

5 年施肥对楸树人工幼林动态生长、生产力以及化学计量特征的影响

关追追¹ 张庆斌¹ 何茜² 李吉跃² 张广波¹ 乔良¹ 马天晓^{1*}

(1. 信阳农林学院林学院 信阳 464399; 2. 华南农业大学林学与风景园林学院 广州 510640)

摘 要:【目的】施肥是全球森林经营的一项重要技术措施,对树木的生长和生产潜力的提高具有十分重要的作用。短期施肥对林木的生长提升作用有限,显得肥效不足,而长期施肥(例如5年以上)后树木的动态发育状态、生产力增效情况却涉及较少。【方法】本研究以中国山东省济南市7年生楸树人工幼林为研究对象,采用2种施肥措施,分别为穴施(HF)和水肥一体化(WF),另设置不施肥作为对照,探究长期施肥对人工林动态生长、生产力以及化学计量特征的影响。【结果】结果表明,施肥1年后,林分生产力增加缓慢,随着施肥时间延长,WF极大地促进了林分生产力的提高,而HF和CK林分生产力增速相对较缓,HF林分生产力高于CK。相较于HF和CK林分,WF林分生产力分别提高了39.7%和55.1%。经过5年的施肥,WF施肥林分蓄积达到了 $112.36 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,林分生产力达到了 $41.75 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。施肥显著提高了楸树叶和细根中的氮含量以及粗根中的钾含量,这些元素在水肥一体化林分的相应器官中富集较多。纵观整个生长周期,叶氮、磷和钾含量以及粗根钾含量、细根磷含量被大量消耗,降低幅度分别为30.5%、18.8%、47.3%、24.7%和24.4%。施肥后叶氮含量的提高会促进楸树树高、胸径和单株材积的增加。当枝和粗根中钾含量富集时,胸径和单株材积也会随之增加。【结论】总之,施肥主要通过增加叶氮含量、枝和粗根钾含量来提高楸树的材积生长。从最大化地提高林分生产力的角度考虑,水肥一体化的施肥方案要优于穴施,在今后楸树施肥试验中值得优先考虑。

关键词:楸树;生产力;水肥一体化;化学计量学;长期施肥

The Effects of Five-Year Fertilization on Dynamic Development, Productivity, and Stoichiometric Properties of Young *Catalpa Bungei* Plantations

Abstract:【Objective】 In order to maximize the growth and productivity potential of trees, fertilization is a crucial technical tool in the global management of forests. Tree growth is not greatly affected by short-term fertilization, and it doesn't seem to be very effective at increasing fertilizer efficiency. On the other hand, there is less involvement in the dynamic development state and productivity improvement of trees following long-term fertilization (more than five years). 【Method】 The research subject for this study was a 7-year-old *C. bungei* plantations located in Jinan City, Shandong Province, China. In order to investigate the effects of long-term fertilization on the dynamic growth, productivity, and stoichiometric characteristics of the plantations, two fertilization measures were adopted: hole fertilization (HF) and integrated water and fertilizer (WF). No fertilization was set as a control. 【Result】 The findings demonstrated that the stand productivity increased gradually following a year of fertilization. While the productivity growth rate of HF and CK stands was relatively slow and the productivity of HF stands was higher than that of CK, WF significantly promoted the improvement of stand productivity with increased fertilization time. The productivity of WF stands increased by 39.7% and 55.1%,

基金项目:2024年中央林业草原改革发展资金(林业科技推广示范补助)(112079)

* 马天晓为通讯作者

respectively, in comparison to HF and CK stands. After 5 years of fertilization, the accumulation of WF-fertilized stands reached $112.36 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, and the stand productivity reached $41.75 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. Fertilization considerably raised the amounts of potassium in the coarse roots and nitrogen in the leaves and fine roots of *C. bungei*. The corresponding organs of the water-fertilizer integrated forest had higher concentrations of these elements. Throughout the growth cycle, the leaf nitrogen, phosphorus, and potassium contents, as well as the coarse root potassium and fine root phosphorus contents, were consumed in substantial quantities, with declines of 30.5%, 18.8%, 47.3%, 24.7%, and 24.4%. The increase in leaf nitrogen contents following fertilization would stimulate the growth of tree height, DBH, and single tree volume. When potassium levels in branches and coarse roots were raised, DBH and single tree volume increased. 【Conclusion】 Finally, fertilizer mostly increased the volume growth of *C. bungei* by boosting leaf nitrogen and branch and root potassium levels. In terms of optimizing stand productivity, the integrated water-fertilizer fertilization strategy outperforms hole fertilization and should be given priority in future *C. bungei* fertilization experiments.

Keywords: *Catalpa bungei*; productivity; integration of water and fertilizer; chemometrics; long-term fertilization

目前人工林高质量培育技术研究一直是学者们关注的热点话题。作为中国本土珍贵的阔叶树种，楸树栽培技术的研究一直是政府关注的焦点。施肥是快速提高楸树生长的重要手段（Shi *et al.*, 2017）。肥料种类、施肥方法以及施肥持续的时间均会对林木的动态生长产生重要的影响。

生态化学计量学用于研究有机体所需的元素（主要是碳、氮、磷）以及这些元素之间的多重平衡。氮和磷是陆地生态系统中的主要限制因子，光合作用同化的碳是植物生长的重要底物。施肥可通过直接改变土壤养分浓度，进而影响植物体内氮、磷浓度以及对碳的固定，最终影响植物体内养分化学计量比。植物不同器官的氮磷比变化可反映养分供应状况。此外，植物各器官的碳氮比和碳磷比可以反映植物生长速率对养分供应的响应（Koerselman and Meuleman, 1996; Tessier and Raynal, 2003）。对植物养分的生态化研究，通过计量特征的分析，有助于今后判断植物生长中限制元素的情况以及施肥前的营养诊断（庚强，2005）。

水肥一体化施肥是农业生产上一项十分重要的施肥技术，它具有提高水分和养分利用效率的优势，目前在促进农作物生长方面应用广泛（Zhang *et al.*, 2019; Hu *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2018; Kumar *et al.*, 2021; Lu *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2021），例如：番茄、大豆和玉米等。但是，此技术在林业生产上尚处于初步应用阶段（He *et al.*, 2021）。有研究发现，对毛白杨（*Poplar tomentosa*）人工林进行施肥时，与常规施肥方案相比，采用水肥一体化能够减少肥料用量（Xi *et al.*, 2017; Bhat *et al.*, 2007）。此外，水肥一体化可以显著增加杨树人工林的生物量和碳储量（Yan *et al.*, 2016）。迄今为止，应用水肥一体化技术监测林木长期动态生长发育、生产力以及器官养分化学计量特征报道较少。

楸树（*Catalpa bungei*）是紫葳科梓树属珍贵高大落叶乔木，也是著名的园林观赏树种。它干形通直，纹理美观，具有极高的经济价值，在市场上售价高达 5000 元/ m^3 （邱权，2016）。目前对楸树的研究多集中在苗期施肥，比如：配方施肥（白晶晶等，2015；王祥等，2021）、水肥耦合（邱权等，2015；邱权等，2016）以及指数施肥（王力朋等，2012；王力朋等，2013；吴俊文等，2015）等。楸树人工林因兼具用材和固碳能力得到广泛推广，目前来看，与之配套的灌溉和施肥等栽培技术比较缺乏，在楸树进行大面积种植

时,尤其在干旱地区,其水肥资源消耗问题很容易受到社会的普遍关注。在中国山东济南地区,栽植了大面积的楸树人工林,但由于其年均降水量不足 650 mm,在某种程度上楸树的生长受到水分供应不足的制约。在生产实践上,传统的经营方式导致楸树林地肥料和水资源未能得到有效利用,水肥利用率出现一定程度的降低,间接影响到立地质量和林分生产力。寻求新型的施肥方式,将有助于改善楸树林分质量和提高水肥利用效率。从当前的行业发展来看,研制水肥一体化技术可以作为一个重要的发展前景。基于此,本研究以山东省济南市章丘区楸树人工幼林为研究对象,应用水肥一体化施肥技术,同时设置穴施和不施肥对照,探究不同施肥措施对楸树林分生长动态发育、生产力以及生态化学计量特征的影响。经过 5 年的施肥研究,本试验提出了两点假设:第一,水肥一体化施肥条件下楸树人工林生产力要高于穴施和对照;第二,对比其他两种施肥措施,水肥一体化施肥树木氮磷含量较高,在某种程度上可以促进树木的生长。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验样地位于山东省济南市章丘区枣园保育库($36^{\circ} 25' \sim 37^{\circ} 09' \text{ N}$, $117^{\circ} 10' \sim 117^{\circ} 35' \text{ E}$)。属于温带季风气候,年均气温 12.8°C ,月均最高气温 27.2°C (7月),最低气温 -3.2°C (1月),无霜期 192 d,年均降水量 600.8 mm,年日照时数 2647.6 h。章丘区土壤类型有褐土、潮土和棕壤,研究样地为棕壤。2017 ~ 2023 年的月均气温和降水数据参考图 1。

1.2 研究对象

2017 年 3 月,选择 2a 生的楸树无性系“9-1”进行造林,所造纯林密度为 $833 \text{ 株} \cdot \text{ha}^{-1}$ ($3 \times 4 \text{ m}$),宽行窄株距。造林前该样地种植 15a 生的北美鹅掌楸。造林时进行了整地、挖穴,并施入有机肥作为基肥。造林 3 个月后,测得树木平均树高为 4.2 m,平均胸径为 4.0 cm。造林后,调查了楸树土壤属性本底值(0 ~ 20 cm),其中 pH 为 7.67,有机质含量为 $19.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量为 $0.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷含量为 $0.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾含量为 $16.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量为 $81.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷含量为 $32.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量为 $176.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。楸树生长季主要集中在每年的 5 ~ 9 月,持续时间约为 130 ~ 150 d。造林当年成活率达到 95%以上,试验结束时树木保存率达到了 90%。

1.3 施肥设计

2018 年 5 月初,采用随机区组设计的方法,设置 9 块样地开展施肥试验,每块样地面积为 384 m^2 。每块样地分别栽植楸树 45 株(5 行 $\times$ 9 列)。共设置 2 种施肥措施,分别为水肥一体化(Integration of water and fertilizer, WF)和穴施(Hole fertilization, HF),另有不施肥作为对照。将各施肥措施随机分配于样地中,保证每个施肥处理 3 个重复。样地之间均设置有隔离带,隔离带的宽度约 6 ~ 8 m。于 2018 年 5 月进行首次施肥,2023 年 5 月结束施肥,施肥持续了 5 年。根据前期的施肥经验,首次施肥时,在每株施肥量中,有效成分 N 为 24 g、 P_2O_5 为 8 g 和 K_2O 为 16 g,随后每年施肥量递增 20%。

穴施和水肥一体化每年的施肥总量一致。其中穴施是在距离树干南向和北向 50 cm 的位置各挖一个深约 20 ~ 30 cm 的洞穴,并将肥料一次性等量施入树木根系附近,同时进行少量浇水,随后用土覆盖洞穴。水肥一体化是借助智能滴灌设备(HN-BXE, Huinong Automation Company, China)将肥料溶于水中滋润根系的方法。其方法是将全年施肥量等分为 12 份,从 5 月初开始,每 10 d 施肥一次,每个月施肥 3 次,9 月初结束施肥。不施肥样地不作任何处理。对于穴施和水肥一体化而言,氮肥和钾肥均使用尿素和硫酸钾。穴施和水肥一体化中的磷肥分别使用过磷酸钙和磷酸二氢铵。样地设置后,根据树木生长调查结果,每个样地设置 5 株标准木。标准木应为冠形匀称、树干笔直、长势良好,可以代表整个小区生长情况的林

木。

水肥一体化智能滴灌设备参见图 2。水的作用主要是为了溶解肥料，用于制作液体肥。每次施肥时，将肥料倒入压力桶中，桶的容积为 500 L。将肥料充分溶解后，借助压力装置，将水肥输送到树木根系附近，当桶内水肥输送完毕，则结束单次施肥，单次施肥时间约 30 min。滴灌系统的设计如下：滴灌系统设计流量为 40 m³/h；滴灌管采用管径为 16 mm，壁厚为 1.0 mm 的滴灌管；滴头流量为 2.2 L/h，滴头间距为 50 cm；管道平整铺设在地面，管道均采用 1.0 Mpa 的 UPVC 材质，其中主管、分干管和支管直径分别为 110 mm、90 mm 和 63 mm；管材采用承插式粘接；滴头分布在靠近树木位置（参见图 3）。

1.4 生长测定

在各样地内，选取 20 株长势基本一致，健康良好的楸树进行长期定位监测。分别于 2018 年 5、8 和 11 月、2019 年 5 ~ 11 月、2020 年 11 月、2021 年 5 和 11 月、以及 2022 和 2023 年 5 月对样地内楸树树高和胸径进行了测定。测定工具为测高器和胸径尺。

1.5 器官养分测定

于 2021 年 5 月上旬（生长季初期）、7 月中旬（生长季中期）以及 9 月下旬（生长季末期）剪取位于冠层中上部南侧的枝条，并选取 5-6 片功能叶作为枝叶样本。同时，在距离树干南向约 50 cm 的位置，挖取土层深度 0-30 cm 的根系，根据直径等级，将根系分为粗根（> 2 mm）和细根（≤ 2 mm）。样品采集后立即置于保温箱中冷藏保存，随后带回实验室，使用纯净水洗净，自然晾干，随后置于 75 °C 烘箱中烘干至恒重，磨粉过 2 mm 筛后保存于密封袋中。参考鲁如坤的方法（鲁如坤，2000）测定楸树叶、枝、粗根和细根的氮（N）、磷（P）和钾（K）含量，同时计算 N:P、N:K 和 P:K。

1.6 数据分析

楸树单株材积的计算方法参考华北地区阔叶树立木材积公式（肖传法等，2000），公式如下所示：

$$V=0.000057468552 \times D^{1.915559} \times H^{0.9265972}$$

式中：V 为单株材积（m³），D 为胸径（cm），H 为树高（m）。

公顷蓄积量的计算方式为：先计算出各样地内 20 株楸树的材积均值，然后乘以每公顷株数（1170 株），最后得出公顷蓄积量。林分生产力为当年林分每公顷蓄积量。

在使用 IBM SPSS 25.0 对数据进行方差分析前，检验数据是否符合“独立、正态、方差齐性”要求，随后使用单因素方差分析探究不同施肥措施对楸树树高、胸径、单株材积、公顷蓄积量、林分生产力、各器官养分含量以及化学计量比的影响，最后使用图基（Turkey’ s HSD）进行显著性比较（P<0.05）。使用 Origin Pro 2022 进行制图。

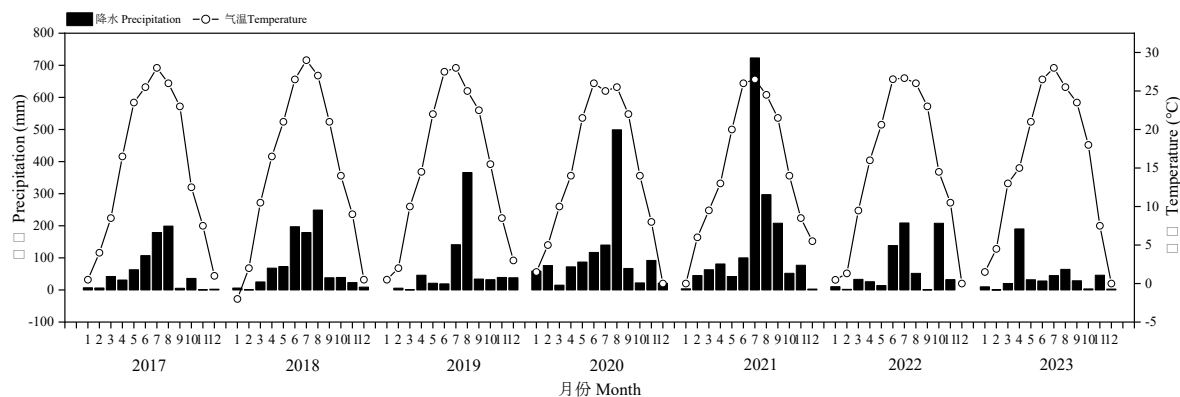


图 1 山东省章丘区 2017 ~ 2023 年月均气温和降水分布

Figure 1 Distribution of monthly average temperature and precipitation in Zhangqiu District, Shandong Province for years 2017 ~ 2023

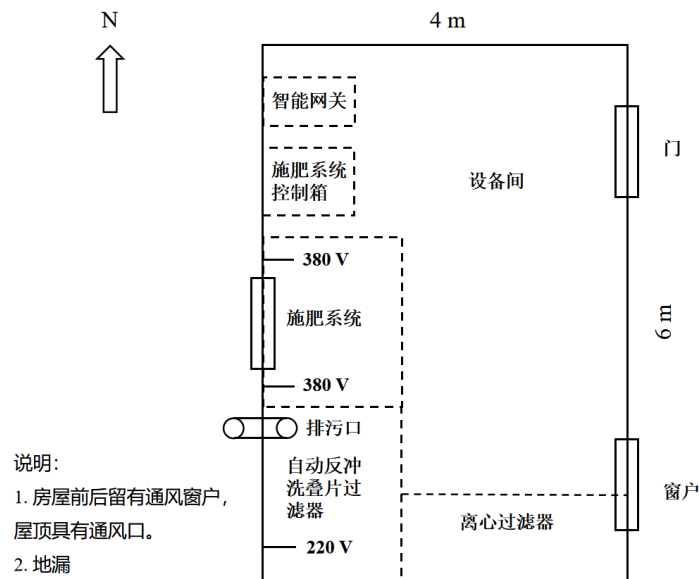


图 2 水肥一体化设备示意图

Figure 2 Schematic diagram of water and fertilizer integration equipment

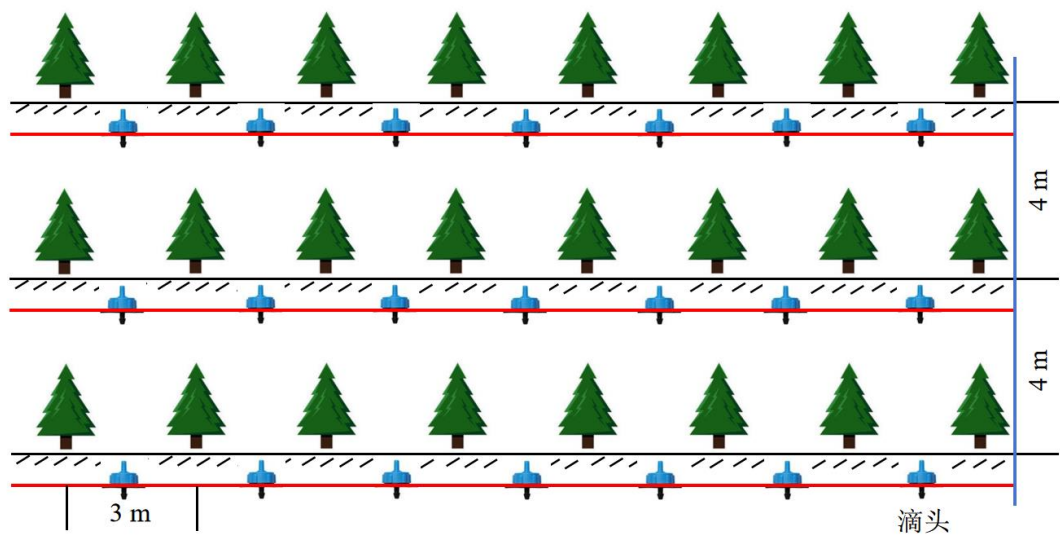


图 3 滴头位置示意图

Figure 3 Schematic diagram of dropper position

2 结果与分析

2.1 生长表现

经过 5 年的长期施肥，发现不同施肥措施对楸树树高、胸径、单株材积和林分蓄积的影响显著不同 ($P < 0.05$; 图 4)。从 5 年的生长增量来看，CK 和 HF 施肥处理下各生长指标差异较小，具体表现为：5.83 和 5.71 m（树高，前面表示 CK，图 4A）、11.63 和 11.67 cm（胸径，图 4B）、0.090 和 0.094 m³（单株材积，

图 4C)、83.95 和 86.88 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ (蓄积) (图 4D)。WF 处理下树高、胸径、单株材积和蓄积 5 年的生长增量分别达到了 6.18 m、13.35 cm、0.117 m^3 和 108.68 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 相较于 CK 处理分别提高了 5.9%、14.8%、29.3%和 29.5%。从最后一次的调查结果来看, WF 处理下各生长指标显著高于其他两种处理, HF 处理下各指标略高于 CK 处理, 但未达到差异显著水平。综上, 水肥一体化施肥显著提高了楸树林分生长, 经过 5 年的生长, 林分蓄积达到了 112.36 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ (图 4D)。

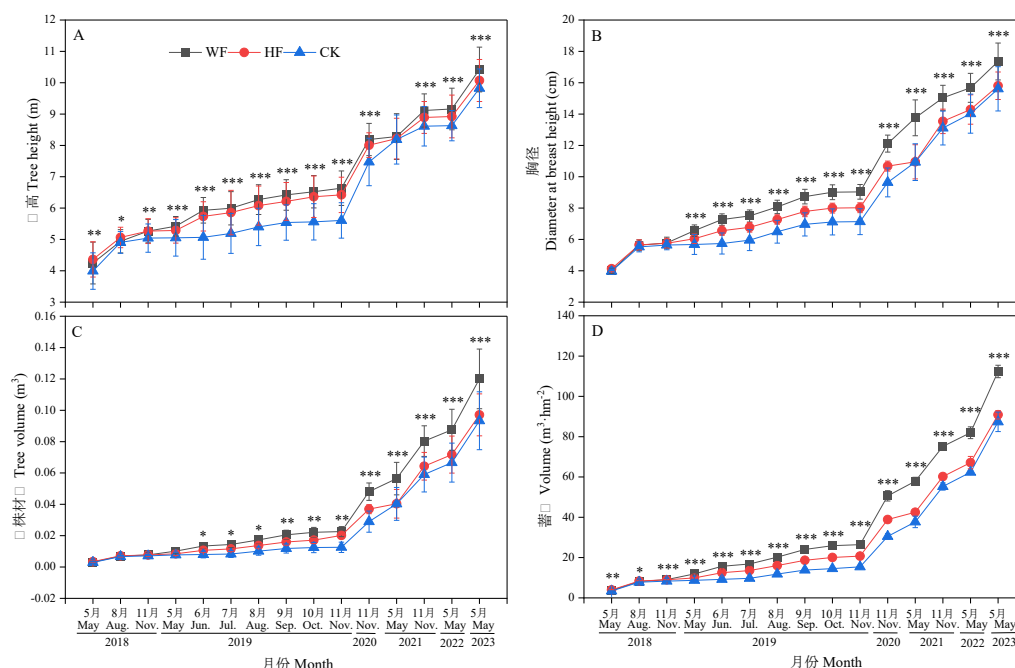


图 4 2018-2023 年楸树人工林树高 (A)、胸径 (B)、单株材积 (C) 和林分蓄积 (D) 生长表现

Figure 4 Growth performance of tree height (A), diameter at breast height (B), tree volume (C), and stand volume (D) of *C. bungei* plantations from 2018 to 2023

注: *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$ 。CK, 不施肥; HF, 穴施; WF, 水肥一体化。下同。Note: CK, no fertilization; HF, hole fertilization; WF, integration of water and fertilizer. Same as below.

2.2 生产力表现

从 2018-2022 年, 各施肥处理下楸树林分生产力逐年增加, 施肥措施显著改变了林分生产力 ($P < 0.05$) (图 5)。生长初期 (2018-2019), 各施肥处理下楸树生长较慢。2019-2021 年, HF 和 CK 处理下楸树出现了两年的生长高峰, 2021-2022 年生长速度增加缓慢。2019-2022 年, WF 处理下楸树持续高速增长, 出现了三年的生长高峰。根据 2022 年各施肥处理下楸树林分的生产力表现, 发现三种处理下林分生产力分别达到了 41.75 (WF)、29.88 (HF)、26.91 (CK) $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, WF 处理下林分生产力相较于 HF 和 CK 处理分别提高了 39.7%和 55.1%。总之, 水肥一体化施肥措施下楸树林分生产力得到大幅度提升。

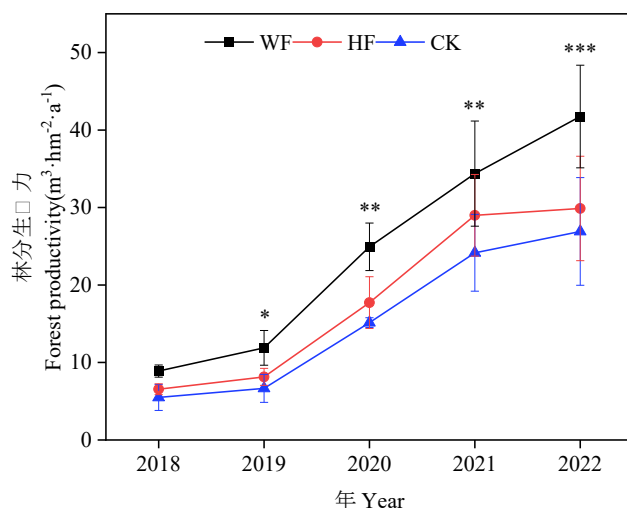


图5 楸树人工林生产力表现

Figure 5 Productivity performance of *C. bungei* plantations

2.3 化学计量特征

2.3.1 叶元素含量变化 不同施肥措施显著改变了叶氮含量（图 6A）和氮磷比（图 6D）。水肥一体化施肥下叶氮含量、氮磷比显著高于穴施和对照处理（ $P < 0.05$ ）。相比于穴施（ $29.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）和对照（ $29.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）林分，水肥一体化（ $31.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）林分叶氮含量增加了 8.3%和 6.5%。其他指标，如：叶磷含量（图 6B）、钾含量（图 6C）、氮钾比（图 6E）以及磷钾比（图 6F）在不同施肥措施间差异均不显著（ $P > 0.05$ ）。

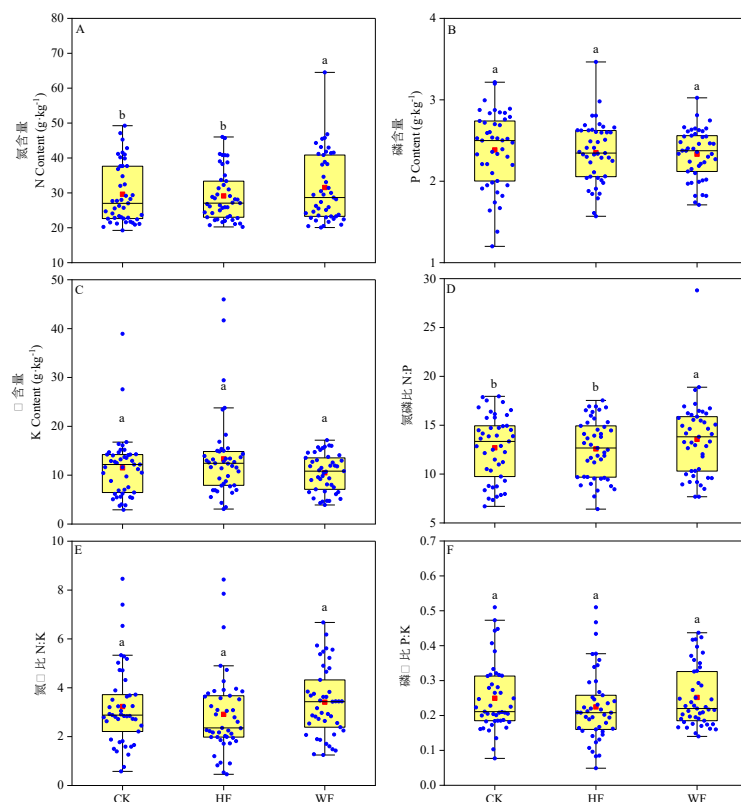


图6 楸树叶元素生态化学计量特征

Figure 6 Stoichiometric characteristics of leaves elements of *C. bungei*

注：不同小写字母表示施肥处理间差异显著 ($P < 0.05$)。A：氮含量；B：磷含量；C：钾含量；D：氮磷比；E：氮钾比；F：磷钾比。下同。Note: Different lowercase letters indicate significant differences between fertilization treatments ($P < 0.05$). A: N content; B: P content; C: K content; D: N:P; E: N:K; F: P:K. Same as below.

2.3.2 枝元素含量变化 不同施肥措施对枝氮、磷、钾含量、氮磷比、氮钾比以及磷钾比均未产生显著的影响 ($P > 0.05$)。其中枝氮含量介于 $11.14\text{--}11.47\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间 (图 7A)，磷含量介于 $1.29\text{--}1.35\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间 (图 7B)，钾含量介于 $6.08\text{--}7.32\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间 (图 7C)，氮磷比介于 $8.90\text{--}9.01$ 之间 (图 7D)，氮钾比介于 $1.77\text{--}1.97$ 之间 (图 7E)，磷钾比介于 $0.20\text{--}0.23$ 之间 (图 7F)。

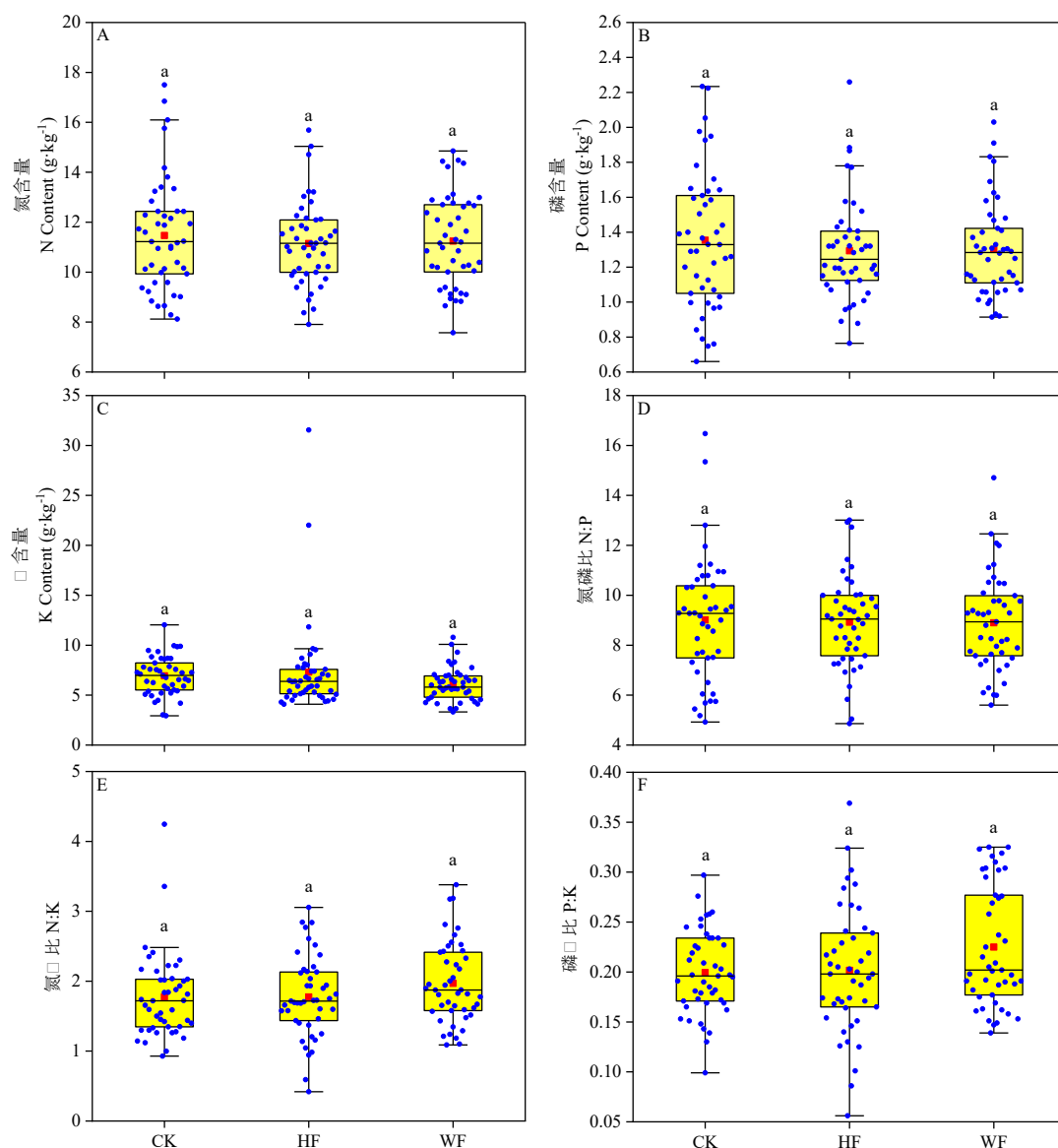


图 7 楸树枝元素生态化学计量特征

Figure 7 Stoichiometric characteristics of branches elements of *C. bungei*

2.3.3 粗根元素含量变化 楸树粗根钾含量在不同施肥措施间差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。施肥提高了粗根钾含量，水肥一体化施肥后，粗根钾含量 ($6.06\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 相较于穴施 ($5.41\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和不施肥 ($5.$

05 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 分别提高了 12.0% 和 20.0% (图 8C)。粗根氮 (图 8A)、磷含量 (图 8B)、氮磷比 (图 8D)、氮钾比 (图 8E) 以及磷钾比 (图 8F) 在不同施肥措施间差异均不显著 ($P > 0.05$)。

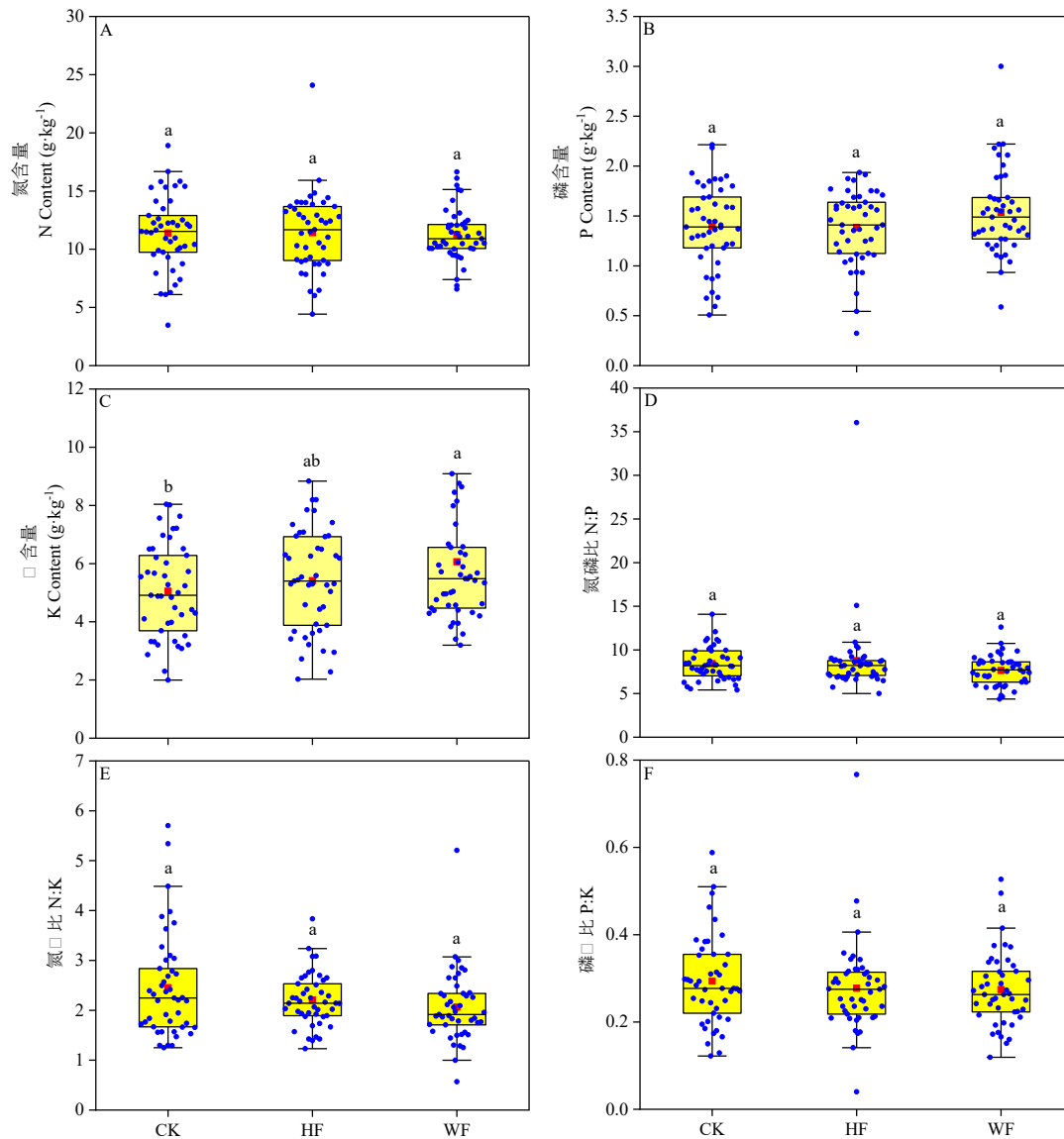


图 8 楸树粗根元素生态化学计量特征

Figure 8 Stoichiometric characteristics of coarse roots elements of *C. bungei*

2.3.4 细根元素含量变化 楸树细根氮含量、钾含量、氮钾比以及磷钾比在不同施肥措施间差异显著 ($P < 0.05$)。施肥提高了细根中的氮含量, 与不施肥 ($16.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 林分相比, 穴施 ($17.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和水肥一体化 ($16.98 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 施肥林分的氮含量分别增加了 7.6% 和 4.6% (图 9A)。穴施林分中钾含量显著高于不施肥和水肥一体化林分 (图 9C), 但此规律在氮钾比 (图 9E) 和磷钾比 (图 9F) 中完全相反。细根磷含量 (图 9B)、氮磷比 (图 9D) 在不同施肥措施间差异均未达到显著水平 ($P > 0.05$)。

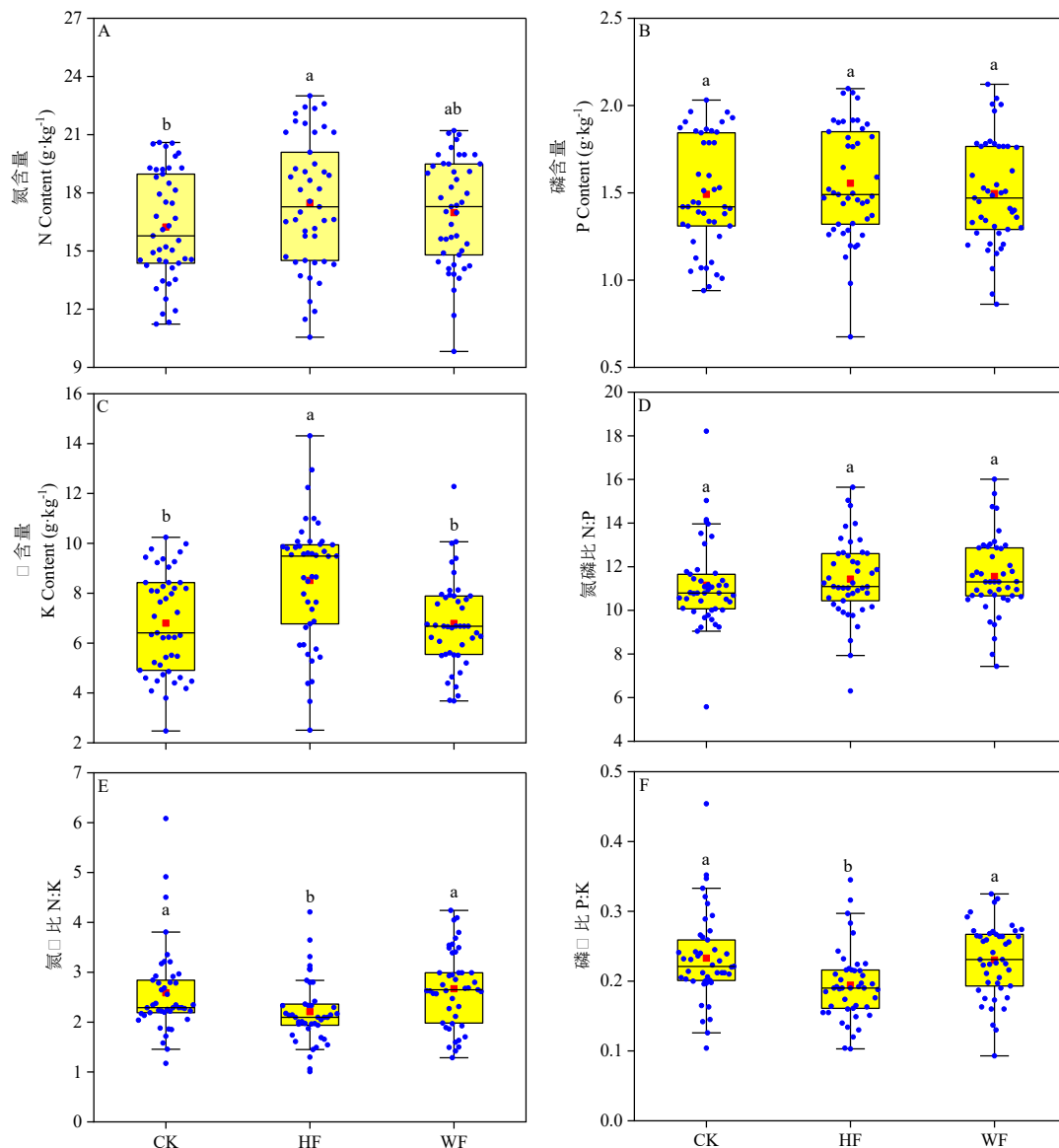


图9 楸树细根元素生态化学计量特征

Figure 9 Stoichiometric characteristics of fine roots elements of *C. bungei*

2.4 器官养分时间动态

从生长初期（5月）到中期（7月），楸树叶氮含量被大量消耗，减少了44.7%。从中期到末期（9月），叶氮含量出现了回升，增加了25.6%（图10A）。从初期-中期-末期，枝、粗根和细根中氮含量呈现“先降后升”的趋势。与初期相比，末期叶、粗根和细根氮含量显著下降（ $P < 0.05$ ），分别降低了30.5%、11.1%和20.0%。

从初期-中期-末期，叶磷含量呈现出逐渐降低的趋势，枝磷含量呈现“先升后降”的趋势，粗根和细根磷含量呈现“先降后升”的趋势（图10B）。与初期相比，末期叶、细根磷含量显著减少（ $P < 0.05$ ），分别减少了18.8%和24.4%。

从初期-中期-末期，叶、枝钾含量表现出“先升后降”的趋势，粗根钾含量表现出逐渐降低的趋势，细根钾含量表现出“先降后升”的趋势（图10C）。相较于初期，末期叶、枝、粗根和细根钾含量表现出显著降低（ $P < 0.05$ ），分别降低了47.3%、21.4%、24.7%和15.1%。

2.5 器官养分含量分配

在楸树器官氮含量分配中,叶中氮含量分配最高(42.1%-44.4%),其次为细根(23.7%-25.3%),枝(15.8%-16.7%)和粗根(15.8%-16.5%)中分配较少(图 11A)。相较于不施肥(43.1%)和穴施(42.1%),水肥一体化(44.4%)林分显著提高了叶氮含量占比。在所有施肥林分中,叶磷含量占比最高,均超过了 35.0%,其他器官磷含量占比介于 19.5%-23.7%之间(图 11B)。楸树叶钾含量占比最高(35.7%-37.5%),其他器官钾含量占比均不超过 25.4%(图 11C)。相较于不施肥(16.9%)和穴施(16.4%)林分,水肥一体化(20.4%)施肥显著提高了粗根钾含量占比。

2.6 单株生长与器官养分间的关系

相关性分析发现,楸树树高生长主要受到叶氮、磷含量的正向影响(图 12A)。当叶氮含量、枝和粗根钾含量增加时,胸径出现明显的增加(图 12B)。此外,单株材积与叶氮含量、枝和粗根钾含量呈现正相关关系(图 12C)。

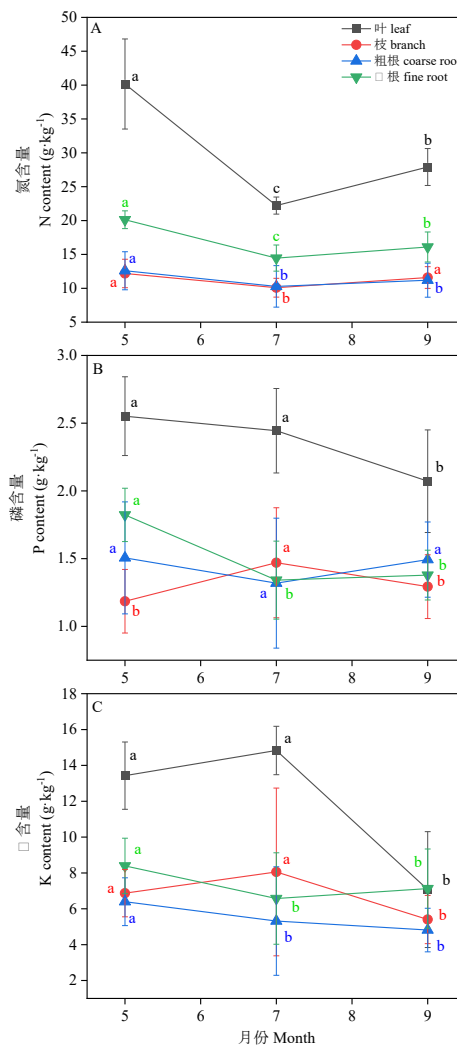


图 10 楸树器官氮 (A)、磷 (B) 和钾 (C) 含量时间动态

Figure 10 Temporal dynamics of N (A), P (B), and K (C) contents of *C. bungei* organs

注: 不同小写字母表示月份间差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different lowercase letters indicate significant differences between months ($P < 0.05$).

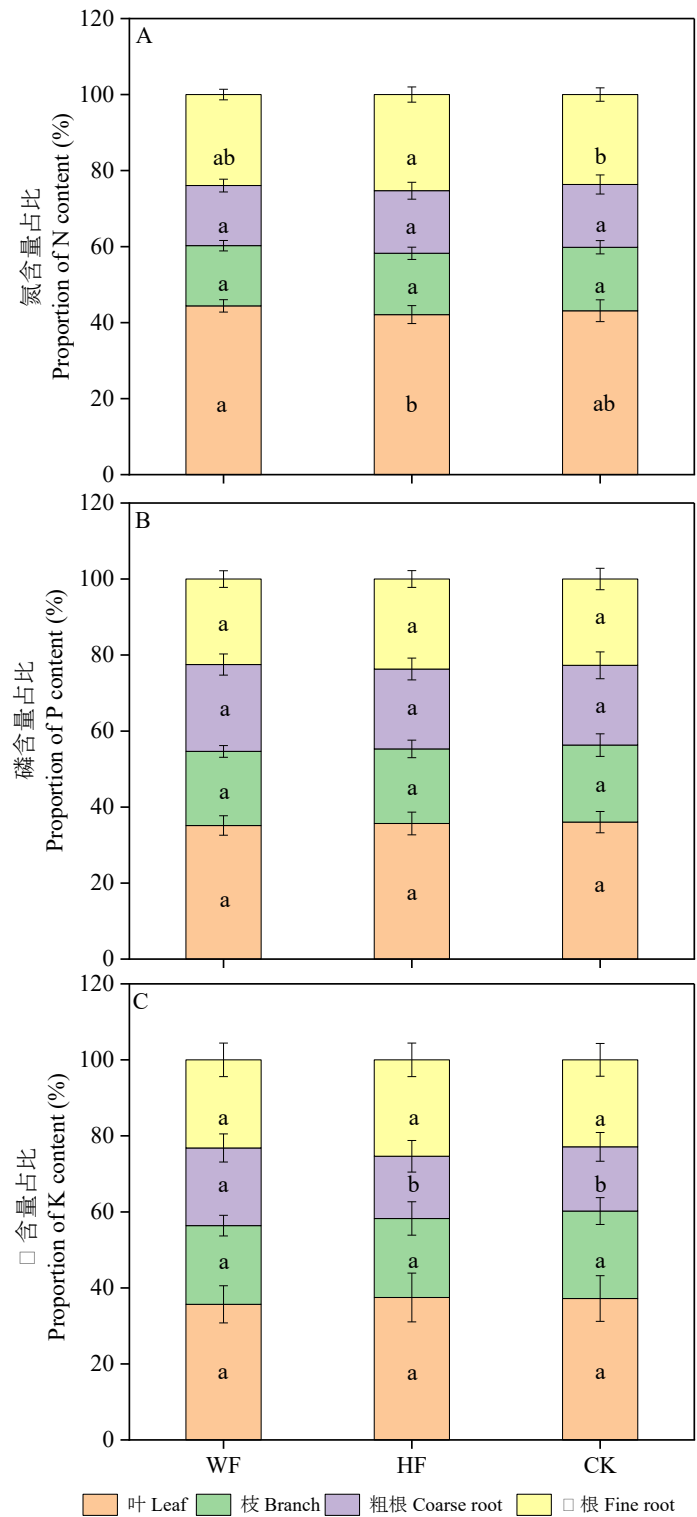


图 11 楸树器官氮 (A)、磷 (B) 和钾 (C) 含量分配比例

Figure 11 Proportion of N (A), P (B), and K (C) contents of *C. bungei* organs
注: 不同小写字母表示施肥处理间差异显著 ($P < 0.05$). Note: Different lowercase letters indicate significant differences between fertilization treatments ($P < 0.05$).

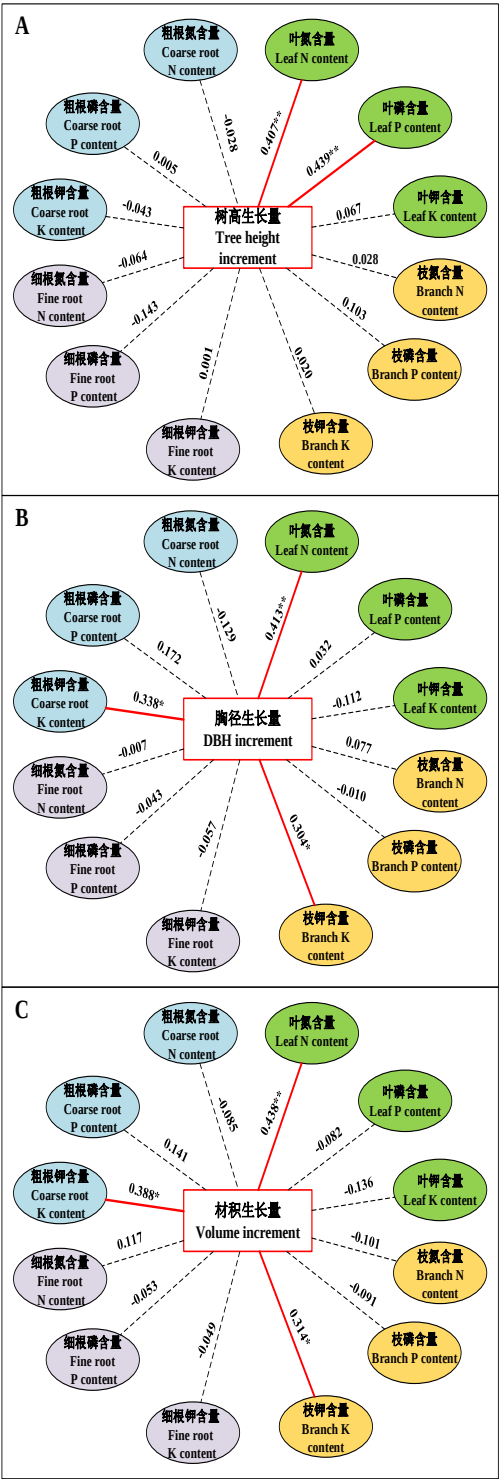


图 12 楸树树高 (A)、胸径 (B) 和材积 (C) 生长量与器官养分间的关系

Figure 12 Relationship between increment of tree height (A), DBH (B), and volume (C) and organ nutrients of *C. bungei*

注: *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$ 。

3 讨论

在楸树生长前期 (2018-2019 年), 由于刚栽幼树需要经历环境气候适应的过程, 故前期楸树生长较缓慢。随着树木胸径的增加, 冠幅逐渐增大, 以及土壤中有效养分输入的增加, 楸树单株材积以及林分蓄积

得到迅速增加。本研究发现,施肥提高了楸树林分蓄积,在两种施肥方式中,发现水肥一体化施肥林分蓄积($112.36 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)相较于穴施林分($90.88 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)提高了23.6%。有研究表明,水溶肥非常便于通过灌溉系统施用,根系吸收快,见效快(张从军和曹广峰,2015;孔庆波等,2016;李军,2017;冯先明等,2018;马富裕等,2019)。此外,杨久廷等(2008)研究发现,滴灌施肥能较好地保持土壤疏松状态,使土壤的孔隙度比漫灌高,通气性能好,不会破坏土壤团粒结构。王巧仙等(2013)研究发现水肥一体化对土壤养分含量和酶活性有显著影响,水肥一体化处理下土壤全氮、全磷、碱解氮、pH值、脲酶含量和磷酸酶活性显著高于普通施肥处理;且全钾、有效磷、速效钾含量高于普通施肥处理。由此可知,在水肥一体化施肥下,楸树根系对土壤养分的吸收效率较高,由于土壤较好的疏松结构以及良好的土壤养分供给,极大地促进了楸树的生长,但该部分土壤数据并未在文中体现,有待进一步考究。

在本研究中,水肥一体化施肥显著提高了楸树叶氮和粗根钾含量。同时,楸树林分蓄积大小与叶氮和粗根钾含量呈现正相关关系。究其原因,林分蓄积量的增加是由施肥后叶片氮和粗根钾含量增多引起的。此外,叶氮含量的提高有助于增强净光合作用,提高有机物质的积累,促进树木生长和生产力提高(魏丽娜等,2021)。粗根钾含量的增多可促进植物体内酶的活化,增强光合作用,促进糖代谢,促进蛋白质合成,增强植物抗旱、抗寒、抗盐碱以及抗病虫害等能力,同时有助于提高树木生长(Joannès *et al.*, 2021; Chambi-Legoas *et al.*, 2023)。

此外,不同施肥措施下楸树叶片氮、磷和钾含量在生长初期浓度较高,其原因是该时期土壤中大量的流动性元素氮、磷和钾含量被植物吸收并且得到了其他部位的转移供给(张彤彤等,2012)。随着叶片快速的生长发育,生物量的不断增加,植物根系吸收营养元素的速率小于叶细胞膨胀的速率,氮、磷和钾含量被稀释(刘广全等,2001; Townsend *et al.*, 2007),使得其含量逐渐下降。到了生长末期,老叶逐渐衰老脱落,将养分回流至其他叶片中,导致叶片中氮含量有所提高(衣宁等,2014)。

经历整个生长季的生长,楸树各器官养分含量出现了一定的损耗。这是因为,一方面,楸树各器官的生长发育、组织分化和呼吸作用都会消耗大量的营养物质。此外,当植物合成叶片、穗部和花粉时,需要大量水分来支撑这些代谢作用,这也是养分消耗的另一重要方面。落花落果会损失大量养分,影响花芽分化和当年养分的积累与贮藏,并影响来年的生长发育。总之,在楸树生长过程中,由于需要支撑干材生长和物质积累,需要消耗树木体内的养分(如氮、磷和钾)来调节植物呼吸和光合生长,这可能是植物的一种生存策略。

楸树幼龄林施肥后材积和蓄积的增加与器官养分含量的增多密切相关。然而,施肥后土壤理化性质、土壤酶活性以及细菌和真菌等微生物的改变势必也会影响到植物的生长(Zeng *et al.*, 2016; He *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2022; Lin *et al.*, 2022)。林下植被多样性的变化以及凋落物本身养分的释放反过来也会作用于土壤养分循环,对树木的发育起到至关重要的作用,在今后的研究中值得重点考虑。

4 结论

经过5年的施肥研究,发现施肥会提高楸树人工幼龄林的生长和材积积累。对比两种施肥措施,从增加林分蓄积和林分生产力角度考虑,水肥一体化施肥技术更具优势。施肥后叶片氮和粗根钾含量的增多,对楸树光合作用的提高具有明显的促进作用,在一定程度上增加了树木的干物质积累。土壤作为重要的碳库,其理化性质、酶活性以及微生物群落结构的变化或许会改变树木的养分循环动态和积累量,在未来的探究中可加以考量。

参 考 文 献

- 庚强. 2005. 高等植物内稳性和生长率机理的研究. 甘肃农业大学.
- (Geng Q. 2005. The study on the homeostasis and growth rate of a higher plant and their mechanism. Gansu Agricultural University. [in Chinese])
- 白晶晶, 吴俊文, 何茜, 等. 2015. 不同配方施肥对楸树幼苗生物量分配及养分利用的影响. 华南农业大学学报, 36 (6): 91-97.
- (Bai J J, Wu J W, He Q, et al. 2015. Effects of different fertilization formulas on *Catalpa bungei* seedling biomass allocation and nutrient use efficiency. Journal of South China Agricultural University, 36 (6): 91-97. [in Chinese])
- 冯先明, 王保明, 彭全, 等. 2018. 我国水溶肥的发展概况与建议. 现代化工, 1: 6-11.
- (Feng X M, Wang B M, Peng Q, et al. 2018. Development situation and suggestions on China's water soluble fertilizer. Modern Chemical Industry, 1: 6-11. [in Chinese])
- 孔庆波, 张青, 栗方亮, 等. 2016. 液态悬浮大量元素水溶肥生产技术. 福建农业科技, 8: 35-37.
- (Kong Q B, Zhang Q, Li F L, et al. 2016. Production technology of liquid macro element-suspension of water soluble fertilizer. Fujian Agricultural Science and Technology, 8: 35-37. [in Chinese])
- 李军. 2017. 水溶肥在我国农业生产中的应用. 中国园艺文摘, 2: 223-224.
- (Li J. 2017. Application of water-soluble fertilizer in agricultural production in China. Chinese Horticulture Abstract, 2: 223-224. [in Chinese])
- 刘广全, 赵士洞, 王浩, 等. 2001. 锐齿栎林非同化器官营养元素含量的分布. 生态学报, 21: 422-429.
- (Liu G Q, Zhao S D, Wang H, et al. 2001. Nutrient distribution for non-photosynthetic organs in the sharp-tooth oak stands. Acta Ecologica Sinica, 21: 422-429. [in Chinese])
- 鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社.
- (Lu R K. 2000. Soil Agrochemical Analysis Methods [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. [in Chinese])
- 马富裕, 刘扬, 崔静, 等. 2019. 水肥一体化研究进展. 新疆农业科学, 56(1): 183-192.
- (Ma F Y, Liu Y, Cui J, et al. 2019. Review on the research progress of water and fertilizer integration. Xinjiang Agricultural Sciences, 56(1): 183-192. [in Chinese])
- 邱权, 李吉跃, 王军辉, 等. 2015. 水肥耦合效应对楸树苗木叶片 $\delta^{13}C$ 的影响. 西北植物学报, 35 (11): 2290-2298.
- (Qiu Q, Li J Y, Wang J H, et al. 2015. Coupling effects of soil water and fertilizer application on leaf $\delta^{13}C$ of *Catalpa bungei* seedlings. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 35 (11): 2290-2298. [in Chinese])
- 邱权, 李吉跃, 王军辉, 等. 2016. 水肥耦合效应对楸树苗期叶片净光合速率和 SPAD 值的影响. 生态学报, 36 (11): 3459-3468.
- (Qiu Q, Li J Y, Wang J H, et al. 2016. Interactive effects of soil water and fertilizer application on leaf net photosynthetic rate and SPAD readings of *Catalpa bungei* seedlings. Acta Ecologica Sinica, 36 (11): 3459-3468. [in Chinese])
- 邱权. 2016. 楸树无性系苗期水肥光互作效应研究. 华南农业大学.
- (Qiu Q. 2016. Interactive effects of light with water and fertilizer on the growth and physiological characteristics of *Catalpa bungei* clones seedlings. South China Agricultural University. [in Chinese])
- 王力朋, 晏紫伊, 李吉跃, 等. 2012. 指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响. 生态学报, 32 (23): 7452-7462.
- (Wang L P, Yan Z Y, Li J Y, et al. 2012. Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of *Catalpa bungei* clones. Acta Ecologica Sinica, 32 (23): 7452-7462. [in Chinese])
- 王力朋, 晏紫伊, 李吉跃, 等. 2013. 氮素指数施肥对 3 个楸树无性系光合特性的影响. 林业科学研究, 26 (1): 46-51.
- (Wang L P, Yan Z Y, Li J Y, et al. 2013. Effects of nitrogen exponential fertilization on photosynthetic characteristics of three *Catalpa bungei* clones. Forest Research, 26 (1): 46-51. [in Chinese])
- 王巧仙, 张江红, 张玉星. 2013. 水肥耦合对梨园土壤养分和果实品质的影响. 中国果树, 4: 18-23.
- (Wang Q X, Zhang J H, Zhang Y X. 2013. Effect of coupling of water and fertilizer on soil nutrients and fruit quality of pear orchard. China Fruits, 4: 18-23. [in Chinese])
- 王祥, 白晶晶, 何茜, 等. 2021. 氮磷钾配方施肥对楸树苗期生长及养分利用的影响. 林业与环境科学, 37 (3): 40-46.
- (Wang X, Bai J J, He Q, et al. 2021. Effects of different formulated fertilization on the growth and physiological cha

- racteristics of *Catalpa bungei* seedling. *Forestry and Environmental Science*, 37 (3): 40-46. [in Chinese])
- 魏丽娜, 周冠军, 孙海龙, 等. 2021. 氮磷施肥对水曲柳叶片光合特征及体内非结构性碳的影响. *森林工程*, 37(5): 20-27.
- (Wei L N, Zhou G J, Sun H L, et al. 2021. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on photosynthetic characteristics and non-structural carbohydrate of *Fraxinus mandshurica*. *Forest Engineering*, 37(5): 20-27. [in Chinese])
- 吴俊文, 何茜, 李吉跃, 等. 2015. 不同氮素指数施肥下楸树无性系叶片发育动态变化. *北京林业大学学报*, 37 (7): 19-28.
- (Wu J W, He Q, Li J Y, et al. 2015. Dynamic changes of foliage growth of *Catalpa bungei* clones under different nitrogen exponential fertilizations. *Journal of Beijing Forestry University*, 37 (7): 19-28. [in Chinese])
- 肖传法. 2000. 木材·立木材积速算表[M]. 河南科学技术出版社.
- (Xiao C F. 2000. Quick Calculation Table for Timber and Standing Timber Volume [M]. Henan Science and Technology Press. [in Chinese])
- 杨久廷, 肖继兵, 辛宗绪, 等. 2008. 日光温室番茄滴灌与漫灌对土壤理化性质的影响. *辽宁农业科学*, 3: 77-78.
- (Yang J T, Xiao J B, Xin Z X, et al. 2008. Effects of drip and furrow irrigation on soil physical and chemical properties of tomato in greenhouse. *Liaoning Agricultural Sciences*, 3: 77-78. [in Chinese])
- 衣宁, 赵文倩, 刘倩, 等. 2014. 油松新生叶与老叶光合功能的比较. *林业科技*, 39(6):10-14.
- (Yi N, Zhao W Q, Liu Q, et al. 2014. Comparison on photosynthetic capacity of new leaves and older leaves of *Pinus tabulaeformis*. *Forestry Science and Technology*, 39(6):10-14. [in Chinese])
- 张从军, 曹广峰. 2015. 含海藻酸水溶肥生产技术. *化肥工业*, 5: 18-19, 24.
- (Zhang C J, Cao G F. 2015. Production technology of water soluble fertilizer containing alginic acid. *Journal of the Chemical Fertilizer Industry*, 5: 18-19, 24. [in Chinese])
- 张彤彤, 徐福利, 汪有科, 等. 2012. 施用氮、磷、钾对密植梨枣生长与叶片养分季节动态的影响. *植物营养与肥料学报*, 18(1):241-248.
- (Zhang T T, Xu F L, Wang Y K, et al. 2012. Effects of fertilization on growth and seasonal dynamic of leaf nutrients of close planting pear-jujube trees. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 18(1):241-248. [in Chinese])
- Bhat R, Sujatha S, Balasimha D. 2007. Impact of drip fertigation on productivity of arecanut (*Areca catechu* L.). *Agricultural Water Management*, 90: 101-111.
- Chambi-Legoas R, Tomazello-Filho M, Laclau J P, et al. 2023. Potassium fertilization enhances xylem plasticity and growth recovery of *Eucalyptus grandis* trees in response to drastic changes in water availability. *Forest Ecology and Management*, 528:120656.
- Chen Y, Jia Y, Cui N, et al. 2018. Effects of integrated management of water and fertilizer on *Citrus* Photosyn_x0002thesis, yield and water use efficiency. *Journal of Irrigation and Drainage*, 37: 50-58.
- He D, Shen W, Eberwein J, et al. 2017. Diversity and co-occurrence network of soil fungi are more responsive than those of bacteria to shifts in precipitation seasonality in a subtropical forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 115: 499-510.
- He Y, Xi B, Li G, et al. 2021. Influence of drip irrigation, nitrogen fertigation, and precipitation on soil water and nitrogen distribution, tree seasonal growth and nitrogen uptake in young triploid poplar (*Populus tomentosa*) plantations. *Agricultural Water Management*, 243:106460.
- Hu A, Dong X, Wei G, et al. 2010. Coupling effects of water and fertilizer on yield of Chinese jujube under drip irrigation in the arid area. *Journal of Irrigation and Drainage*, 29: 60-63.
- Joannès G, Verónica A, Bruno B, et al. 2021. Increased hydraulic constraints in *Eucalyptus* plantations fertilized with potassium. *Plant, Cell and Environment*, 44(9):2938-2950.
- Koerselman W, Meuleman A F. 1996. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, 33(6):1441-1450.
- Kumar D S, Sharma R, Brar A S. 2021. Optimising drip irrigation and fertigation schedules for higher crop and water productivity of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Irrigation Science*, 39: 535-548.
- Li J, Li S, Huang X, et al. 2022. Plant diversity and soil properties regulate the microbial community of monsoon evergreen broad-leaved forest under different intensities of woodland use. *Science of The Total Environment*, 821: 153565.
- Lin Y, Kong J, Yang L, et al. 2022. Soil bacterial and fungal community responses to throughfall reduction in a *Eucalyptus* plantation in Southern China. *Forests*, 13: 37.
- Lu J, Hu T, Geng C, et al. 2021. Response of yield, yield components and water-nitrogen use efficiency of winter wheat to different drip fertigation regimes in Northwest China. *Agricultural Water Management*, 255:107034.
- Shi H, Ma W, Song J, et al. 2017. Physiological and transcriptional responses of *Catalpa bungei* to drought stress un

der sufficient-and deficient-nitrogen conditions. *Tree Physiology*, 37: 1457-1468.

Tessier J T, Raynal D J. 2003. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. *Journal of Applied Ecology*, 40(3):523-534.

Townsend A R, Cleveland C C, Asner G P, et al. 2007. Controls over foliar N:P ratios in tropical rain forests. *Ecology*, 88:107-118.

Xi B, Wang Y, Jia L. 2017. Effects of nitrogen application rate and frequency on biomass accumulation and nitrogen uptake of *Populus tomentosa* under drip fertigation. *Scientia Silvae Sinicae*, 53: 63-73.

Yan X, Dai T, Zhao D, et al. 2016. Combined surface drip irrigation and fertigation significantly increase biomass and carbon storage in a *Populus × euramericana* cv. *guariento* plantation. *Journal of Forest Research*, 21: 280-290.

Zeng J, Liu X, Song L, et al. 2016. Nitrogen fertilization directly affects soil bacterial diversity and indirectly affects bacterial community composition. *Soil Biology and Biochemistry*, 92: 41-49.

Zhang Y, Lan Z, Mi H, et al. 2019. The growth and photosynthetic characteristics of *Cinnamomum longepaniculatum* 'Longnao Xiangzhang' seedling under different N, P and K level by drip fertilization. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 43: 39-45.

Zhao Y, Lv H, Qasim W, et al. 2021. Drip fertigation with straw incorporation significantly reduces N₂O emission and N leaching while maintaining high vegetable yields in solar greenhouse production. *Environment Pollution*, 273:116521.