

# 氧化石墨烯与盐度对白骨壤幼苗早期生长的影响

陈梓情<sup>\*#</sup>, 赵滢君, 郭文俊

广东海洋大学化学与环境学院, 广东 湛江

收稿日期: 2026年4月8日; 录用日期: 2026年5月7日; 发布日期: 2026年5月26日

## 摘要

为探究氧化石墨烯(Graphene Oxide, GO)与盐度复合胁迫对红树植物白骨壤(*Avicennia marina*)幼苗早期生长的影响, 明确其交互作用机制与耐受阈值, 文章以白骨壤种子为研究对象, 采用Box-Behnken响应面法设计双因素三水平试验, 设置GO浓度(0、100、200 mg/L)和盐度(0、10‰、20‰)共13组处理, 以河沙为生长基质进行盆栽试验。测定根系形态指标(根系长度、根尖数、根系投影面积)及生物量, 通过Design-Expert13进行回归建模与多目标优化。结果表明: 1) GO浓度与盐度对白骨壤幼苗生长具有显著交互效应( $P < 0.05$ ), 其中GO浓度为主导因子(在对生物量、根系长度、投影面积、根尖数的方差分析中, GO浓度的F值分别为146.37、84.59、66.12、81.53, 而盐度的F值分别为34.58、19.46、13.18、24.08, GO在各形态指标的F值均大于盐度)。2) 以根系生物量、根系长度、根尖个数、投影面积为响应值进行多目标优化, 获得最佳复合条件: GO浓度为0.171 mg/L, 盐度为0.74‰。此时理论生物量为0.151 g、根系长度为200.148 mm、根尖个数为33个、投影面积为157.638 mm<sup>2</sup>。最优GO浓度(0.171 mg/L)低于试验最低浓度(100 mg/L), 优化结果为模型外推预测, 需通过设置更低浓度梯度的试验进一步验证。研究为滨海湿地植物在纳米材料复合污染生态风险评估及红树林生态修复提供了理论依据。

## 关键词

白骨壤, 氧化石墨烯, 盐度, 幼苗生长, 响应面

# Effects of Graphene Oxide and Salinity on the Early Growth of *Avicennia marina* Seedlings

Ziqing Chen<sup>\*#</sup>, Yingjun Zhao, Wenjun Guo

Faculty of Chemistry and Environment, Guangdong Ocean University, Zhanjiang Guangdong

Received: April 8, 2026; accepted: May 7, 2026; published: May 26, 2026

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 陈梓情, 赵滢君, 郭文俊. 氧化石墨烯与盐度对白骨壤幼苗早期生长的影响[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(5): 889-899. DOI: 10.12677/aep.2026.165088

## Abstract

To investigate the effects of the combined stress of graphene oxide (GO) and salinity on the early growth of *Avicennia marina* seedlings, and to elucidate their interaction mechanisms and tolerance thresholds, *Avicennia marina* seeds were used as research material. A two-factor, three-level experiment was designed using the Box-Behnken response surface methodology, comprising 13 treatment combinations with GO concentrations (0, 100, 200 mg/L) and salinity levels (0, 10‰, 20‰). A pot experiment was conducted using river sand as the growth substrate. Root morphological parameters (root length, number of root tips, root projection area) and biomass were measured. Regression modeling and multi-objective optimization were performed using Design-Expert 13. The results showed that: 1) GO concentration and salinity exhibited a significant interactive effect on seedling growth ( $P < 0.05$ ), with GO concentration being the dominant factor (in the ANOVA for biomass, root length, projection area, and number of root tips, the F-values for GO concentration were 146.37, 84.59, 66.12, and 81.53, respectively, while those for salinity were 34.58, 19.46, 13.18, and 24.08; the F-values for GO were higher than those for salinity across all morphological indices). 2) Using root biomass, root length, number of root tips, and projection area as response values, multi-objective optimization yielded the optimal combined conditions: GO concentration of 0.171 mg/L and salinity of 0.74‰. Under these conditions, the theoretical values were: biomass of 0.151 g, root length of 200.148 mm, number of root tips of 33, and projection area of 157.638 mm<sup>2</sup>. The optimal GO concentration (0.171 mg/L) was lower than the lowest experimental concentration (100 mg/L), indicating that the optimization result was derived from model extrapolation, which requires further validation through experiments with lower concentration gradients. This study provides a theoretical basis for ecological risk assessment of nanomaterial combined pollution in coastal wetland plants and for mangrove ecological restoration.

## Keywords

*Avicennia marina*, Graphene Oxide, Salinity, Seedling Growth, Response Surface Methodology

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

白骨壤(*Avicennia marina*)作为湛江滨海湿地生态修复的先锋物种[1], 在防风、消浪、促淤护岸[2]、维持滨海生物多样性等方面发挥着不可替代的生态功能。近年来, 随着“红树林保护修复专项行动”[3]推进, 以白骨壤、桐花树等红树植物为核心的生态修复工程在金牛岛[4]等地相继实施, 其早期建植成活率直接关系到修复成效。

盐度是影响白骨壤幼苗定植成活的关键环境因子。然而在实际生境中, 往往面临严峻的挑战: 一方面, 盐胁迫环境降低植物光合作用能力[5]; 另一方面, 高浓度氧化石墨烯可通过诱导氧化胁迫破坏植物抗氧化酶系统[6], 这种复合胁迫严重制约了白骨壤幼苗的生长。因此, 深入解析白骨壤在盐胁迫下的生理响应与适应机制, 不仅有助于揭示其耐盐进化策略, 更能为筛选抗逆优良种质、优化造林技术, 从而提升修复工程红树林的成活率提供关键科学依据。

氧化石墨烯(Graphene Oxide, GO)是石墨烯的一种衍生物[7], 表面有丰富的官能团(如羟基、羧基、环氧基)[8], 使石墨烯的性质更加活泼, 功能更加复杂。因GO具有独特的光学、电学、机械等性能及超高

的比表面积,在医药、光学、电磁、能源、生物材料及环境修复等领域得到了广泛应用[9]。

GO在农业方面的应用表明,适当浓度的GO处理可以促进植物种子萌发及其幼苗生长。如100 mg/L GO处理下卷荚相思(*Acacia cincinnata*)种子发芽率较对照提高15.36% [10]; 150 mg/L的GO浸种处理使紫穗槐(*Amorpha fruticosa* L.)种子的萌发率较对照显著提高23.33% [11]; 50 mg/L GO处理促进了白榆(*Ulmus pumila* L.)扦插苗的根系生长[12]。另一方面,石墨烯材料也表现出了明显的生物毒性效应,如1~10 mg/L GO处理抑制Gala苹果组培苗根系的发育[13]; 在液体培养基中,12.5、25、50、100、200 mg/L GO处理均对小麦幼苗的株高及根系形态表现出浓度依赖的毒害效应,并提高了抗氧化酶活性和丙二醛含量[14]。

在红树林生态修复中,白骨壤虽然作为先锋树种耐盐能力较强,但其幼苗定植的首要限制因素往往是潮汐淹水时间,而非盐度。但也有研究认为盐度对其生长有一定影响,如梁耐思[15]等人的研究发现,白骨壤在盐度5‰条件下萌根率较高,而盐度15‰和20‰时则萌发和生长受到明显抑制。梁文召[16]等人的研究得出,在2.9‰ NaCl盐胁迫下,低浓度GO可以促进水稻萌发,而高浓度GO对水稻生长具有一定危害,加大盐胁迫对水稻生长的毒害。作为在海水中生长的红树植物,在一定的盐度范围内GO对其种子萌发和幼苗生长的生物学效应如何,目前的研究还很少涉及。

基于此,本研究以白骨壤种子为试验材料,以河沙为生长基质,采用Box-Behnken设计,设置GO浓度(0~200 mg/L)与盐度(0~20‰)双因素三水平试验,探究GO和盐度对白骨壤幼苗早期生长的影响,以揭示GO与盐度耦合胁迫下白骨壤幼苗生长的耐受阈值与适应机制,为红树林湿地生态安全评估与修复实践提供理论依据。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 试验材料

本试验于2025年9月10日至10月29日进行,周期50 d。试验材料白骨壤种子采自广东省湛江市霞山区观海长廊(21.21°N, 110.42°E)滩涂生长的健康母树。采集后1 h内带回实验室,选择胚轴发育饱满、无病虫害的胎生苗,用清水冲洗3遍去除表面附着物,置于桶中浸泡12 h(期间换水2次),待种皮自然开裂后,挑选胚轴直径约1.2 cm、大小均一的种子备用。

试验基质选用河沙,过2 mm筛去除杂质后,置于105℃烘箱灭菌30 min以杀灭细菌,冷却后装入黑色育苗盒中(170×115×52 mm)。每盒填沙量保持一致,且不低于盒高的五分之三。将购自苏州碳丰科技有限公司的氧化石墨烯水性分散液(纯度>99 wt%),按试验设计稀释为相应浓度的工作液(见表1),并与氯化钠配制成处理液。超声30 min后分别浇入上述育苗盒中。

每盒均匀植入10颗处理好的种子(株间距约1 cm,深埋约1 cm,见图1)。播种后将育苗盒放在试验台面,架设LED灯(45 W全光谱白光,约5000 Lux提供光照),温度为25℃~30℃。试验期间每7 d浇灌3次相对应浓度的营养液(GO和NaCl配制而成)。培养50 d后结束试验,取样测定,进行植物形状分析。1个培育盒为1个重复,1~8实验组重复3次,9~13实验组重复1次,共13个处理。

#### 2.1.1. 氧化石墨烯 TEM 分析

本试验采用苏州碳丰科技公司生产的氧化石墨烯,主要仪器为美国FEI公司生产的Tecnai-G20。测试方法:取一点样品,用乙醇超声分散测试。加速电压200 KV,点分辨率在0.24 nm。线分辨率在0.14 nm,最大倍数约为100万(见图2)。

#### 2.1.2. 氧化石墨烯 Raman 分析

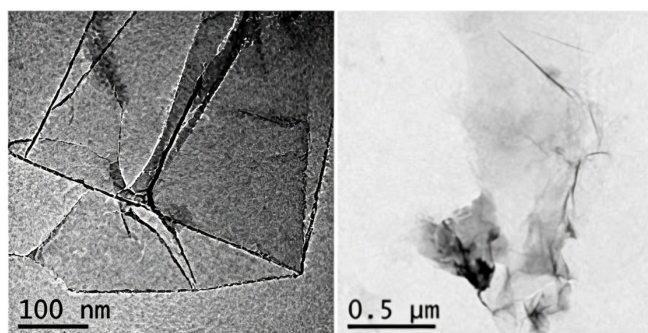
主要仪器型号为雷绍尼Renishaw inVia2000,搭配514 nm激光器,光谱分析率为 $1\text{ cm}^{-1}$ ,扫描范围

为  $50\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ ，空间分辨率  $1\text{ }\mu\text{m}$ ，共焦采样深度  $1.5\sim 2\text{ }\mu\text{m}$  (见图 3)。



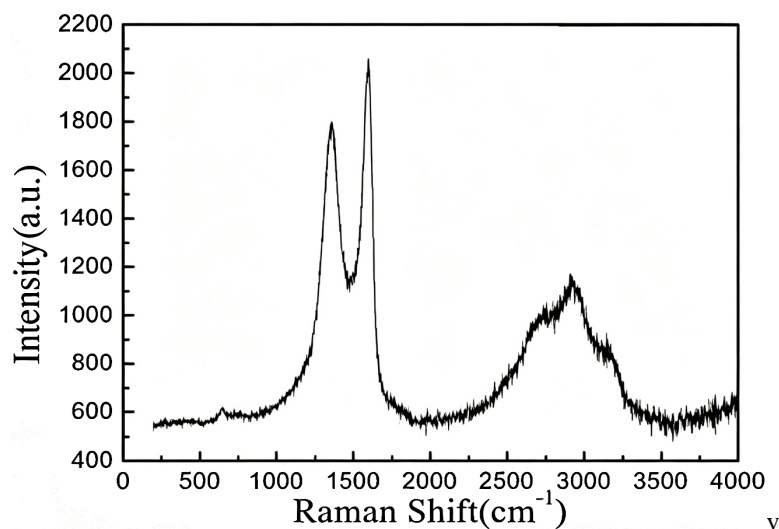
**Figure 1.** Experimental design for the effects of graphene oxide and salinity treatment on the early growth of *Avicennia marina* seedlings

**图 1.** 氧化石墨烯与盐度处理对白骨壤幼苗早期生长影响的试验设计



**Figure 2.** Transmission electron microscopy image of graphene oxide

**图 2.** 氧化石墨烯的 TEM 分析图



**Figure 3.** Raman spectrum of graphene oxide

**图 3.** 氧化石墨烯的 Raman 光谱图

## 2.2. 试验设计

采用 Box-Behnken 响应面法设计双因素三水平试验(见表 1), 选取氧化石墨烯浓度(A: 0、100、200 mg/L, 水平编码依次为-1、0、+1)和盐度(B: 0、10、20‰, 水平编码依次为-1、0、+1)为影响因素, 共 13 个处理组合(含 5 个中心点重复)。

**Table 1.** Coded design of experimental factor levels

**表 1.** 试验因素水平编码设计

试验号	试验因素水平编码	
	A 氧化石墨烯浓度(mg/L)	B 盐度(‰)
1	0	0
2	200	0
3	0	20
4	200	20
5	0	10
6	200	10
7	100	0
8	100	20
9	100	10
10	100	10
11	100	10
12	100	10
13	100	10

## 2.3. 测定指标与方法

### 2.3.1. 根系形态指标

试验结束后, 每个处理随机选取 6 株幼苗进行根系形态分析(见图 4)。首先, 将根系用蒸馏水小心冲洗去除附着沙粒, 用吸水纸吸干表面水分。然后将其置于 WinRHIZO 根系分析扫描仪中进行扫描, 用 WinRHIZO 软件分析获取根系总长度、根系投影面积、根系体积、根尖数量等形态指标。



注: 从左往右依次为处理组 1~13。

**Figure 4.** Effects of GO and salinity treatments on root growth of *Avicennia marina* seedlings

**图 4.** GO 和盐度处理对白骨壤幼苗根系生长的影响

### 2.3.2. 生物量测定

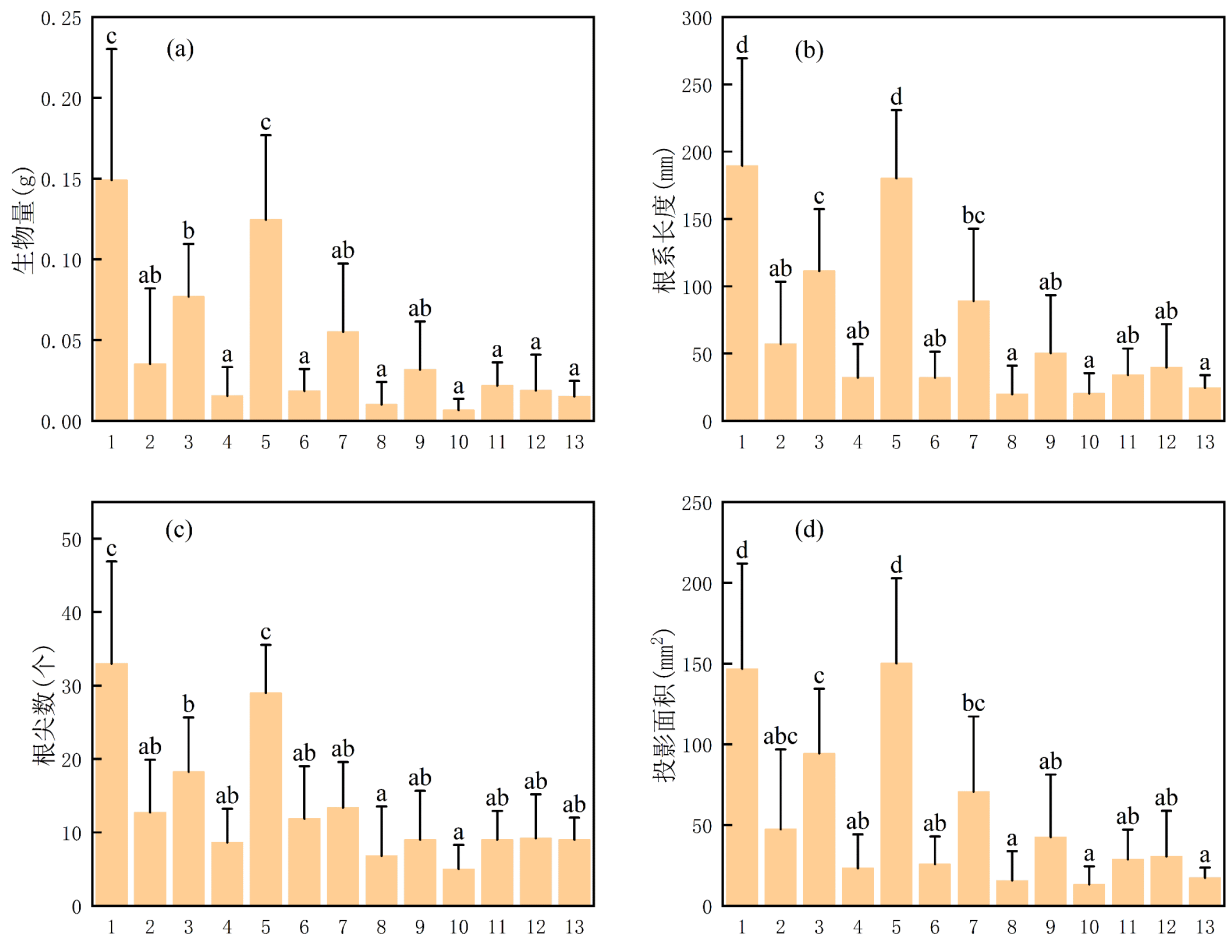
取上述已进行根系扫描分析的幼苗根系，每个处理随机选取 3 株，随后用精度 0.0001 g 分析天平称取质量。由于本试验幼苗根系较少，以白骨壤鲜重为生物量进行分析。

### 2.4. 数据处理

采用 Excel 2019 进行数据整理，SPSS 25.0 进行方差分析(ANOVA)和 Duncan 多重比较( $\alpha = 0.05$ )。通过 Design-Expert 13.0 进行响应面回归分析、模型显著性检验、交互作用分析和多目标优化。

## 3. 结果与分析

### 3.1. GO 单独作用对白骨壤幼苗生长的影响



注：图中数据为平均值  $\pm$  标准误差；同一组数据后小写字母不同者，表示差异达显著水平( $P < 0.05$ )。

**Figure 5.** Effects of GO and salinity treatment on biomass and root morphology of *Avicennia marina* seedlings

**图 5.** GO 和盐度处理对白骨壤幼苗生物量和根系形态的影响

不同浓度 GO 处理 50 d 后白骨壤幼苗根系指标和生物量变化如图 5 所示。随着 GO 浓度增加，0‰ 盐度的白骨壤幼苗根系各指标均呈现先上升后下降的趋势，且在 GO 浓度为 100 mg/L 时达最低。100 mg/L (处理 7)和 200 mg/L (处理 2) GO 浓度对白骨壤幼苗根系生物量、根系长度、根尖数、投影面积影响均显著，100 mg/L 时与对照组(处理 1)相比其各指标分别下降了 63.0%、53.0%、59.5%、51.8% ( $P < 0.05$ )；200

mg/L 则分别下降了 76.4%、69.8%、61.5%、67.7% ( $P < 0.05$ )。10‰盐度的白骨壤幼苗根系, 随着 GO 浓度增加, 0 mg/L GO 浓度各根系指标显著高于 100 mg/L (处理 9~13)和 200 mg/L (处理 6) ( $P < 0.05$ )。20‰盐度的白骨壤幼苗各根系指标均随着 GO 浓度增加, 呈现先下降后上升的趋势, 0 mg/L (处理 3) GO 浓度白骨壤根系生物量、根系长度以及投影面积显著高于 100 mg/L (处理 8)和 200 mg/L (处理 4) ( $P < 0.05$ ) (见图 5(a)、图 5(b)、图 5(d)), 但根尖数不显著( $P > 0.05$ ) (图 5(c))。

### 3.2. GO 和盐度对白骨壤幼苗根系指标的交互分析

**Table 2.** Two-way ANOVA results for the effects of GO concentration, salinity, and their interaction on physicochemical indices of *Avicennia marina* seedling roots

**表 2.** GO 浓度、盐度及其交互作用对白骨壤幼苗根系理化指标的双因素方差分析结果

根系指标	参数	F	P
生物量	GO 浓度	146.37	<0.0001
	盐度	34.58	0.0006
	GO 浓度 × 盐度	7.61	0.0281
根系长度	GO 浓度	84.59	<0.0001
	盐度	19.46	0.0031
	GO 浓度 × 盐度	2.76	0.1407
根尖数	GO 浓度	81.53	<0.0001
	盐度	24.08	0.0017
	GO 浓度 × 盐度	6.99	0.0332
根系投影面积	GO 浓度	66.12	<0.0001
	盐度	13.18	0.0084
	GO 浓度 × 盐度	0.9081	0.3724

由表 2 分析结果可知, GO 浓度及盐度对白骨壤根系各形态指标的影响存在显著差异( $P < 0.05$ ); GO 浓度和盐度的交互作用对白骨壤幼苗根系生物量、根尖数的影响存在显著差异( $P < 0.05$ ), 对根系长度和根系投影面积的影响不显著( $P > 0.05$ )。

### 3.3. GO 和盐度对白骨壤幼苗根系指标的响应面分析

利用 Design-Expert 13.0 软件对表 2 中的响应值进行多元二次回归拟合分析, 建立了以白骨壤生物量(Y1)、根系长度(Y2)、根尖数(Y3)、投影面积(Y4)为预测值, GO 和盐度为影响因素的多元二次线性回归方程:

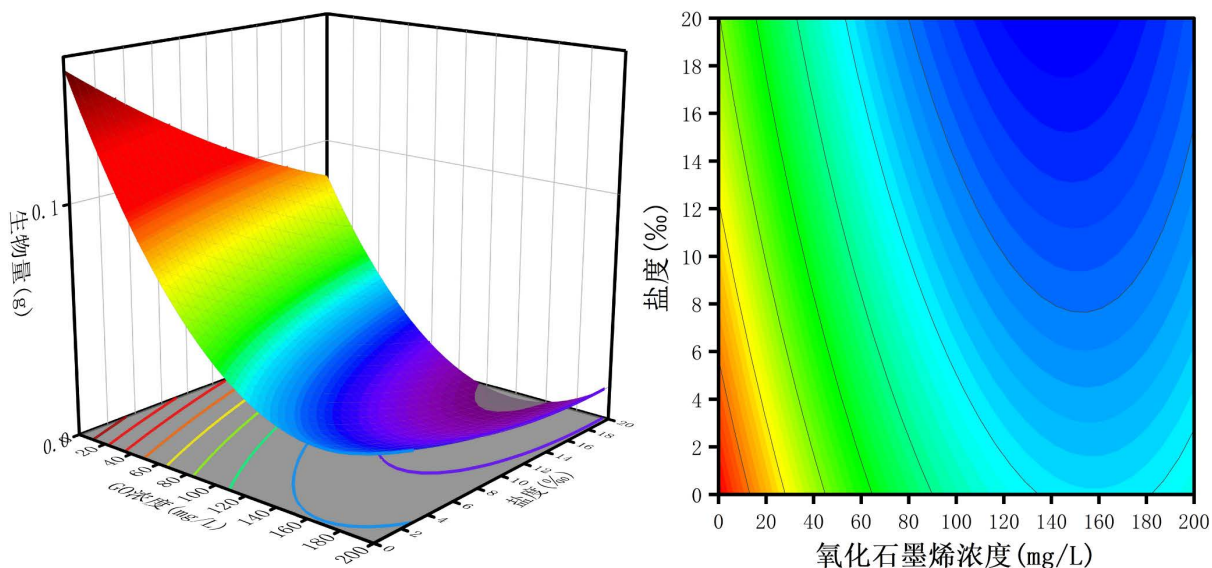
$$Y1 = 0.021 - 0.0469A - 0.0228B + 0.0131AB + 0.0449A^2 + 0.0060B^2$$

$$Y2 = 38.45 - 59.96A - 28.76B + 13.26AB + 57.87A^2 + 6.14B^2$$

$$Y3 = 8.76 - 7.67A - 4.17B + 2.75AB + 10.34A^2 - 0.1552B^2$$

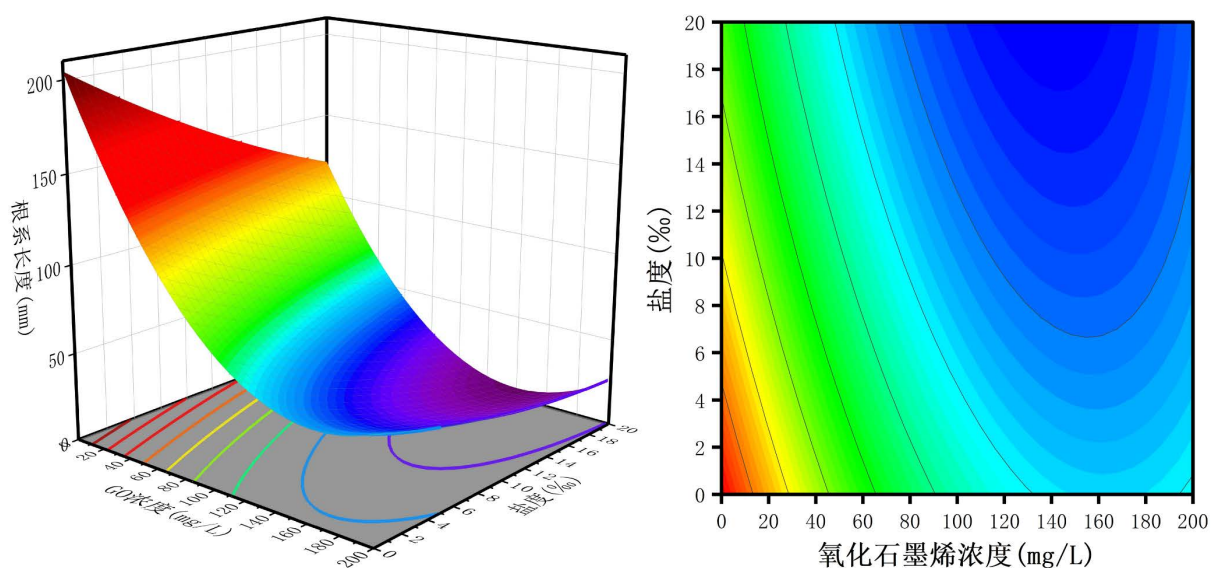
$$Y4 = 30.76 - 49.13A - 21.94B + 7.05AB + 48.21A^2 + 3.44B^2$$

为探究各因素间的交互作用对白骨壤幼苗根系指标的影响, 采用软件 Design Expert 软件进行多元二次回归拟合, 构建了相应的响应面模型。响应面曲面图(见图 6~9)直观反应了 GO 浓度和盐度中任意一个变量取零水平时, 另一因素及其交互作用对白骨壤幼苗根系指标的调控作用。



**Figure 6.** Interaction analysis of GO and salinity on root biomass of *Avicennia marina* seedlings

**图 6.** GO 和盐度对白骨壤幼苗根系生物量的交互分析



**Figure 7.** Interaction analysis of GO and salinity on root length of *Avicennia marina* seedlings

**图 7.** GO 和盐度对白骨壤幼苗根系长度的交互分析

白骨壤幼苗根系指标均在低盐度下随氧化石墨烯浓度增加呈先降后升的趋势(见图 6~9), 表明存在最佳浓度范围, 而高盐度整体抑制根系生长; 氧化石墨烯区域的等高线密度大于盐度的区域, 说明氧化石墨烯影响程度更显著; 且等高线呈椭圆形, 说明二者交互作用显著。

### 3.4. 组合优化

由于白骨壤生物量越大, 根系长度越长、根尖个数越多、投影面积越大, 生产效率也越高, 最终确定以生物量 Y1、根系长度 Y2、根尖个数 Y3、投影面积 Y4 为响应值, 对实验数据进行优化预测, 通过分析得到优化结果: GO 浓度为 0.171 mg/L, 盐度为 0.74‰, 此时理论生物量为 0.151 g、根系长度为 200.148 mm、投影面积为 157.638 mm<sup>2</sup>、根尖个数为 33 个(见表 3)。

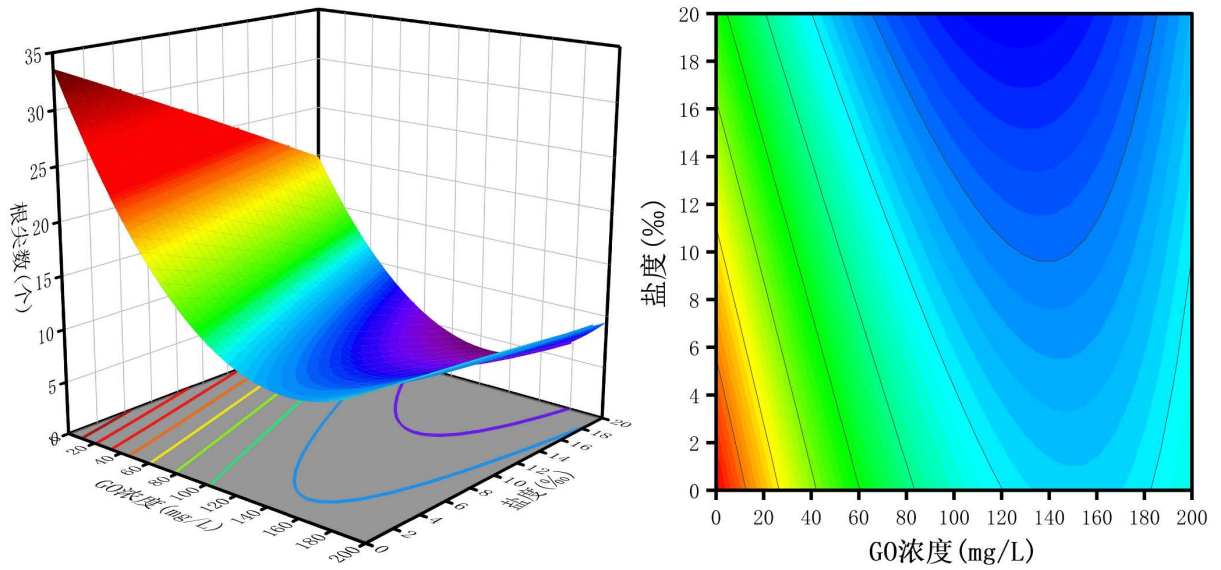


Figure 8. Interaction analysis of GO and salinity on number of root tips of *Avicennia marina* seedlings

图 8. GO 和盐度对白骨壤幼苗根尖数的交互分析

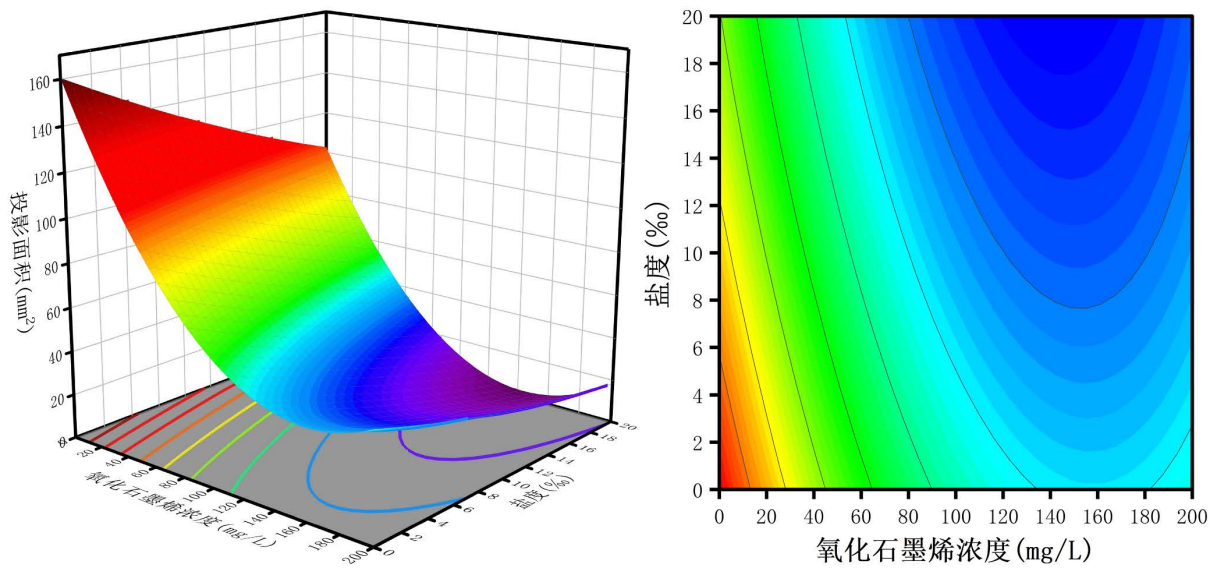


Figure 9. Interaction analysis of GO and salinity on the projected area of the root system of *Avicennia marina* seedlings

图 9. GO 和盐度对白骨壤幼苗根系投影面积的交互分析

Table 3. Predicted values of biomass and root system indices

表 3. 生物量及根系指标预测值

响应变量	预测值	标准误	95%置信区间最低值	95%置信区间最高值
生物量	0.1509	0.0080	0.1322	0.1698
根系长度	200.1480	13.3759	168.5190	231.7770
根尖个数	33.0585	1.7127	29.0086	37.1084
投影面积	157.6380	12.3954	128.3270	186.9480

## 4. 讨论

本研究首先明确了 GO 单独作用对白骨壤幼苗生长的影响。在盐度为 0‰条件下, 100 mg/L GO 处理使白骨壤幼苗的生物量、根系长度、根尖数、投影面积较对照分别下降 63.0%、53.0%、59.5%、51.8%; 200 mg/L GO 处理使上述指标进一步下降。这一结果表明, 在 0~200 mg/L 试验范围内, GO 对白骨壤幼苗生长表现为浓度依赖的抑制效应。这一结果与部分木本植物研究相似。曹慧芬等[17]研究表明, GO 对银白杨扦插苗生长同样表现出浓度依赖的抑制效应; Li 等[13]发现 1~10 mg/L GO 即对苹果组培苗根系发育产生抑制。

氧化石墨烯(GO)与盐度对白骨壤种子的萌发及幼苗生长具有显著的交互效应, 且 GO 浓度的影响(F 值范围 66.12~146.37)均显著大于盐度的影响(F 值范围 13.18~34.58), 表明 GO 浓度是影响白骨壤幼苗生长的主导因子。GO 与盐度之间存在协同抑制效应。对比处理 7 (100 mg/L GO、0‰盐度)与处理 9~13 (100 mg/L GO、10‰盐度), 盐度 10‰使生物量从 0.0551 g 降至 0.0188 g (下降 65.9%), 根系长度从 89.09 mm 降至 34.53 mm (下降 61.2%), 根尖数从 13.38 个降至 8.25 个(下降 38.3%), 投影面积从 70.73 mm<sup>2</sup> 升至 27.18 mm<sup>2</sup> (下降 61.6%)。这表明, 在 100 mg/L GO 胁迫基础上, 叠加 10‰盐度使白骨壤幼苗生长进一步抑制, 各指标下降 38.3%~65.9%, 证实 GO 与盐度对幼苗生长具有协同抑制效应。这一现象的可能机制是: GO 通过诱导氧化胁迫破坏细胞膜完整性, 使细胞更容易受到盐胁迫的渗透胁迫和离子毒害; 同时, 盐胁迫本身也会诱导活性氧产生, 二者叠加导致氧化损伤加剧。苏航等[18]在对黑麦草根系的研究中发现, 高剂量 GO 处理会显著提高 POD、SOD、CAT 活性及 MDA 含量, 降低根系活力。白秀丽等[19]通过转录组学分析发现, 石墨烯处理可显著影响红锥根系中与氧化还原相关的基因表达。白骨壤盐腺为多细胞复合结构[20], 依赖 H<sup>+</sup>-ATPase、Na<sup>+</sup>/H<sup>+</sup>逆向转运蛋白和 K<sup>+</sup>通道运输实现能量驱动型泌盐, GO 可能通过物理吸附作用改变盐腺表面盐晶微环境从而直接调控盐腺泌盐效率。与拒盐植物不同, 白骨壤泌盐高度依赖盐腺细胞的离子外排与胞吐过程, GO 并非通过根系拒盐发挥作用, 而是靶向盐腺泌盐通路实现离子稳态调控。这些发现为本研究中 GO 与盐度复合胁迫的协同抑制效应提供了机制解释。

通过响应面分析, 本试验确定白骨壤的最适生长条件为 GO 浓度 0.171 mg/L、盐度 0.74‰, 在此组合下白骨壤幼苗的生物量(0.151 g)、根系长度(200.148 mm)、根尖个数(33 个)、投影面积(157.638 mm<sup>2</sup>), 显著高于其他处理组(P < 0.05)。该最适盐度低于梁耐思[15]等研究的 5%, 表明 GO 的存在可能通过调控植物抗氧化系统与渗透调节能力, 从而改变白骨壤对盐度的耐受范围。

白骨壤幼苗在低浓度 GO 与低盐复合条件下表现出较强的适应性与生长潜力, 而在高浓度 GO 与高盐条件下生长受抑制。GO 浓度是主导因子, 盐度次之, 二者交互作用在根系发育与抗氧化响应中发挥重要调控作用。本研究为评估纳米材料与盐分复合胁迫下红树植物的生态响应提供了理论依据, 也为滨海湿地生态修复中的污染风险防控提供了参考。

## 5. 结论

对白骨壤种子的萌发与幼苗的生长在不同氧化石墨烯浓度和盐度的组合下的分析和评估表明: 1) 白骨壤种子在盐度为 0‰条件下, 100 mg/L GO 处理使白骨壤幼苗的生物量、根系长度、根尖数、投影面积较对照分别下降 63.0%、53.0%、59.5%、51.8%; 200 mg/L GO 处理抑制更为严重, 生物量、根系长度、根尖数、投影面积较对照分别下降 76.4%、69.8%、61.5%、67.7%。2) 方差分析显示, GO 浓度的 F 值(生物量 146.37、根系长度 84.59、根尖个数 81.53、投影面积 66.12)均显著大于盐度的 F 值(生物量 34.58、根系长度 19.46、根尖个数 24.08、投影面积 13.18), 表明 GO 浓度的影响大于盐度。3) 在 100 mg/L GO 存在下, 盐度 10‰使各指标下降 38.3%~65.9%。4) 在 GO 浓度为 0.171 mg/L、盐度为 0.74‰的组合条件

下, 最适宜白骨壤幼苗生长, 这说明白骨壤能适应低氧化石墨烯、低盐环境, 但在 GO 和盐度同时存在时, 会产生协同抑制效应。

## 基金项目

广东省大学生创新创业研究项目(CXXL2025173)、广东省本科高校线上线下混合式一流课程建设项目(jxyj20231215017)。

## 参考文献

- [1] 卢伟志, 陈鹭真, 杜晓娜, 等. 红树植物白骨壤幼苗水下光合与生长特性的研究[C]/中国生态学会红树林学组执委会. 中国第五届红树林学术会议论文摘要集. 2011: 23-24.
- [2] 田野, 陈玉军, 侯琳, 等. 广东湛江白骨壤红树人工林消波效应初步研究[J]. 地球环境学报, 2014, 5(1): 30-35+41.
- [3] 梁玉华. 乡村振兴背景下湛江红树林湿地保护与生态旅游规划研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2026(2): 4-6.
- [4] 陈雪, 牛丞禹, 曹烁阳, 等. 基于生态协同视角的红树林保护和发展规划研究——以湛江金牛岛红树林片区为例[C]/中国城市规划学会, 沈阳市人民政府. 迈向中国式现代化: 规划的价值与作为——2025 中国城市规划年会论文集(09 城市生态规划). 2025: 818-829.
- [5] 潘桂娟. 木本植物对盐胁迫的响应及在人工模拟海水养殖污水中的应用[D]: [硕士学位论文]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2023.
- [6] 赵琳, 宋瑞瑞, 吴琦, 等. 氧化石墨烯对玉米幼苗生长及生理特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1167-1173.
- [7] 张溪之. 复合型氧化石墨烯纳米载体对肝癌模型的化学——光热联合治疗[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [8] 李轩泽, 方汉洪, 徐哲. 海藻酸钠-羟基磷灰石-氧化石墨烯水凝胶的制备及细胞相容性[J]. 中国组织工程研究, 2026, 30(32): 8420-8426.
- [9] 葛赛, 孙景茹, 李少雄, 等. 氧化石墨烯对茄科植物种子萌发的影响[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2022, 38(6): 5-8.
- [10] 张淑霞. 氧化石墨烯对卷荚相思种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 安徽农学通报, 2025(3): 52-56.
- [11] 刘顿, 吕月玲, 骆汉. 氧化石墨烯对紫穗槐种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 种子, 2022, 41(1): 14-18+37.
- [12] 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.
- [13] Li, F., Sun, C., Li, X., Yu, X., Luo, C., Shen, Y., et al. (2018) The Effect of Graphene Oxide on Adventitious Root Formation and Growth in Apple. *Plant Physiology and Biochemistry*, **129**, 122-129. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.05.029>
- [14] 曹慧芬, 谢建义, 姚建忠, 等. 氧化石墨烯对盐胁迫下小麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2022, 42(5): 84-92.
- [15] 梁耐思, 曾悦, 等. 盐胁迫对白骨壤种子萌发及幼苗生理的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2024, 44(2): 62-68.
- [16] 梁文召, 周诗意, 韦瑞燕, 等. 氧化石墨烯引发对盐胁迫下水稻种子萌发的影响[J]. 中国农学通报, 2025, 41(9): 1-7.
- [17] 曹慧芬, 张晓, 赵建国, 等. 氧化石墨烯对银白杨扦插苗生长的影响[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 31-36.
- [18] 苏航, 毛建越, 赵树兰, 等. 氧化石墨烯对黑麦草根系抗逆生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(12): 2108-2113.
- [19] 白秀丽, 庞敏, 刘泽慧, 等. 红锥根系响应石墨烯的转录组学研究[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2023, 44(2): 43-52.
- [20] 魏明月. 红树植物白骨壤泌盐机制研究[D]: [博士学位论文]. 厦门: 厦门大学, 2022.