮素在杉木幼苗的各个器官中的分配表现为叶 > 茎 > 根。贾庆宇等[36] 研究得出芦苇不同器官的含氮量总体表现为叶片 > 茎秆 > 根须，地上器官的含氮量大于地下器官；董雯怡等[25] 研究发现，茎作为植物物质运输的主要通道，储存的氮素较少；张平等[37]研究得出，植株根吸收氮素之后会合成转化为铵基酸的形式供植物体吸收利用，所以氮素在植株根部的积累也较少。但石墨烯处理下氮素在杉木幼苗各器官中的分配不存在显著差异。在杉木幼苗全株^{15}N 利用率方面，不同处理全株^{15}N 利用率均为 25 mg·L^{-1}>20 mg·L^{-1}> 30 mg·L^{-1}>CK1。胡梓超[38] 研究发现纳米碳可以缓解氮素在土壤中的淋溶，从而提高植物对氮素的利用率，与本研究结果一致。

林木生长及生理生化变化对施肥的响应需要一个过程。本研究仅分析了石墨烯处理杉木幼苗 60、120 及 180 d 时的生长、生物量分配、根系形态、N 素吸收及利用率的影响，至于后期石墨烯对苗木生长的影响，有待于进一步观测。除此之外，还应进一步开展不同浓度石墨烯对杉木幼龄林及中龄林生长影响的施肥试验，总结出一套可供生产应用的杉木林石墨烯施肥技术，从而提高杉木林的施肥效果，达到增产、增效的目标。

5　结论

本研究表明，石墨烯能促进杉木优良无性系“洋 061”幼苗的生长，其生长、生物量和根系形态指标表现为添加石墨烯处理普遍好于对照处理，各处理除茎干质量和根体积外，其余指标都表现在石墨烯浓度为 25 mg·L^{-1} 的处理最大，但各处理之间不存在显著差异。此外，氮素在杉木幼苗的各个器官中的分配表现为叶 > 茎 > 根，说明氮素主要集中在生命活动和新陈代谢旺盛的器官中；不同处理全株^{15}N 利用率均表现为 25 mg·L^{-1}>20 mg·L^{-1}>30 mg·L^{-1}>CK1，并与根系形态指标呈极显著正相关（$P < 0.01$），说明一定浓度的石墨烯有利杉木幼苗氮素的积累，且杉木幼苗根系形态对全株^{15}N 利用率影响较大，但不同浓度石墨烯处理差异不显著。

参考文献：

[1] 于钦民, 徐福利, 王渭玲. 氮、磷肥对杉木幼苗生物量及养分分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20（1）：118-128.

[2] Bu W S, Wang F C, Zhang C, *et al*. The contrasting effects of nitrogen and phosphorus fertilizations on the growth of *Cunninghamia lanceolata* depend on the season in subtropical China[J]. Forest Ecology and Management, 2021: 482.

[3] 任衍敏, 陈敏健, 李惠通, 等. 配方施肥对杉木近熟林大径材材种结构的影响[J]. 森林与环境学报, 2021, 41（1）：18-25.

[4] 李　茂, 任正标, 郑鸣鸣, 等. 指数施肥对杉木优良无性系生长和光合特性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26（2）：400-409.

[5] 刘　欢, 王超琦, 吴家森, 等. 氮素指数施肥对杉木无性系苗生长及养分含量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27（10）：3123-3128.

[6] 唐明荣, 陈小忠, 鄢振武, 等. 杉木幼林施肥效应研究[J]. 浙江林业科技, 2000（1）：87.

[7] 张　强, 谢君毅, 牛　芸, 等. 不同施肥处理对杉木林土壤水源涵养功能的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41（2）：112-122.

[8] 李艳鹏, 贺同鑫, 王清奎. 施肥对杉木林土壤酶和活性有机碳的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35（10）：2722-2731.

[9] 俞有志, 王清奎, 于小军, 等. 施氮磷肥对杉木人工林土壤活性有机碳的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37（10）：3053-3060.

[10] 李　茂, 洪　凯, 许珊珊, 等. 指数施肥对杉木优良无性系幼苗生长和养分含量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26（6）：1490-1497.

[11] 陈胜进, 叶代全, 吕红翠, 等. 铜锌肥对不同林龄杉木生长及土壤养分的影响[J]. 森林与环境学报, 2017, 37（2）：155-162.

[12] 俞元春, 陈金林, 曾曙才, 等. 杉木幼林磷肥利用率的研究[J]. 南京林业大学学报, 1997（1）：35-38.

[13] 夏丽丹, 于姣妲, 邓玲玲, 等. 杉木人工林地力衰退研究进展[J]. 世界林业研究, 2018, 31（2）：37-42.

[14] 任顺荣, 邵玉翠, 高宝岩, 等. 长期定位施肥对土壤重金属含量的影响[J]. 水土保持学报, 2005（4）：96-99.

[15] Zhao J G, Guo Y, Li Z P, *et al*. An approach for synthesizing graphene with calcium carbonate and magnesium[J]. Carbon, 2012, 50: 4939-4944.

[16] He Y, Hu R, Zhong Y, *et al*. Graphene oxide as a water transporter promoting germination of plants in soil[J]. Nano Research, 2018, 11(4): 1982-1937.

[17] Tang J, Xiong L, Wang S, *et al*. Distribution, translocation and accumulation of silver nanoparticles in rats[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2009, 9(8): 4924-4932.

[18] 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.

[19] 杨　士, 刘祖文, 龙　焙, 等. 生物炭负载氧化石墨烯对离子型稀土矿区土壤中重金属的阻控效应[J]. 环境科学, 2022, 43（3）：1567-1576.

[20] Yin L Y, Wang Z, Wang S G, *et al*. Effects of graphene oxide and/or Cd^{2+} on seed germination, seedling growth, and uptake to Cd^{2+} in solution culture[J]. Water Air and Soil Pollution, 2018, 229: 151.

[21] 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.

[22] 高占锋, 付　才, 王红云. ^{15}N同位素示踪计算方法的改进[J]. 河北农业大学学报, 2011, 34（1）：105-110.

[23] 毛　超, 漆良华, 刘琦蕊, 等. 毛竹林各器官对N素的吸收和利用率[J]. 林业科学, 2016, 52（5）：64-70.

[24] 杜海燕, 王大鹏, 王文斌, 等. 应用^{15}N示踪技术研究橡胶树幼苗对不同氮肥的吸收和分配[J]. 热带作物学报, 2015, 36（6）：1019-1024.

[25] 董雯怡, 聂立水, 李吉跃, 等. 应用^{15}N示踪研究毛白杨苗木对不同形态氮素的吸收及分配[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31（4）：97-101.

[26] 贾　朋, 王力朋, 何　茜, 等. 应用^{15}N示踪探究楸树无性系对氮素的吸收和分配[J]. 核农学报, 2016, 30（4）：776-782.

[27] 刘泽慧, 陈志文, 赵建国, 等. 石墨烯对蚕豆生长发育的效应研究[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2020, 41（5）：33-39.

[28] 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.

[29] Zhang M, Gao B, Chen J J, *et al*. Effects of graphene on seed germination and seedling growth[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2015, 17: 78.

[30] 张　晓, 曹慧芬, 赵建国, 等. 氧化石墨烯促进玉米根系生长的转

录组分析[J]. 分子植物育种, 2021, 19（10）：3157-3167.
[31] 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.
[32] Liu S, Wei H, Li Z, *et al*. Effects of graphene on germination and seedling morphology in rice[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2015, 15(4): 2695-2701.
[33] 李前锋, 郭宝琴, 李新宇, 等. 石墨烯对西梅苗木生长影响的作用机理初探[J]. 林业科技, 2022, 47（1）：21-23.
[34] 厉 然. 氮高效利用杉木家系的筛选及氮素形态对不同家系幼苗的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
[35] 刘 欢, 王超琦, 吴家森, 等. 氮素指数施肥对1年生杉木苗生长及氮素积累的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34（3）：459-464.
[36] 贾庆宇, 周广胜, 周 莉, 等. 湿地芦苇植株氮素分布动态特征分析[J]. 植物生态学报, 2008（4）：858-864.
[37] 张 平, 周 毅, 高 祥, 等. 氮形态对低磷胁迫下苗期玉米生物学性状及磷素吸收的影响[J]. 南京农业大学学报, 2012, 35（4）：32-36.
[38] 胡梓超. 纳米碳对黄土区典型作物生长发育影响的试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.

Effect of Different Concentrations of Graphene on the Growth, Root Morphology and ^{15}N Uptake and Utilization of *Cunninghamia lanceolata* Seedlings

PENG Ting-ting[1,2,3], *WEI Yong-ping*[4], *ZHANG Jin-feng*[4], *ZHANG Xiao*[2], *CHEN Hong-hua*[4], *CHEN Ai-ling*[2], *ZHAO Jian-guo*[5], *HU Ya-lin*[1,3], *CAO Guang-qiu*[1,2,3]

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian China; 2. Chinese Fir Engineering Technology Research Center of the National Forestry and Grassland Administration, Fuzhou 350002, China; 3. Key Laboratory of Forest Stress Physiology, Ecology and Molecular Biology, Fuzhou 350002, China; 4. Fujian Yongan State-owned Forest Farm , Yongan 366000, Fujian China; 5. Institute of Carbon Materials, Shanxi Datong University, Datong 037009, Shanxi China)

Abstract: [**Objective**] To provide theoretical basis for the efficient cultivation of *C. lanceolate*, the effects of graphene on the growth, root morphology and nitrogen uptake and utilization of *Cunninghamia lanceolata* were investigated in this study. [**Method**] A pot experiment with four concentrations of graphene (0, 20, 25, 30 mg·L^{-1}) was conducted in this study by using the superior clone of *C. lanceolata* seedlings 'Yang 061' to investigate the growth, root morphology, ^{15}N distribution and utilization rate of *C. lanceolata* seedlings under various graphene treatments. [**Results**] The indexes of growth and root morphologies were maximum at 25 mg·L^{-1} graphene concentration except for stem weight and root volume, but no significant difference were observed among different treatments. The ^{15}N utilization rate of seedlings was 25 mg·L^{-1}>20 mg·L^{-1}>30 mg·L^{-1}>CK1, and the distribution of ^{15}N in different organs of *C. lanceolata* seedlings was leaf > stems > roots. Correlation analysis results showed that a significantly positive correlation between roots ^{15}N partition rate and seedlings ^{15}N utilization rate with different growth indexes were observed except for root length, root volume, root ^{15}N partition rate and root diameter. [**Conclusion**] A certain concentration of graphene is beneficial to the growth of *C. lanceolata* seedlings and can promote the absorption and utilization of N.

Keywords: Chinese fir; graphene; seedling growth; ^{15}N tracer technique

（责任编辑：彭南轩）