

水分和氮磷添加对水曲柳幼苗生长及光合作用的影响

王鹏洋¹, 赵欣雨¹, 李博洋¹, 沈海龙^{1,3}, 杨剑飞^{1,2*}

(1. 东北林业大学 林学院, 哈尔滨 150040; 2. 森林生态系统可持续经营教育部重点实验室(东北林业大学), 哈尔滨 150040; 3. 国家林业和草原局红松工程技术研究中心, 哈尔滨 150040)

摘要: 为探究氮磷添加和水分处理对水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*) 幼苗的生长和光合特性的影响, 以1年生水曲柳幼苗为研究对象, 设计3种水分梯度, 分别为干旱 (Drought, DR, 土壤体积含水量13%)、正常 (Control, CK, 土壤体积含水量26%)、多水 (Water addition, W, 土壤体积含水量39%), 以及4种施肥梯度, 分别为N0P0 (0 g/株N, 0 g/株P)、N1P1 (0.5 g/株N, 0.25 g/株P)、N2P2 (1 g/株N, 0.5 g/株P)、N3P3 (1.5 g/株N, 0.75 g/株P) 进行随机区组设计试验。通过研究水曲柳幼苗在不同水肥处理下的生长、生物量分配和光合特性, 揭示其响应不同水肥条件的生理机制。结果表明, 水分相较于氮磷添加对水曲柳幼苗各项指标影响更显著。当土壤含水量在39%、施肥强度达到N2P2时, 水曲柳的苗高生长量、地径生长量、总生物量和净光合速率等达到最大值, 分别比对照 (含水量26%+N0P0) 增加82.59%、39.83%、74.61%、64.03%。相比多水处理, 干旱则显著降低了水曲柳幼苗的苗高生长量、地径生长量、总生物量和净光合速率等指标。因此, 在水分供应充足的条件下, 合理施肥能够促进水曲柳幼苗的生长。该研究结果可为水曲柳幼苗培育提供理论依据。

关键词: 水曲柳; 氮磷添加; 水分处理; 生物量; 光合特性

中图分类号: S725.5

文献标识码: A

DOI: 10.7525/j.issn.1006-8023.2025.06.004

Effects of Water and Nitrogen-Phosphorus Additions on the Growth and Photosynthesis of *Fraxinus mandshurica* Seedlings

WANG Pengyang¹, ZHAO Xinyu¹, LI Boyang¹, SHEN Hailong^{1,3}, YANG Jianfei^{1,2*}

(1. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management (Northeast Forestry University), Ministry of Education, Harbin 150040, China; 3. Korean Pine Engineering Technology Research Center of National Forestry and Grassland Administration, Harbin 150040, China)

Abstract: To investigate the effects of nitrogen and phosphorus additions and water treatments on the growth and photosynthetic characteristics of *Fraxinus mandshurica* seedlings, this study used one-year-old seedlings of *F. mandshurica* as the research subject. A randomized block design was utilized with three water gradients: drought (DR, volumetric water content 13%), control (CK, volumetric water content 26%), and water addition (W, volumetric water content 39%), and four fertilization gradients: N0P0 (0 g/plant N, 0 g/plant P), N1P1 (0.5 g/plant N, 0.25 g/plant P), N2P2 (1 g/plant N, 0.5 g/plant P), and N3P3 (1.5 g/plant N, 0.75 g/plant P). The growth, biomass allocation, and photosynthetic characteristics of *F. mandshurica* seedlings under different water and fertilizer treatments were analyzed to elucidate their physiological responses to these conditions. The results showed that water availability had a more significant impact on the growth of *F. mandshurica* seedlings compared to nitrogen and phosphorus fertilization. When soil water content was 39% and fertilization reached N2P2, the seedling height growth, base diameter growth, total biomass, and net photosynthetic rate achieved their maximum values. Specifically, these parameters were 82.59%, 39.83%, 74.61%, and 64.03% higher, respectively, compared to the control (soil water content 26%+N0P0). Compared with water addition treatment,

收稿日期: 2024-12-27

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目 (2022YFD2201100)。

第一作者简介: 王鹏洋, 硕士研究生。研究方向为林木种苗栽培生理。E-mail: wpy_2000@126.com

*通信作者: 杨剑飞, 博士, 副教授。研究方向为林木种苗高效繁育。E-mail: yjf19910304@126.com

引文格式: 王鹏洋, 赵欣雨, 李博洋, 等. 水分和氮磷添加对水曲柳幼苗生长及光合作用的影响[J]. 森林工程, 2025, 41(6): 1135-1144.

WANG P Y, ZHAO X Y, LI B Y, et al. Effects of water and nitrogen-phosphorus additions on the growth and photosynthesis of *Fraxinus mandshurica* seedlings[J]. Forest Engineering, 2025, 41(6): 1135-1144.

drought significantly reduced indicators such as seedling height growth, base diameter growth, total biomass, and net photosynthetic rate of *F. mandshurica* seedlings. Therefore, appropriate fertilization can enhance the growth of *F. mandshurica* seedlings under adequate water conditions. These findings provide a theoretical basis for the cultivation of *F. mandshurica* seedlings.

Keywords: *Fraxinus mandshurica*; nitrogen and phosphorus addition; water treatment; biomass; photosynthetic properties

0 引言

随着全球变化诱发的降水格局改变(如干旱)和养分沉降(氮、磷)愈发严峻,精准选育适应水养环境变化珍贵造林树种的紧迫性日渐凸显。水分与氮磷养分对植物生长的影响存在复杂的交互过程。当水分条件发生变化时,土壤中氮磷养分的有效性也随之改变,进而重塑植物对养分的吸收、转运与利用策略;反之,氮磷施肥水平的调整,同样会干扰植物根系的水分摄取能力、叶片的蒸腾速率以及整体的水分平衡状态^[1-3]。许多研究表明,水分过多或过少都可能导致植物根系的吸水能力受限,进而影响氮磷养分的吸收,抑制光合作用和生物量的积累^[4-6]。而过量的养分供应会导致植物受到一定的养分胁迫,也可能致使植物对水分需求增加,从而诱发植物的水分胁迫,抑制植物的生长^[7-10]。因此,合理的水分和养分管理对苗木培育尤为重要,如何合理调控水分和氮磷的供应,成为提升林木培育效率、优化苗木品质的关键^[11]。

水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)为木犀科梣属植物,是东北地区珍贵的硬阔叶树种,其经济价值高、材质优良等特点得到大规模的采伐与利用,导致天然林资源匮乏。因此,研究并建立合理的培育技术体系,培养优质的水曲柳幼苗,具有重要的科学和实践意义。目前关于水曲柳幼苗生长影响的研究主要集中于单一的环境胁迫^[12-14]、氮磷养分的单独添加^[15-16]等方面,而水养互作对其生长的相关研究极少,缺乏系统性研究。已有研究表明,干旱胁迫下可降低水曲柳苗木的苗高、地径的相对生长量,以及细根生物量的积累,同时影响叶片的形态和化学性状^[17]。汤靖文等^[18]研究发现,氮磷钾配比施肥可通过改善叶片氮磷钾的质量分数,进而提高水曲柳叶片的净光合速率、相对叶绿素质量分数和叶面积。马慧敏等^[19]研究表明,水氮互作对水曲柳幼苗的光合特性具有调控作用,在高氮和充分灌水的条件下,叶绿素质量分数最高,净光合速率随施氮量和土壤含水量的降低而下降。

本研究以1年生的水曲柳幼苗为试验对象,进行氮磷添加和水分处理试验,研究水曲柳幼苗响应不同处理条件的生长指标变化和光合生理特征,为今后水曲柳幼苗培育提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

该试验于东北林业大学帽儿山实验林场(127°29′—127°44′E, 45°14′—45°29′N)温室大棚内进行。研究对象为长势良好且长势一致的1年生水曲柳容器苗。该种来自吉林省露水河镇,在2023年4月播种于温室大棚内进行培育。2024年4月中旬将1年生苗移栽到塑料盆(上口径15 cm,下口径10 cm,高18 cm)中,每盆800 g左右营养土(草炭土与珍珠岩体积比为4:1),缓苗15 d后开始进行处理。

1.2 试验设计

本试验设置2个因素,其中水分因素设置3个水平,干旱(drought, DR),土壤体积含水率控制在13%左右;正常(control, CK),土壤体积含水率控制在26%左右;多水(water addition, W),土壤体积含水率控制在39%左右。施肥梯度设置4个水平, N0P0、N1P1、N2P2、N3P3。其中,氮添加药品为硫酸铵 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$,磷添加药品为磷酸二氢钾 KH_2PO_4 ,用硫酸钾 K_2SO_4 补足处理间的钾含量,具体水分及施肥处理,见表1。

表1 各处理间水分条件及施肥浓度

Tab. 1 Water conditions and fertilizer concentrations among the treatments

处理编号 Treatment No.	土壤体积含水率 / % Volumetric water content	施肥量 / (g·株 ⁻¹) Fertilizer amount	
		N	P
DR+N0P0	13	0	0
DR+N1P1	13	0.5	0.25
DR+N2P2	13	1.0	0.50
DR+N3P3	13	1.5	0.75
CK+N0P0	26	0	0
CK+N1P1	26	0.5	0.25
CK+N2P2	26	1.0	0.50
CK+N3P3	26	1.5	0.75
W+N0P0	39	0	0
W+N1P1	39	0.5	0.25
W+N2P2	39	1.0	0.50
W+N3P3	39	1.5	0.75

试验期间共施肥8次,每次施肥量为总施肥量的1/8,从2024年5月2日开始,每隔15 d施肥一次,到2024年8月15日结束施肥。该试验采用双因素完全随机区组试验,共设12个处理,每个处理设置3个小区,总计36个小区,每个小区内均匀布置20盆苗木,共计720盆。

水分控制方法为采用盆栽称重浇水法和水分测定仪(水分测定仪显示的数值经过数次测量后发现约等于其土壤体积含水率)共同对水分进行控制,将土壤含水量控制在设定范围内。根据当地的气温变化,每2~3 d进行一次补水,同时去除掉盆内多余的杂草。

1.3 指标测定

1.3.1 幼苗生长指标的测定

在试验开始前随机挑选20株幼苗用卷尺(精确度0.1 cm)测定其初始苗高平均值($H_1=11.0\text{ cm}\pm 1.94\text{ cm}$),游标卡尺(精确度0.01 mm)测定其初始地径平均值($D_1=3.19\text{ mm}\pm 0.37\text{ mm}$)。试验结束后在各处理之间随机挑选20株幼苗再次用同样的方法进行测量,以确定最终苗高(H_2)和最终地径(D_2)。

$$H = H_2 - H_1。$$

式中, H 为苗高生长量,cm。

$$D = D_2 - D_1。$$

式中, D 为地径生长量,mm。

1.3.2 幼苗各组织生物量的测定

在试验结束后,挑选不同处理下大小一致的幼苗各5株,带回试验室洗净擦干,使用烘箱对幼苗各器官(叶、茎、细根、粗根,其中直径小于2 mm为细根,其他为粗根)105 °C杀青15 min后,于65 °C烘干至恒重;使用电子天平(精度0.01 g)称取统计各部分生物量。

1.3.3 叶片光合相关指标的测定

光合作用相关指标采用Li-6800便携式光合作用测量系统(LI-COR, USA)测定,测定时设置CO₂浓度为400 μmol/mol,叶室温度为25 °C,光合有效辐射为1 000 μmol/(m²·s)。在晴朗无风的上午09:00—11:00,每个处理随机挑选长势一致的5株幼苗进行光合指标的测定,选择从顶端向基部的第一轮发育完全、健康的复叶中第2~3片叶来测量,每株幼苗在同一轮复叶中测定2次。测定参数主要包括净光合速率(net photosynthetic rate, P_n)、蒸腾速率(transpiration rate, T_r)、气孔导度(stomatal conductance, G_s)和胞间CO₂浓度(intercellular CO₂ concentration, C_i)。

1.3.4 叶绿素质量分数的测定

采用乙醇提取法^[20],称取0.1 g叶片鲜样,使用10 mL无水乙醇浸泡,静置2~3 d通过分光光度计(TU-1950;

Presee Co. Ltd, Beijing, China)在λ665、λ649下测定其上清液,计算叶绿素a、叶绿素b、叶绿素(a+b)质量分数及叶绿素a/b的值。

1.3.5 数据分析

使用WPS Spreadsheets软件进行数据整理和表格制作,采用SPSS Statistics 27.0(IBM,美国)的双因素方差分析(analysis of variance, ANOVA)对数据进行检验。当数据在α=0.05水平上存在显著差异时,采用Duncan检验进行多重比较。柱状图形采用GraphPad Prism9.0制作,线性拟合方程使用Origin 2024软件进行数据分析并作图。

2 结果与分析

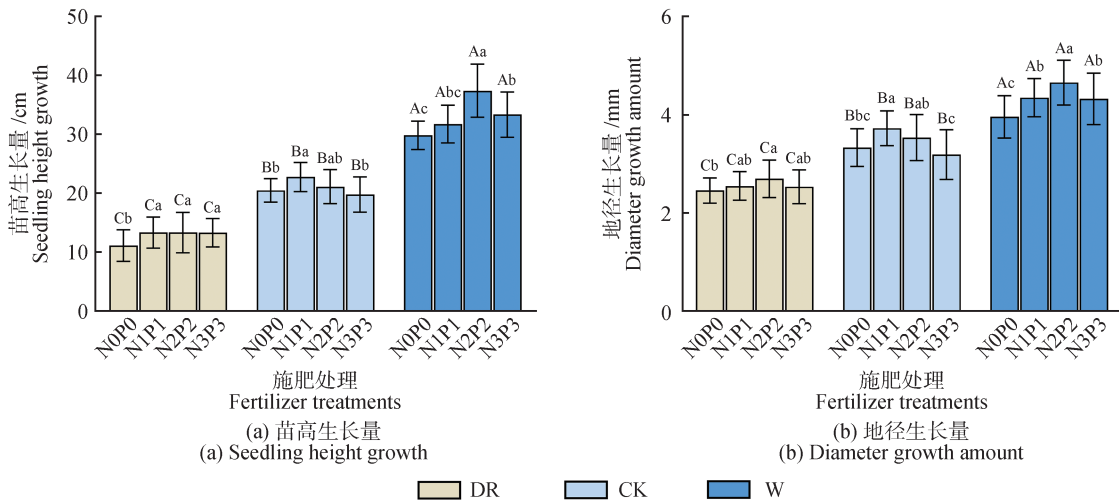
2.1 水分和氮磷添加对水曲柳幼苗苗高、地径生长量的影响

水分处理和氮磷添加对水曲柳幼苗苗高生长量的影响不同,如图1(a)所示。在干旱条件下,经施肥后的水曲柳幼苗苗高生长量显著高于不施肥处理(DR+NOPO)($P<0.05$),但在不同施肥强度下的幼苗苗高生长量并没有明显差异。在正常水分和多水条件下,幼苗的苗高生长量随着施肥强度增加均呈先上升后下降的趋势;其中,在正常水分条件下N1P1处理的幼苗苗高生长量达到最高值22.84 cm,而多水条件下N2P2处理的幼苗苗高生长量达到最高值37.54 cm,显著高于其他3个施肥处理($P<0.05$)。从同一施肥处理不同水分条件来看,幼苗苗高生长量在不同水分处理之间都有极其显著的差异($P<0.001$),多水条件下不同施肥处理的幼苗苗高生长量均极显著高于干旱和正常水分处理,其中W+N2P2处理的幼苗苗高生长量与对照(CK+NOPO)相比增加了82.59%。

与苗高生长量相似,水曲柳幼苗的地径生长量在相同水分条件下也随着施肥强度增加而呈先上升后下降的趋势,如图1(b)所示。从水分条件上来看,在多水条件下不同施肥处理的幼苗地径生长量均极显著高于干旱和正常水分处理($P<0.001$),在W+N2P2处理下达到最大值,与对照相比增加了39.83%。

2.2 水分和氮磷添加对水曲柳幼苗生物量的影响

水曲柳幼苗在不同水分处理和氮磷添加下的生物量分配模式不同,见表2。从水分条件上来看,叶、茎、粗根、细根及总生物量均随着土壤含水率的升高显著增加($P<0.05$),各项指标均在多水条件下达到最大值。在相同水分条件下,干旱组在N1P1施肥处理中叶片生物量、茎生物量、总生物量达到最大值;在正常水分条件下,叶片生物量、茎生物量、总生物量随着施肥



不同小写字母表示同一水分条件下不同施肥处理间差异显著 ($P < 0.05$)。不同大写字母表示同一施肥条件下不同水分处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate that there are significant differences among different fertilization treatments under the same water condition ($P < 0.05$). Different capital letters indicate that there are significant differences among different water treatments under the same fertilization condition ($P < 0.05$).

图1 水分和氮磷添加对水曲柳幼苗苗高、地径增长量的影响

Fig. 1 Effects of water and nitrogen-phosphorus addition on the height and base diameter increments of *Fraxinus mandshurica* seedlings

强度的增加呈先增多后减少的趋势,但各施肥处理之间差异不显著;在多水条件下,叶片生物量、茎生物量、总生物量呈先增多后减少的趋势,并于N2P2时达到最

大值,显著高于N0P0处理 ($P < 0.05$),其中总生物量相比对照增加了74.61%。另外,细根生物量在各水分条件下,随着施肥强度的增加总体上呈逐渐减少的趋势。

表2 水分和氮磷添加对水曲柳幼苗生物量的影响

Tab. 2 Effects of water and nitrogen-phosphorus addition on the biomass of *Fraxinus mandshurica* seedlings

水分条件 Water conditions	施肥处理 Fertilizer treatments	叶片生物量/g Leaf biomass	茎生物量/g Stem biomass	细根生物量/g Fine root biomass	粗根生物量/g Coarse root biomass	总生物量/g Total biomass
DR	N0P0	2.16 ± 0.28Cab	2.03 ± 0.20Cb	1.41 ± 0.21Ba	2.61 ± 0.41Ba	8.21 ± 0.79Cab
	N1P1	2.65 ± 0.43Ca	2.43 ± 0.29Ca	1.03 ± 0.2Bb	2.69 ± 0.33Ca	8.80 ± 0.77Ca
	N2P2	2.33 ± 0.40Cab	2.04 ± 0.28Cb	0.80 ± 0.19Cbc	2.43 ± 0.47Ca	7.60 ± 1.21Cab
	N3P3	2.12 ± 0.35Cb	2.04 ± 0.30Cb	0.73 ± 0.16Cc	2.18 ± 0.40Ca	7.08 ± 1.11Cb
CK	N0P0	3.36 ± 0.34Ba	3.67 ± 0.32Ba	1.47 ± 0.23Ba	3.82 ± 0.52Aa	12.17 ± 1.00Ba
	N1P1	3.79 ± 0.56Ba	4.05 ± 0.33Ba	1.28 ± 0.21Bab	3.39 ± 0.52Ba	12.51 ± 1.50Ba
	N2P2	3.83 ± 0.41Ba	3.71 ± 0.49Ba	1.09 ± 0.17Bb	3.71 ± 0.57Ba	12.34 ± 1.59Ba
	N3P3	3.46 ± 0.56Ba	3.61 ± 0.50Ba	1.01 ± 0.14Bb	3.84 ± 0.52Ba	11.93 ± 1.53Ba
W	N0P0	4.97 ± 0.44Ac	6.07 ± 0.54Ab	1.88 ± 0.24Aa	4.23 ± 0.38Aa	17.15 ± 1.32Ac
	N1P1	6.10 ± 0.44Ab	6.90 ± 0.59Aa	1.78 ± 0.19Aa	4.43 ± 0.39Aa	19.22 ± 0.96Ab
	N2P2	7.23 ± 0.65Aa	7.55 ± 0.56Aa	1.58 ± 0.24Aa	4.88 ± 0.52Aa	21.25 ± 1.74Aa
	N3P3	6.58 ± 0.65Aab	7.02 ± 0.44Aa	1.64 ± 0.19Aa	4.50 ± 0.50Aa	19.74 ± 1.34Aab

注:表中数据为平均值±标准差。不同小写字母表示同一水分条件下不同施肥处理间差异显著 ($P < 0.05$)。不同大写字母表示同一施肥条件下不同水分处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Data in the table are mean ± standard deviation. Different lowercase letters indicate that there are significant differences among different fertilization treatments under the same water condition ($P < 0.05$). Different capital letters indicate that there are significant differences among different water treatments under the same fertilization condition ($P < 0.05$).

随着水分条件的改善,水曲柳幼苗的生物量分配主要向地上(叶片和茎)倾斜,其斜率在干旱时达到最小值0.452,在多水时达到最大值1.795,说明幼苗地上生物量在水分增加条件下增长更快,如图2(a)所示。随着施肥水平的提高(从NOPO到N3P3),拟合斜

率先增加后下降,但各施肥组均高于不施肥处理(NOPO);随着施肥水平的提高,幼苗更倾向于地上部分的生长,施肥在一定程度上促进了水曲柳幼苗地上生物量的累积,如图2(b)所示。

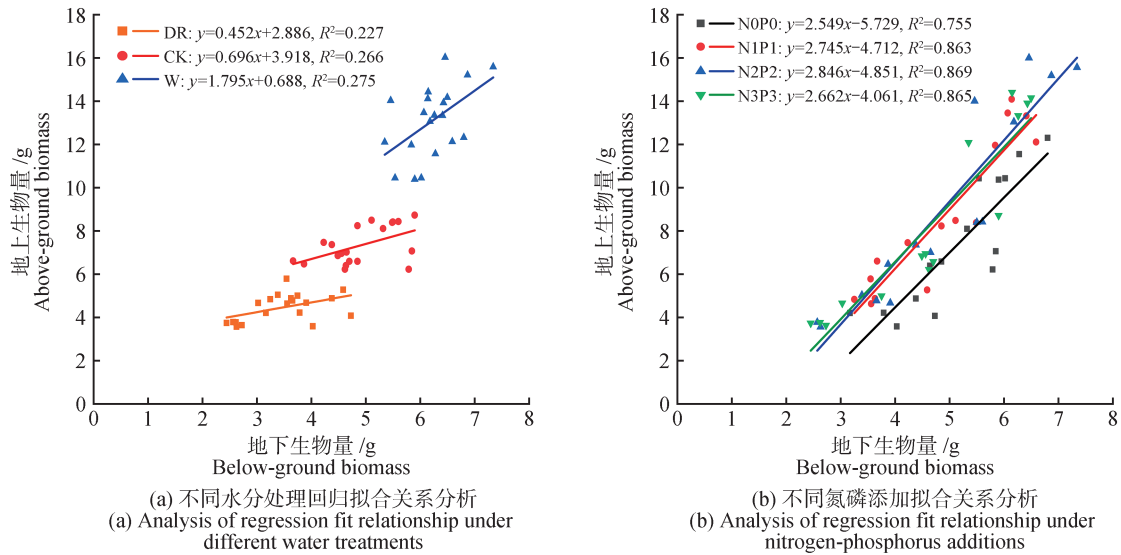


图2 水曲柳幼苗地上与地下生物量对不同水分处理和氮磷添加下的回归拟合关系分析

Fig. 2 Analysis of regression fit relationship between above-ground and below-ground biomass of *Fraxinus mandshurica* seedlings under different water treatments and nitrogen-phosphorus additions

2.3 水分和氮磷添加对水曲柳幼苗光合作用的影响

从不同水分条件同一施肥强度上来看,叶片的 P_n 、 T_r 、 G_s 均随土壤含水量的增加显著升高($P < 0.05$),在多水条件下,相同施肥处理的叶片各项指标均高于干旱和正常水分处理,各指标在多水条件下达到最大值,如图3所示。其中 P_n 在W+N2P2时达到最大值,为 $9.12 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,与对照相比增加了64.03%;但 C_i 随着土壤含水量的增加大致呈逐渐下降的趋势。在正常水分和多水条件下,随施肥水平的提高,水曲柳幼苗叶片的 P_n 、 T_r 、 G_s 呈现先上升后下降趋势,正常水分条件下N1P1处理中 P_n 、 T_r 、 G_s 达到最大,多水条件下于N2P2处理中达到最大,如图3(a)~图3(c)所示; C_i 则呈现相反的趋势,如图3(d)所示。而在干旱条件下,叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 在不同施肥水平下并无显著差异, C_i 则随着施肥水平增加呈现显著下降。

2.4 水分和氮磷添加对水曲柳幼苗叶绿素质量分数的影响

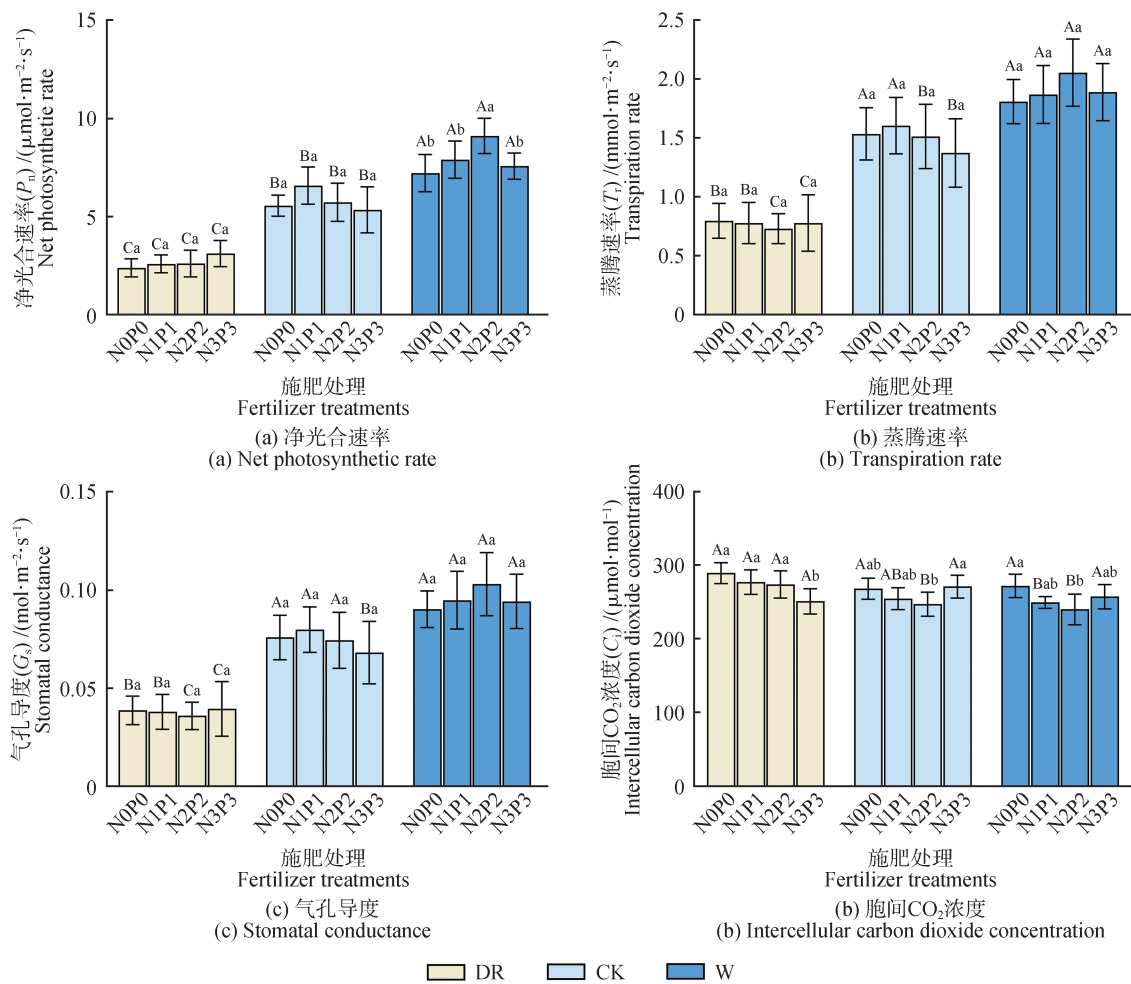
不同水分条件下,水曲柳幼苗的叶绿素a和叶绿素b质量分数在NOPO和N1P1处理下无显著差异。而在N2P2和N3P3强度下,叶绿素a和b的质量分数随土

壤含水量的增加显著升高,并且在W+N2P2和W+N3P3下达到最大值,如图4(a)和图4(b)所示。叶绿素(a+b)的质量分数与叶绿素a的质量分数变化较为一致,如图4(c)所示,在多水条件下的N3P3处理中质量分数达到 4.89 mg/g 。叶绿素a/b在各个处理之间没有明显的差异,如图4(d)所示。

3 讨论与结论

3.1 讨论

水分和养分是植物生长发育过程中不可缺失的因素。本试验探究在不同水分条件下,不同梯度的氮磷添加对水曲柳幼苗生长、生物量分配及光合生理的影响。苗高与地径能够直接体现苗木的生长态势,而各器官生物量则反映苗木对有机质的转化和积累情况^[21-22]。在本试验中,发现在干旱条件下,水曲柳幼苗的苗高、地径生长量以及各器官的生物量积累明显受到抑制,表明土壤水分的欠缺会严重影响植物的高生长和径增长以及植物各器官的生长发育,这与大多数人的研究结果相似^[23-26]。崔婉莹等^[4]在氮添加和水分胁迫对水曲柳幼苗生物量分配的影响研究中发现,在持续的水分胁迫环境下,水曲柳幼苗的生长会受到严重的抑制,严重降低茎和总生物量的累积,而氮添加



不同小写字母表示同一水分条件下不同施肥处理间差异显著 ($P < 0.05$)。不同大写字母表示同一施肥条件下不同水分处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate that there are significant differences among different fertilization treatments under the same water condition ($P < 0.05$). Different capital letters indicate that there are significant differences among different water treatments under the same fertilization condition ($P < 0.05$).

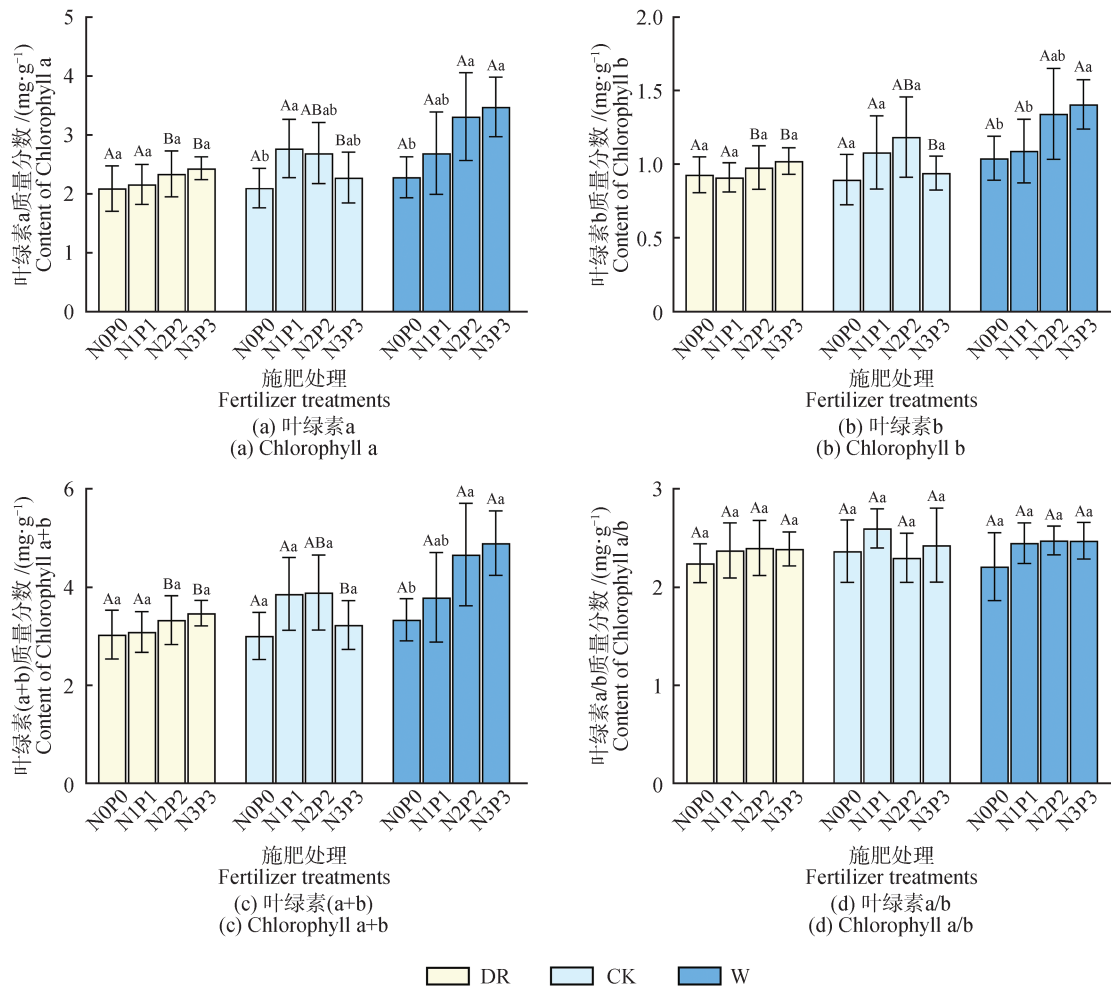
图3 水分和氮磷添加对水曲柳幼苗光合作用的影响

Fig. 3 Effects of water and nitrogen-phosphorus addition on the photosynthetic characteristics of *Fraxinus mandshurica* seedlings

能够在早期缓解干旱对水曲柳苗木造成的不利影响,这与本研究结果相似,干旱条件下低质量分数的氮磷添加增加了水曲柳幼苗的苗高、地径生长量和总生物量。

本研究发现,在正常水分条件下,低强度的施肥(N1P1)处理,最利于幼苗的高生长,但在生物量的积累上没有明显的差异;而多水条件下,可以发现随着施肥强度的增加,不管是幼苗的高生长还是生物量的积累都有明显的升高,表明充足的水分供应条件可以增强植物对养分的利用,从而促进植物的生长和生物量累积。刘杨等^[27]研究表明,不同灌溉和施氮处理对番茄(*Solanum lycopersicum*)的产量和品质影响显著,且

灌溉因素大于施氮因素,总灌溉量与株高、茎粗和产量均呈极显著正相关,凸显水分与施肥的协同作用下,水分对植株生长的影响占主导作用。本研究中,在同一施肥强度下土壤水分条件的改变对水曲柳幼苗的苗高生长量、地径生长量、各组织生物量的积累和光合特性影响较大,说明水分是水曲柳幼苗生长的主要限制性因素。除干旱条件外,随着施肥强度的升高,水曲柳的苗高生长量、地径生长量呈现先上升后下降的趋势,这与王晓等^[28]研究结果相似,其研究发现闽楠(*Phoebe bournei*)幼苗的苗高、地径和生物量等指标随施氮量的增加先升高后降低。苗木的生长量指标随着供氮水平的增加而增大,但存在一个氮素阈值^[29]。张力斌等^[30]



不同小写字母表示同一水分条件下不同施肥处理间差异显著 ($P < 0.05$)。不同大写字母表示同一施肥条件下不同水分处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate that there are significant differences among different fertilization treatments under the same water condition ($P < 0.05$). Different capital letters indicate that there are significant differences among different water treatments under the same fertilization condition ($P < 0.05$).

图 4 水分和氮磷添加对水曲柳幼苗叶绿素含量的影响

Fig. 4 Effects of water and nitrogen-phosphorus addition on the chlorophyll content of *Fraxinus mandshurica* seedlings

对柠条 (*Caragana korshinskii*) 的研究表明, 高质量分数的氮添加随着植物的生长以及质量分数的累积, 其对植物生长促进效果减弱, 甚至产生抑制作用, 同时, 高质量分数磷添加也会抑制植物的地下生物量。这说明高强度的施肥可能会通过影响土壤的渗透势, 导致植株产生更多水分需求, 进一步加剧水分胁迫, 也可能造成土壤酸化^[31], 从而抑制植物根系的生长和对养分的吸收。另外有其他研究表明, 磷的缺乏会促进水曲柳幼苗的侧根生长^[32]。李潘亭等^[33]在元宝枫幼苗生长对水肥耦合的响应中指出, 增加土壤含水量可以促进植物对养分的吸收和利用, 形成一种正向循环。在本研究结果中发现, 在干旱和正常水分条件下, 幼苗的

总生物量等在低质量分数(N1P1)时达到最大, 而在多水条件中, 苗高、地径和总生物量等均在中等施肥强度(N2P2)时达到最大值, 进一步说明质量分数过高对幼苗造成的限制条件可能会随着水分条件的改善逐步解除。

植物地上部分与地下部分的生物量积累模式, 反映了植物对资源分配的策略调整^[34]。在资源充足的条件下, 植物更倾向于将生物量尽可能多地分配到地上部分, 增加对叶片的生物量以提高光合作用能力; 当土壤中养分供应不足时, 植物的根系生长会相对加强以吸收更多的养分。这与干旱条件下植物会优先将生物量分配到根系, 以深入土壤中获取更多的水分策略

一致^[35-36]。本研究发现,水曲柳幼苗在水分充足时会更多资源分配到地上部分(图 3(a)),以提高生长效率和光合竞争能力。这与平晓燕等^[37]研究结论相似,土壤含水量的增加和土壤养分的改善能显著促进植物地上生物量的积累。

光合速率是反映植物光合生产能力的重要参数,决定植株的生长发育和生物量积累^[38]。Luo 等^[39]研究发现水曲柳和兴安落叶松(*Larix gmelinii*)幼苗在干旱胁迫下可以通过关闭气孔、降低叶片水势来调整其水力导度。本试验发现,在正常水分和多水条件下,水曲柳的 P_n 、 T_r 和 C_s 呈现先上升后下降的趋势,说明适宜的氮磷添加在合理的土壤水分条件下可以促进其光合作用,而过量则会抑制。Netzer 等^[40]研究发现,在高氮和中磷供应下,杨树(*Populus*)表现出生长增量减少、成熟叶片的光合作用减弱等趋势。吴慧苗^[41]在试验结果表明,氮磷比的减小对杨树和樟子松(*Pinus sylvestris*)幼苗的光合作用均有促进效果,但磷质量分数过高会造成一定的抑制。这些结果说明,光合作用对养分以及水分条件的响应不是单一的、线性的关系,水分和养分相互作用、协同调控着植株的生长。

3.2 结论

在氮磷添加和水分条件 2 个因子中,水分对 1 年生水曲柳幼苗生长、光合生理的影响占主导地位,其与养分之间存在一定程度的协同作用。水曲柳的生长、总生物量及光合指标均在多水中肥(W+N2P2)处理时达到最大值;而在正常水分及干旱条件下,低质量分数氮磷添加能一定程度上促进水曲柳幼苗的生长,说明在水曲柳幼苗栽培过程中需要保证充足的水分和合理的氮磷配施。从本试验结果来看最适宜 1 年生水曲柳幼苗生长的条件为土壤含水量 39%,施肥量为中等强度施肥(N2P2,氮肥 1 g/株,磷肥 0.5 g/株),更利于幼苗的生长和生物量的累积。

参 考 文 献

- [1] LINDH M, HOEBER S, WEIH M, et al. Interactions of nutrient and water availability control growth and diversity effects in a *Salix* two-species mixture [J]. *Ecohydrology*, 2022, 15(5): e2401.
- [2] HUSSNER A, MEYER C, BUSCH J. The influence of water level and nutrient availability on growth and root system development of *Myriophyllum aquaticum* [J]. *Weed Research*, 2009, 49(1): 73-80.
- [3] 沈玉芳,李世清,邵明安. 水肥不同层次组合对冬小麦(*Triticum aestivum* L.)氮磷养分有效性和产量效应的影响[J]. *生态学报*, 2008(6): 2698-2706.
- [4] SHEN Y F, LI S Q, SHAO M A. Effects of water and fertilizer spatial coupling on nitrogen and phosphorus validity and yield effect of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008(6): 2698-2706.
- [5] 崔婉莹,刘思佳,魏亚伟,等. 氮添加和水分胁迫对红松、水曲柳幼苗生物量分配的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(5): 1454-1462.
- [6] CUI W Y, LIU S J, WEI Y W, et al. Effects of nitrogen addition on biomass allocation of *Pinus koraiensis* and *Fraxinus mandshurica* seedlings under water stress [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(5): 1454-1462.
- [7] 陈志波. 水氮耦合对饲用油菜生理特性及产量品质的影响[D]. 阿拉尔:塔里木大学, 2024.
- [8] CHEN Z B. Effects of water and nitrogen coupling on physiological characteristics, yield and quality of forage rape [D]. Alar: Tarim University, 2024.
- [9] 戚迎龙,宁小莉,孙贯芳,等. 水氮耦合对滴灌玉米光合特性及产量的调控效应[J]. *东北农业大学学报*, 2024, 55(3): 10-20.
- [10] QI Y L, NING X L, SUN G F, et al. Regulatory effects of water-nitrogen coupling on photosynthetic characteristics and yield of drip-irrigated maize [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2024, 55(3): 10-20.
- [11] 谈建鑫. 过量施磷下青稞生长发育和磷素利用的变化[J]. *湖北农业科学*, 2024, 63(4): 6-11.
- [12] TAN J X. Changes of growth and phosphorus utilization of highland barley under excessive phosphorus application [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2024, 63(4): 6-11.
- [13] 张新洁. 氮磷施肥对水曲柳生长和生态化学计量特征的影响[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2019.
- [14] ZHANG X J. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on growth and ecological stoichiometric of *Fraxinus mandshurica* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2019.
- [15] 林仪华. 氮磷添加对天童常绿阔叶林树木生长的影响[D]. 上海:华东师范大学, 2022.
- [16] LIN Y H. Effects of nitrogen and phosphorus additions on trees growth in Tiantong evergreen broad-leaved forest [D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.
- [17] 王雨情. 水氮互作对红花果球发育期品质形成、物质转运及产量的影响[D]. 郑州:河南农业大学, 2024.
- [18] WANG Y Q. Effects of water and nitrogen interaction on quality formation, substance transport and yield of *Carthamus tinctorius* cones during development period [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2024.
- [19] CHAPIN F S, BLOOM A J, FIELD C B, et al. Plant responses to multiple environmental factors: physiological ecology provides tools for studying how interacting envi-

- ronmental resources control plant growth [J]. *Bioscience*, 1987, 37(1): 49-57.
- [12] 杨博文, 孙海龙, 吴楚. 低磷胁迫对水曲柳幼苗光合速率与氮素同化的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(8): 18-23.
- YANG B W, SUN H L, WU C. Effects of phosphorus stress on photosynthesis and nitrogen assimilation of *Fraxinus mandshurica* seedlings [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015, 37(8): 18-23.
- [13] 程鑫, 吴纯泽, 韦庆钰, 等. 水曲柳丛枝菌根真菌接菌苗对干旱胁迫的生长和生理响应[J]. *林业科学*, 2023, 59(2): 58-66.
- CHENG X, WU C Z, WEI Q Y, et al. Growth and physiological responses of *Fraxinus mandshurica* seedlings inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi to drought stress [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2023, 59(2): 58-66.
- [14] 孔鑫, 王爱英, 郝广友, 等. 水曲柳幼苗水力结构和光合生理对光强梯度变化的耦合响应[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(1): 83-91.
- KONG X, WANG A Y, HAO G Y, et al. Coordinated responses of hydraulic architecture and photosynthetic characteristics in *Fraxinus mandshurica* seedlings to change of light intensity irradiance [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2023, 47(1): 83-91.
- [15] 李婷婷. 白桦和水曲柳幼苗光合能力对不同形态氮素的响应研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
- LI T T. Different nitrogen forms on the photosynthetic characteristics of *Betula platyphylla* and *Fraxinus mandshurica* seedlings [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2023.
- [16] WANG M, ZHANG W-W, LI N, et al. Photosynthesis and growth responses of *Fraxinus mandshurica* Rupr. seedlings to a gradient of simulated nitrogen deposition [J]. *Annals of Forest Science*, 2017, 75(1): 1.
- [17] 杨妮. 基于分根试验的干旱胁迫对吸收根和叶养分重吸收的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2024.
- YANG N. Effect of drought stress on the nutrient resorption of absorptive roots and leaves based on split-root experiment [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2024.
- [18] 汤靖文, 李晨曦, 彭政淋, 等. 氮磷钾肥对水曲柳雌雄株叶片光合生理及化学计量特征的影响[J]. *森林工程*, 2023, 39(2): 30-38, 46.
- TANG J W, LI C X, PENG Z L, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on photosynthetic physiological and stoichiometric characteristics of male and female leaves of *Fraxinus mandshurica* [J]. *Forest Engineering*, 2023, 39(2): 30-38, 46.
- [19] 马慧敏, 图拉, 高世华. 水肥互作对水曲柳氮代谢和光合特性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(20): 168-173.
- MA H M, TU L, GAO S H. Impacts of water and fertilizer interaction on nitrogen metabolism and photosynthetic characteristics of *Fraxinus mandshurica* [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(20): 168-173.
- [20] 胡秉芬, 黄华梨, 季元祖, 等. 分光光度法测定叶绿素含量的提取液的适宜浓度[J]. *草业科学*, 2018, 35(8): 1965-1974.
- HU B F, HUANG H L, JI Y Z, et al. Evaluation of the optimum concentration of chlorophyll extract for determination of chlorophyll content by spectrophotometry [J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(8): 1965-1974.
- [21] ZHAO Y, WANG Z, XU S, et al. Nutrient assimilation and utilization in Korean pine (*Pinus koraiensis*) seedlings exposed to exponential fertilization under contrasting spectra [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2020, 51(18): 2414-2428.
- [22] CHEN L, WANG C, DELL B, et al. Growth and nutrient dynamics of *Betula alnoides* seedlings under exponential fertilization [J]. *Journal of Forestry Research*, 2018, 29(1): 111-119.
- [23] 冯树林. 干旱胁迫和复水对侧柏和紫穗槐幼苗生长和生理特征的影响研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2020.
- FENG S L. Effects of drought stress and rewatering on growth and physiological characteristics of *Platycladus orientalis* and *Amorpha fruticosa* seedlings [D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2020.
- [24] 程媛媛, 苏孝良. 植物抗旱机制研究进展[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 32(1): 113-120.
- CHENG Y Y, SU X L. Research progress on plant drought resistance mechanism [J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2014, 32(1): 113-120.
- [25] 王曦. 干旱胁迫对桢楠幼树生长的影响及施氮的缓解效应[D]. 雅安: 四川农业大学, 2018.
- WANG X. Effects of drought stress on the growth of *Phoebe zhennan* seedlings and its alleviation by nitrogen application [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2018.
- [26] 俞永玮. 十个优良杨树无性系抗旱性研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021.
- YU Y W. Study on drought resistance of ten quality poplar clones [D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2021.
- [27] 刘杨, 夏皓, 李远, 等. 水氮耦合对设施樱桃番茄全生育期生长发育及产量品质的影响[J]. *中国农机化学报*, 2024, 45(12): 200-207.
- LIU Y, XIA H, LI Y, et al. Effects of irrigation and nitrogen coupling on growth, yield and quality of cherry tomato

- under greenhouse cultivation during the whole growth period [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2024, 45(12):200–207.
- [28] 王晓, 王樱琳, 韦小丽, 等. 不同指数施氮量对闽楠幼苗生长生理及养分积累的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2020, 37(3):514–521.
- WANG X, WANG Y L, WEI X L, et al. Growth, physiology and nutrient accumulation of *Phoebe bournei* seedlings under different amount of exponential nitrogen fertilization [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2020, 37(3):514–521.
- [29] 陈琳, 曾杰, 徐大平, 等. 氮素营养对西南桦幼苗生长及叶片养分状况的影响[J]. *林业科学*, 2010, 46(5):35–40.
- CHEN L, ZENG J, XU D P, et al. Effects of exponential nitrogen loading on growth and foliar nutrient status of *Betula alnoides* seedlings [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(5):35–40.
- [30] 张力斌, 何明珠, 张珂. 柠条锦鸡儿生物量分配规律与异速生长对氮、磷添加的响应[J]. *生态学报*, 2023, 43(16):6627–6636.
- ZHANG L B, HE M Z, ZHANG K. Response of biomass allocation and allometric growth of *Caragana Korshinskii* to nitrogen and phosphorus addition [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(16):6627–6636.
- [31] 苏渝钦, 刘何铭, 郑泽梅, 等. 氮磷添加对中亚热带常绿阔叶林土壤有效氮和pH值的影响[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(9):2279–2285.
- SU Y Q, LIU H M, ZHENG Z M, et al. Effects of N and P addition on soil available nitrogen and pH in a subtropical forest [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(9):2279–2285.
- [32] HUANG W, ZHAO X, LIANG N, et al. Phosphorus deficiency promotes the lateral root growth of *Fraxinus mandshurica* seedlings [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2019, 182(4):552–559.
- [33] 李潘亭, 杜满义, 王玥, 等. 元宝枫幼苗生长及光合特性对水肥耦合的响应[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(5):113–122.
- LI P T, DU M Y, WANG Y, et al. The growth and photosynthetic characteristics of *Acer truncatum* seedlings in response to soil water and fertilizer coupling [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2024, 48(5):113–122.
- [34] 王杨, 徐文婷, 熊高明, 等. 櫟木生物量分配特征[J]. *植物生态学报*, 2017, 41(1):105–114.
- WANG Y, XU W T, XIONG G M, et al. Biomass allocation patterns of *Loropetalum chinense* [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(1):105–114.
- [35] 王墩, 郭晋平, 刘宁, 等. 森林光环境对4种天然灌木的光合作用和形态的影响[J]. *林业科学*, 2011, 47(6):56–63.
- WANG T, GUO J P, LIU N, et al. Photosynthetic and morphological responses and plasticity of four naturally-regenerated shrubs under forest light environments [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(6):56–63.
- [36] 王晓辉, 石兆勇, 张梦歌, 等. 不同菌根类型植物生物量分配对干旱的响应[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2023, 49(4):412–420.
- WANG X H, SHI Z Y, ZHANG M G, et al. Drought-induced biomass allocation responses in different types of mycorrhizal plants [J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2023, 49(4):412–420.
- [37] 平晓燕, 周广胜, 孙敬松. 植物光合产物分配及其影响因素研究进展[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1):100–111.
- PING X Y, ZHOU G S, SUN J S. Advances in the study of photosynthate allocation and its controls [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1):100–111.
- [38] REICH P B, SENDALL K M, STEFANSKI A, et al. Effects of climate warming on photosynthesis in boreal tree species depend on soil moisture [J]. *Nature*, 2018, 562(7726):263–267.
- [39] LUO D, WANG C, JIN Y, et al. Different hydraulic strategies under drought stress between *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii* seedlings [J]. *Journal of Forestry Research*, 2023, 34(1):99–111.
- [40] NETZER F, POZZI L, DUBBERT D, et al. Improved photosynthesis and growth of poplar during nitrogen fertilization is accompanied by phosphorus depletion that indicates phosphorus remobilization from older stem tissues [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2019, 162:421–432.
- [41] 吴慧苗. 不同氮磷比对杨树和樟子松幼苗生长、生理特性和养分吸收利用的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
- WU H M. Effects of different nitrogen and phosphorus ratios on growth, physiological characteristics and nutrient uptake and utilization of *Populus* sp and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023.