北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

染色体加倍对河北杨生长生理及材质性状的影响

解云云 贺鹏 谷志善 张平冬

Effects of chromosome doubling on growth, physiological traits and wood properties of *Populus hopeiensis*

Xie Yunyun, He Peng, Gu Zhishan, Zhang Pingdong

引用本文:
解云云, 贺鹏, 谷志善, 张平冬. 染色体加倍对河北杨生长生理及材质性状的影响[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(6):174–182. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260007
Xie Yunyun, He Peng, Gu Zhishan, Zhang Pingdong. Effects of chromosome doubling on growth, physiological traits and wood properties of *Populus hopeiensis*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(6):174–182. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260007

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260007

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

低温诱导毛白杨花粉染色体加倍选育三倍体
Pollen chromosome doubling induced by low temperature to produce triploid in *Populus tomentosa*
北京林业大学学报, 2025, 47(5): 26–36. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250018

低温诱导毛白杨花粉染色体加倍技术体系的优化
Technical systemic optimization of pollen chromosome doubling induced by low temperature in *Populus tomentosa*
北京林业大学学报, 2025, 47(9): 80–89. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250158

基于生长与木材性状的红松优良种源评价选择
Evaluation and selection of excellent provenances of *Pinus koraiensis* based on growth and wood properties
北京林业大学学报, 2022, 44(3): 12–23. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210247

马尾松无性系生长性状基因型与环境互作效应初步研究
Preliminary study on the interaction effect between genotypes and environment of growth traits in *Pinus massoniana* clones
北京林业大学学报, 2023, 45(5): 47–56. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210312

紫雨桦杂交子代苗期生长及叶色性状的变异
Variation of growth and leaf color traits of *Betula pendula* ‘Purple Rain’ hybrid offsprings at seedling stage
北京林业大学学报, 2022, 44(9): 62–71. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210133

美洲黑杨表型和生理性状多样性及群体结构分析
Phenotypic and physiological trait diversity and population structure of *Populus deltoides*
北京林业大学学报, 2021, 43(6): 1–12. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200231

DOI:10.12171/j.1000−1522.20260007

染色体加倍对河北杨生长生理及材质性状的影响

解云云[1,2]　贺　鹏[3]　谷志善[4]　张平冬[1,2]

（1. 北京林业大学林木资源高效生产全国重点实验室，北京 100083；2. 北京林业大学林木育种与生态修复国家工程研究中心，北京 100083；
3. 朔州市朔城区林木种苗培育中心，山西 朔州 036002；4. 威县林木良种繁育基地，河北 邢台 054700）

摘要:【目的】比较河北杨二倍体及其同源四倍体在生长、生理和材质性状上的差异，揭示染色体加倍对上述性状的影响规律。**【方法】**以 1 年生不同基因型（BT1、BT3、BT8）的河北杨二倍体及其同源四倍体为研究对象，测定苗高、地径、节间距及叶片性状；利用光合仪测定净光合速率、蒸腾速率等光合生理参数；采用两步酸水解法结合高效液相色谱与紫外−可见光谱法，测定苗木茎秆的木质素与纤维素含量。**【结果】**（1）四倍体的苗高和地径生长量均显著低于二倍体，而节间距显著高于二倍体。四倍体的叶片长、宽、面积及厚度均大于二倍体，但叶片长宽比低于二倍体。（2）四倍体的净光合速率高于相应二倍体植株，而蒸腾速率、气孔导度及胞间 CO_2 浓度均低于相应二倍体植株。（3）四倍体的木质素含量低于相应二倍体，而纤维素含量则高于相应二倍体。（4）倍性水平对河北杨 1 年生苗木的苗高、地径、节间距、叶片长、叶片宽、叶片长宽比、叶片面积、叶片厚度、木质素含量及纤维素含量均具有极显著影响（$P < 0.001$）。**【结论】**染色体加倍显著影响河北杨的生长、生理与材质性状。本研究结果对于深化理解基因剂量效应对林木生长发育和材质形成的影响具有重要意义。

关键词：河北杨；染色体加倍；生长性状；生理性状；材质性状

中图分类号：S792.11　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)06−0174−09

引文格式：解云云，贺鹏，谷志善，等. 染色体加倍对河北杨生长生理及材质性状的影响［J］. 北京林业大学学报，2026，48(6)：174−182. Xie Yunyun, He Peng, Gu Zhishan, et al. Effects of chromosome doubling on growth, physiological traits and wood properties of *Populus hopeiensis*［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(6): 174−182.

Effects of chromosome doubling on growth, physiological traits and wood properties of *Populus hopeiensis*

Xie Yunyun[1,2]　He Peng[3]　Gu Zhishan[4]　Zhang Pingdong[1,2]

(1. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Tree Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. National Engineering Research Center of Tree Breeding and Ecological Restoration,
Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
3. Shuocheng District Forest Tree Seedling Cultivation Center, Shuozhou 036002, Shanxi, China;
4. Weixian County Improved Forest Tree Variety Breeding Base, Xingtai 054700, Hebei, China)

Abstract: ［**Objective**］ To investigate the regulatory effects of chromosome doubling on growth, physiological traits, and wood properties of *Populus hopeiensis*, diploids and their autotetraploids were compared. ［**Method**］ Taking one-year-old diploids and their corresponding autotetraploids derived from different genotypes (BT1, BT3, BT8) as the research objects, we measured the plant height, basal ground diameter, internode length and leaf traits. Photosynthetic parameters such as net photosynthetic rate and transpiration rate were determined using a photosynthesis analyzer. The lignin and cellulose content of

收稿日期: 2026−01−08　**修回日期:** 2026−05−23

基金项目: 国家重点研发计划（2021YFD220120503）。

第一作者: 解云云。主要研究方向：林木细胞遗传与细胞工程。Email：yunyun77@bjfu.edu.cn　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学生物科学与技术学院。

责任作者: 张平冬，教授，博士生导师。主要研究方向：林木遗传改良。Email：zhangpd@bjfu.edu.cn　地址：同上。

本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

seedling stems were estimated via the two-step acid hydrolysis method combined with high-performance liquid chromatography and ultraviolet-visible spectroscopy. [**Result**] (1) The plant height and basal ground diameter of the autotetraploids were lower than those of the diploids, while the internode length of the autotetraploids was higher than those of the diploids. The leaf length, leaf width, leaf area and leaf thickness of the autotetraploids were higher than those of the diploids, while the leaf length-width ratio of the autotetraploids was lower than that of the diploids. (2) The net photosynthetic rate of the autotetraploids was higher than that of their corresponding diploids, while the transpiration rate, stomatal conductance and intercellular CO_2 concentration of the autotetraploids were lower than those of the diploids. (3) The lignin content of the autotetraploids was lower than that of their corresponding diploids, while the cellulose content of the autotetraploids was higher than that of the diploids. (4) Ploidy level had an extremely significant effect on the plant height, basal ground diameter, internode length, leaf length, leaf width, leaf length-width ratio, leaf area, leaf thickness, lignin content and cellulose content of one-year-old *Populus hopeiensis* seedlings ($P < 0.001$). [**Conclusion**] Chromosome doubling has significant effects on the growth, physiological traits, and wood properties of the forest tree *Populus hopeiensis*. The results play an important role in the recognition of gene dosage effects on the development and timber formation.

Key words: *Populus hopeiensis*; chromosome doubling; growth trait; physiological trait; wood property

多倍体育种是植物遗传改良的有效途径之一。经染色体加倍诱导产生的多倍体，其细胞通常表现为核体积增大、基因剂量效应增强及遗传缓冲能力提高等特征；在个体水平上，则表现出器官增大、生物量增加及抗逆性增强等优势[1]。例如，拟南芥（*Arabidopsis thaliana*）四倍体的叶片面积与细胞体积显著大于二倍体[2]；玉米（*Zea mays*）三倍体的生长势明显优于二倍体[3−4]；相较于二倍体，四倍体苜蓿（*Medicago sativa*）不仅苗高更高，且具有更大的生物量和细胞体积[5]；响叶杨（*Populus adenopoda*）三倍体的气孔大小、叶片面积、光合速率及生长素含量等指标均显著高于同一杂交组合的二倍体植株[6]；滇杨（*Populus yunnanensis*）多倍体植株的叶表皮气孔增大，叶片叶绿素含量约为二倍体的 1.5 倍[7]。

河北杨（*Populus hopeiensis*）隶属于杨柳科（Salicaceae）杨属（*Populus*）白杨派（Sect. *Leuce*），是广泛分布于我国华北、西北地区且极具生态与经济价值的乡土树种[8]。该树种树干通直，侧枝纤细且分布均匀，木材柔韧、材质优良，易于加工利用。河北杨抗逆性突出，不仅耐干旱、瘠薄，对光肩星天牛（*Anoplophora glabripennis*）具有较强抗性，还能适应强光照的沙漠环境及高寒多风区域[9]。前期，北京林业大学杨树多倍体育种团队以不同基因型的河北杨离体叶片为材料，在建立叶片离体不定芽诱导技术体系的基础上，开展了四倍体诱导研究，获得 136 株不同基因型的四倍体植株[10]。然而，关于染色体加倍对河北杨生长、光合及材质性状影响规律的研究尚未见报道。

本研究以人工诱导获得的河北杨同源四倍体为试验材料，测定其苗高、地径、节间距、净光合速率、纤维素含量及木质素含量等生长、生理和材质性状指标，分析染色体加倍对上述性状的影响，旨在揭示染色体加倍对河北杨营养生长、光合性能及材质性状的影响规律。研究结果对于深化基因剂量效应对林木生长发育和材质形成影响的认识，具有重要的理论意义与实践价值。

1　材料与方法

1.1　试验材料

本研究以北京林业大学杨树多倍体诱导实验室保存的 1 年生不同基因型河北杨（BT1、BT3 和 BT8）二倍体及其诱导获得的同源四倍体为试验材料。将二倍体和四倍体组培苗栽植于盛有混合育苗基质（$V_{草炭土}$∶$V_{珍珠岩}$∶$V_{蛭石}$ = 2∶1∶1）的塑料盆中，置于北京林业大学植物科学中心温室培养。每个基因型的二倍体和四倍体苗木各选取 6 ~ 8 株。

1.2　研究方法

1.2.1　生长指标测定

2025 年 6 月，当河北杨基因型 BT1、BT3、BT8 的二倍体及其同源四倍体温室盆栽苗木生长满 1 年时，使用塔尺测定苗高，利用电子游标卡尺测定地径及节间距。同时，采集不同基因型二倍体和四倍体植株第 7 叶位的叶片，获取高清图像后，借助 Image J 软件测定叶片长宽比和叶片面积等参数。

避开主叶脉区域，切取规格为 5 mm × 5 mm 的叶块，迅速置于 FAA 固定液（$V_{福尔马林}$∶$V_{乙酸}$∶$V_{乙醇}$ = 1∶1∶18）中，于 4 ℃ 条件下固定过夜。随后采用常规石蜡切片技术制备切片，每个样品制作 5 个切片，并

利用番红−固绿双重染色法进行染色。将切片样本置于 Olympus BX51 型光学显微镜下观察，随机选取 3 个不重叠的视野进行图像采集，并利用 Image J 软件测量叶片厚度。

1.2.2 光合生理指标测定

利用 LI-6400 便携式光合仪，于上午 8：30—11：30 对河北杨 BT1、BT3、BT8 这 3 个基因型的二倍体与同源四倍体植株第 7 叶位的成熟功能叶片进行光合测定。测定前，将仪器置于测定环境中预热 30 min 以确保性能稳定；采用 LED 红蓝复合光源，设定关键参数如下：光量子通量密度（photosynthetic photon flux density，PPFD）1 400 μmol/（m^2·s），相对湿度 60%～65%，气流速率 500 μmol/s，参考 CO_2 浓度 400 μmol/mol。测定过程中记录的核心光合参数包括净光合速率、胞间 CO_2 浓度、气孔导度及蒸腾速率。试验重复 3 次，每次重复 1 株。

1.2.3 纤维素与木质素含量测定

待冬季河北杨不同基因型（BT1、BT3 和 BT8）的二倍体与同源四倍体苗木落叶后，每个基因型的二倍体和同源四倍体苗木各取 3 株，剥离皮部后置于 105 ℃ 烘箱中烘干至质量恒定。然后用粉碎机将苗木茎秆粉碎，经 40～60 目筛过筛后收集木粉，采用美国化学能源协会[11]的方法测定纤维素与木质素含量。该方法基于两步酸水解法，将生物质中的结构性多糖水解为单糖，并分别通过高效液相色谱（HPLC）和紫外−可见光谱法对碳水化合物和木质素进行定量分析。纤维素含量计算公式如下。

$$C_q = \frac{0.90CV \times 10^{-3}}{m} \times 100\%$$

式中：C_q 为纤维素含量；C 为游离葡萄糖单体的浓度；V 为生物质样品经过两步酸水解后所获得的全部可过滤液体的总体积；m 为完全不含水分和其他挥发性物质的固体物质干质量。

木质素总量为酸不溶木质素与酸溶木质素之和。

1.2.4 数据统计分析

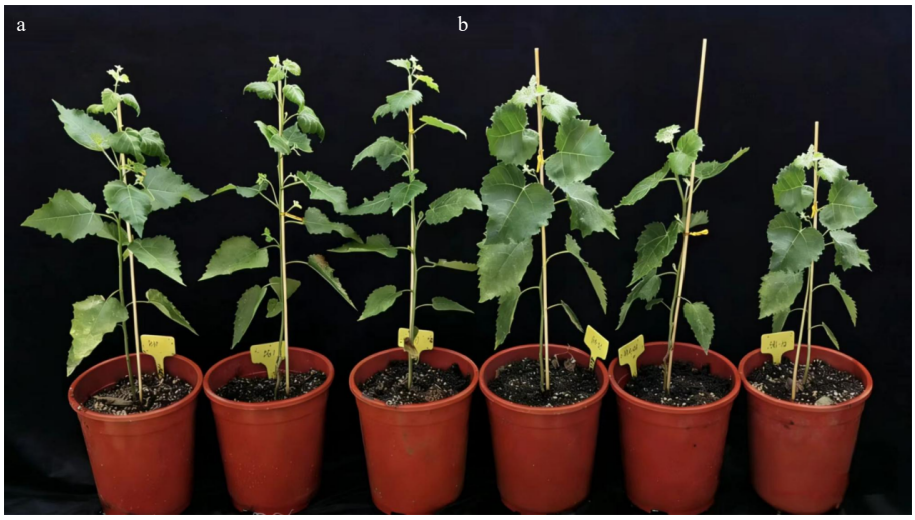
采用 Excel 软件对所有测定数据进行初步整理与汇总，进一步利用 IBM SPSS Statistics 27 软件完成不同基因型与倍性水平下各性状数据的方差分析和多重比较。差异显著性水平设定为 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$。对于纤维素及木质素含量等百分比数据，在进行差异显著性分析前需进行反正弦（Arcsin）变换。图表绘制及部分图像分析借助 Image J 软件完成。

2 结果与分析

2.1 染色体加倍对河北杨生长和叶片性状的影响

河北杨无性系 BT1、BT3 和 BT8 的二倍体（图 1a）及其同源四倍体（图 1b）在苗高、地径和节间距方面的分析结果见图 2。多重比较结果（图 2a～c）表明，各基因型四倍体的苗高与地径均显著低于相应二倍体（$P < 0.05$），而节间距则显著高于相应二倍体（$P < 0.05$）。其中，BT3 二倍体苗高最高，为 240.67 cm；BT8 四倍体苗高最低，为 76.12 cm（图 2a）。BT1 二倍体地径最大，为 19.68 mm；BT8 四倍体地径最小，为 8.87 mm（图 2b）。BT1 四倍体节间距最大，为 3.73 cm；BT3 二倍体节间距最小，为 2.20 cm（图 2c）。

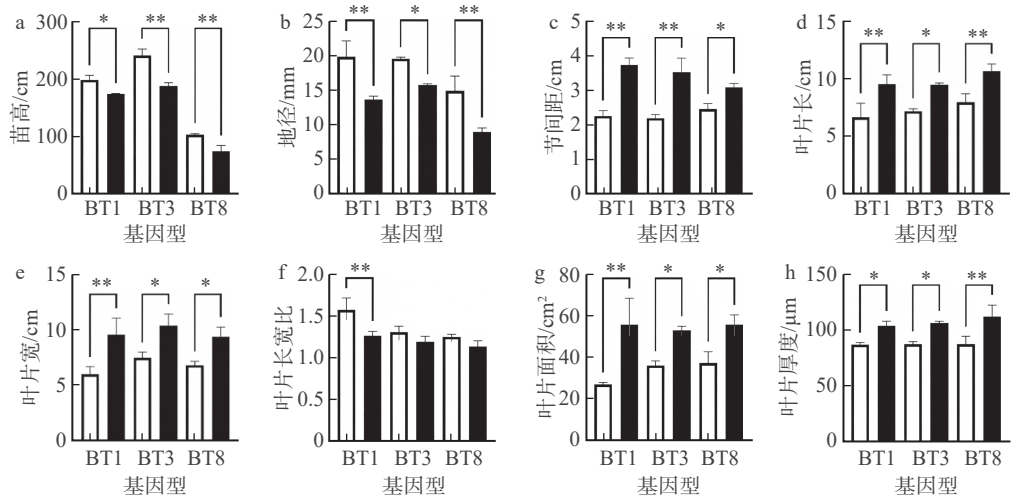
河北杨不同二倍体与四倍体苗高、地径及节间距的方差分析结果（表 1）表明，倍性水平对河北杨 1 年生苗木的苗高（$P < 0.001$）、地径（$P < 0.001$）及节间距（$P < 0.001$）均具有极显著影响；基因型仅对河



a. 二倍体植株；b. 四倍体植株。a、b 图中，从左至右依次为无性系 BT1、BT3、BT8。

图 1 河北杨二倍体与四倍体植株的表型差异

Fig. 1 Phenotypic differences between diploid and tetraploid plants of *P. hopeiensis*



*表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著；**表示在 $P < 0.01$ 水平差异显著。空心柱表示二倍体，黑实柱表示相应四倍体。下同。

图 2　染色体加倍对生长及叶片性状的影响

Fig. 2　Effects of chromosome doubling on the growth and leaf traits of *P. hopeiensis*

北杨 1 年生苗木的苗高（$P < 0.001$）和地径（$P < 0.001$）具有极显著影响；基因型与倍性水平的交互效应对河北杨 1 年生苗木的苗高（$P = 0.008$）具有极显著影响，对节间距（$P = 0.012$）具有显著影响。

河北杨无性系 BT1、BT3 和 BT8 二倍体及其同源四倍体的叶片长、叶片宽、叶片长宽比、叶片面积（图 3）及叶片厚度（图 4）的分析结果见图 2。由图 2d ~ h 可知，各基因型四倍体叶片长、叶片宽、叶片面积及叶片厚度均高于相应二倍体植株，而叶片长宽比低于相应二倍体。多重比较分析结果表明（图 2d ~ h），二倍体植株的叶片长、叶片宽均显著低于其同源四倍体植株（$P < 0.05$），BT1 二倍体的叶片长宽比显著高于其同源四倍体（$P < 0.001$），BT1、BT3 和 BT8 四倍体叶片面积与叶片厚度分别显著高于相应二倍体植株（$P < 0.05$）。其中，BT8 四倍体叶片长最长，为 10.70 cm；BT1 二倍体叶片长最短，为 6.70 cm。BT3 四倍体叶片宽最大，为 10.43 cm；BT1 二倍体叶片宽最小，为 6.00 cm。BT1 二倍体叶片长宽比最大，为 1.74；BT8 四倍体叶片长宽比最小，为 1.20。BT1 四倍体叶片面积最大，为 55.77 cm^2；BT1 二倍体叶片面积最小，为 27.16 cm^2；BT8 四倍体叶片厚度最大，为 111.67 μm；BT8 二倍体叶片厚度最小，为 86.90 μm。

方差分析结果（表 1）表明，倍性水平对河北杨 1 年生苗木的叶片长、叶片宽、叶片长宽比、叶片面积及叶片厚度均具有极显著影响（$P < 0.001$）；基因型对河北杨 1 年生苗木的叶片长宽比具有极显著影响（$P < 0.001$），对叶片长具有显著影响（$P = 0.028$）。基因型与倍性水平的交互效应对河北杨 1 年生苗木的叶片长、叶片宽、叶片长宽比、叶片面积及叶片厚度的影响均不显著（$P > 0.05$）。

2.2　染色体加倍对河北杨光合生理特性的影响

河北杨无性系 BT1、BT3 和 BT8 的二倍体及其同源四倍体的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度及胞间 CO_2 浓度分析结果见图 5。总体而言，各无性系四倍体植株的净光合速率高于相应二倍体植株，而蒸腾速率、气孔导度及胞间 CO_2 浓度均低于相应二倍体植株。多重比较分析表明（图 5a ~ d），二倍体植株的蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度均显著高于其同源四倍体（$P < 0.05$），BT1 和 BT3 的净光合速率则显著低于其同源四倍体（$P < 0.05$）。其中，BT3 四倍体的净光合速率最高，为 35.41 μmol/(m^2·s)；BT1 二倍体的净光合速率最低，仅为 19.08 μmol/(m^2·s)（图 5a）。BT3 二倍体的蒸腾速率最高，为 10.43 mmol/(m^2·s)；BT8 四倍体的蒸腾速率最低，仅为 6.57 mmol/(m^2·s)（图 5b）。BT3 二倍体的气孔导度最高，为 4 072.17 mmol/(m^2·s)；BT8 四倍体的气孔导度最低，仅为 513.73 mmol/(m^2·s)（图 5c）。BT3 二倍体的胞间 CO_2 浓度最高，为 816.80 μmol/mol；BT1 四倍体的胞间 CO_2 浓度最低，为 639.40 μmol/mol（图 5d）。

方差分析结果（表 2）表明，倍性水平仅对河北杨 1 年生苗木的净光合速率（$P = 0.019$）具有显著影响。基因型对河北杨 1 年生苗木的净光合速率（$P = 0.045$）及蒸腾速率（$P = 0.015$）具有显著影响，对气孔导度（$P < 0.001$）及胞间 CO_2 浓度（$P = 0.003$）具有极显著影响；基因型与倍性水平的交互效应对河北杨 1 年生苗木的净光合速率（$P = 0.714$）、蒸腾速率（$P = 0.338$）、气孔导度（$P = 0.323$）及胞间 CO_2 浓度（$P = 0.242$）的影响均不显著。

2.3　染色体加倍对河北杨材质性状的影响

河北杨无性系 BT1、BT3 和 BT8 的二倍体及其同源四倍体的木质素与纤维素含量分析结果如图 6

表 1 染色体加倍对河北杨生长及叶片性状影响方差分析

Tab. 1 Analysis of variance on growth and leaf traits of *P. hopeiensis*

性状	变异来源	df	均方MS	*F*	*P*
苗高	基因型	2	25 545.722	517.819	0.001
	倍性水平	1	5 442.722	110.325	0.001
	基因型 × 倍性	2	367.056	7.440	0.008
	误差	12	49.333		
地径	基因型	2	55.843	32.747	0.001
	倍性水平	1	125.242	73.442	0.001
	基因型 × 倍性	2	2.651	1.555	0.251
	误差	12	1.705		
节间距	基因型	2	0.072	1.573	0.247
	倍性水平	1	5.894	129.378	0.001
	基因型 × 倍性	2	0.301	6.598	0.012
	误差	12	0.046		
叶片长	基因型	2	2.502	4.889	0.028
	倍性水平	1	30.942	60.473	0.001
	基因型 × 倍性	2	0.137	0.268	0.769
	误差	12	0.512		
叶片宽	基因型	2	2.101	2.555	0.119
	倍性水平	1	40.801	49.622	0.001
	基因型 × 倍性	2	0.441	0.536	0.599
	误差	12	0.822		
叶片长宽比	基因型	2	0.079	12.457	0.001
	倍性水平	1	0.162	25.599	0.001
	基因型 × 倍性	2	0.016	2.498	0.124
	误差	12	0.006		
叶片面积	基因型	2	39.667	1.053	0.379
	倍性水平	1	2 042.883	54.250	0.001
	基因型 × 倍性	2	60.509	1.607	0.241
	误差	12	37.657		
叶片厚度	基因型	2	0.941	0.024	0.976
	倍性水平	1	1 722.845	44.201	0.001
	基因型 × 倍性	2	4.372	0.112	0.895
	误差	12	38.977		



a BT1 叶片 b BT3 叶片 c BT8 叶片

图 a ~ c 中，左图和右图分别展示二倍体和四倍体。

图 3 河北杨二倍体与四倍体植株的叶片差异

Fig. 3 Leaf differences between diploid and tetraploid plants of *P. hopeiensis*

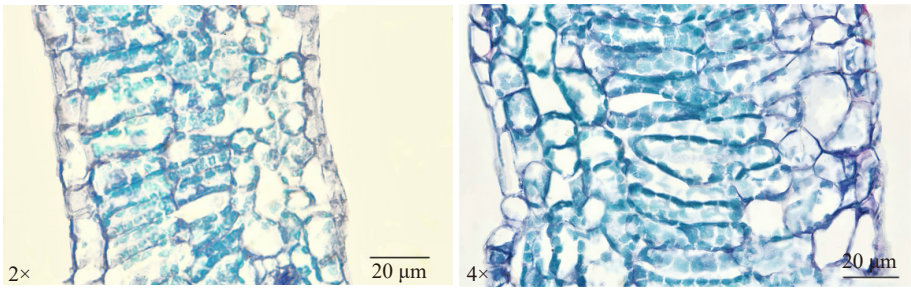


图 4　二倍体和四倍体河北杨叶片解剖结构

Fig. 4　Anatomical structures of diploid and tetraploid leaves from *P. hopeiensis*

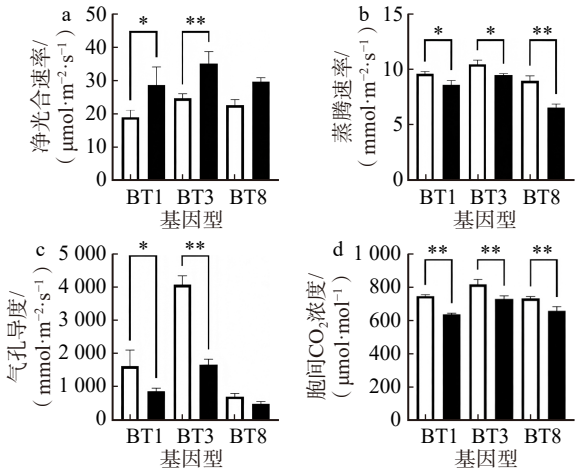


图 5　染色体加倍对光合生理性状影响比较

Fig. 5　Effects of chromosome doubling on the photosynthetic physiological characteristics of *P. hopeiensis*

所示。多重比较分析结果表明，二倍体植株的木质素含量显著高于其同源四倍体($P < 0.05$)，纤维素含量显著低于其同源四倍体($P < 0.05$)。其中，BT8 二倍体的木质素含量最高，为 27.49%；BT1 四倍体木质素含量最低，仅为 24.87%(图 6a)。BT3 四倍体的纤维素含量最高，为 45.56%；BT8 二倍体的纤维素含量最低，仅为 42.46%(图 6b)。方差分析结果(表 3)表明，倍性水平对河北杨 1 年生苗木的木质素和纤维素含量有极显著影响($P < 0.001$)；基因型仅对纤维素含量有极显著影响($P = 0.009$)；基因型与倍性水平的交互效应对木质素和纤维素含量的影响均不显著。

3　讨　　论

植物多倍化常导致显著的表型变异，包括生长

表 2　染色体加倍对河北杨光合生理特性影响的方差分析

Tab. 2　Analysis of variance of the photosynthetic physiological characteristics of *P. hopeiensis*

性状	变异来源	df	MS	*F*	*P*
净光合速率	基因型	2	94.547	4.050	0.045
	倍性水平	1	170.878	7.319	0.019
	基因型 × 倍性	2	8.100	0.347	0.714
	误差	12	23.347		
蒸腾速率	基因型	2	11.310	6.035	0.015
	倍性水平	1	0.605	0.323	0.580
	基因型 × 倍性	2	2.227	1.189	0.338
	误差	12	1.874		
气孔导度	基因型	2	12 276 997.52	11.936	0.001
	倍性水平	1	3 275 861.401	3.185	0.100
	基因型 × 倍性	2	1 279 141.737	1.244	0.323
	误差	12	1 028 545.715		
胞间CO_2浓度	基因型	2	5 524.707	9.648	0.003
	倍性水平	1	669.780	1.237	0.288
	基因型 × 倍性	2	886.432	1.600	0.242
	误差	12	541.543		

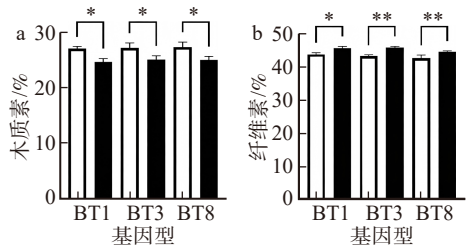


图 6 染色体加倍对材质性状影响的比较

Fig. 6 Effects of chromosome doubling on wood properties of *P. hopeiensis*

特征、生理生化特征及材质性状等[12]。有研究[13]表明，‘红脆甜’苹果(*Malus domestica* ‘Hongcuitian’)四倍体的生长速率显著低于二倍体，呈现矮壮表型。尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)四倍体较二倍体叶片更厚，且细胞面积更大[14]。本研究通过比较河北杨二倍体及其同源四倍体的生长性状，发现四倍体植株的苗高和地径均显著低于二倍体，而节间距则显著高于二倍体。该结果与多数木本植物四倍体研究中观察到的“生长减缓且矮小”现象一致[15]。许从萍[16]研究表明，杨树四倍体生长较二倍体缓慢，这与营养生长相关 miRNA 表达的剂量效应有关。其中，与营养生长正相关的差异表达 miRNA 含量增加，导致 *ARFs*、*GMYB* 等靶基因受抑程度增强而显著下调；同时，赤霉酸(gibberellin A_3，GA_3)、吲哚乙酸(indole-3-acetic acid，IAA)等促生长激素含量显著低于二倍体。相反，与营养生长负相关的差异 miRNA 含量减少，使得 *ERF*、TCP 等靶基因受抑程度减弱而显著上调；脱落酸(abscisic acid，ABA)、茉莉酸(jasmonic acid，JA)、乙烯(ethylene，ET)等衰老调节激素含量高于二倍体。上述变化加速了四倍体叶绿体降解及叶片衰老，降低光合速率及糖、淀粉的合成与分解能力，最终导致杨树四倍体营养生长缓慢。节间距的显著增加可能源于细胞纵向延伸增强，这为叶片空间分布提供了更优的结构基础。此外，本研究观察到四倍体的叶片长度、宽度、面积及厚度均显著大于二倍体，而长宽比显著低于二倍体。这表明染色体加倍在增大河北杨四倍体叶片的同时，也改变了叶片长宽的生长速率。河北杨四倍体叶片面积和厚度的增加可能与叶肉细胞数目增多或体积增大有关，这不仅有利于容纳更多叶绿体，还可能增强叶片的结构强度与保水能力[17]。

光合作用是植物能量积累与生长发育的基础。前人研究[18]发现，与二倍体相比，四倍体白桦(*Betula platyphylla*)对强光与弱光的利用能力更优，且在相同光照条件下净光合速率更高。滇杨(*Populus yunnanensis*)四倍体植株的净光合速率在日变化过程中均高于二倍体，而气孔导度和蒸腾速率与二倍体差异较小[19]。本研究中，河北杨四倍体的净光合速率显著高于二倍体，而蒸腾速率、气孔导度及胞间 CO_2 浓度则显著降低。这表明四倍体在提升光合效率的同时，水分利用效率也可能得到改善。这一结果符合多倍体植株常表现出的光合优势，其原因可能与叶绿素含量增加及光系统活性增强有关[20]。气孔导度、蒸腾速率及胞间 CO_2 浓度的降低，反映出四倍体气孔行为更为保守，有助于减少水分散失并提升抗旱能力；同时，其对 CO_2 的利用效率较高，这可能与相关酶活性增强及叶肉导度改善有关[21]。

木材材质性状是评价林木经济价值的重要指标。木质素作为细胞壁主要的硬化成分，其含量降低通常意味着木材刚性减弱、韧性增强，更利于加工利用。纤维素作为细胞壁主要的结构多糖，其含量提高有助于增强木材的抗拉强度与耐久性[22]。针对拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)[23]、柳树(*Salix* spp.)[24]和白花泡桐(*Paulownia fortunei*)[25−26]的研究发现，染色体加倍后四倍体的木质素含量显著低于相应二倍体，而泡桐[26]及白桦[27]四倍体的纤维素含量高于相应二倍体。本研究中，河北杨四倍体植株的木质素含量显著低于二倍体，纤维素含量则高于二倍体，这与前人研究结果一致。这一变化趋势可能与多倍化后木质

表 3 染色体加倍对河北杨材质性状影响的方差分析

Tab. 3 Analysis of variance of wood properties in *P. hopeiensis*

性状	变异来源	df	MS	*F*	*P*
木质素含量	基因型	2	0.000	0.354	0.709
	倍性水平	1	0.003	42.177	0.001
	基因型 × 倍性水平	2	0.000	0.066	0.937
	误差	12	0.000		
纤维素含量	基因型	2	0.000	7.075	0.009
	倍性水平	1	0.002	71.232	0.001
	基因型 × 倍性	2	0.000	0.861	0.447
	误差	12	0.000		

素和纤维素合成酶基因的表达调控密切相关。木质素与纤维素代谢途径均受多基因调控，染色体加倍可能通过基因剂量效应影响关键酶（如 CESA 等）的活性或表达量，从而改变次生细胞壁组分的比例，这为解析多倍体中木质素与纤维素含量变化的机理提供了理想途径[28]。

4 结　　论

本研究以 1 年生不同基因型河北杨（BT1、BT3 及 BT8）二倍体及其诱导获得的同源四倍体苗木为研究对象，通过测定苗高、地径、节间距、叶片长、叶片宽、叶片长宽比、叶片面积、叶片厚度、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、木质素含量及纤维素含量等指标，系统探究了染色体加倍对河北杨生长、光合生理及材质性状的影响。

（1）四倍体的苗高与地径均低于二倍体，而节间距则高于二倍体。此外，四倍体的叶片长、叶片宽、叶片面积及叶片厚度均显著高于二倍体，但叶片长宽比低于二倍体。

（2）在光合生理方面，四倍体的净光合速率高于相应二倍体植株，而蒸腾速率、气孔导度及胞间 CO_2 浓度均低于相应二倍体植株。

（3）在材质性状方面，四倍体的木质素含量低于相应二倍体植株，而纤维素含量则高于相应二倍体。

（4）统计分析表明，倍性水平对河北杨 1 年生苗木的苗高、地径、节间距、叶片形态指标（长、宽、长宽比、面积、厚度）以及木质素和纤维素含量均具有极显著影响（$P < 0.001$），说明染色体加倍对河北杨的生长、生理与材质性状具有重要调控作用。

研究结果对于丰富林木多倍体基因剂量效应理论，以及揭示关键性状变化的遗传调控机制具有重要意义。

参　考　文　献

[1] Sattler M C, Carvalho C R, Clarindo W R. The polyploidy and its key role in plant breeding [J]. Planta, 2016, 243(2): 281−296.

[2] Ni Z F, Kim E D, Ha M, et al. Altered circadian rhythms regulate growth vigour in hybrids and allopolyploids [J]. Nature, 2009, 457: 327−331.

[3] Adams K L, Wendel J F. Polyploidy and genome evolution in plants [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2005, 8(2): 135−141.

[4] Guo M, Rupe M A, Zinselmeier C, et al. Allelic variation of gene expression in maize hybrids [J]. The Plant Cell, 2004, 16(7): 1707−1716.

[5] Kondorosi E, Roudier F, Gendreau E. Plant cell-size control: growing by ploidy? [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2000, 3(6): 488−492.

[6] 鲁敏. 响叶杨三倍体和四倍体诱导技术研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
Lu M. Techniques of triploid and teraploid induction in *Populus* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.

[7] 陈杰. 滇杨多倍体种质的诱导及鉴定 [D]. 昆明: 西南林业大学, 2013.
Chen J. The abduction and indentification of the polyploid varieties in *Populus yunnanensis* [D]. Kunming: Southwest Forestry University, 2013.

[8] 季海明. 河北杨生长习性及主要病虫害防治技术 [J]. 新农业, 2025(8): 48−49.
Ji H M. Growth habit and main pest control techniques of *Populus hopeiensis* [J]. Xinnongye, 2025(8): 48−49.

[9] 左利萍, 李毅, 焦健. 渗透胁迫下河北杨叶片的生理响应及相关分析 [J]. 林业科学, 2008, 44(8): 56−61.
Zuo L P, Li Y, Jiao J. Physiological responses and their correlations of *Populus* hopeiensis leaves under osmotic stress [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(8): 56−61.

[10] Wu J, Cheng X T, Kong B, et al. *In vitro* octaploid induction of *Populus hopeiensis* with colchicine [J]. BMC Plant Biology, 2022, 22(1): 176.

[11] Sluiter A, Hames B, Ruiz R, et al. Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass: NREL/TP-510-42618[R]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2011.

[12] Vilcherrez-Atoche J A, Iiyama C M, Cardoso J C. Polyploidization in orchids: from cellular changes to breeding applications [J]. Plants, 2022, 11(4): 469.

[13] 马荣群, 葛红娟, 黄粤, 等. 红果肉苹果‘红脆甜’二倍体和四倍体叶片显微结构差异分析 [J]. 山东农业科学, 2021, 53(9): 59−62.
Ma R Q, Ge H J, Huang Y, et al. Differences in leaf microstructural between diploid and tetraploid red flesh apple ‘Hongcuitian’ [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2021, 53(9): 59−62.

[14] Liu Z, Wang J Z, Qiu B F, et al. Induction and characterization of tetraploid through zygotic chromosome doubling in *Eucalyptus urophylla* [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 870698.

[15] 吴剑. 河北杨四倍体离体诱导及其木质素生物合成的转录调控研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2023.
Wu J. In vitro induction of tetraploid *Populus hopeiensis* and transcriptional regulation of lignin biosynthesis[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2023.

[16] 许从萍. 青杨四倍体诱导及其营养生长缓慢的分子基础研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
Xu C P. Tetraploid induction and molecular basic of vegetative slowly growth in tetraploid *Populus* spp. (section tacamahaca) [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.

[17] 马鸿文, 任宇昕, 龙羿辛, 等. 青黑杨杂种全同胞二倍体与三倍体长枝叶性状变异研究 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(1): 27−34.
Ma H W, Ren Y X, Long Y X, et al. Variation in leaf traits on long branches in full-sib diploid and triploid hybrids between section Tacamahaca and sect. Aigeiros of *Populus* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(1): 27−34.

[18] 杜琳, 李永存, 穆怀志, 等. 四倍体与二倍体白桦的光合特性比较 [J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(2): 1−4.
Du L, Li Y C, Mu H Z, et al. Photosynthetic characteristics of tetraploid and diploid *Betula platyphylla* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(2): 1−4.

[19] 唐军荣, 李斌, 朱丽娜, 等. 滇杨多倍体苗期叶片形态及光合生理比较分析 [J]. 林业科学研究, 2016, 29(1): 103−109.
Tang J R, Li B, Zhu L N, et al. Analysis on leaf morphology and photosynthesis physiology of polyploidized *Populus yunnanensis* seedlings [J]. Forest Research, 2016, 29(1): 103−109.

[20] 孟南. 四倍体山杨的生长性状及抗逆性分析 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
Meng N. Analysis of growth characters and stress resistance of *Populus davidiana* dod [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2023.

[21] del Pozo J C, Ramirez-Parra E. Deciphering the molecular bases for drought tolerance in *Arabidopsis* autotetraploids [J]. Plant, Cell & Environment, 2014, 37(12): 2722−2737.

[22] Burdon R D. Wood properties and genetic improvement of *Radiata* pine [J]. New Zealand Journal of Forestry, 2010, 55(2): 22−27.

[23] Radotić K, Popović J, Vojisavljević K, et al. Doubling genome size of energy willow affects woody stem cell wall structure, chemistry, and biogas yield [J]. Wood Science and Technology, 2024, 58(4): 1353−1379.

[24] Serapiglia M J, Gouker F E, Hart J F, et al. Ploidy level affects important biomass traits of novel shrub willow (*Salix*) hybrids [J]. BioEnergy Research, 2015, 8(1): 259−269.

[25] 赵振利, 王晓丹, 范国强. 二倍体及其同源四倍体泡桐木材特性的变异分析和评价 [J]. 河南农业大学学报, 2020, 54(5): 803−809.
Zhao Z L, Wang X D, Fan G Q. Variation analysis and evaluation of wood characteristics of diploid *Paulownia* and its autotetraploid [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2020, 54(5): 803−809.

[26] 王晓丹, 邓敏捷, 申林芝, 等. 四倍体与二倍体白花泡桐木材纤维形态及化学成分的差异分析 [J]. 河南农业大学学报, 2014, 48(5): 585−589.
Wang X D, Deng M J, Shen L Z, et al. Differential analysis of fiber characteristics and chemical properties between tetraploid *Paulownia fortunei* and its diploid [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2014, 48(5): 585−589.

[27] 刘超逸, 刘桂丰, 方功桂, 等. 四倍体白桦木材纤维性状比较及优良母树选择 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(2): 9−15.
Liu C Y, Liu G F, Fang G G, et al. Comparison of tetraploid *Betula platyphylla* wood fiber traits and selection of superior seed trees [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(2): 9−15.

[28] Xu T T, Liu Z, Zhan D J, et al. Integrated transcriptomic and metabolomic analysis reveals the effects of polyploidization on the lignin content and metabolic pathway in *Eucalyptus* [J]. Biotechnology for Biofuels and Bioproducts, 2023, 16(1): 117.

（责任编辑 赵田芸 孟 瑶
责任编委 康向阳）