



氮添加和干旱对亚热带4种幼树生长的影响

王涓, 边妍妍, 朱玉璘, 杨清培, 方熊

引用本文:

王涓,边妍妍,朱玉,杨清培,方熊. 氮添加和干旱对亚热带4种幼树生长的影响[J]. *热带亚热带植物学报*, 2024, 32(4): 475–482.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4792>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

增温对鼎湖山混交林中4种优势树种生物量分配和养分积累的影响

Effects of Warming on Biomass Allocation Patterns and Nutrient Accumulations of Four Dominant Tree Species in Mixed Forest of Dinghushan, China

热带亚热带植物学报. 2021, 29(4): 389–400 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4325>

氮磷添加对华南地区2种人工林土壤氮磷循环酶活性的影响

Effects of Long-term Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Enzyme Activities Related N and P Cycle in Two Plantations in South China

热带亚热带植物学报. 2021, 29(3): 244–250 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4293>

南亚热带森林2种菌根类型树木水分传导和养分利用策略的对比研究

Comparison Studies on Water Transport and Nutrient Acquisition of Trees with Different Mycorrhiza Types in Subtropical Forest

热带亚热带植物学报. 2021, 29(6): 589–596 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4385>

3种作物(莴笋、茄子、小白菜)对香樟凋落叶化感作用的生理响应

Physiological Responses of Three Crops (Lettuce, Eggplant and Pakchoi) to Allelopathy of *Cinnamomum camphora* Litter Leaves

热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 41–49 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4229>

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

热带亚热带植物学报. 2020, 28(1): 17–24 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4080>

向下翻页，浏览PDF全文

氮添加和干旱对亚热带 4 种幼树生长的影响

王涓^{1a}, 边妍妍^{1a}, 朱玉璘², 杨清培^{1a}, 方熊^{1b*}

(1. 江西农业大学, a. 林学院; b. 国土资源与环境学院, 南昌 330045; 2. 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

摘要: 为探究氮沉降和干旱交互作用对亚热带森林植物生长的影响, 研究了亚热带 4 种典型树种马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、海南红豆(*Ormosia pinnata*)和木荷(*Schima superba*)幼树生长对不同氮添加量和干旱程度的响应。结果表明, 干旱和氮添加处理 2.5 a 对不同树种生长的影响不同。氮添加显著促进了对照和轻度干旱下木荷与杉木的总生物量、株高和基径生长, 抑制了轻度干旱下马尾松的根茎生物量和基径生长, 对重度干旱下 4 种幼树的生长均没有显著影响。氮添加和干旱处理降低了海南红豆、马尾松和杉木的株高和总生物量, 且随干旱程度的加重抑制作用更明显。不施氮和干旱对木荷总生物量和株高无显著影响; 氮添加和重度干旱显著降低木荷的基径和总生物量。干旱显著增加杉木根冠比, 但对其他树种根冠比无显著影响。干旱和氮添加对非豆科植物(木荷)生长的促进作用均比豆科植物(海南红豆)明显, 这表明氮沉降可能加剧极端干旱对亚热带部分树种生长的抑制作用。

关键词: 氮沉降; 干旱; 生物量; 豆科植物; 亚热带森林

doi: 10.11926/jtsb.4792

Effects of Nitrogen Addition and Drought on Sapling Growth of Four Subtropical Tree Species

WANG Juan^{1a}, BIAN Yanyan^{1a}, ZHU Yulin², YANG Qingpei^{1a}, FANG Xiong^{1b*}

(1a. College of forestry; 1b. College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: To explore the effects of nitrogen deposition and drought on plant growth in subtropical forests, the responses of four typical subtropical tree species, such as *Pinus massoniana*, *Cunninghamia lanceolata*, *Ormosia pinnata* and *Schima superba*, to different nitrogen levels and drought degrees were studied. The results showed that drought and nitrogen addition treatment for 2.5 years had different effects on the growth of different tree species. Nitrogen addition significantly increased the total biomass, plant height, and basal diameter of *S. superba* and *C. lanceolata* under the control and moderate drought treatment, but constrained the root and stem biomass and basal diameter of *P. massoniana* under moderate drought treatment, and had no significant effect on the growth of four tree species under severe drought treatment. Drought and nitrogen addition decreased height and total biomass of *O. pinnata*, *P. massoniana* and *S. superba*, and the inhibition effect became more obvious with the increase of drought degree. Without nitrogen addition, drought had no significant effect on the total biomass and plant height of *S. superba*. However, severe drought and nitrogen addition significantly reduced the basal diameter and total biomass of *S. superba*. Drought significantly increased the root-shoot ratio of *C. lanceolata*, but had no significant effect on other tree species. Furthermore, the effects of nitrogen addition and drought on the growth of non-leguminous species (e.g., *S. superba*) were more obvious than that of leguminous plants (e.g., *O.*

收稿日期: 2023-04-07 接受日期: 2023-06-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(42267034, 32260335); 江西省“千人计划”创新领军人才长期青年项目(jxsq2023101103)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42267034, 32260335), and the Project for 1000 Talents Plan Award of Jiangxi (Grant No. jxsq2023101103).

作者简介: 王涓(1999年生), 女, 硕士研究生, 主要从事植物生态学研究。E-mail: ecwjst@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fangxiong_1103@126.com

pinnata). Therefore, it was that nitrogen deposition might exacerbate the inhibitory effect of extreme drought on the growth of some tree species in subtropical regions.

Key words: Nitrogen deposition; Drought; Biomass; Legumes; Subtropical forest

由于化石燃料的燃烧和化肥的过量使用等人类活动,各地区氮沉降量日益增多^[1],我国已是全球三大高氮沉降区域之一。目前,我国亚热带地区氮沉降量已达到 40 kg N/(hm²·a)^[2],高于我国平均氮沉降水平[20.4 kg N/(hm²·a)]^[3]。在氮素缺乏的森林,氮添加能够提高植物光合速率,促进植物生长,有利于森林碳储存^[4];而在氮饱和森林,氮添加可能造成植物营养失衡、光合速率下降,从而导致森林生产力降低^[5-6]。不同树种对氮沉降的响应也有所不同,在低氮添加时,固氮豆科植物生长比非固氮植物更具优势;而在高氮添加时,则与非固氮物种差异不大^[7]。另外,针叶树种和阔叶树种对氮沉降的响应也有所差异,Vanguelova 等^[8]的研究表明氮沉降对阔叶树种影响更大。

同时,我国亚热带地区也遭受着不同程度干旱,且发生频率在未来有上升趋势^[9]。在轻度干旱下,植物可以通过调控渗透调节物质含量和叶绿素含量等生理过程来适应干旱;而在重度干旱下,植物自身调节能力降低,光合速率下降,生长受到限制^[10]。一般认为,豆科植物由于和固氮真菌的共生,养分限制较小,植物生长受干旱的影响比非固氮植物小^[11];也有研究认为,固氮植物的生产力比非固氮植物更易受干旱影响^[12]。我国亚热带森林具有重要的碳汇潜力^[13],探究不同树种对干旱的响应对于了解气候变化背景下亚热带森林碳库的动态变化十分重要。

高氮沉降和干旱均会影响森林不同植物生长进而影响森林群落结构和生态系统服务功能^[14]。一般认为,低氮沉降会减缓干旱对植物的不利影响^[15],但高氮沉降则可能加重干旱对植物生长的抑制作用^[16]。亚热带森林是我国重要的碳库^[17],豆科植物种类较多^[18],同时受到高氮沉降和干旱的影响^[19]。目前对于在高氮沉降和干旱交互作用下,森林不同树种会如何响应尚了解不足。因此,探究氮沉降和干旱对不同植物生长的影响,有助于预测未来高氮沉降和干旱交互背景下亚热带森林生态功能的变化。

本试验设置了施氮和不施氮 2 个处理,每个氮处理下设置 3 个干旱程度(对照、轻度干旱、重度干

旱),探讨氮处理、干旱及其交互作用对马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、海南红豆(*Ormosia pinnata*)和木荷(*Schima superba*)幼树生长的影响,为未来氮沉降和干旱背景下亚热带森林生态系统管理提供理论支撑。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验地点位于福州市福建农林大学的实验温室(26°08' N, 119°24' E),温室四面通风。在温室内建设 18 个生长池,每个生长池外径长 1.4 m,宽 1.4 m,深 0.6 m。每个生长池底部设计 1 个 2 cm 出水口,用于收集土壤淋滤液。池内土壤为采自城郊亚热带人工林的红壤,土壤去除杂物后混匀填入池中,填土深 0.5 m,所填土壤 pH 值为 6.09±0.08,全碳含量为(3.99±0.04) g/kg,全氮含量为(0.37±0.01) g/kg,全磷含量为(0.36±0.02) g/kg,硝态氮含量为(5.62±0.77) mg/kg,氨态氮含量为(2.20±0.51) mg/kg。土壤静置 1 个月,将 1 a 生长势一致的马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、海南红豆(*Ormosia pinnata*)和木荷(*Schima superba*)幼苗各 1 株随机移入池中。

缓苗 4 个月,2018 年 4 月开始试验处理。试验设置施氮和不施氮 2 个处理,每个氮处理又分别设置 3 个干旱处理,共 6 个处理,每处理 3 个重复。2 个氮处理分别是对照(CK,不施氮)和施氮[NA,施氮量 80 kg N/(hm²·a)]。3 个干旱处理分别是对照(HW,土壤体积含水率为 28.31%,下同)、轻度干旱(MW, 22.38%)和重度干旱(LW, 15.37%),即分别相当于约 80%、55%和 40%的田间最大持水量。试验添加的氮为 NH₄NO₃,将 1.905 g NH₄NO₃溶于 5 L 蒸馏水中,每月 1 次浇于施氮组生长池,对照浇 5 L 蒸馏水。土壤湿度通过土壤湿度计监测,每 3 d 监测 1 次,依据土壤湿度、土壤持水量和生长池体积等补充水分,以保持土壤含水量。

1.2 样品测定

土壤填入生长池前混匀,随机取 3 份用于基本理化性质背景值的测定。土壤 pH 用电极法测定

(土:水=1:2.5); 全氮和全碳用元素分析仪测定(EA3000, Euro Vector, Italy); 全磷用高氯酸-硫酸消煮法测定; 氨态氮和硝态氮用 KCl 溶液浸提^[20], 用紫外分光光度比色法测定。在 2018 年 4 月和 2020 年 8 月分别测量每棵幼树的基径和株高。于 2020 年 8 月采用全收割法对 4 种幼树进行破坏性取样, 将植物根、茎、叶分别在 65 °C 烘箱烘至恒重, 分别称量干物质量作为根、茎、叶生物量, 同时计算每株植物的总生物量和根冠比。

1.3 数据分析

所有数据均用 SPSS 20.0 进行分析, 对基径、株高以及生物量进行氮添加量、干旱程度和物种多因素方差分析。采用单因素方差分析同一氮处理下对照组、轻度干旱和重度干旱处理间差异, 用 Duncan 法进行多重比较; 采用 *t* 检验分析同一干旱

程度下不同氮处理间的差异。采用 Excel 2013 作图。

2 结果和分析

2.1 氮添加和干旱对 4 种幼树株高和基径的影响

4 种幼树的株高和基径在不同氮添加处理、干旱程度和树种间差异显著(图 1)。氮添加对轻度干旱处理的木荷和干旱对照的杉木株高有显著促进作用, 对 3 种干旱处理的马尾松和杉木幼树株高均无显著影响。在不施氮处理下, 干旱对马尾松株高没有显著影响; 但在 2 种氮处理下, 干旱对木荷、杉木和海南红豆幼树株高均有抑制作用($P<0.05$), 且随干旱程度的加重, 抑制作用更明显。在干旱对照组和轻度干旱处理下, 氮添加促进了木荷和杉木的基径生长($P<0.05$); 在轻度干旱处理下, 氮添加抑

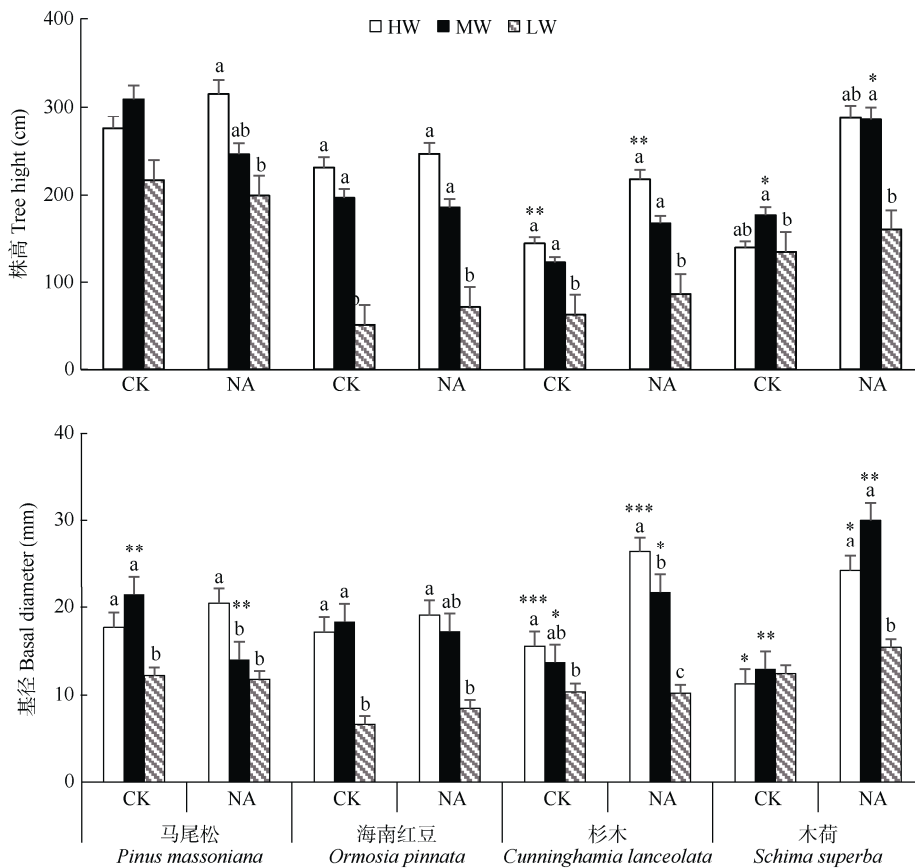


图 1 氮添加和干旱对 4 种幼树株高和基径的影响。CK: 不施氮; NA: 施氮; HW: 对照; MW: 轻度干旱; LW: 重度干旱; 柱上不同小写字母表示同一氮处理下不同干旱程度间差异显著($P<0.05$); *、**、***: 同一干旱下不同氮处理间差异显著(*: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$)。下同

Fig. 1 Effects of nitrogen addition and drought stress on the basal diameter and tree height of four saplings. CK: No nitrogen addition; NA: Nitrogen addition; HW: Control; MW: Moderate drought; LW: Severe drought. Different small letters upon column indicate significant differences among different drought degree under the same nitrogen treatment at 0.05 level, and * indicated significant differences among different nitrogen treatments under the same drought stress (*: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$). The same below

制了马尾松的基径生长($P<0.01$)。在 3 种干旱处理下, 氮添加均对海南红豆的基径生长无显著影响。在不施氮处理下, 干旱对木荷幼树生长没有明显影响; 在 2 种氮处理下, 干旱对马尾松、杉木和海南红豆幼树的基径生长均有抑制作用。另外, 氮添加、干旱和物种 3 因素之间的交互作用显著, 并总体上显著影响 4 种幼树的株高和基径(表 1)。

2.2 氮添加和干旱对幼树生物量及其分配的影响

在干旱对照和轻度干旱处理下, 氮添加促进了木荷和杉木总生物量的增加($P<0.01$), 但对马尾松和杉木的幼树总生物量没有明显影响; 在重度干旱处理下, 氮添加对 4 种树苗的总生物量均无显著影响。氮添加对非豆科植物(木荷)生物量增加的促进作用要高于豆科植物(海南红豆)。干旱对幼树的总生物量有抑制作用, 且随干旱程度的加剧抑制作用逐渐加强, 但干旱对不施氮处理下的木荷生物量没有明显影响(图 2)。在不同氮添加和干旱处理下, 阔

叶植物(木荷、海南红豆)和针叶植物(马尾松、杉木)之间的总生物量均没有太大差异(表 2)。

在不同氮处理和干旱处理下, 各树种的生物量分配也存在差异(图 3)。在干旱对照和轻度干旱处理下, 氮添加显著促进了木荷的根、茎、叶生物量和杉木的根、叶生物量增加($P<0.05$); 在轻度干旱处理下, 氮添加抑制了马尾松的根、茎生物量增长。氮添加显著降低了重度干旱处理下杉木的根冠比($P<0.01$), 对其他幼树根冠比没有显著影响。在不施氮处理下, 干旱对海南红豆的根、茎、叶生物量和杉木的茎、叶生物量均有抑制作用, 对杉木的根生物量和木荷的根、茎生物量没有显著影响; 在施氮处理下, 干旱对海南红豆的叶、根生物量及杉木和木荷的根、茎、叶生物量有显著抑制作用, 对马尾松的根、叶生物量和海南红豆的茎生物量没有显著影响。干旱显著增加了杉木的根冠比($P<0.05$), 对其他幼树的根冠比没有显著影响。

表 1 氮添加和干旱对 4 种幼树生长的影响

Table 1 Effects of nitrogen addition and drought stress on the growth of four sapling

因素 Factor	基径 Basal diameter			株高 Tree height			生物量 Biomass		
	F	P	df.	F	P	df.	F	P	df.
干旱 Drought (A)	78.027	<0.001	2	52.741	<0.001	2	36.821	<0.001	2
施氮 Nitrogen (B)	47.272	<0.001	1	13.611	0.001	1	43.562	<0.001	1
树种 Species (C)	4.871	0.005	3	34.682	<0.001	3	11.269	<0.001	3
A×B	8.574	0.001	2	3.682	0.033	2	7.057	0.002	2
B×C	22.462	<0.001	3	6.554	0.001	3	15.422	<0.001	3
A×C	3.576	0.005	6	2.576	0.030	6	2.683	0.025	6
A×B×C	6.126	<0.001	6	1.212	0.317	6	3.270	0.009	6
误差 Error			48			48			48

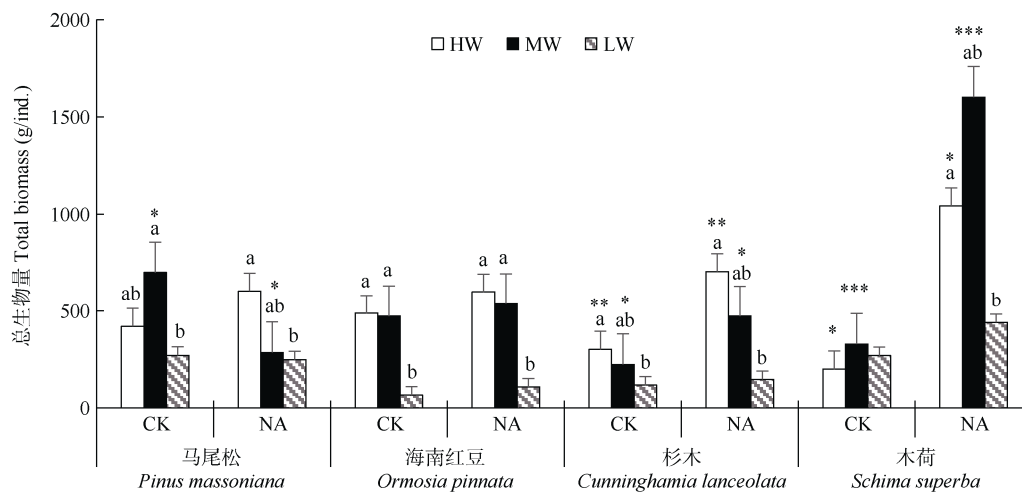


图 2 氮添加和干旱对 4 种幼树总生物量的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen addition and drought stress on the total biomass of four saplings

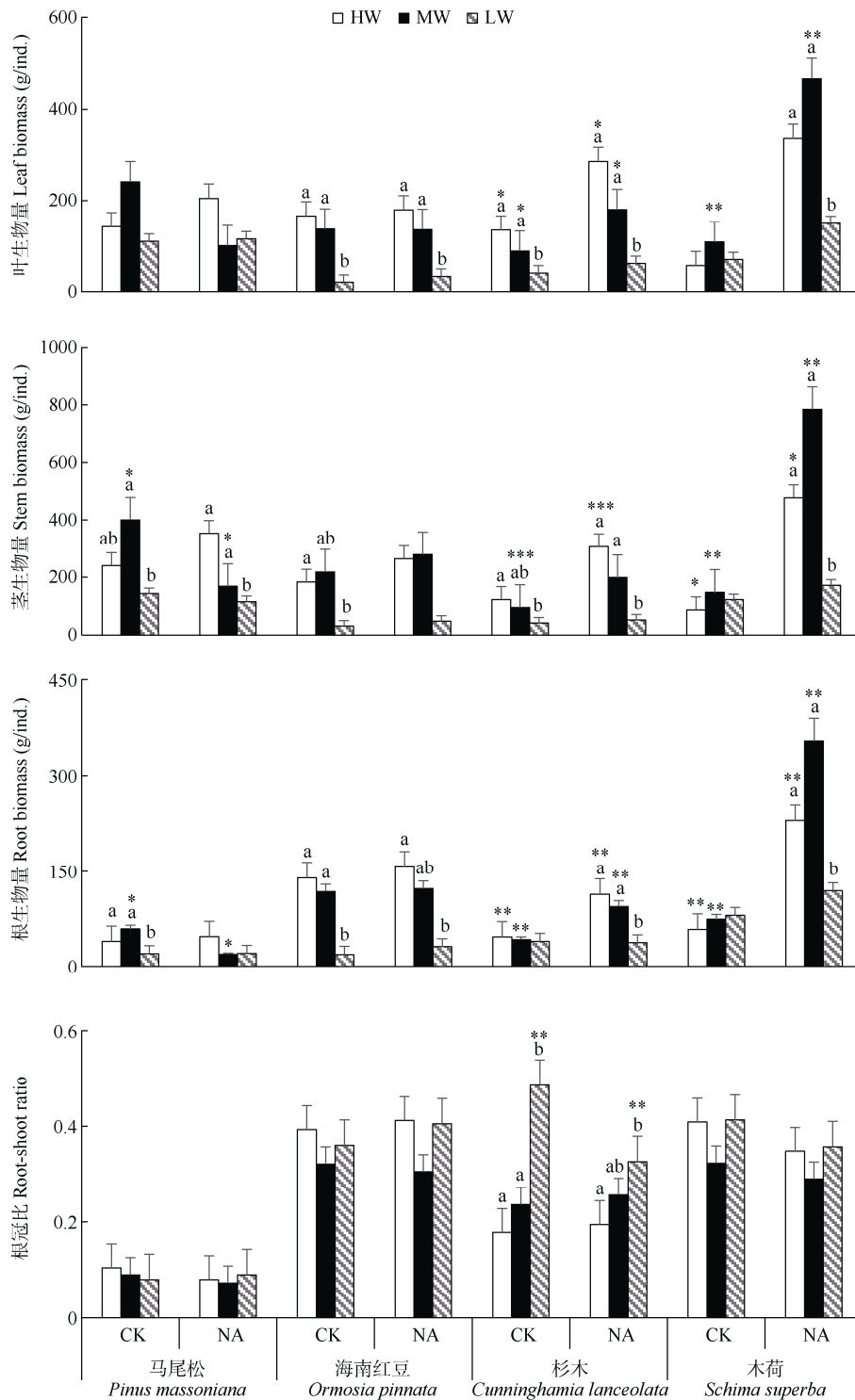


图 3 氮添加和干旱对 4 种幼树叶、茎和根生物量及根冠比的影响

Fig. 3 Effects of nitrogen addition and drought stress on the biomass of leaves, stems, roots and root-shoot ratio of four saplings

3 讨论和结论

3.1 氮添加对 4 种幼树生长的影响

氮是植物生长所需的重要元素, 氮添加可以增加植物叶绿素含量, 提高光合酶活性, 从而提高光

合速率, 促进植物生长^[4]。一般来讲, 氮添加能显著提高植物全株生物量和各器官生物量^[21]。本研究干旱对照组中, 氮添加显著促进了木荷和杉木幼树基径、总生物量和不同器官生物量的增加, 这表明氮添加能够有效提高植物各器官生物量。夏建阳

表 2 4 种幼树生长对氮添加和干旱的响应差异

Table 2 Differential response of four sapling species to the nitrogen addition and drought stress treatments

树种 Species	变量 Variable		CK			NA		
			HW	MW	LW	HW	MW	LW
豆科 vs 非豆科 Legumes vs non-legumes	基径 Basal diameter	<i>F</i>	2.003	3.937	6.544	0.865	0.880	0.085
		<i>P</i>	0.024	0.014	0.016	0.221	0.035	0.014
	株高 Tree height	<i>F</i>	8.641	0.431	54.81	0.355	6.235	8.717
		<i>P</i>	0.042	0.547	0.002	0.583	0.067	0.042
	生物量 Biomass	<i>F</i>	11.129	1.091	2.744	2.520	12.809	19.877
<i>P</i>		0.029	0.355	0.171	0.188	0.023	0.011	
阔叶 vs 针叶 Broadleaf vs conifers	基径 Basal diameter	<i>F</i>	2.108	0.667	1.173	0.536	2.281	0.234
		<i>P</i>	0.177	0.433	0.304	0.481	0.162	0.639
	株高 Tree height	<i>F</i>	0.405	0.400	1.255	0.318	0.681	0.568
		<i>P</i>	0.539	0.541	0.289	0.585	0.428	0.468
	生物量 Biomass	<i>F</i>	0.041	0.202	0.177	0.942	6.141	0.775
<i>P</i>		0.843	0.663	0.683	0.355	0.033	0.399	

等^[22]对陆生植物对氮添加的全球响应模式也表明,氮添加能显著增加植物的生物量。

但本研究中,氮添加对干旱对照组海南红豆和马尾松幼树的生长没有显著影响。马尾松是典型的先锋树种,可能由于对土壤养分要求不高,因而其生长对氮添加没有明显响应。豆科植物由于和固氮菌的共生,可以通过固氮作用满足自身对氮元素的需求^[23],因此本研究中海南红豆在未施氮条件下可能也不缺氮,从而导致氮添加对海南红豆生长影响不大。

3.2 干旱对 4 种幼树生长的影响

在 2 种氮处理下,干旱均显著降低海南红豆和杉木的基径、株高和总生物量,且随干旱程度的加重抑制作用更明显,这表明干旱会抑制植物生长。干旱通过影响植物体形态、气孔导度和光合作用等生理代谢过程抑制植物生长^[10]。在 Pardos^[24]等对地中海 4 种幼树应对轻度干旱响应策略的研究中,干旱降低了幼树的水势和光合效率,抑制了生物量增加。本试验中,重度干旱降低了马尾松的光合速率和气孔导度^[25],从而可能抑制了施氮处理下马尾松的基径和生物量增加,这也表明干旱会通过抑制植物光合作用从而抑制植物生长。但重度干旱对木荷的基径和生物量影响不大,这可能是由于木荷的养分吸收和利用效率受干旱影响不大^[26],因此木荷生长在不同干旱处理下没有明显差异。在干旱条件下,植物会调节不同器官的生长和资源分配,比如,增加根系的生长以获取水分和养分^[27]。本研究中干旱增加了杉木的根冠比,这表明杉木分配了更多的资源给根系以适应干旱。

豆科植物和非豆科植物对干旱的响应不同。在不施氮处理下,干旱对照组的海南红豆基径、株高和生物量要高于木荷,而重度干旱下的海南红豆基径、株高和生物量要低于木荷,这表明干旱对豆科植物生长的抑制作用比非豆科植物明显。这可能是由于干旱破坏了豆科植物(海南红豆)原有的固氮途径,固氮菌和植物的联系减弱,固氮菌的活性下降,从而导致豆科植物对氮元素的获取受限^[7],生长受到抑制。Minucci 等^[12]研究固氮树种对干旱的敏感性也表明,固氮树种比非固氮树种更易受干旱影响,干旱导致固氮树种生产力降低,生物量下降。针叶树和阔叶树种之间生长没有明显差异,可能是叶片形态以外的其他特征,比如内部的组织结构差异^[28]、树种间的相互影响^[29]等影响了植物对干旱的响应。

3.3 氮添加和干旱交互作用对不同树种生长的影响

一般认为氮添加能在一定程度上抵消干旱对植物生长的抑制,促进植物生长^[30];但是在重度干旱下,氮添加对植物生长没有明显的促进效果,甚至可能抑制植物生长^[31]。本研究中,在轻度干旱下,氮添加显著促进了木荷和杉木幼树的基径和生物量增加;在重度干旱下,氮添加对各幼树的生长没有显著影响。这可能是由于在轻度干旱下添加氮提高了植物的水分利用效率和光合速率^[16],从而促进了幼树的生长。在重度干旱下,植物水分利用效率和养分利用效率较低,施加的氮元素由于水分限制不能被植物所吸收利用^[26],因而氮添加对重度干旱下 4 种植物的生长没有明显促进作用。另外,高氮沉降和干旱同时发生也可能导致与植物共生的真

菌发生变化进而影响植物生长^[32]。

氮添加对轻度干旱处理下非豆科植物生物量的促进作用要大于海南红豆。这可能是由于豆科植物通过固氮菌获取氮元素, 在未施氮条件下亦不缺氮^[12], 因而施氮对豆科植物影响不大; 而非豆科植物在不施氮条件下氮元素获取不足, 因此在氮添加后, 由于氮元素对生长的促进作用^[21], 生长反而比豆科植物好。

未来, 干旱可能在一定程度上抑制亚热带地区森林不同植物的生长, 但是在氮沉降和干旱双重背景下, 氮沉降可能加剧极端干旱对部分森林植物生长的抑制作用, 从而改变森林的群落组成。氮沉降和干旱交互作用对不同树种生长的影响还与氮输入形式、干旱发生频度、植物生长生境和树种生长特性等因素有关, 在长期高氮沉降和干旱频发的环境下, 亚热带森林植物会如何响应, 尚有待进一步研究。

参考文献

- [1] RICHTER A, BURROWS J P, NÜß H, et al. Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space [J]. *Nature*, 2005, 437(7055): 129–132. doi: 10.1038/nature04092.
- [2] WEN Z, XU W, LI Q, et al. Changes of nitrogen deposition in China from 1980 to 2018 [J]. *Environ Int*, 2020, 144: 106022. doi: 10.1016/j.envint.2020.106022.
- [3] YU G R, JIA Y L, HE N P, et al. Stabilization of atmospheric nitrogen deposition in China over the past decade [J]. *Nat Geosci*, 2019, 12(6): 424–429. doi: 10.1038/s41561-019-0352-4.
- [4] DEZI S, MEDLYN B E, TONON G, et al. The effect of nitrogen deposition on forest carbon sequestration: A model-based analysis [J]. *Glob Chang Biol*, 2010, 16(5): 1470–1486. doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02102.x.
- [5] YU Q, DUAN L, YU L F, et al. Threshold and multiple indicators for nitrogen saturation in subtropical forests [J]. *Environ Pollut*, 2018, 241: 664–673. doi: 10.1016/j.envpol.2018.06.001.
- [6] TIAN D S, WANG H, SUN J, et al. Global evidence on nitrogen saturation of terrestrial ecosystem net primary productivity [J]. *Environ Res Lett*, 2016, 11(2): 024012. doi: 10.1088/1748-9326/11/2/024012.
- [7] WANG X. Response of nitrogen fixation of several legumes to different environmental factors [D]. Ji'nan: Shandong University, 2018. [王骁. 几种豆科植物固氮作用对不同环境因子的响应研究 [D]. 济南: 山东大学, 2018.]
- [8] VANGUELOVA E I, PITMAN R M. Nutrient and carbon cycling along nitrogen deposition gradients in broadleaf and conifer forest stands in the east of England [J]. *For Ecol Manag*, 2019, 447: 180–194. doi: 10.1016/j.foreco.2019.05.040.
- [9] WANG Y J, YAN F. Spatial and temporal variations of regional drought events in southern China [J]. *Meteor Appl*, 2017, 24(3): 481–490. doi: 10.1002/met.1647.
- [10] GUPTA A, RICO-MEDINA A, CAÑO-DELGADO A I. The physiology of plant responses to drought [J]. *Science*, 2020, 368(6488): 266–269. doi: 10.1126/science.aaz7614.
- [11] EPRON D, BAHN M, DERRIEN D, et al. Pulse-labelling trees to study carbon allocation dynamics: A review of methods, current knowledge and future prospects [J]. *Tree Physiol*, 2012, 32(6): 776–798. doi: 10.1093/treephys/tps057.
- [12] MINUCCI J M, MINIAT C F, WURZBURGER N. Drought sensitivity of an N₂-fixing tree may slow temperate deciduous forest recovery from disturbance [J]. *Ecology*, 2019, 100(12): e02862. doi: 10.1002/ecy.2862.
- [13] YU G R, CHEN Z, PIAO S L, et al. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111(13): 4910–4915. doi: 10.1073/pnas.1317065111.
- [14] MAES S L, PERRING M P, VANHELLEMONT M, et al. Environmental drivers interactively affect individual tree growth across temperate European forests [J]. *Glob Chang Biol*, 2019, 25(1): 201–217. doi: 10.1111/gcb.14493.
- [15] IBÁÑEZ I, ZAK D R, BURTON A J, et al. Anthropogenic nitrogen deposition ameliorates the decline in tree growth caused by a drier climate [J]. *Ecology*, 2018, 99(2): 411–420. doi: 10.1002/ecy.2095.
- [16] CHEN X N, ZHAO N Q, DUAN N, et al. Plant response to water and nitrogen addition: A review [J]. *J Temp For Res*, 2022, 5(1): 7–11. [陈晓娜, 赵纳祺, 段娜, 等. 植物响应水分和氮添加的研究进展 [J]. 温带林业研究, 2022, 5(1): 7–11. doi: 10.3969/j.issn.2096-4900.2022.01.002.]
- [17] HUANG L, LIU J Y, SHAO Q Q, et al. Temporal and spatial patterns of carbon sequestration services for primary terrestrial ecosystems in China between 1990 and 2030 [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, 36(13): 3891–3902. [黄麟, 刘纪远, 邵全琴, 等. 1990—2030年中国主要陆地生态系统碳固定服务时空变化 [J]. 生态学报, 2016, 36(13): 3891–3902. doi: 10.5846/stxb201411012141.]
- [18] YANG A H, CHEN Z F, TAN G, et al. Species and distribution pattern of the state key protected wild plants (2021 edition) in Guangdong Province, China [J]. *Subtrop Plant Sci*, 2022, 51(6): 474–480. [杨安华, 陈祝锋, 谭淦, 等. 广东省国家重点保护野生植物评估及其分布格

- 局——基于国家重点保护野生植物名录(2021 版) [J]. 亚热带植物科学, 2022, 51(6): 474–480. doi: 10.3969/j.issn.1009-7791.2022.06.007.]
- [19] YIN S Y, MAO F J, ZHOU G M, et al. Multi-scalar spatiotemporal pattern and evolution trend of drought in subtropical China [J]. Res Soil Water Conserv, 2022, 29(6): 242–253. [尹世燕, 毛方杰, 周国模, 等. 中国亚热带干旱多尺度时空格局及演变趋势 [J]. 水土保持研究, 2022, 29(6): 242–253. doi: 10.13869/j.cnki.rswc.2022.06.001.]
- [20] Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences. Soil Physical and Chemical Analysis [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1978. [中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.]
- [21] YUE K, FORNARA D A, LI W, et al. Nitrogen addition affects plant biomass allocation but not allometric relationships among different organs across the globe [J]. J Plant Ecol, 2021, 14(3): 361–371. doi: 10.1093/jpe/rtaa100.
- [22] XIA J Y, WAN S Q. Global response patterns of terrestrial plant species to nitrogen addition [J]. New Phytol, 2008, 179(2): 428–439. doi: 10.1111/j.1469-8137.2008.02488.x.
- [23] FENG J G, ZHU B. A review on the effects of nitrogen and phosphorus addition on tree growth and productivity in forest ecosystems [J]. Chin J Plant Ecol, 2020, 44(6): 583–597. [冯继广, 朱彪. 氮磷添加对树木生长和森林生产力影响的研究进展 [J]. 植物生态学报, 2020, 44(6): 583–597. doi: 10.17521/cjpe.2019.0176.]
- [24] PARDOS M, CALAMA R. Adaptive strategies of seedlings of four Mediterranean co-occurring tree species in response to light and moderate drought: A nursery approach [J]. Forests, 2022, 13(2): 154. doi: 10.3390/f13020154.
- [25] LIU Y F, ZHANG Y, LAI J M, et al. Effects of soil nitrogen and water interaction on COS and CO₂ fluxes of *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* [J]. Acta Ecol Sin, 2020, 40(16): 5729–5738. [刘燕飞, 张羽, 赖金美, 等. 土壤氮水交互对马尾松和杉木 COS 和 CO₂ 通量的影响 [J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5729–5738. doi: 10.5846/stxb201910172178.]
- [26] XU X N, XIA J Y, ZHOU X H, et al. Experimental evidence for weakened tree nutrient use and resorption efficiencies under severe drought in a subtropical monsoon forest [J]. J Plant Ecol, 2020, 13(5): 649–656. doi: 10.1093/jpe/rtaa053.
- [27] VERBRAEKEN L, WUYTS N, MERTENS S, et al. Drought affects the rate and duration of organ growth but not inter-organ growth coordination [J]. Plant Physiol, 2021, 186(2): 1336–1353. doi: 10.1093/plphys/kiab155.
- [28] VASTAG E, COCOZZA C, ORLOVIĆ S, et al. Half-Sib lines of pedunculate Oak (*Quercus robur* L.) respond differently to drought through biometrical, anatomical and physiological traits [J]. Forests, 2020, 11(11): 153. doi: 10.3390/f11020153
- [29] HABERSTROH S, WERNER C. The role of species interactions for forest resilience to drought [J]. Plant Biol, 2022, 24(7): 1098–1107. doi: 10.1111/plb.13415.
- [30] SONG J Y, WANG Y, PAN Y H, et al. The influence of nitrogen availability on anatomical and physiological responses of *Populus alba* × *P. glandulosa* to drought stress [J]. BMC Plant Biol, 2019, 19(1): 63. doi: 10.1186/s12870-019-1667-4.
- [31] BAYAR E. Influence of drought stress and N addition on the gas exchange, biochemical and growth traits in *Quercus ithaburensis* [J]. Dendrobiology, 2022, 88: 94–104. doi: 10.12657/denbio.088.007.
- [32] LI N J, ZENG Q P, JIANG S H, et al. Response of soil microbial community and hydrothermal environment to nitrogen deposition in *Pinus massoniana* forest in Central Asia [J]. Therm Sci, 2019, 23: 2551–2559. doi: 10.2298/TSCI181120143L.