

Cd 污染及其与大气 CO₂ 浓度升高、N 添加复合作用对大叶相思生长的影响

易亚凤^{1,2}, 彭诗涛³, 张玲玲¹, 尧波^{1,2}, 罗先真^{1,2}, 臧晓蔚^{1,2}, 张桂华^{1,2}, 温达志^{1*}

(1. 中国科学院华南植物园, 中国科学院退化生态系统植被恢复与管理重点实验室, 广州 510650; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 江西省吉安市林业局森林资源监测中心, 江西 吉安 343000)

摘要: 为了解 Cd 污染胁迫下树木对 CO₂ 浓度升高、N 添加及其复合作用的响应, 应用开顶箱, 探讨 Cd 及其与 CO₂、N 的复合作用对大叶相思(*Acacia auriculiformis*)基径、树高和生物量的影响。结果表明, Cd 添加抑制大叶相思基径、树高和生物量的增长, 并且具有时间滞后性; 大气 CO₂ 浓度升高、N 添加及 CO₂+N 均有缓解 Cd 对植物生长抑制作用的趋势, 其中, N 添加更能促进大叶相思基径的生长, 树高生长则对 CO₂ 升高更为敏感; 在 Cd 污染土壤中, N 添加的缓解作用最显著。因此, 氮肥管理是重金属污染土地修复初期促进植物修复的重要策略。

关键词: 镉污染; CO₂; 氮添加; 大叶相思; 生长

doi: 10.11926/jtsb.4080

Growth Dynamics of *Acacia auriculiformis* under Cadmium Pollution and Its Combination with Atmospheric CO₂ Enrichment and Nitrogen Addition

YI Ya-feng^{1,2}, PENG Shi-tao³, ZHANG Ling-ling¹, YAO Bo^{1,2}, LUO Xian-zhen^{1,2}, ZANG Xiao-wei^{1,2}, ZHANG Gui-hua^{1,2}, WEN Da-zhi^{1*}

(1. Key Laboratory of Vegetation Restoration and Management of Degraded Ecosystem, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Forest Resources Monitoring Center, Ji'an Forestry Bureau in Jiangxi Province, Ji'an 343000, Jiangxi, China)

Abstract: In order to understand the response of trees to elevated CO₂, N addition and Cd stress, the growth characters of *Acacia auriculiformis*, such as basal diameter, tree height and individual biomass, were studied using an open-top chamber (OTC). The results showed that the basal diameter, height and individual biomass of *A. auriculiformis* were significantly inhibited under Cd stress, and the inhibition effect was with a lag time. Both elevated CO₂ and N addition remitted the inhibition of Cd stress on *A. auriculiformis* growth, N addition could promote the base diameter growth of *A. auriculiformis*, and tree height growth was more sensitive to CO₂ enrichment. Under Cd stress, the biomass accumulation of *A. auriculiformis* was mainly caused by N addition. So, it was suggested that N fertilization management was an important strategy to promote phytoremediation in the early stage of heavy metal contaminated land remediation.

Key words: Cadmium pollution; Carbon dioxide; Nitrogen addition; *Acacia auriculiformis*; Growth

收稿日期: 2019-04-18 接受日期: 2019-07-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(31570483); 广东省自然科学基金重点项目(2015A030311029)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31570483), and the Key Project of Natural Science Foundation of Guangdong Province (Grant No. 2015A030311029).

作者简介: 易亚凤, 女, 硕士研究生, 从事环境生态研究。E-mail: yiyafeng@scbg.ac.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: dzwen@scib.ac.cn

森林生态系统被认为是陆地生态系统最大的储碳库,虽然全球森林面积仅占陆地面积的 30%,但碳储量却占陆地植被碳储量的 80%~90%^[1-3]。森林因其较高的碳密度和较快的碳积累速率而具有长期持续的增汇作用,在减缓和应对全球气候变暖中扮演重要角色^[4-6]。中国人工造林面积高达 $6.9 \times 10^7 \text{ hm}^2$,居世界首位,1978-1998 年间中国森林碳库通过增加人工造林增加碳汇 0.45 Pg C,年均增加 0.021 Pg C,通过人工营林及造林进行碳增汇已被广泛认可^[7-8]。

当前,由于化石燃料燃烧以及土地利用类型的改变,大气 CO_2 浓度与氮(N)沉降速率均达到有历史纪录以来的最高值,且仍在加剧。据报道,大气 CO_2 浓度已经从 1959 年的 $315 \mu\text{mol/mol}$ 升高至当前约 $385 \mu\text{mol/mol}$,且每年仍以 $1.9 \mu\text{mol/mol}$ 的速率增长,预测到 2100 年将升高至 $540 \sim 970 \mu\text{mol/mol}$ ^[9]。全球 N 沉降在 1995 年约为 100 Tg N,远高于 1860 年的 34 Tg N,预测到 2050 年将增加到 200 Tg N^[10]。如此高的 CO_2 浓度与 N 沉降水平势必对树木生长及森林碳库造成巨大影响,大量的 CO_2 富集、养分添加试验和 Meta 分析认为高浓度 CO_2 与高 N 沉降水平均带来明显的“施肥效应”^[11-14]。其中,高浓度 CO_2 能够促进植物光合作用,从而提高森林生产力^[15];高 N 输入则主要刺激植物生长,提高森林生产力^[16]。然而, Pennuelas 等^[17]的研究则表明,尽管大气 CO_2 浓度和 N 沉降普遍增加,全球树木生长和森林碳库并没有明显增加,暗示其它因子(如干旱,环境污染等)可能阻碍了许多地区 CO_2 浓度/N 沉降增加对森林碳储存的刺激作用。因此,之前的研究仍存在以下问题:(1) 多关注单一因素(大气 CO_2 浓度升高或 N 沉降水平)的影响,双因素及多因素的复合研究仍相对薄弱;(2) 主要关注的是热带、亚热带、温带、寒带等地区未受污染的森林,对受重金属胁迫的森林缺乏关注。事实上,伴随着全球大气 CO_2 浓度与 N 沉降速率快速增长,土壤重金属污染亦已成为全球性的环境问题,尤其在快速工业化城市化地区造成严重危害^[18-19]。在我国广州地区,重金属对森林生态系统的污染已经从中心城区向郊区和边远山区扩展,且铅(Pb)、镉(Cd)、锌(Zn)含量远超过植物受害临界值和土壤背景值^[20]。鉴于复杂因素共存的事实,越来越多的学者认为,设计良好的多因素复合试验对精确预测森林碳库动态至关重要^[21-22]。

我国亚热带地区森林面积辽阔,物种多样性丰富、群落类型和结构复杂,具有巨大生物量碳库和碳储存潜力,在维持区域和全球尺度上的气候调节和生物地球化学循环中均具有重要作用^[23-24]。然而,该地区亦是我国人口、工业和城市分布最为稠密、经济增长最快的核心区域,受频繁持续的人类活动影响,已暴露出酸雨加剧、土壤酸化加重、重金属与有机物复合污染日趋严重等环境问题,大面积森林处于酸沉降超临界负荷的敏感区域^[25-26]。这些酸性土壤的缓冲性能差,对重金属的固定能力极其有限,导致土壤中的重金属活性高,对环境和自然生态系统造成严重威胁^[27]。Cd 是广泛存在于环境中毒性最强的重金属之一,对植物的毒害作用尤为严重^[28-29]。大叶相思(*Acacia auriculiformis*)速生耐贫瘠且制浆性能优良,已广泛用于广东、广西、福建等地的人工造林和城市绿化^[30-31]。因此,本文采用开顶生长箱(open-top chamber, OTC),探究重金属 Cd 污染下 CO_2 浓度升高和 N 添加对大叶相思生长的影响,为镉污染土地的植被修复与管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院华南植物园科研区($113^\circ 30' \text{ E}$, $23^\circ 20' \text{ N}$),属南亚热带季风气候,温暖多雨、光热充足,年均温 21.5°C 。年平均降水 $1600 \sim 1900 \text{ mm}$,80%的降水集中在 5-11 月^[32],有明显的干湿季之分。

1.2 样地设置

研究采用开顶生长箱的近自然法。开顶生长箱装置由底座、箱体、充气系统三部分组成,整体上呈圆柱形。其中底座为直径 3 m、高 0.7 m 的砖墙结构。箱体由不锈钢支柱固定在底座上,铁丝网逐级缠绕加固,最后围上透光 PVC 膜。充气系统由 CO_2 瓶、 CO_2 流量计、PVC 管及鼓风机连接而成。PVC 管围绕箱体一周,在面向箱体中心的一侧,每隔 30 cm 开一直径约为 0.3 cm 的小孔。气瓶中的 CO_2 在鼓风机的作用下送入 PVC 管道,并经由小孔均匀扩散至生长箱内。生长箱内的土壤来自受干扰较少的罗浮山自然保护区,转移过程保持土层顺序(0~10、10~30 和 30~60 cm)。

经查询 <https://www.co2.earth/>,当前大气 CO_2

浓度为 410 $\mu\text{mol}/\text{mol}$, 设定增加 CO₂ 处理的浓度为 700 $\mu\text{mol}/\text{mol}$; 根据 Mo 等的报道^[33], 我国西南和华南地区 N 沉降背景值约为 50 kg N/(hm²·a), 将加 N 处理设为 100 kg N/(hm²·a); 由于大气中 Cd 的年沉降量很低, 土壤中 Cd 主要来源于金属矿山开采和污水灌溉, 加 Cd 处理设为 10 kg Cd/(hm²·a), 表征 Cd 污染较为严重的情形。试验设置对照(Control)、加 Cd (Cd)、加 Cd 加 CO₂ (Cd+CO₂)、加 Cd 加 N (Cd+N)、加 Cd 加 CO₂ 加 N (Cd+CO₂+N) 共 5 个处理; 每处理 3 个重复, 共 15 个 OTCs。选择 3 株健壮 1 a 生大叶相思(*Acacia auriculiformis*) 苗等比例种植在每个 OTC 内。通过生长箱内环绕穿孔胶管和 CO₂ 加热流量阀控制棚内 CO₂ 浓度在 700 $\mu\text{mol}/\text{mol}$, 熏气时间为 8:00–17:00。N、Cd 添加分别使用 NH₄NO₃、CdCl₂ 配置成溶液, 逐月以近地面喷洒的方式施入, 年总施入量为 100 kg N/hm² 和 10 kg Cd/hm²。对照处理以等量去离子水代替。2016 年 9 月种植树苗, 在 OTC 中适应和稳定生长后, 2017 年 4 月开始试验处理。

1.3 植物生长的测定

使用游标卡测量树木基径(D, mm); 使用卷尺测量树高(H, m)。2017 年 4 月, 大叶相思的基径和树高分别为 26.53 mm 和 2.66 m。之后每隔 2 个月测量 1 次。10–次年 3 月为干季, 4–9 月为湿季。

树木相对生长速率(RGR)=(X₂-X₁)/(t₂-t₁), 其中, X₁ 和 X₂ 分别为 t₁ 和 t₂ 时的树高、基径或生物量。

生物量(W)=0.2279(D²H)^{0.7408}, 其中, W 为生物量(kg); D²H 为基径平方与树高的乘积^[34–35]。

1.4 数据分析

使用 SPSS 19 对数据进行方差分析, 处理间差异显著性采用单因素方差分析(One-way ANOVA), 显著性水平为 P<0.05。使用 SigmaPlot 12.5 作图。

2 结果和分析

2.1 对基径的影响

不同处理下大叶相思的基径均随时间延长表现出相对一致的增长趋势, 但处理间无显著差异。大叶相思单株基径的年均增长速率(mm/a)为对照(65.75±1.98)>Cd+CO₂+N (55.48±6.0)>Cd+N (51.25±5.12)>Cd (50.72±2.24)>Cd+CO₂ (50.61±4.53)(图 1: A)。

Cd 对大叶相思基径生长具有抑制效应(-30%), N 添加有缓解这种抑制作用的趋势(1.04%), 施加 CO₂+N 也具有缓解这种抑制作用的趋势(9.38%), 增加 CO₂ 的作用则不明显。这表明施加 Cd 处理, CO₂ 升高、N 添加对于基径生长可能存在交互作用。试验期间, 基径月增长速率随时间变化而变化, 湿季速率快、干季速率慢(图 1: B), 但大叶相思干湿季的基径月增长速率在不同处理间差异不显著(图 1: C)。

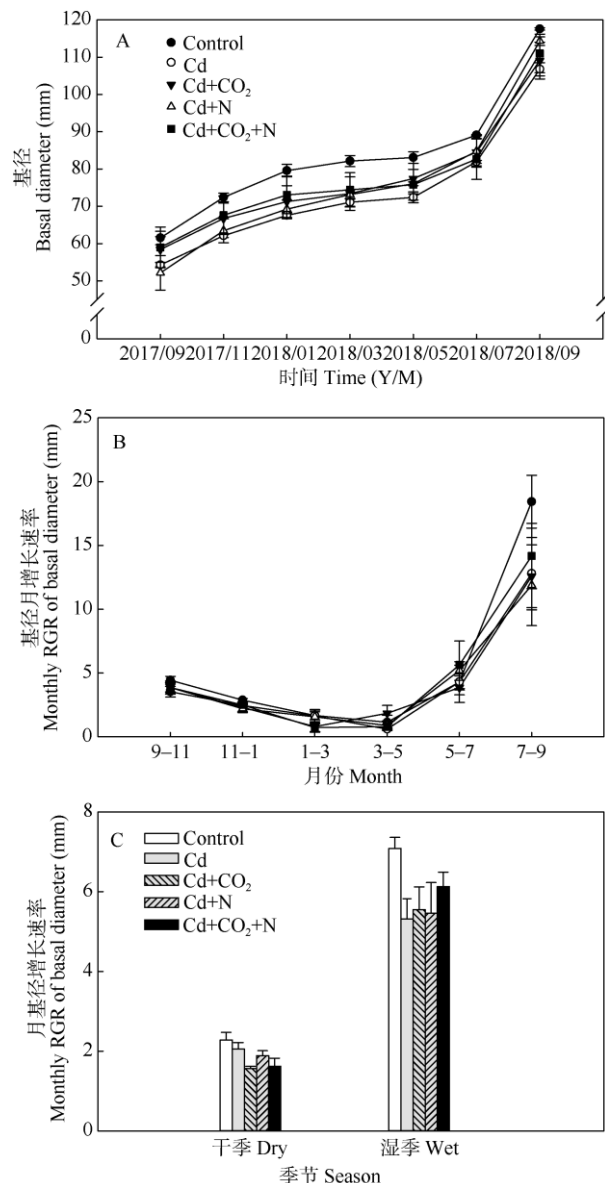


图 1 大叶相思 2017/09–2018/09 的基径生长。A: 基径; B: 基径月增长速率; C: 干湿季基径月增长速率。下图同。

Fig. 1 Base diameter of *Acacia auriculiformis* from 2017/09 to 2018/09. A: Basal diameter; B: Monthly RGR of basal diameter; C: Monthly RGR of basal diameter in dry and wet seasons. The same is following Figures.

2.2 对树高的影响

不同处理大叶相思树高随时间延长均表现出明显的增长, 但处理间均无显著差异。单株大叶相思树高的年均增长速率(m/a)为对照(2.75 ± 0.19) > Cd+CO₂ (2.74 ± 0.13) > Cd+CO₂+N (2.73 ± 0.48) > N+Cd (2.19 ± 0.21) > Cd (2.18 ± 0.23) (图 2: A)。施加 Cd 对大叶相思树高生长具有抑制效应(-26.15%), 复合 CO₂ 升高、CO₂ 升高和 N 添加有缓解 Cd 添加的抑制趋势(25.69%、25.23%), 而 N 添加的效应较弱(0.46%)。这表明施加 Cd 时, CO₂ 升高、N 添加对于树高的生长存在交互作用。树高月增长速率随时间变化而变化, 湿季速率快、干季速率慢(图 2: B), 但大叶相思干湿季树高的月增长速率在处理间的差异均不显著(图 2: C)。

2.3 对生物量的影响

大叶相思生物量随时间延长而增加, 但处理间无显著差异。大叶相思单株生物量的年增长速率(kg/a)为对照(28.1 ± 0.63) > Cd+N (26.88 ± 2.48) > Cd+CO₂+N (23.64 ± 3.48) > Cd (22.96 ± 0.79) > Cd+CO₂ (18.75 ± 3.55) (图 3: A)。Cd 对生物量积累具有抑制效应(-22.39%), 施 Cd 复合 N 添加、CO₂ 升高和 N 添加则有缓解这种抑制作用(17.07%、2.96%), 复合 CO₂ 升高有加剧抑制作用(-22.45%)。这表明施加 Cd 时, CO₂ 升高、N 添加对于生物量的增长存在交互作用。不同处理间生物量月增长速率随时间变化而变化, 湿季速率加快、干季速率减缓(图 3: B)。不同处理间生物量干季月积累速率差异显著($F=3.537, P=0.048$), 湿季则不显著(表 1)。干季在施加 Cd 的基础上复合 CO₂ 升高、N 添加、CO₂ 升高及 N 添加均会加剧 Cd 对生物量积累的抑制作用(-44.63%、-6.67%、-24.18%)。湿季复合 N 添加、CO₂ 升高和 N 添加(22.21%、7.88%)具有缓解 Cd 对生物量积累速率抑制的作用, 复合 CO₂ 升高会加剧抑制作用(-18.35%)(图 3: C)。

3 结论和讨论

本研究结果表明, 大叶相思在重金属 Cd 污染土壤中的生长变化和生物量积累对大气 CO₂ 浓度升高、N 添加及两者复合作用均表现出不同的响应。

Cd 添加的大叶相思基径、树高和生物量增长均低于对照, 说明 Cd 添加对大叶相思的生长具有

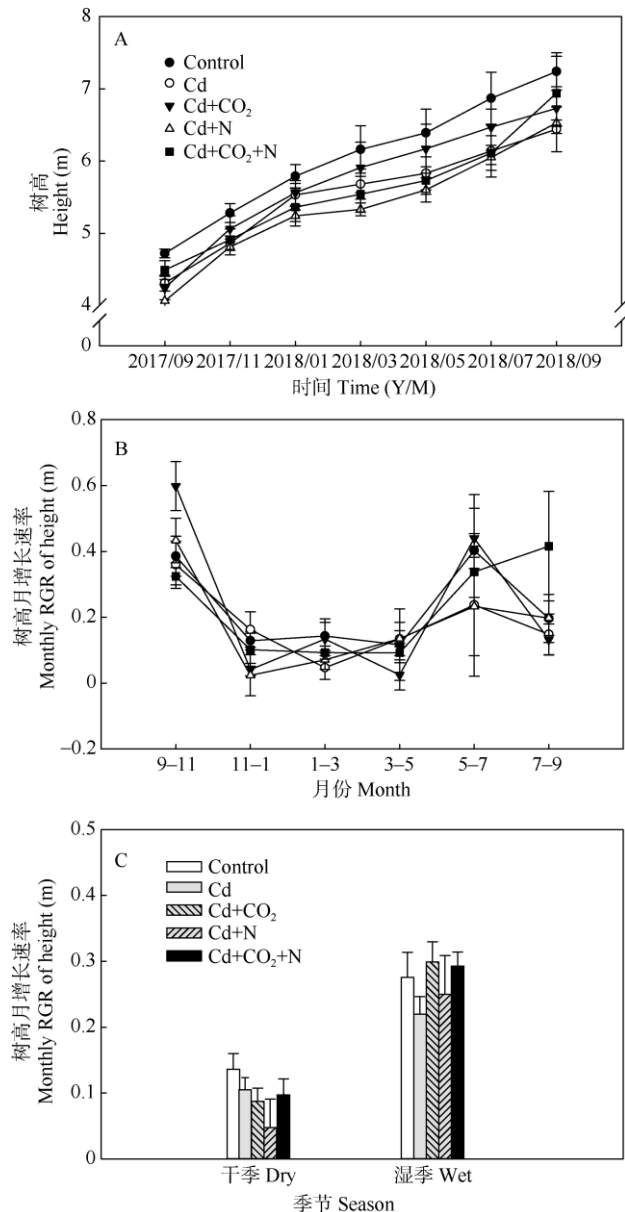


图 2 大叶相思的 2017/09–2018/09 树高生长。A: 树高; B: 树高月均增长速率; C: 干湿季树高月均增长速率

Fig. 2 Height growth of *Acacia auriculiformi* from 2017/09 to 2018/09. A: Height; B: Monthly RGR of height; C: Monthly RGR of height in dry and wet seasons.

抑制作用, 重金属 Cd 在土壤-植物系统中的迁移会通过阻碍根系生长、抑制水分和养分吸收、抑制光合作用等直接影响植物的生理生化过程和生长发育, 从而降低植物的产量^[36-37]。土壤重金属 Cd 污染后, 高 N 沉降处理有缓解 Cd 对大叶相思基径、生物量增长抑制作用(的趋势, 这表明在 Cd 污染土壤下, 施 N 能在一定程度上缓解重金属 Cd 对大叶相思生长的抑制作用, 因为 N 输入增加会刺激植物

表 1 不同处理和干湿季对大叶相思生物量相对增长速率影响的方差分析

Table 1 ANOVA analysis of different treatments and seasons on RGR of biomass of *Acacia auriculiformi*.

	干季 Dry season			湿季 Wet season		
	df	F	P	df	F	P
处理 Treatment (A)	4	6.666	0.007**	4	3.021	0.071
时间 Time (B)	4	67.959	<0.001***	4	197.76	<0.001***
A × B	16	4.81	<0.001***	16	3.765	0.041*

*: P<0.05; **: P<0.01; ***: P<0.001

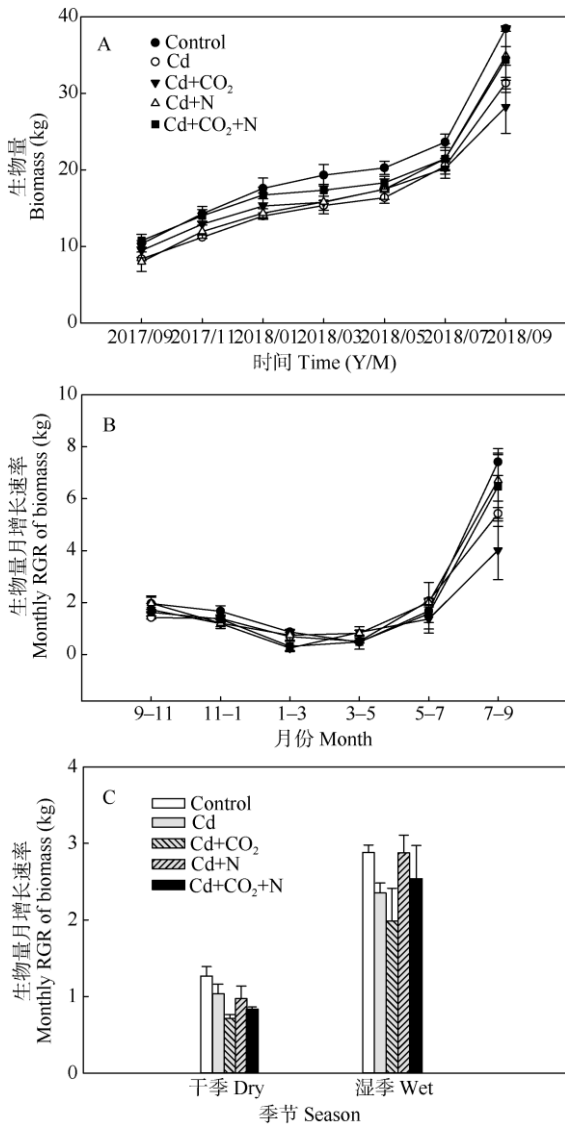


图 3 大叶相思 2017/09–2018/09 的生物量变化。A: 生物量; B: 生物量月均增长速率; C: 干湿季生物量月均增长速率。

Fig. 3 Changes in biomass of *Acacia auriculiformi* from 2017/09 to 2018/09. A: Biomass; B: Monthly RGR of biomass; C: Monthly RGR of biomass in dry and wet seasons.

生长, 提高生产力, 从而增加植物生物量^[16]。在供 N 充足和外部环境良好的情况下, 植物营养器官储

存的碳水化合物减少, 形成更多的原生质, 促进茎部次生木质部生长^[38]。增加 CO₂ 浓度在一定程度上能够缓解大叶相思树高因土壤重金属 Cd 污染导致的年生长抑制, 这表明在 Cd 污染土壤中, 高浓度 CO₂ 能缓解 Cd 对植物的毒害作用。Cd 胁迫时高浓度 CO₂ 能激发植物体内酶促系统(如超氧化物歧化酶)以应对重金属胁迫环境^[39]。同时, CO₂ 升高加速植物代谢过程, 诱导根系产生更多细胞分裂素, 从而促进大叶相思顶芽的快速生长^[40]。本研究还表明, 施加重金属 Cd 复合 CO₂ 升高处理会加剧 Cd 对大叶相思基径和生物量的抑制作用, 可能是高 CO₂ 处理促进植物光合与代谢^[41], 加速植物根系吸收, Cd²⁺ 离子经由根部维管部、木质部向上运输时较先到达植物的茎部^[37], 抑制茎部侧生分生组织的细胞分裂^[38], 从而抑制基径加粗和生物量的积累。因此, 在 Cd 污染土壤中, 施 N 主要促进大叶相思的径向生长, CO₂ 增加则主要促进大叶相思纵向生长。本试验中, Cd+CO₂+N 处理的大叶相思基径、树高、生物量与 Cd+CO₂、Cd+N 处理的差异均不显著性, 但显示出升高的趋势, 说明 CO₂+N 的耦合在 Cd 污染土壤中对植物生长具有交互作用。对亚热带地区优势树种的研究也证实这一点, CO₂ 升高和 N 沉降的交互作用对植物生物量积累的影响较单独的 CO₂ 升高、N 沉降处理更明显^[42]。但是, 基于豆科植物对高 CO₂ 处理的不确定性, CO₂ 升高和 N 沉降的交互作用对缓解重金属 Cd 对植物生长的抑制具有不确定性, 还有待于更进一步的研究。

本研究结果表明, 大叶相思生长速率具有时间动态变化和干湿季差异。对照的生物量积累曲线显示出强大的增长潜力; Cd 处理的随时间延长而降低, 说明重金属 Cd 对植物生长具有抑制作用, 并且存在一定的滞后性, 可能是 Cd²⁺ 胁迫会使植物体内超氧自由基(O⁻·)、过氧化氢(H₂O₂)、丙二醛(MDA) 含量不断积累, 进而抑制植物生长, 使 Cd²⁺ 胁迫对

植物的抑制性表现出明显的时间序列性^[43],即重金属 Cd 对植物的毒害作用在生长后期大于生长前期。此外,大叶相思生物量增长速率对不同处理的响应在干季和湿季表现也不一致,干季生物量月积累速率在处理间差异显著,湿季则不显著。有研究表明,光热条件良好的环境下植物自身的防御机制(如酶促/非酶促抗氧化系统)较强,导致 Cd 对植物的胁迫作用不明显^[36]。干季施加 Cd 复合 CO₂ 升高、N 添加处理会加剧 Cd 对大叶相思树高、基径生长的抑制作用,而湿季则缓解抑制作用。有研究表明,在活跃的生物群落中,植物地上净初级生产力对于湿润环境的响应大于干燥环境^[44],这表明 Cd+CO₂+N 处理对大叶相思生长的作用与环境中的水分含量可能存在密切的相关关系。

综上所述,重金属 Cd 对大叶相思生长的抑制作用在时间尺度上具有滞后性;CO₂ 升高,N 添加及其复合均有缓解重金属 Cd 对植物生长抑制作用的趋势,其中,N 添加更能促进大叶相思基径的生长,树高生长则对 CO₂ 升高更为敏感;在重金属 Cd 污染土壤中,N 添加的缓解潜力更大,而季节性的差异可能带来不一样的影响。这提示氮肥管理是重金属污染土地修复初期阶段促进植物修复的重要策略。

参考文献

- [1] DIXON R K, SOLOMON A M, BROWN S, HOUGHTON R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 1994, 263(5144): 185–190. doi: 10.1126/science.263.5144.185.
- [2] GUO Z D, HU H F, LI P, et al. Spatio-temporal changes in biomass carbon sinks in China's forests from 1977 to 2008 [J]. *Sci China Life Sci*, 2013, 56(7): 661–671. doi: 10.1007/s11427-013-4492-2.
- [3] SU Y J, GUO Q H, XUE B L, et al. Spatial distribution of forest aboveground biomass in China: Estimation through combination of spaceborne lidar, optical imagery, and forest inventory data [J]. *Remote Sens Environ*, 2016, 173: 187–199. doi: 10.1016/j.rse.2015.12.002.
- [4] PAN Y D, BIRDSEY R A, FANG J Y, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests [J]. *Science*, 2011, 333(6045): 988–993. doi: 10.1126/science.1201609.
- [5] SHEVLIKOVA E, STOUFFER R J, MALYSHEV S, et al. Historical warming reduced due to enhanced land carbon uptake [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110(42): 16730–16735. doi: 10.1073/pnas.1314047110.
- [6] FANG J Y, GUO Z D, HU H F, et al. Forest biomass carbon sinks in East Asia, with special reference to the relative contributions of forest expansion and forest growth [J]. *Glob Change Biol*, 2014, 20(6): 2019–2030. doi: 10.1111/gcb.12512.
- [7] FANG J Y, CHEN A P. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance [J]. *Acta Bot Sin*, 2001, 43(9): 967–973. doi: 10.3321/j.issn:1672-9072.2001.09.014.
方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义 [J]. *植物学报*, 2001, 43(9): 967–973. doi: 10.3321/j.issn:1672-9072.2001.09.014.
- [8] State Forestry Administration. The results of the eighth national forest resource inventory [J]. *For Resour Manag*, 2014(1): 1–21. doi: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2014.01.001.
国家林业局. 第八次全国森林资源清查结果 [J]. *林业资源管理*, 2014(1): 1–2. doi: 10.13466/j.cnki.lyzygl.2014.01.001.
- [9] STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis [C]// Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Vol. 18(2). Cambridge Comput Geom: Cambridge University Press, 2013, 18(2): 95–123.
- [10] GALLOWAY J N, TOWNSEND A R, ERISMAN J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions [J]. *Science*, 2008, 320(5878): 889–892. doi: 10.1126/science.1136674.
- [11] OLLINGER S V, ABER J D, REICH P B, et al. Interactive effects of nitrogen deposition, tropospheric ozone, elevated CO₂ and land use history on the carbon dynamics of northern hardwood forests [J]. *Glob Change Biol*, 2002, 8(6): 545–562. doi: 10.1046/j.1365-2486.2002.00482.x.
- [12] LUO Y Q, HUI D F, ZHANG D Q. Elevated CO₂ stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: A meta-analysis [J]. *Ecology*, 2006, 87(1): 53–63. doi: 10.1890/04-1724.
- [13] XU Z Z, JIANG Y L, ZHOU G S. Response and adaptation of photosynthesis, respiration, and antioxidant systems to elevated CO₂ with environmental stress in plants [J]. *Front Plant Sci*, 2015, 6: 7017. doi: 10.3389/fpls.2015.00701.
- [14] SCHULTE-UEBBING L, de VRIES W. Global-scale impacts of nitrogen deposition on tree carbon sequestration in tropical, temperate, and boreal forests: A meta-analysis [J]. *Glob Change Biol*, 2018, 24(2): e416–e4316. doi: 10.1111/gcb.13862.
- [15] McCARTHY H R, OREN R, FINZI A C, et al. Canopy leaf area constrains [CO₂]-induced enhancement of productivity and partitioning among aboveground carbon pools [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2006, 103(51): 19356–19361. doi: 10.1073/pnas.0609448103.

- [16] NEFF J C, TOWNSEND A R, GLEIXNER G, et al. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon [J]. *Nature*, 2002, 419(6910): 915–917. doi: 10.1038/nature01136.
- [17] PENÑ UELAS J, SARDANS J, RIVAS-UBACH A, et al. The human-induced imbalance between C, N and P in Earth's life system [J]. *Glob Change Biol*, 2012, 18(1): 3–6. doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02568.x.
- [18] CHEN Y P, LIU Q, LIU Y J, et al. Responses of soil microbial activity to cadmium pollution and elevated CO₂ [J]. *Sci Rep*, 2014, 4: 42876. doi: 10.1038/srep04287.
- [19] ASHRAF S, ALI Q, ZAHIR Z A, et al. Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2019, 174: 714–727. doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.02.068.
- [20] SUN F F, WEN D Z, KUANG Y W, et al. Concentrations of sulphur and heavy metals in needles and rooting soils of masson pine (*Pinus massoniana* L.) trees growing along an urban-rural gradient in Guangzhou, China [J]. *Environ Monit Assess*, 2009, 154(1/2/3/4): 263–274. doi: 10.1007/s10661-008-0394-3.
- [21] TIAN H Q, MELILLO J, LU C Q, et al. China's terrestrial carbon balance: Contributions from multiple global change factors [J]. *Glob Biogeochem Cycl*, 2011, 25(1): GB100716. doi: 10.1029/2010GB003838.
- [22] NORBY R J, DE KAUIWE M G, DOMINGUES T F, et al. Model-data synthesis for the next generation of forest free-air CO₂ enrichment (FACE) experiments [J]. *New Phytol*, 2016, 209(1): 17–28. doi: 10.1111/nph.13593.
- [23] FANG J Y, CHEN A P, PENG C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. *Science*, 2001, 292(5525): 2320–2322. doi: 10.1126/science.1058629.
- [24] PIAO S L, FANG J Y, CIAIS P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China [J]. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009–1013. doi: 10.1038/nature07944.
- [25] ZHAO Q G. Suggestions for solving problems in resource and environmental qualities of highly developed coastal regions in southeast China [J]. *Soils*, 2001, 33(3): 113–118. doi: 10.3321/j.issn:0253-9829.2001.03.001. 赵其国. 解决我国东南沿海经济快速发展地区资源与环境质量问题刻不容缓——关于该区资源与环境质量问题研究的建议 [J]. *土壤*, 2001, 33(03): 113–118. doi: 10.3321/j.issn:0253-9829.2001.03.001.
- [26] HAO J M. Acid Deposition Critical Load and Its Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 1–374. 郝吉明. 酸沉降临界负荷及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 1–374.
- [27] ZHU Y G, CHEN B D, LING A J, et al. Heavy metal contamination in Pearl River Delta: Status and research priorities [J]. *Acta Sci Circum*, 2005, 25(12): 1575–1579. doi: 10.3321/j.issn:0253-2468.2005.12.001. 朱永官, 陈保冬, 林爱军, 等. 珠江三角洲地区土壤重金属污染控制与修复研究的若干思考 [J]. *环境科学学报*, 2005, 25(12): 1575–1579. doi: 10.3321/j.issn:0253-2468.2005.12.001.
- [28] NAGAJYOTI P C, LEE K D, SREEKANTH T V M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: A review [J]. *Environ Chem Lett*, 2010, 8(3): 199–216. doi: 10.1007/s10311-010-0297-8.
- [29] SATARUG S, BAKER J R, URBENJAPOL S, et al. A global perspective on cadmium pollution and toxicity in non-occupationally exposed population [J]. *Toxicol Lett*, 2003, 137(1/2): 65–83. doi: 10.1016/S0378-4274(02)00381-8.
- [30] REN H, PENG S L. The ecological and biological characteristics of *Acacia auriculiformis* [J]. *Guihaia*, 1998, 18(02): 146–152. 任海, 彭少麟. 大叶相思的生态生物学特征 [J]. *广西植物*, 1998, 18(02): 146–152.
- [31] WEI Z J Z, QIU X J, MO Z Z. Study on collection and preservation of acacia tree germplasm resources [J]. *Guangxi For Sci*, 1996, 25(4): 181–188, 205. doi: 10.19692/j.cnki.gfs.1996.04.001. 韦增建, 丘小军, 莫钊志. 相思类树种种质资源收集保存研究 [J]. *广西林业科学*, 1996, 25(4): 181–188, 205. doi: 10.19692/j.cnki.gfs.1996.04.001.
- [32] HUANG W J, ZHOU G Y, LIU J X, et al. Effects of elevated carbon dioxide and nitrogen addition on foliar stoichiometry of nitrogen and phosphorus of five tree species in subtropical model forest ecosystems [J]. *Environ Pollut*, 2012, 168: 113–120. doi: 10.1016/j.envpol.2012.04.027.
- [33] MO J M, BROWN S, XUE J H, et al. Responses of litter decomposition to simulated N deposition in disturbed, rehabilitated and mature forests in subtropical China [J]. *Plant Soil*, 2006, 282(1/2): 135–151. doi: 10.1007/s11104-005-5446-7.
- [34] WANG W F, LEI Y C, WANG X F, et al. A review of forest biomass models [J]. *J NW For Univ*, 2008, 23(2): 58–63. 王维枫, 雷渊才, 王雪峰, 等. 森林生物量模型综述 [J]. *西北林学院学报*, 2008, 23(2): 58–63.
- [35] GAO C J, TANG G Y, SUN Y Y, et al. Biomass and allocation of young *Azadirachta indica* and *Acacia auriculiformis* for different restoration patterns in Dry-hot valley [J]. *J Zhejiang Agric For Univ*, 2012, 29(4): 482–490. doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.2012.04.002. 高成杰, 唐国勇, 孙永玉, 等. 不同恢复模式下干热河谷幼龄印楝和大叶相思生物量及其分配 [J]. *浙江农林大学学报*, 2012, 29(4): 482–490. doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.2012.04.002.
- [36] van ASSCHE F, CLIJSTERS H. Effects of metals on enzyme-activity in plants [J]. *Plant Cell Environ*, 1990, 13(3): 195–206. doi: 10.1111/j.

- 1365-3040.1990.tb01304.x.
- [37] SEREGIN I V, IVANOV V B. Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants [J]. *Russ J Plant Physiol*, 2001, 48(4): 523–544. doi: 10.1023/A:1016719901147.
- [38] MA W L. *BotanyPhytology* [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2015: 50–58.
马炜梁. 植物学 [M]. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2015: 50–58.
- [39] JIA Y. Physiological and biochemical responses of ryegrass to elevate atmospheric CO₂ under cadmium stress [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010: 1–90.
贾炎. 镉胁迫下黑麦草对二氧化碳升高的生理生化响应研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2010: 1–90.
- [40] SCHAZ U, DUÛ LL B, REINBOTHE C, et al. Influence of root-bed size on the response of tobacco to elevated CO₂ as mediated by cytokinins [J]. *AoB PLANTS*, 2014, 6: plu01016. doi: 10.1093/aobpla/plu010.
- [41] LIU F M, WANG L R, LI Y, et al. Research progress on the effects of elevating the atmospheric CO₂ concentration on woody plants [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2008, 4836(28): 12182–12185. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2008.28.048.
- 刘发民, 王利荣, 李怡, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对木本植物影响的研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2008, 4836(28): 12182–12185. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2008.28.048.
- [42] DUAN H L, LIU J X, DENG Q, et al. Effects of elevated CO₂ and N deposition on plant biomass accumulation and allocation in subtropical forest ecosystems: A mesocosm study [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2009, 33(3): 570–579. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2009.03.016.
段洪浪, 刘菊秀, 邓琦, 等. CO₂ 浓度升高与氮沉降对亚热带森林生态系统植物生物量积累及分配格局的影响 [J]. *植物生态学报*, 2009, 33(3): 570–579. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2009.03.016.
- [43] Li X H, LAN L Q, WU Q Y, et al. Effects of cadmium stress on reactive oxygen metabolism in wheat at different developmental stages [J]. *J Sichuan Univ (Nat Sci)*, 2007, 44(2): 420–424. doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2007.02.045.
黎晓红, 兰利琼, 吴巧玉, 等. 镉胁迫对小麦不同生育期活性氧代谢的影响 [J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2007, 44(2): 420–424. doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2007.02.045.
- [44] KNAPP A K, SMITH M D. Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production [J]. *Science*, 2001, 291(5503): 481–484. doi: 10.1126/science.291.5503.481.