参赛学生姓名:	郭厚泽
中　　学:	中国人民大学附属中学
省　　份:	北京
国 家 / 地 区:	中国
指导老师姓名:	吴浩、万丹
指导老师单位:	厦门大学环境与生态学院、中国人民大学附属中学
论 文 题 目:	百年气候变化背景下北京清华园毛白杨树轮宽度与稳定碳同位素的生理适应机制

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

百年气候变化背景下北京清华园毛白杨树轮宽度与稳定碳同位素的生理适应机制

郭厚泽

摘要

为研究在全球大气 CO_2 浓度持续升高与区域暖干化背景下，树木如何在碳同化与水分消耗之间取得平衡，本研究选取北京清华园内人工毛白杨为研究对象，利用树轮宽度、树轮 α-纤维素稳定碳同位素（$\delta^{13}C$），结合大气 CO_2、大气碳同位素以及北京站月尺度气象数据，构建“外部环境强迫 — 叶片气体交换生理状态 — 径向生长输出”的完整证据链。通过 15 年中心移动平均标准化得到年轮宽度指数 （RWI）；基于 Farquhar 碳同位素判别模型反演光合碳同位素判别（$\Delta^{13}C$）、胞间 CO_2 浓度/大气 CO_2浓度（χ）、胞间 CO_2 浓度（C_i）与内在水分利用效率（iWUE）。综合运用趋势分析、BH-FDR 多重检验、原序列 — 去趋势 — 一阶差分多尺度对比、一阶差分标准化多元回归，区分长期年代共变趋势与年际气候响应。结果表明：原始年轮宽度随时间显著下降，但标准化后的 RWI 无显著趋势，说明原始轮宽下降可能主要来源于树木年龄本身发育作用，跟气候无关；树轮原始 $\delta^{13}C$ 的长期降低由大气同位素背景 Suess 效应导致，校正之后 $\Delta^{13}C$ 与 χ 未出现显著长期上升或下降变化，胞间 CO_2 绝对浓度 C_i 随大气 CO_2 同步上升。区域暖干化背景下，径向生长 RWI 对气候响应偏弱，而碳同位素指标 χ 对水分条件存在明显年际敏感性。毛白杨 iWUE 显著提升，但 iWUE 与 RWI 之间不存在显著相关，iWUE 的增大并未转化为树木径向生长的增加。多元统计结果反映了饱和水汽压亏缺（VPD）、温度对叶片气体交换的主导调控作用。本研究揭示了城市人工毛白杨面对百年环境变化的碳-水权衡驯化特征，可为华北城市绿化树种的气候适应性评估提供树轮生理依据。

关键词：毛白杨；树木年轮；稳定碳同位素；C_i/C_a；内在水分利用效率；气候响应

Abstract

To investigate how trees balance carbon assimilation and water consumption under the continuous rise in global atmospheric CO_2 concentration and regional warming-drying trends, this study selected cultivated *Populus tomentosa* on the Tsinghua University campus in Beijing as the research material. Combining tree-ring width, stable carbon isotope ($\delta^{13}C$) of tree-ring α-cellulose, atmospheric CO_2 records, atmospheric carbon isotope data, and monthly meteorological observations from the Beijing meteorological station, a complete evidence chain of “external environmental forcing — leaf gas-exchange physiological status — radial growth output” was established.

The ring-width index (RWI) was obtained via 15-year centered moving-average standardization. Based on the Farquhar carbon-isotope discrimination model, photosynthetic carbon-isotope

2026 高一 Tsinghua High School Science Award 仅用于2026年成都中学科学奖论文公示

discrimination ($\Delta^{13}C$), the ratio of intercellular-to-atmospheric CO_2 concentration (χ), intercellular CO_2 concentration (C_i), and intrinsic water-use efficiency (iWUE) were reconstructed. Trend analysis, BH-FDR multiple testing, multi-scale comparisons among raw series, detrended series and first-difference series, as well as standardized multiple regression on first-difference data were applied to disentangle long-term decadal co-variation trends from interannual climatic responses.

The results show that raw tree-ring width decreased significantly over time, whereas standardized RWI exhibited no significant temporal trend. This indicates that the decline in raw ring width is mainly driven by ontogenetic ageing rather than climatic factors. The long-term decrease in raw tree-ring $\delta^{13}C$ arises from the atmospheric Suess effect. After correction, neither $\Delta^{13}C$ nor χ displayed significant long-term increasing or decreasing trends, while absolute intercellular CO_2 concentration (C_i) increased synchronously with atmospheric CO_2.

Under regional warming-drying conditions, radial growth (RWI) showed weak climatic sensitivity, whereas the carbon-isotope-derived ratio *c* exhibited pronounced interannual sensitivity to water availability. The iWUE of *Populus tomentosa* increased significantly; nevertheless, no significant correlation existed between iWUE and RWI, meaning higher iWUE did not translate into enhanced tree radial growth. Multivariate statistics demonstrated that vapor-pressure deficit (VPD) and temperature dominated the regulation of leaf gas-exchange processes.

This study reveals the acclimation characteristics of carbon-water trade-offs in urban cultivated *Populus tomentosa* under centennial environmental changes, and provides tree-ring-based physiological evidence for climate-adaptation assessment of urban greening tree species in North China.

Key words: Populus tomentosa; tree rings; stable carbon isotope; C_i/C_a; intrinsic water-use efficiency; climate response

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

目录

第 1 章 绪论 6
1.1 研究背景 6
1.2 国内外研究现状 7
1.3 研究内容 8
1.4 创新点与应用价值 9
1.5 技术路线 10
第 2 章 数据与研究方法 11
2.1 数据来源 11
2.2 样品采集与处理 11
2.3 数据处理与统计 14
第 3 章 结果与讨论 16
3.1 原始年轮宽度与 RWI 的长期变化趋势 16
3.2 树轮 $\delta^{13}C$、大气 $\delta^{13}CO_2$ 与光合碳同位素判别长期变化趋势 17
3.3 生长季与全年尺度的气候长期变化趋势 17
3.4 RWI 对逐月、生长季与年尺度气候的响应 19
3.5 χ（C_i/C_a）对气候因子的多时间尺度响应 20
3.6 C_i/C_a、C_i 与 iWUE 的长期变化及其生长联系 21
3.7 χ 变化的长期—年际分离与多变量联合证据 23
第 4 章 结论与展望 24
4.1 主要结论 24
4.2 研究展望 24
参考文献 26
致谢 28

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

符号与缩略语

表 0-1　主要符号与缩略语

符号	中文含义	单位
$\delta^{13}C_{_TR}$	树轮（α-纤维素）稳定碳同位素组成	‰
$\delta^{13}CO_2$	大气 CO_2稳定碳同位素组成	‰
d	后光合分馏偏移	‰
$\Delta^{13}C$	光合碳同位素判别	‰
C_a	大气 CO_2浓度/分压	ppm/Pa
C_i	胞间 CO_2浓度	ppm
χ	C_i/C_a	无量纲
Γ*	无暗呼吸时 CO_2补偿点	Pa
Tg	5—9 月平均温度	℃
iWUE	内在水分利用效率	$\mu mol \cdot mol^{-1}$
RWI	年轮宽度指数	无量纲
VPD	饱和水汽压亏缺	kPa

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

工业革命以来，随着二氧化碳排放量的增加，全球气温显著上升，空气污染也日益严重，以及降水模式也在不断变化，这些已经被证实会影响各种树木的生长[1]，因此气候变化对树木的影响已是当今研究的热点之一。全球环境变化由多种因子共同影响，大气二氧化碳浓度（C_a）上升会增加植物叶片外部碳源的供给；同时，温度、降水、相对湿度（RH）及饱和水汽压亏缺（VPD）的变化，又会通过蒸散、土壤供水和植物水力状态影响碳的获取[2-3]。

树木生长过程中形成的木质部年轮具有明确的时间属性，因其具有年度时间分辨率高、定年准确且树木寿命长等特点而成为捕获过去长时间序列气候变化的重要手段之一。年轮的形成是树木形成层活动的结果[4-5]，它的生长与温度、降水、湿度、日照等气候因素有关，我们可以通过年轮的宽窄了解树木往年的生长状况和对气候变化的响应，以及进一步推断未来气候变化对生态系统的影响。树轮稳定碳同位素则保存了光合作用过程中 CO_2 扩散与羧化的综合信号，是树木年轮学的重要内容，同样被用于研究多种自然现象。树木年轮稳定碳同位素（$\delta^{13}C$）的变化可以用来重建历史气候和环境变化，也可以用来研究树木对环境改变的生理响应[1,6-7]。二者分别回答“当年形成了多少径向生长”和“形成这些木质部时碳-水关系处于何种相对状态”。

年轮宽度并不是纯粹的气候信号。随着树龄和树干半径增加，即使形成的木材面积相近，年轮也可能因几何效应而逐渐变窄；竞争、修枝、病虫害和局地干扰同样可能改变年轮宽度。树轮气候学通常通过交叉定年、质量控制和标准化减弱非气候性低频变化，并构建标准年表或年轮宽度指数（STD / RWI）[1,8]。但标准化也会改变序列的频率结构，因此原始宽度与标准化序列具有不同含义：前者用于描述观测到的总体宽度变化，后者更适合比较相对生长波动。

树轮 $\delta^{13}C$ 也不能直接被解释为植物自身生理变化。工业化以来，大气 CO_2 的 $\delta^{13}C$ 持续改变，树木所利用碳源的同位素背景随之变化；如果仅分析树轮原始 $\delta^{13}C$，容易把大气背景变化与植物光合分馏混合在一起[2,4]。C_3 植物的碳同位素判别由 CO_2 扩散、羧化与光呼吸共同决定。Farquhar 理论给出了光合碳同位素判别（$\Delta^{13}C$）与胞间 CO_2 浓度/大气 CO_2浓度（C_i/C_a）的基础关系，后续工作进一步指出叶肉导度、后光合分馏和大气 $\delta^{13}CO_2$ 背景会改变由木质部反演的生理量[9-12]。由此还可进一步计算 C_i 和内在水分利用效率（iWUE），从而把树轮同位素序列转化为具有明确生理含义的指标体系。

需要强调的是，χ 反映的是 CO_2 由气孔进入叶片的“供给”与光合作用消耗 CO_2 的“需求”之间的综合平衡，而不是某一个单独过程的直接测量。χ 降低既可能与气孔导度下降有关，也可能与净光合速率相对于气孔导度提高有关；叶肉导度、呼吸以及木质部形成过程中的后光合分馏也会影响树轮同位素信号[11-13,12]。同样，iWUE 是 C_a与 χ 共同决定的比值指标，其上升不必然

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026正成科学奖论文公示

意味着整株碳吸收增加，更不一定会带来更宽的年轮。只有把 χ、C_i、iWUE 与 RWI/STD 共同分析，才能区分“生理指标发生变化”和“这种变化是否伴随径向生长收益”。

1.2 国内外研究现状

树轮学研究首先建立了由年轮测量、标准化和年表统计组成的方法体系。Fritts 系统阐明了年轮形成与气候限制之间的关系，Cook 进一步发展了树轮序列标准化的时间序列方法[1,8]。这一体系使研究者能够从原始宽度中提取共同的年际变化，但也提示不同标准化方法对低频信号的保留程度不同。因此，现代树轮研究越来越重视同时给出原始序列及标准化结果，而不是仅以单一曲线代表全部生长信息。

在稳定碳同位素研究方面，Farquhar 等建立了 C_3 植物碳同位素判别与 C_i/C_a 之间的理论关系，奠定了利用植物组织 $\delta^{13}C$ 解释气体交换状态的基础[9-10]。随后，树轮稳定同位素研究逐步形成从大气背景校正、$\Delta^{13}C$ 计算到 χ、C_i 和 iWUE 推导的分析结构[4-5,7]。相关综述同时指出，树轮同位素是对木质部形成期内多个过程的记录，受到气孔扩散、羧化、叶肉传输、呼吸和后光合分馏等因素共同影响[12-13]。

围绕升高 CO_2 条件下植物如何协调碳获取和水分运输，国外研究提出了从经验气孔模型到最优性理论的多种解释框架[9-11,14-15]。这些研究普遍把 C_a、温度和 VPD 视为影响 χ 的重要外部变量：C_a 改变 CO_2 扩散梯度，VPD 改变单位气孔开放的水分代价，温度则同时影响酶促羧化、呼吸、蒸散需求与物候进程[12,16-18]。但温度、RH 和 VPD 在物理上彼此关联，降水又需要经过土壤蓄水和根系吸收才能作用于叶片。因此，单个气候因子与 χ 的相关方向可能随地区、季节和时间尺度而变化，不能脱离水分供需过程单独作解释。

长期树轮同位素序列还被广泛用于讨论 iWUE 变化。北欧亚树木的研究发现，过去一个世纪中 iWUE 总体呈上升趋势[19]；欧洲森林的综合研究进一步表明，iWUE 提高并不自动对应蒸腾下降或生长同步增强[20]。这些结果推动研究重点从“效率是否提高”转向“效率变化由何种过程形成、是否产生可观察的生长后果”。由于 iWUE 可由 C_a 和 χ 推导，其长期变化既包含外部 CO_2 背景的影响，也包含植物气体交换状态的变化；将其与相对独立的生长指标并列，是避免循环论证的重要做法。

国内也在样品处理、年表构建、同位素测定和气候响应分析等方面有较多研究。张敬远以樟子松人工林为对象，展示了从样芯采集、交叉定年、轮宽标准化到稳定碳同位素环境解释的完整流程[21]。靳翔等[22]对川西亚高山岷江冷杉的研究揭示，不同海拔树轮 $\delta^{13}C$ 对气温、相对湿度的响应存在海拔分异，树木生长存在明显的滞后效应，径向生长主要受温度调控，对降水依赖性弱。国内大量树轮稳定碳同位素工作集中于西北、青藏高原、东北林区：在天山、祁连山[23]针对云杉、圆柏的研究发现，树轮碳同位素受生长季温度、降水与干旱胁迫共同调控，且海拔梯度会改变同位素的气候敏感性；大兴安岭兴安落叶松的相关研究表明[24]，上年气候条件会持续影响当年树轮碳同位素分馏，水分胁迫是重要驱动因素；山东塔山黑松[25]、沂山油松[26]的

2026 S - T You High School Science Award
仅用于2026年度高中学科竞赛论文公示

研究证实，半湿润山地树种的 $\delta^{13}C$ 主要响应夏季温度、相对湿度。顾洪亮[27]的研究进一步指出，树轮—气候信号提取受样品预处理、去趋势算法、相关性分析方法的显著影响，方法选择不当易造成信号失真；其以亚热带马尾松为对象，发现碳同位素相比树轮宽度的气候信号更强。

综合国内外已有成果，国内树轮 $\delta^{13}C$ 研究多集中在西北干旱半干旱区、西南高山与东北林区。北京地处东亚季风边缘，气候波动敏感，但针对北京山地本土树种开展树轮碳同位素气候响应的系统性研究仍较为匮乏。即使有关于北京毛白杨的研究，也有一定的局限性。例如，已有针对北京毛白杨的树轮研究，曾增[28]和李夏榕[29]关于北京毛白杨的研究，仅依靠年轮宽度、胸径生长量表型指标，解析年龄、林分竞争与短期气候对径向生长的调控作用，阐明道路林毛白杨衰退的外部驱动因素，缺少树木内在生理过程的直接证据，无法解析百年尺度大气 CO_2升高与区域暖干化共同胁迫下的碳水适应机制。与之相比，本研究同样选取清华园百年毛白杨古树样本，拟结合树轮宽度与稳定碳同位素双重指标，区分大气 CO_2长期趋势与年际气候信号，解析 “环境胁迫—生理调节—径向生长”完整链条，揭示水分利用效率提升与径向生长脱耦的现象，弥补现有北京城市毛白杨研究在长期生理适应机制上的不足。

1.3 研究内容

本研究以北京清华园内毛白杨年轮宽度、树轮稳定碳同位素、大气 CO_2 及北京站月气候资料为基础，围绕“气候和 CO_2 如何共同影响树木碳-水关系，这种生理变化是否在径向生长中得到体现”这一核心问题开展分析。主要研究内容如下。

（1）年轮生长序列构建。检查各数据表的年份范围、重复值、缺失值，明确不同分析可使用的共同时间段；对原始年轮宽度进行标准化，构建 RWI/STD 序列，并分别分析原始宽度和标准化序列的长期变化及拟合关系。这样既保留观测到的总体生长信息，也为年际气候响应提供相对可比的生长指标。

（2）大气同位素背景校正与生理指标计算。将树轮 $\delta^{13}C$ 与同期大气 $\delta^{13}CO_2$ 置于同一时间轴，计算光合碳同位素判别值 $\Delta^{13}C$，再依据 Farquhar 模型获得 $\chi=C_i/C_a$、C_i 和 iWUE，比较原始同位素序列与背景校正后指标的变化。

（3）分别构建 5—9 月生长季和全年气候指标，分析其长期变化。在上年 9 月至当年 9 月的月尺度，以及生长季和全年尺度上，分析 RWI/STD 和 χ 与温度、降水、RH 及 VPD 的关系；通过原序列、线性去趋势和一阶差分的对照，区分长期共同变化与年际同步响应。

（4）多变量机制分析与生理—生长交叉验证。在统一有效年份内，将 C_a、气候因子和 RWI/STD 纳入多元分析，考察各变量与 χ 变化方向的一致性。进一步比较 C_i、χ、iWUE 与 RWI/STD 的长期趋势和相互关系，判断相对气体交换状态、绝对胞间 CO_2 水平、效率指标和径向生长是否同步变化。

（5）构建证据链。按照“外部强迫—生理状态—效率变化—生长结果”的逻辑综合各项分析：大气 CO_2 和气候变量表征外部环境，χ 与 C_i 表征气体交换的相对和绝对状态，iWUE 表征碳

2026 Tsinghua University High School Science Award
仅用于2026年度清华园中学科学奖论文公示

—水效率，RWI/STD 表征相对径向生长结果。结合数据来源、样本信息和指标推导关系，构建证据链。

通过上述内容，本研究重点回答四个相互衔接的问题：原始树轮轮宽的变化在标准化后呈现何种特征；树轮原始 $\delta^{13}C$ 变化在多大程度上受到大气背景影响；χ 和 RWI/STD 对气候的响应在月、生长季和年尺度上是否一致；iWUE 及 C_i 的变化是否伴随可检测的相对径向生长变化。四个问题依次对应生长基线、同位素校正、气候响应和生理—生长联系，共同构成本研究的逻辑思路。

1.4 创新点与应用价值

1.4.1 创新点

结合当前树轮同位素研究现状，本研究的创新亮点主要体现以下三个方面：

第一，研究案例具有独特性。国内树轮稳定碳同位素研究大多集中于天然山地森林，针对华北城市人工树木开展百年尺度树轮宽度-碳同位素联合解析的案例相对匮乏。本研究利用清华园百年毛白杨这一城市活历史样本，聚焦北京季风边缘区暖干化背景，填补了华北城市人工林树木长期碳水生理适应研究案例的空白，丰富了季风区树轮同位素数据库。

第二，构建“外部环境强迫 — 叶片气体交换生理状态 — 径向生长输出”完整证据链，严格区分长期年代共变趋势与年际气候响应。本研究同时采用原始序列、去趋势序列、一阶差分等多种方法对照，搭配 BH-FDR 多重检验校正、一阶差分标准化多元回归统计，有效规避 Suess 大气同位素效应、树木年龄生长效应、变量长期协同变化带来的统计假象，把年轮生长信号、碳同位素生理信号、气象驱动因子三者解耦，明确区分“生理指标改变”和“生理变化能否转化为径向木材生长”。

第三，揭示重要生理脱耦现象：大气 CO_2升高叠加区域暖干化条件下，毛白杨内在水分利用效率 iWUE 显著提升，但水分利用效率提升和径向生长脱耦。打破“水分利用效率提高就会带来树木生长加快”的惯性认知，阐明城市人工树种的生存权衡适应机制。

1.4.2 应用价值

本研究具备明确的基础科研价值与现实应用价值。

在基础科研层面：厘清了北京城市毛白杨胞间 CO_2比值、胞间绝对浓度、水分利用效率、径向生长对百年气候变化的响应规律，为理解 C_3树木在 CO_2升高叠加区域暖干化下的碳水权衡驯化机制提供实测证据，可为华北地区古气候重建的树轮同位素解译提供参考依据。

在城市实际应用层面：本研究结果可直接服务华北城市绿化树种气候适应性评估。在当下北京及华北区域持续暖干化、大气干旱胁迫不断加剧的背景下，城市绿化树种不仅需要关注生长快慢，更需要关注树木生理抗旱适应能力。本研究揭示毛白杨虽然可以通过调节气孔提升水分利用效率应对干旱胁迫，但该生理调节并不能转化为径向生长收益，树木受大气 VPD 等水分条件约束明显。可为城市造林树种筛选、古树养护管理、城市森林生态风险预判提供树轮生理

2026 STEM You High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖公示

层面的实证参考，帮助城市在未来高温干旱频发背景下科学开展树木管护、城市绿地规划，提升城市森林应对气候变化的韧性。

1.5 技术路线

本研究通过样品采集、树轮宽度测量、纤维素提取与稳定碳同位素测定，完成基础数据的获取与整理。在此基础上，研究沿两方面展开：第一，路径聚焦于树木生长响应，通过对树轮宽度进行标准化处理，分析其与关键气候要素（如气温、湿度、降水、VPD）的相关性，并运用去趋势和一阶差分等方法揭示生长与环境的动态关系；第二，深入探究树木生理机制，通过对树轮 $\delta^{13}C$ 进行大气背景校正，反演出胞间 CO_2 浓度、水分利用效率(iWUE)等关键生理指标，揭示树木内在的生理调节策略。最后，两条路径的分析结果通过多元回归分析进行整合，旨在系统阐释“外部环境变化 → 气体交换状态 → 水分利用效率 → 径向生长”这一机理，从而揭示树木对气候变化的响应与适应过程。技术路线见图 1-1。

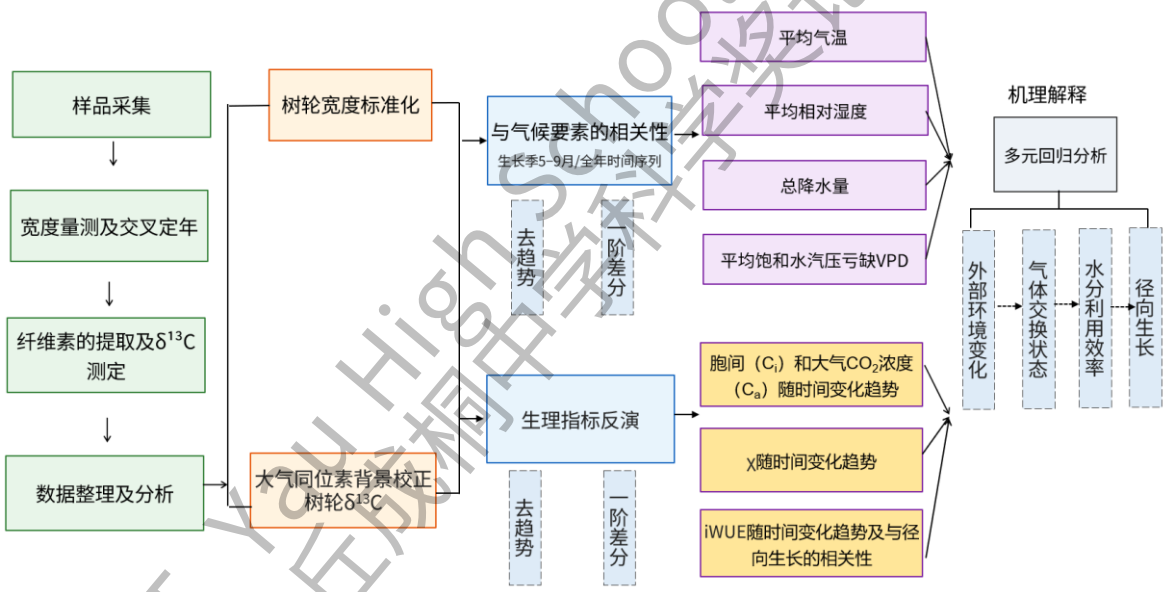


图 1-1　本研究技术路线

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

第 2 章 数据与研究方法

2.1 数据来源

本研究使用三类数据：第一类为清华毛白杨树轮碳同位素数据，覆盖 1940─2024 年，包含年份、树轮 $\delta^{13}C$ 和 CO_2 浓度。第二类为树轮宽度─月气候数据，覆盖 1939─2024 年，其中 1939─2023 年具有完整 12 个月气温和降水数据，2024 年气象月值缺失。第三类为北京地面气候月值数据，包含北京、密云、延庆 3 个站点共 1170 条站点─年月记录，其中北京主站 54511 覆盖 1951─2015 年。该部分数据处理使用 python 3 实现。

表 2-1 数据组成及时间范围

数据	时间范围
年轮宽度	1939─2024
树轮同位素与 CO_2	1940─2024
北京站月气候	1951─2015

2.2 样品采集与处理

样品采集与处理如图 2-1。本研究试验材料均取自北京清华园内人工培育的健康毛白杨，共计 5 株样本。其中 2 株为园内大风自然倒伏的毛白杨，在其树干胸高位置横向锯取树干圆盘切片，剩余 3 株采用 10 mm 生长锥在树干胸高处、不同方位钻取树轮木芯。本研究选取年轮界限清晰、年轮宽度整体均匀、缺轮现象少、无畸形、损伤及异常生长痕迹的样本，保证试验数据可靠。

步骤 1：样本打磨抛光

对采集的树干圆盘与树芯样本进行精细打磨处理，依次更换不同目数砂纸逐级打磨，使样本表面光滑透亮、年轮边界清晰可辨。若局部年轮纹理模糊，更换高目数砂纸进一步抛光，确保能够精准区分逐年年轮层次。

步骤 2：样本初处理与逐年剥离

根据圆盘与树芯的年轮序列校正精确日历年份并做好标记，统一按照由树皮向髓心的方向，逐年剥离年轮碎屑。剥离所得样品借助硫酸纸转移至洁净离心瓶中，将 5 株树木的同年份年轮样品混合均匀，完成分类编号登记。将所有样品放入 75 ℃烘箱持续烘干 24 h。烘干后的干燥样品使用 MM400 型混合球磨仪（Retsch GnbH，德国）充分粉碎，统一过 60 目筛备用。

步骤 3：α-纤维素提取

本研究采用亚氯酸钠-醋酸法提取逐年样品的 α-纤维素，并增设 17% 氢氧化钠处理步骤，有效去除木材中的木质素、半纤维素等干扰杂质。所有试剂添加操作均在通风橱内规范完成，保证实验安全与样品纯度。

2026 STYSH High School Science Award
仅用于2026年成桐中学科学奖论文公示

步骤 4：水浴加热反应

将配置好反应体系的样品置于恒温加热器中，持续水浴加热 4 h，充分分解样品中的木质素与多糖类杂质，纯化纤维素组分。

步骤 5：固液分离纯化

水浴反应结束后，使用高速离心机进行固液分离，重复离心 3 次，单次离心时长 5 min，弃去上层废液，留存底部纯净的纤维素固体沉淀。

步骤 6：纤维素粉末烘干

将离心得到的纤维素沉淀多次洗涤去除残留试剂，随后放入恒温干燥箱彻底烘干，获得高纯度纤维素粉末。

步骤 7：精准称量

使用百万分之一精度分析天平，每份样品精准称量 70-100 μg 纯化纤维素粉末。

步骤 8：样品装填

将称量完毕的纤维素粉末小心装填至锡杯内部。

步骤 9：样品封装成型

将装有样品的锡杯压实成规整球状或立方体，完全密封，避免污染与损耗，备用上机检测。

步骤 10： $\delta^{13}C$ 测定利用稳定同位素质谱仪（MAT253，Thermo Fisher Scientific GmbH，德国）测定碳同位素比值。每 7 个待测样品插入 1 份实验室石墨标准物质（$\delta^{13}C = -16.0‰$）开展质量控制，同位素测试分析标准差控制在 0.05‰以内（该部分在厦门大学环境与生态学院同位素重点实验室完成）。稳定碳同位素表达采取相对丰度南卡罗莱纳白垩系皮狄组地层美洲箭石化石 (Vienna Pee Dee Belemnite VPDB) 标准，其计算公式为:

$$\delta^{13}C = \left[\frac{(^{13}C/^{12}C)_{\text{sample}}}{(^{13}C/^{12}C)_{\text{VPDB}}} - 1\right] \times 10^3‰ \quad \text{公式(1)}$$

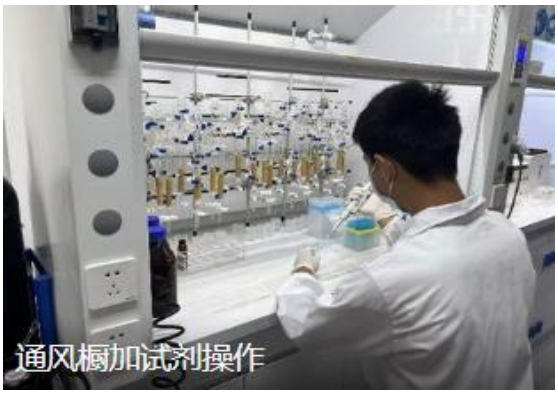


步骤 1: 年轮样本采集

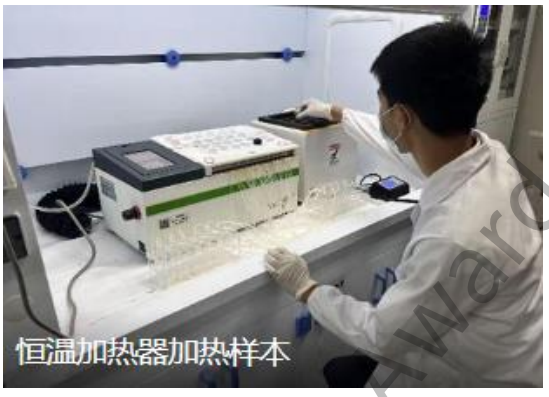


步骤 2: 样本初清洗

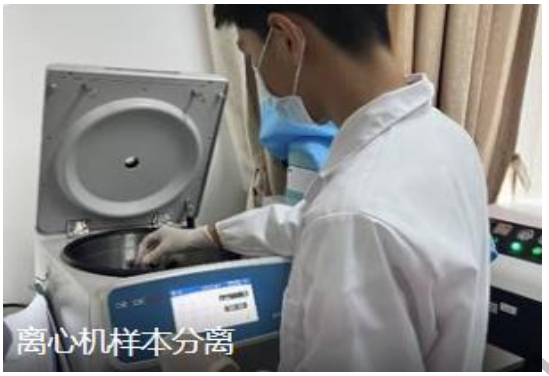
2026 T. Yau High School Science Award
仅供2026年成同中学科学奖论文公示



步骤 3:通风橱内 α- 纤维素提取（亚氯酸钠 - 醋酸混合体系 + 17% NaOH 脱木质素）



步骤 4: 恒温加热器水浴加热反应（4 h）



步骤 5：高速离心机固液分离（3 次，单次 5 min）



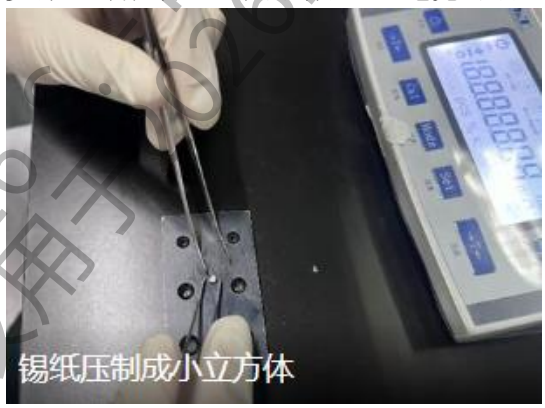
步骤 6：恒温干燥箱烘干纤维素粉末



步骤 7: 百万分之一天平称量 0.2 毫克锡纸包



步骤 8: 将烘干粉末装进锡纸包



步骤 9: 密封成型



步骤 10：稳定同位素质谱仪

图 2-1　样品前处理及测试过程

2026 Envirothon 仅用于2026环境科学竞赛论文评选 High School Science Award

2.3 数据处理与统计

本研究运用年轮标准化、大气同位素背景校正、生理指标反演、时间序列预处理、相关分析与多元回归等数据处理及统计学方法，对树轮宽度、稳定碳同位素、大气 CO_2、气象因子数据开展整合计算，通过原始序列—去趋势—一阶差分多尺度对比，区分长期年代共变趋势与年际气候响应，完成生理参数重建与统计检验。数据处理细节见 2.3.1，统计分析方案见 2.3.2。

2.3.1 数据处理

2.3.1.1 年轮宽度指数的建立

本研究以 15 年中心移动均值作为慢变化基线，对年份 t，RWI 定义为：

$$RWI_t = W_t / MA_{15}(W_t) \text{……公式(2)}$$

式中 W_t为原始轮宽，MA_{15}为以 t 为中心的 15 年移动均值。

2.3.1.2 树轮 $\delta^{13}C$、大气背景校正与生理指标

$\delta^{13}C$通常相对于 VPDB 标准表示。大气 $\delta^{13}CO_2$采用 Belmecheri 和 Lavergne[30]的 Recommended datasets: CO_2 与 $\delta^{13}CO_2$ 由多来源记录统一插值并以重叠期校正的年均值延伸到 2019；1981─2015 的 $\delta^{13}CO_2$ 直接使用编译值。首先计算光合判别值：

$$\Delta^{13}C = [\delta^{13}CO_2 - (\delta^{13}C_{_TR} - d)] / [1 + (\delta^{13}C_{_TR} - d)/1000] \text{ ……公式(3)}$$

其中 $\delta^{13}C_{_TR}$ 为树轮 α-纤维素实测值，d=2.1‰。

基于 C_3植物 Farquhar 碳同位素判别模型，引入光呼吸补偿点 Γ*温度响应方程：

$$\Delta^{13}C = a + (b - a)\chi - f\Gamma^*/c_a \text{……. 公式(4)}$$

$$\Gamma^* = \Gamma^*_{25} \cdot \exp\left[\frac{E_{\Gamma^*}}{R}\left(\frac{1}{298.15} - \frac{1}{T+273.15}\right)\right] \text{……. 公式(5)}$$

$$\chi = C_i/C_a = [\Delta^{13}C - a + f\Gamma^*/C_a] / (b - a) \text{ ……. 公式(6)}$$

$$C_i = \chi C_a \text{……. 公式(7)}$$

其中，Tg 为 5─9 月生长季平均气温（℃），T=Tg+273.15 K；$\Delta^{13}C$：碳同位素判别（碳同位素分馏值），‰；a：气孔扩散分馏，4.4‰，b：Rubisco 羧化分馏，28‰，f：光呼吸相关分馏系数，12‰；Γ：光呼吸补偿点 CO_2浓度（无暗呼吸时的 CO_2补偿点），单位 μmol mol^{-1}；Γ_{25}^*：25 ℃条件下参考光呼吸补偿点，4.332 Pa； R=8.3145 $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$；$C_a(Pa)=10^{-6}Ca(ppm)P_{atm}$ ；E_{Γ}^*：活化能 = 37830 J mol^{-1} ；R：通用气体常数 = 8.314 J mol^{-1} K^{-1} ；χ：胞间—大气 CO_2 浓度比值，无量纲；C_a ：大气 CO_2 摩尔浓度，μmol · mol^{-1}（ppm）; C_i ：叶片胞间 CO_2 摩尔浓度；

水分利用效率计算公式：

$$iWUE = A/g_s = C_a(1 - \chi)/1.6 \text{……. 公式(8)}$$

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

其中，A：净光合速率，μmol $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$； g_s：气孔导度，mol $H_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$；iWUE：内在水分利用效率。

2.3.1.3 气象资料与 VPD 计算

月平均温度、降水和相对湿度来自项目中的中国地面气候资料月值数据。全年温度、RH 和 VPD 按 12 个月平均，全年降水按 12 个月求和；生长季定义为当年 5─9 月，降水求和，其余变量求平均。北京站海拔取 31.3 m，标准大气公式给出 P_{atm}=100962.153 Pa。VPD 由月平均温度 T 和 RH 估算：

$$e_s(T) = 0.6108 \exp[17.27T/(T + 237.3)] \quad \text{……公式(9)}$$

$$VPD = e_s(T)(1 - RH/100) \quad \text{……公式(10)}$$

其中，$e_s(T)$ 表述饱和蒸汽压，kPa；RH：相对湿度（%）。

2.3.2 数据统计

2.3.2.1 5 年中心滑动均值平滑处理

为降低非结构性碳跨年储存、不同年龄碳库混合及储存碳后续用于木质部形成的影响，对 $\delta^{13}C_{_TR}$、$\delta^{13}CO_2$、C_a与 5─9 月温度采用中心 5 年对称滑动窗口平滑处理，计算公式如下：

$$Xt = (X_{t-2} + X_{t-1} + X_t + X_{t+1} + X_{t+2})/5 \quad \text{……公式(11)}$$

平滑后的序列用于统一计算 $\Delta^{13}C$、χ、C_i 与 iWUE 等生理指标。年轮宽度指数 RWI 不进行平滑，保留原始年际波动以捕捉短期气候胁迫信号。

2.3.2.2 线性去趋势与一阶差分

为剥离数十年共同年代趋势对气候—生理关系的混杂干扰，针对 RWI、5 年均值 χ 与全部气候因子进行线性去趋势和一阶差分序列。

线性去趋势：以年份为自变量拟合一元线性模型，取模型残差作为去趋势序列；

一阶差分序列：计算相邻年份差值，消除全部低频年代趋势，仅表征年份间指标增量变化。

2.3.2.3 Pearson 相关分析与 Benjamini–Hochberg（BH-FDR）多重检验校正

（1）逐月尺度相关分析。选取上年 9 月至当年 9 月共 13 个自然月份，以温度、降水、RH、VPD 四类气候因子为自变量，5 年平滑去趋势 χ 为响应变量，开展 Pearson 相关分析。全部检验统一执行 BH-FDR 校正，以校正后 q<0.05 作为显著判据；仅名义 P<0.05 但 q≥0.05 的相关关系仅作标注，不纳入结论。

（2）季节 / 全年聚合尺度相关分析。划分 5─9 月生长季、全年两类聚合气候窗口，与温度、降水、RH、VPD 四类因子，分别基于原始、去趋势、一阶差分开展相关分析。

2.3.2.4 一阶差分标准化多元线性回归模型

为定量区分多环境变量对 χ 的独立作用、规避长期趋势的干扰，以一阶差分 5 年均值 χ 为响应变量，构建标准化多元线性回归模型。

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

第 3 章 结果与讨论

本章按照“生长记录—同位素背景校正—气候外部强迫—年际响应—生理状态—联合证据”展开讨论。原始年轮宽度和年轮宽度指数（RWI）描述径向生长；树轮 $\delta^{13}C$ 及其背景校正值描述碳同位素信息；$\chi=C_i/C_a$ 反映气孔供给与光合消耗共同作用后的相对胞间 CO_2 状态；C_i 和内在水分利用效率（iWUE）则由 C_a 与 χ 推导。气候变量属于外部环境约束，RWI 是相对独立的生长结果。只有区分原始序列、去趋势序列和一阶差分序列，才能避免把共同年代趋势误认为直接生理因果。

3.1 原始年轮宽度与 RWI 的长期变化趋势

图 3-1 (a) 为原始年轮宽度序列。总体来看，1939─2024 年间北京清华园内毛白杨原始年轮宽度随时间呈显著下降趋势，每 10 年降低 0.323 mm（β=-0.323 mm/10a，p<0.001）。 同时也存在显著年际波动， 20 世纪 60─70 年代出现较多宽轮，进入 21 世纪后多数年份的原始年轮宽度偏低。但是，原始年轮宽度下降包含树木自身年龄带来的生长衰减效应，不能直接反映气候驱动的生长波动。图 3-1 (b) 为经 15 年中心移动均值标准化得到的年轮宽度指数 RWI。标准化后剔除了树龄、种内竞争等非气候生长趋势，RWI 长期线性趋势微弱，每 10 年变化幅度仅为 + 0.003，趋势检验不显著（p=0.803）。该结果说明，去除年龄趋势之后，研究区毛白杨气候驱动的径向生长总体保持平稳状态，原始年轮宽度持续缩减可能主要来源于树木本身发育带来的内在生长衰减，而非气候长期变化造成生长衰退。

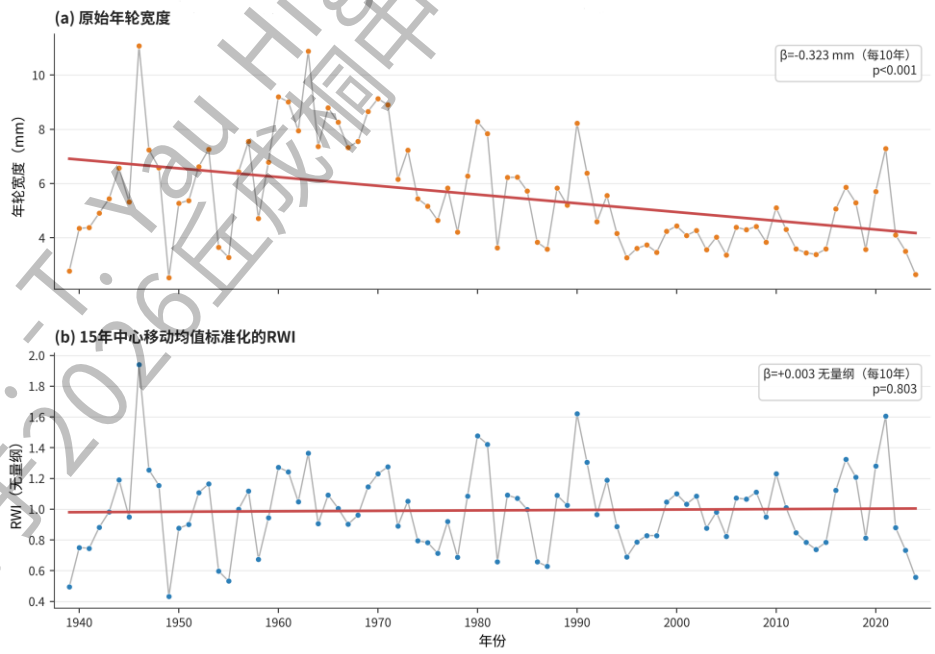


图 3-1　1939─2024 年毛白杨原始年轮宽度与标准化年轮指数（RWI）随时间变化

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖公示

3.2 树轮 $\delta^{13}C$、大气 $\delta^{13}CO_2$与光合碳同位素判别长期变化趋势

图 3-2 展示树轮碳同位素序列、大气背景校正过程与光合判别指标 $\Delta^{13}C$ 的时间演变特征（1940—2024）。如图 3-2(a)所示，原始树轮 $\delta^{13}C$ 年值与 5 年中心滑动均值整体呈显著下降趋势，20 世纪 60—70 年代出现低谷，70 年代以后回升，2010 年后再度下降。同期大气本底 $\delta^{13}C$ 也持续下降，这主要是源于工业革命以来化石燃料燃烧释放贫 ^{13}C 的 CO_2，即大气同位素 Suess 效应。但是，原始树轮 $\delta^{13}C$ 序列同时叠加大气背景长期变化与植物光合生理响应信号，无法直接用于解析气孔、光合等内在生理调控特征。

碳同位素判别值 $\Delta^{13}C$ 随时间的变化如图 3-2(b)，该指标是经大气 $\delta^{13}CO_2$ 背景校正，剔除了 Suess 效应带来的长期趋势后得到的指标。可以看出，整体上 $\Delta^{13}C$ 随时间变化并不大。1960—1970 年 $\Delta^{13}C$ 持续上升，1970 年后阶段性小幅回落，但是总体趋势比较平稳，这就一定程度上反映了在长期环境变化下，毛白杨光合速率与气孔调控的稳定变化。

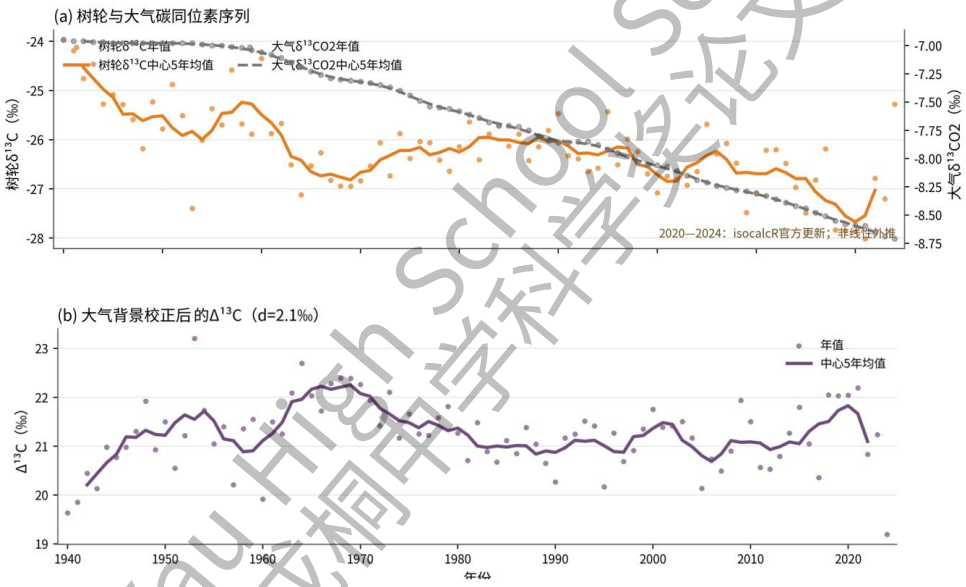


图 3-2　树轮 $\delta^{13}C$、大气 $\delta^{13}CO_2$及背景校正后的 $\Delta^{13}C$ 随时间的变化

3.3 生长季与全年尺度的气候长期变化趋势

图 3-3 展示 1951—2015 年研究区生长季（5—9 月）与全年尺度气温、降水、相对湿度及大气水汽压差（VPD）的长期变化趋势。

温度方面（图 a、b），生长季（5—9 月）温度与年均温均呈显著上升趋势（P-AR1<0.05）。生长季温度升温速率为 0.33 ℃/10a，年均温升温速率达到 0.41 ℃/10a，年均升温幅度略高于生长季。5 年滑动均值显示该区域气温存在明显波动，20 世纪 50 —70 年代气温起伏震荡，冷暖交替特征明显；自 80 年代以后，滑动平均序列整体抬升，研究区逐渐变暖，直到 2015 年，温度一直处于上升趋势。

2026 Sci-Tau High School Science Award
仅用于2026年成都中学科学论文公示

降水随时间变化整体表现为下降趋势，但未达到显著水平。生长季降水递减速率为45.46 mm/10a（P-AR1=0.211），年降水递减速率46.87 mm/10a（P-AR1=0.159），生长季降水幅度略大于全年降水。5 年滑动均值显示 1960s 以前，降水年际变化较大，存在多个丰水年份，之后降水量一直减少，直到 2000s 左右，降水出现最低值，2000s 以后降水又有增加趋势，但是整体上来看，长时间尺度下，降水随着时间呈递减的规律。

相对湿度在生长季与全年尺度均呈显著下降趋势（P-AR1<0.05）。生长季相对湿度每 10 年下降 1.40 个百分点，年均相对湿度每 10 年下降 1.43 个百分点，二者下降幅度十分接近。5 年滑动序列体现出相对湿度持续性衰减特征：20 世纪 50s 和 70s 大气相对湿度整体偏高，此后滑动均值持续下降。结合温度随时间的变化趋势（图 a，b），可以看出，在持续升温背景下，大气相对湿度不断降低，这可能导致本研究区大气干旱化。

大气水汽压差（VPD）作为表征大气干旱胁迫的关键指标，生长季与年均 VPD 均呈显著上升趋势（P-AR1<0.05）。生长季 VPD 增长速率为 0.061 kPa/10a，年均 VPD 增长速率 0.043 kPa/10a，生长季大气干旱胁迫加剧速度更快。5 年滑动均值显示，1950s 和 1970s 的 VPD 维持较低水平，大气蒸发胁迫偏弱；1970s 后滑动均值持续上升，与气温升高、相对湿度降低的演变过程相吻合。

各气候要素年代际波动较为明显，但是总体来看，1951─2015 年研究区呈现气温升高、相对湿度降低、大气 VPD 持续上升的暖干化气候变化，降水虽有减少倾向但受年际波动制约趋势不显著。

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

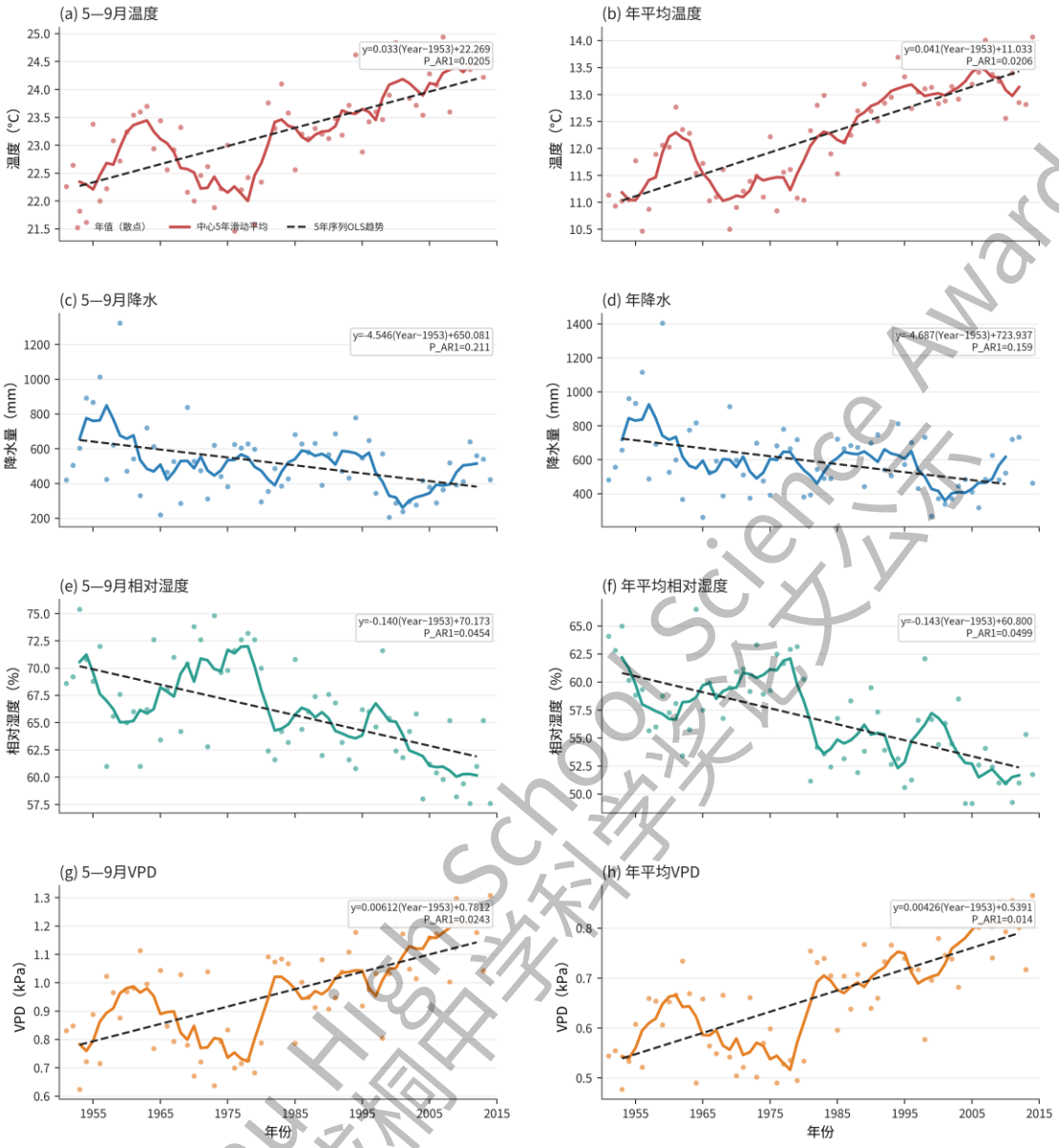


图 3-3　北京生长季与全年气候的年际变化

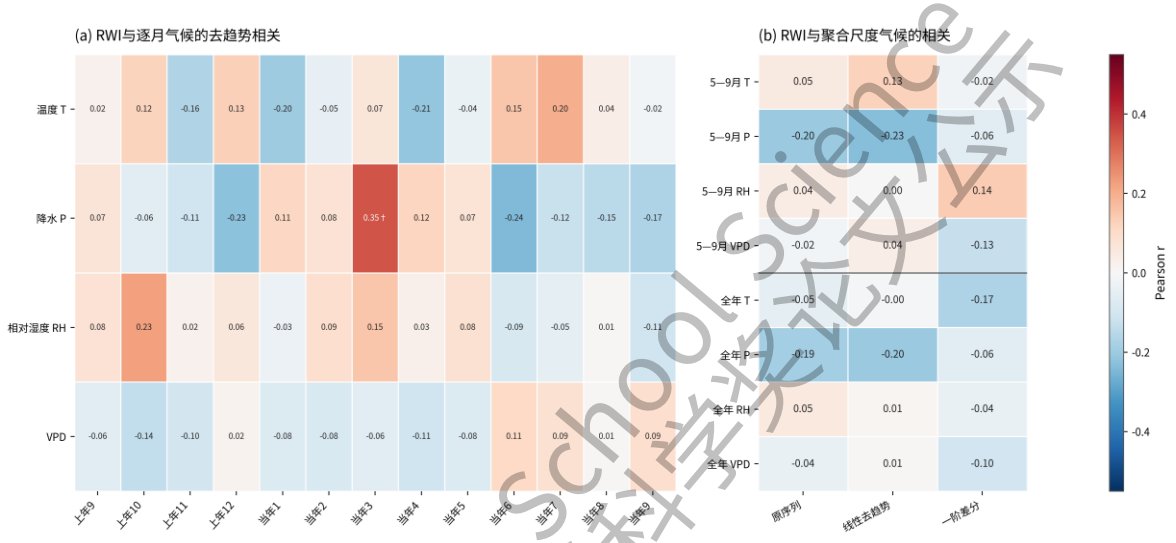
3.4 RWI 对逐月、生长季与年尺度气候的响应

图 3-4 展示树轮宽度指数（RWI）与气候要素的相关分析结果，分为逐月尺度（a）与季节聚合尺度（b）；同时采用原序列、线性去趋势、一阶差分三种序列处理方式开展对比，相关系数为 Pearson r，基于 BH-FDR 方法开展多重检验校正。图 3-4 (a) 为 RWI 与逐月气候要素的相关矩阵，时间覆盖上年 9 月至当年 9 月。可以看出降水是影响径向生长最关键的气候因子：当年 3 月降水与 RWI 呈显著正相关（r=0.35，仅名义 p<0.05），代表春季土壤水分条件改善能够促进树木春季萌发与早期木质部形成。上年 12 月降水、当年 6 月降水与 RWI 呈现负相关关系（r=-0.23、r=-0.24），暗示秋冬降水异常或夏季过量降水对树木生长可能产生抑制效应。相对湿度方面，上年 10 月相对湿度与 RWI 呈中等正相关（r=0.23），上一年秋季大气湿润环境可为树木越冬储备养分，利于次年生长。温度与 VPD 逐月相关整体偏弱，正负相关交替出现，不存在经过

2026 S. T. Yau High School Science Award
仅用于2026年成绩申请科学论文公示

多重检验校正后显著的相关月份。图 3-4 (b) 为生长季（5—9 月）及全年聚合尺度气候与 RWI 的相关对比，整体规律稳定：降水与 RWI 以负相关为主，生长季降水线性去趋势序列相关系数 r=-0.23，全年降水线性去趋势序列 r=-0.20；温度、相对湿度、VPD 相关系数整体偏低，大多介于-0.20~0.15 之间，未达到显著水平。

综合相关结果可知：研究区树木径向生长优先受春季水分条件调控，上年秋季湿度、夏季降水存在阶段性影响；在季节聚合尺度上，降水表现出稳定的负相关特征。温度、VPD 对 RWI 的直接相关性较弱，预示该区域树木径向生长的气候限制因子以水分条件为主，但径向生长对气候的响应强度整体中等。



注：格内数字为 Pearson 相关系数 r；*表示相应检验族 BH-FDR G<0.05；+ 表示仅名义 p<0.05。逐月 52 项整体校正；聚合面板每个处理 8 项校正。

图 3-4　RWI 与逐月及聚合尺度气候因子的相关热力图

3.5 χ（C_i/C_a）对气候因子的多时间尺度响应

图 3-5 展示 5 年重叠平均 χ 序列与气候要素的 Pearson 相关关系，分为逐月尺度（a）与季节聚合尺度（b）。鉴于 5 年重叠序列存在显著时序自相关，统计检验采用 AR (1) 有效样本量校正自由度，并基于 BH-FDR 方法多重校正，区分严格校正显著与仅名义水平显著（†）的相关关系。

图 3-5 (a) 为 5 年 χ 与上年 9 月至当年 9 月逐月气候要素的相关结果。温度与 VPD 整体表现为大范围稳定负相关：上年 9 月 — 当年 5 月多数月份温度与 χ 呈中强负相关，其中上年 12 月、当年 2 月、当年 4 月相关系数达到-0.54、-0.54、-0.56；VPD 与 χ 的相关性格局与温度高度一致，上年 11 月、当年 2 月、当年 4 月 VPD 相关系数分别低至-0.66、-0.54、-0.65。高温与高 VPD 会加剧大气干旱胁迫，促使树木气孔关闭，降低胞间 CO_2浓度（C_i），最终造成 $\Delta^{13}C$ 下降。

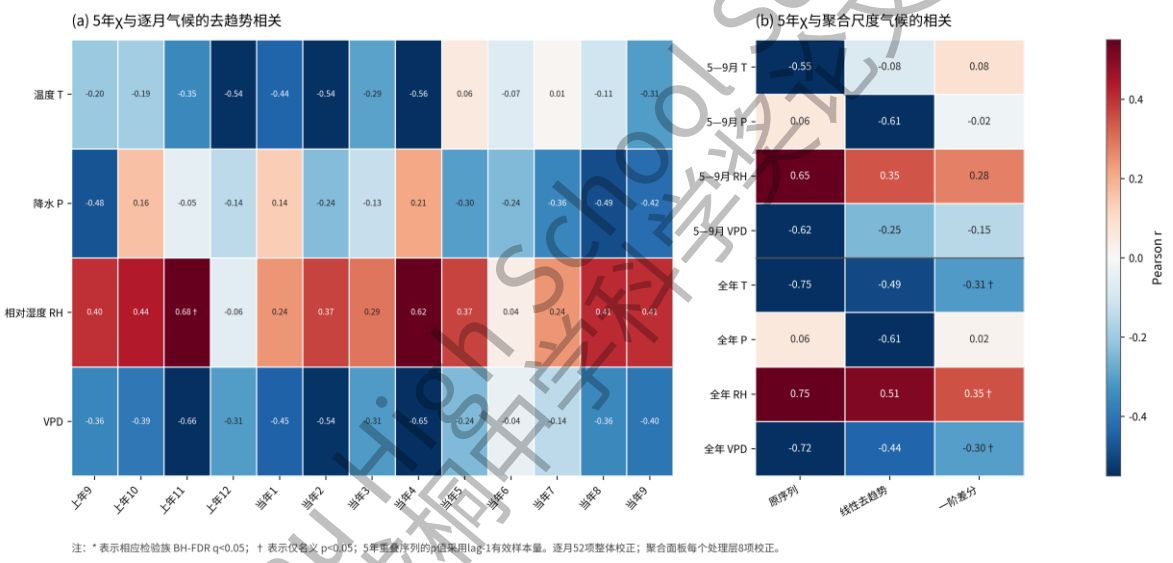
相对湿度呈现大范围稳定正相关，是影响 χ 的关键因子。上年 9—11 月相对湿度与 χ 显著正相关，上年 11 月 r=0.68（仅名义 p<0.05）；当年 1—9 月多数月份相对湿度维持中等以上正向关联。湿润环境有利于维持较高气孔导度，提升 C_i/C_a ，进而使 χ 增大。降水的逐月相关信号相对

2026 Siyuan High School Science Award
仅用于2026年成绩中学科学奖论文公示

复杂，正负相关交替出现，未形成连续稳定的显著月份，说明逐月尺度单一降水事件对 χ 的调控弱于温湿与大气干旱胁迫。

图 3-5 (b) 为生长季（5—9 月）与全年聚合尺度气候要素的相关对比。原序列相关信号最强：全年尺度温度、VPD 与 χ 相关系数分别达到-0.75、-0.72；全年相对湿度 r=0.75；生长季尺度相对湿度 r=0.65、生长季 VPD r=-0.62。线性去趋势处理后相关强度普遍下降，但正负相关关系保持一致；一阶差分序列相关系数进一步减弱，部分指标仅保留名义水平显著（†）。生长季降水仅在线性去趋势序列中表现较强负相关（r=-0.61），原序列无明显关联。

综合来看，大气湿度与 VPD 是调控 χ 最核心的气候因子。温度升高、VPD 上升、相对湿度下降会抑制气孔导度，降低 C_i/C_a，造成 χ 减小；该响应自上年秋季延续至生长季，存在明显气候滞后效应。相比径向生长 RWI，χ 对大气干旱胁迫的响应强度显著更高，表明碳同位素生理信号对大气水热条件变化更为敏感。



注：* 表示相应检验族 BH-FDR q<0.05；† 表示仅名义 p<0.05；5年重建序列的p值采用lag-1有效样本量。逐月52项整体校正；聚合面板每个处理层8项校正。

注：（a）上年 9 月至当年 9 月逐月去趋势相关，52 项检验统一进行 BH-FDR 校正；（b）生长季 5—9 月及全年气候因子的原序列、去趋势和一阶差分相关，按各分析面板进行 BH-FDR 校正。单元格显示 Pearson r；*表示相应检验组内 BH-FDR<0.05; †表示仅名义 p<0.05。

图 3-5　5 年平均 χ 气候因子的多时间尺度相关热力图

3.6 C_i/C_a、C_i 与 iWUE 的长期变化及其生长联系

图 3-6 展示基于树轮碳同位素重建的树木生理指标年值与中心 5 年平滑序列演变特征，包含大气 CO_2浓度 C_a、胞间 CO_2 浓度 C_i 、胞间与大气 CO_2比值 $\chi=C_i/C_a$、内在水分利用效率 iWUE，并进一步分析 5 年尺度 iWUE 与树轮宽度指数 RWI 之间的相关关系。

由图 3-6 (a) 可见，1940—2024 年大气 CO_2 浓度 C_a 持续稳步上升，体现全球大气本底 CO_2升高背景；胞间 CO_2 浓度 C_i 同步呈现长期上升趋势，但上升幅度显著低于 C_a ，说明树木胞间 CO_2

2026 S. T. Yau High School Science Award 仅用于2026丘成桐中学科学奖公示

并未随外界 CO_2 等比例提升。二者 5 年平滑序列明显地反映长期增长趋势，同时伴随年代际波动。

图 3-6 (b) 为 $\chi=C_i/C_a$ 序列。年值散点存在较大年际波动，中心 5 年平滑序列显示，χ 在 20 世纪 70 年代达到峰值后整体下降，之后维持波动变化。χ 表征气孔导度与光合速率的平衡关系，该变化特征表明，尽管大气 CO_2 持续升高，但树木维持较为稳定的 C_i/C_a，气孔调控策略随环境长期演变发生调整。

图 3-6 (c) 内在水分利用效率 iWUE 呈现显著长期上升趋势。20 世纪 50 年代和 70 年代 iWUE 整体偏低且出现低谷，自 70 年代开始持续波动上升，2000 年后维持在较高水平。结合区域持续暖干化气候背景与上升的大气 VPD 可知，大气干旱胁迫增强与大气 CO_2 肥效共同驱动 iWUE 提升；树木通过气孔调节，在水分受限条件下提升碳固定与水分消耗的权衡效率。

图 3-6 (d) 相关性散点图揭示 5 年尺度 iWUE 与 RWI 的关联：二者相关系数 r=-0.081，p=0.853，不存在显著相关关系。内在水分利用效率持续上升并未对应径向生长同步提升，说明 iWUE 升高并未转化为更多木材产量。一方面持续加剧的大气干旱、土壤水分限制抵消了 CO_2增益效应；另一方面，树木提高水分利用效率是应对干旱的保守生理适应策略，优先维持生存而非促进径向生长，体现碳分配权衡机制。

综合生理指标演变规律：大气 CO_2上升背景下，研究区树木 C_i 随 C_a 同步增加，但增速滞后，χ 保持相对稳定，iWUE 持续升高。长期来看，树木通过气孔调控提升水分利用效率以适应暖干环境；但该生理调整无法显著促进径向生长，水分胁迫成为限制树木径向增产的关键因素。

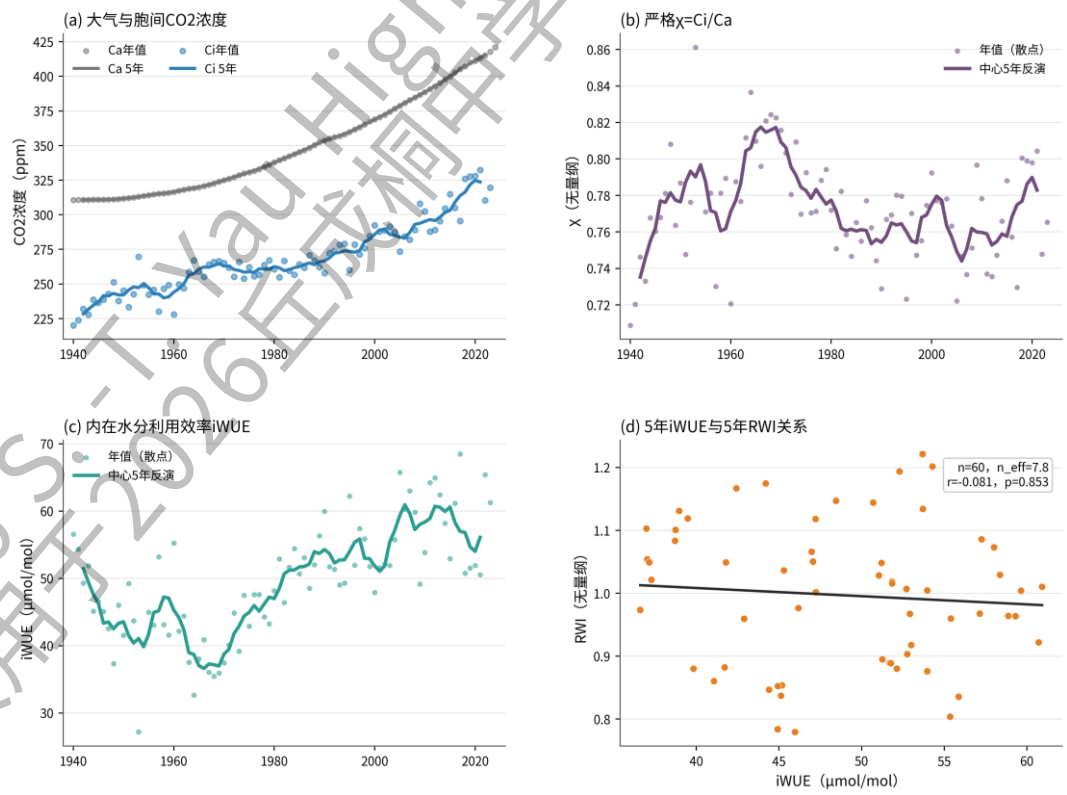


图 3-6　CO_2 背景、碳同化指标及生长响应的联合变化

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖公示

3.7 χ 变化的长期—年际分离与多变量联合证据

图 3-7 从简单相关与多元联合模型两个层面揭示胞间与大气 CO_2 比值 $\chi=C_i/C_a$ 与环境、生长指标的耦合关系。图 (a) 对比 5 年原序列与 5 年一阶差分序列的 Pearson 相关系数；图 (b) 基于 5 年一阶差分序列构建多元线性联合模型，展示各因子标准化回归系数 β 及 95% 置信区间，区分独立驱动效应。

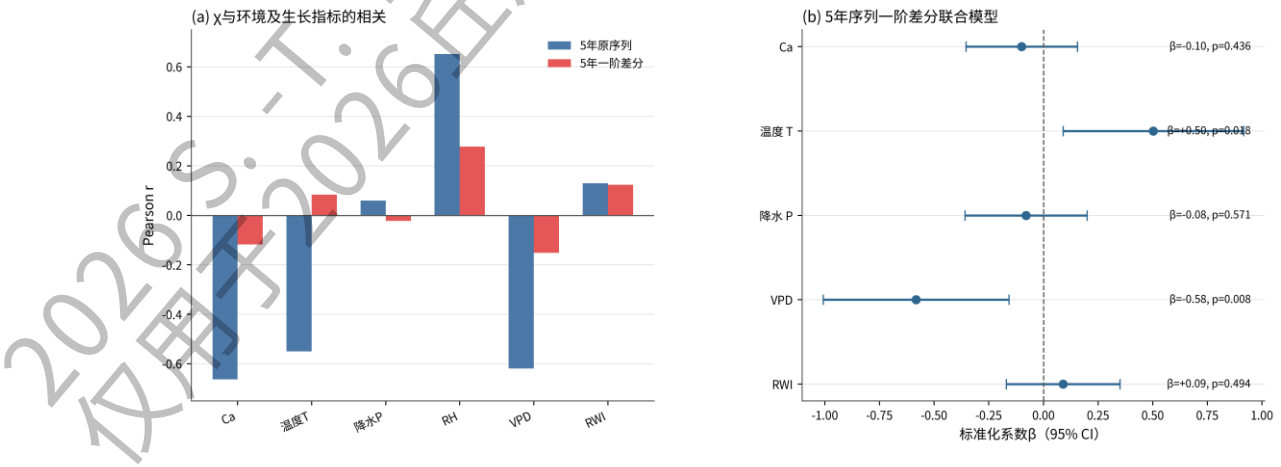
由图 3-7 (a) 简单相关结果可见：5 年原序列相关信号强度整体显著高于一阶差分序列。相对湿度 RH 与 χ 表现为强正相关，是最突出的关联因子；C_a、温度 T、VPD 均与 χ 呈显著负相关；降水 P 相关信号微弱；径向生长 RWI 呈现弱正相关。转换为一阶差分滤除长期趋势后，所有因子相关幅度普遍衰减，但正负相关符号基本保持一致，说明 χ 与环境因子同时存在长期低频协同变化与年际高频波动响应。

简单相关仅反映两两协同关系，无法分离多因子共线性干扰；图 3-7 (b) 一阶差分多元模型进一步解析各变量独立作用。结果显示：VPD 标准化系数 β=-0.58 (p=0.008)、温度 Tβ=+0.50（p=0.018），二者达到统计显著水平；大气 CO_2 浓度 C_a、降水 P、RWI 回归系数置信区间均跨越 0，独立效应不显著。

VPD 负向独立效应表明：在控制其他变量不变条件下，大气干旱胁迫上升会驱动气孔关闭，降低 C_i/C_a；温度表现正向独立效应，体现温度对光合速率的促进作用能够提升胞间 CO_2 相对水平。二者作用方向相反，说明温湿复合干旱共同调控气孔—光合平衡。

综合相关与多元模型结果：简单相关中原序列体现出 C_a、温湿度、VPD 与 χ 较强的关联，很大程度来源于长期共同暖干化趋势叠加大气 CO_2上升的低频协同；剔除长期趋势后的多元模型表明，大气水汽压差 VPD 是调控 χ 最核心的独立驱动因子，其次为温度。大气 CO_2上升、径向生长变化对 χ 不存在显著独立影响。

这进一步证明：区域树木胞间与大气 CO_2 比值的长期演变主要受大气干旱胁迫调控，并非单纯由大气 CO_2 浓度变化主导；水分生理环境是决定气孔与光合权衡关系的首要环境驱动力。



(a) 原序列与一阶差分相关对照　　(b) 一阶差分多变量模型标准化系数及 95%置信区间

图 3-7　χ 变化的长期共变、年际响应与多变量模型证据

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

第 4 章 结论与展望

4.1 主要结论

（1） 通过对 1939─2024 年清华园毛白杨树木年轮的研究可以发现，树木实际年轮宽度随着时间慢慢变小，但经标准化后得到的年轮生长指数 RWI 并没有持续下降，这说明树轮宽度变窄是树木年龄发育带来的几何生长衰减，不是气候变化造成的。

（2） 受工业活动影响，大气碳同位素发生改变，在扣除大气背景后，反应叶片气孔状态和光合作用的相关指标 $\chi=C_i/C_a$ 和 $\Delta^{13}C$ 长期保持稳定，该结果不支持毛白杨近百年来气孔持续单向关闭的简单推论。但是叶片胞间 CO_2 绝对浓度随大气 CO_2 浓度同步升高。

（3） 1951─2015 年北京整体变得更暖更干燥，气温、饱和水汽压亏缺（VPD）显著升高，降水、相对湿度显著降低。树木径向生长受多种因素共同影响，和气候的直接联系不明显；但叶片碳同位素指标对水分条件很敏感，干旱湿润的年际变化会明显影响叶片生理状态。

（4） 虽然树木叶片水分利用效率整体在提高，但效率提升并没有带来树木径向生长变快，二者出现脱节，这是树木为了适应环境做出的生存权衡。统计结果也表明，饱和水汽压亏缺（VPD）和温度，是影响毛白杨叶片气体交换的主要环境因素。

总的来看，近百年来气候环境不断变化，清华园的毛白杨形成了自己的适应模式：叶片气孔相对稳定，内部二氧化碳随大气同步升高，对每年的干旱湿润变化反应明显，水分利用效率提高，却没有转化成树干更快生长。

4.2 研究展望

本研究厘清了清华园百年毛白杨尺度生长与碳水生理权衡的核心规律，但受样本条件、数据时长与分析手段限制，仍存在部分未能充分挖掘的科学问题。结合本研究已获得的结论，后续可以从模型模拟、极端气候信号解析两个方向继续拓展研究，进一步完善城市人工树种气候适应性评估。

（1）未来气候趋势的模拟预测

树轮稳定同位素研究能够还原区域历史气候变迁规律，揭示气候变化对森林生态系统的长期影响机制，可为气候趋势研判、生态保护修复、环境治理政策制定提供重要的科学依据，具备生态预警的现实意义。本研究原本设想借助同位素监测数据，开展北京地区未来气候趋势的预测探究，但受客观条件限制，暂无法获取气象部门专用的气候预测模型，后续可引入最小成本最优性假说（least-cost optimality hypothesis）相关模型开展进一步分析。

（2） 极端气候的识别

受本次研究条件所限，本研究尚未针对树轮同位素序列中的极端气候信号开展深度挖掘，历史极端事件甄别以及极端气候情景的推断分析将作为本研究后续重要的拓展方向，后续将进

2026 S.T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖公示

一步提取同位素记录中的极端气候信息，探究城市森林在极端胁迫下的生理与碳收支波动规律，以期为极端气候风险评估提供更多依据。

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

参考文献

[1] Fritts H C. Tree Rings and Climate[M]. London: Academic Press, 1976.

[2] Graven H, Allison C E, Etheridge D M, et al. Compiled records of carbon isotopes in atmospheric CO_2 for historical simulations in CMIP6[J]. Geoscientific Model Development, 2017, 10: 4405–4417.

[3] Grossiord C, Buckley T N, Cernusak L A, et al. Plant responses to rising vapor pressure deficit[J]. New Phytologist, 2020, 226: 1550–1566.

[4] 廖昌蕊, 杨保. 树轮稳定碳同位素研究进展[J]. 第四纪研究, 2024, 44(4): 1044-1061.

[5] 刘晓宏, 徐国保, 王文志, 等. 树轮稳定同位素记录：进展、问题及展望[J]. 第四纪研究, 2015, 35(5): 1245-1260.

[6] McCarroll D, Loader N J. Stable isotopes in tree rings[J]. Quaternary Science Reviews, 2004, 23: 771–801.

[7] Siegwolf R T W, Brooks J R, Roden J, Saurer M, eds. Stable Isotopes in Tree Rings: Inferring Physiological, Climatic and Environmental Responses[M]. Cham: Springer, 2022.

[8] Cook E R. A Time Series Analysis Approach to Tree-Ring Standardization[S]. Tucson: University of Arizona, 1985.

[9] Farquhar G D, O'Leary M H, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1982, 9: 121-137.

[10] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1989, 40: 503-537.

[11] Cernusak L A, Ubierna N, Winter K, et al. Environmental and physiological determinants of carbon isotope discrimination in terrestrial plants[J]. New Phytologist, 2013, 200: 950-965.

[12] Ubierna N, Farquhar G D. Advances in measurements and models of photosynthetic carbon isotope discrimination in C_3 plants[J]. Plant, Cell & Environment, 2014, 37: 1494-1498.

[13] Seibt U, Rajabi A, Griffiths H, Berry J A. Carbon isotopes and water use efficiency: sense and sensitivity[J]. Oecologia, 2008, 155: 441–454.

[14] Medlyn B E, Duursma R A, Eamus D, et al. Reconciling the optimal and empirical approaches to modelling stomatal conductance[J]. Global Change Biology, 2011, 17: 2134–2144.

[15] Buckley T N. Modeling stomatal conductance[J]. Plant Physiology, 2017, 174: 572–582.

[16] Lavergne A, Voelker S, Csank A, et al. Historical changes in the stomatal limitation of photosynthesis: empirical support for an optimality principle[J]. New Phytologist, 2020, 225: 2484–2497. doi:10.1111/nph.16314.

[17] Prentice I C, Dong N, Gleason S M, Maire V, Wright I J. Balancing the costs of carbon gain and water transport: testing a new theoretical framework for plant functional ecology[J]. Ecology Letters, 2014, 17: 82–91.

[18] Wang H, Prentice I C, Keenan T F, et al. Towards a universal model for carbon dioxide uptake by plants[J]. Nature Plants, 2017, 3: 734–741.

2026 S.T. Yau High School Science Award 仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

[19] Saurer M, Siegwolf R T W, Schweingruber F H. Carbon isotope discrimination indicates improving water-use efficiency of trees in northern Eurasia over the last 100 years. Global Change Biology[J], 2004, 10: 2109–2120.

[20] Frank D C, Poulter B, Saurer M, et al. Water-use efficiency and transpiration across European forests during the Anthropocene[J]. Nature Climate Change, 2015, 5: 579–583.

[21] 张敬远. 黑龙江省樟子松人工林树轮稳定碳同位素变化及其环境指示[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.

[22] 靳翔, 徐庆, 刘世荣, 姜春前. 川西亚高山不同海拔岷江冷杉树轮碳稳定同位素对气候的响应[J]. 生态学报, 2014, 34(7): 1831-1840.

[23] 秦莉, 尚华明, 张同文, 等. 天山南北坡树轮稳定碳同位素对气候的响应差异[J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5713-5724.

[24] 孙振静．兴安落叶松生长及碳氮同位素含量对环境变化的响应[D]．东北林业大学,2019

[25] 郑紫薇. 山东塔山黑松树轮稳定碳同位素组成及其气候意义[D].山东师范大学,2014

[26] 徐成文. 山东沂山油松树轮宽度年表及 δ~(13)C 年序列的气候意义[D] 山东师范大学,2015

[27] 顾洪亮, 王建, 商志远, 马丽娟, 张起鹏.马尾松树轮早材、晚材年表对气候因子响应的敏感性分析[J]．长江流域资源与环境, 2020,29(5):1150-1162.

[28] 曾增.气候条件对城市毛白杨树木径向生长的影响[D].北京林业大学, 2023.

[29] 李夏榕.林分与气候因子对京郊道路林毛白杨径向生长的影响[D].北京林业大学,2021.

[30] Belmecheri, S. and Lavergne, A. Compiled records of atmospheric CO_2 concentrations and stable carbon isotopes to reconstruct climate and derive plant ecophysiological indices from tree rings[J]. Dendrochronologia, 2020, 63, 125748.

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示

致谢

先说说我做这个课题的缘由。我对生态环境与气候变化领域的探索，源于童年时期的真切生活体验。幼时父亲罹患白血病，在漫长的治疗过程中，我逐渐发现空气污染、土壤污染、水污染等环境问题不断破坏自然生态，也间接影响着人们的身体健康，意识到地球生态失衡正在给人类带来诸多健康隐患，这份感触让我早早萌生了关注生态保护、践行可持续发展研究的初心。

小学阶段，我作为清华附小的学生代表前往北极参与科考实践，围绕全球气候热点问题开展探究，完成课题《气候变暖对北极地区冻土有机碳分解的影响》。该课题聚焦极地冻土碳循环这一生态学关键议题，通过实地观察、采样、实验分析完成探究，并最终荣获全国小院士一等课题称号，这进一步点燃了我深耕生态学的兴趣。步入中学后，我始终坚持夯实专业基础，每周二晚上都会前往清华大学旁听生态学通识课程，系统学习生态学基础理论，培养科学探究思维，持续跟进生态领域的前沿知识。从小学时期探究北极冻土有机碳与气候变化的相互作用，到中学阶段开展古树树轮稳定同位素与气候变迁的专项研究，两段科研实践让我深刻意识到，碳循环是影响全球气候变化的关键要素，碳元素的动态变化对气候系统的稳定有着举足轻重的作用。当前处于厄尔尼诺现象影响周期，高温、干旱等极端天气事件频发，识别历史极端气候事件、解析森林生态系统对极端气候的胁迫响应，对气候风险研判有着重要现实意义。

2024 年 5 月 30 日，北京遭遇强对流极端大风天气，清华园内多棵百年毛白杨古树倒伏受损。丘成桐教授在《我的教育观》中谈及校园白杨倒伏的感悟时提到，“清华大学静斋门前有九棵又高又大的白杨树，我一直以为它们可以档风遮雨。但是，半年前，一阵大风刮来。不到 20 分钟，半数白扬树倒下了。我这才发现，这些大树虽然很威武，但根茎太短，愈高大愈不稳定。很明显，科研和教育与此类似。好的科研必须有经过良好训练的年轻学者支持！这些学者必须有扎实的基本学识，又有浓厚的好奇心和想象力，三者缺一不可。在尖端的科研领域，后两者更为重要。”丘教授在书中的话让我备受鼓舞与启发，这些生长百年的古树，是记录区域百年气候变化的珍贵自然样本。而我自小的经历让我对地球生态、可持续发展方面有额外浓厚的兴趣，我经常思考北方城市持续升温、降水减少的暖干化气候，对我周围这些树木的生长会不会有影响，而这些树木又是如何适应这种气候变化的，带着这样的好奇，我开展了本次课题。

本课题的顺利完成，首先由衷感谢清华大学地球系统科学系王焓教授。从前期稳定同位素生态学相关基础知识的学习，到课题选题、研究框架搭建、技术路线设计，王老师都给予了细致的专业指导。王老师严谨审慎的科研态度、求真务实的治学精神，为我树立了科研标杆，也将指引我未来的学术探索之路。

衷心感谢厦门大学环境与生态学院的吴浩教授，为本次研究提供了专业的实验平台，在树轮 α-纤维素提取、稳定碳同位素测定等核心实验中给予专业技术指导，保障了实验数据的精准有效。当然，在这个过程中，我也遇到了很多困难，尤其在样品纤维素提取阶段，当时面临的

2026 Siyau High School Science Award
仅用于2026年思源中学科学奖公示

主要难题是百年树轮样品木质化程度高，纤维素与木质素、半纤维素结合紧密，常规方法难以高效分离。为解决此问题，我通过查阅文献，在吴老师的指导下进行多次预实验，优化了酸 - 碱交替处理的实验参数，精准控制了反应温度和时间。同时，引入了超声波辅助提取，有效提高了纤维素的提取效率，为后续稳定碳同位素的精确测定奠定了坚实基础。

在数据统计分析核心环节，吴老师耐心为我讲解 Farquhar 同位素模型、年轮标准化处理、BH-FDR 多重检验等核心理论与研究方法，帮我逐一攻克科研难点。

衷心感谢我校万丹老师。在论文撰写及定稿阶段，老师逐字逐句打磨全文内容，细致梳理摘要、研究结果、讨论结论的逻辑架构，修正行文疏漏、优化学术表达，为本论文的完善与提高提供了极大帮助。

感谢清华大学地球系统科学系的周建老师。在古树倒伏后的野外取样、树轮圆盘打磨、逐年年轮剥离等繁琐繁重的前期实验工作中悉心帮扶，高效推进样品前处理工作，保障了本课题实验工作的顺利开展。

感谢国家气象观测站点提供的长时序、高精度气象数据集。完整的月尺度温度、湿度、降水量、饱和水汽压亏缺等观测资料，为探究区域气候变化特征、开展树木气候响应分析奠定了核心数据基础。

感恩我的家人。在漫长的课题研究与论文撰写周期中，家人始终默默包容我科研路上的压力与奔波，在生活上悉心照料、在精神上鼎力支持，让我能够心无旁骛、专注投入研究工作，顺利完成全部科研任务。

最后，感谢百忙之中参与本论文评审、答辩的各位专家学者。

从关注生态与人居健康的初心，到北极科考的初步探索，再到依托百年古树开展气候溯源研究，我的科研之路始终扎根现实问题，以扎实的学识为根基，保持对自然科学的好奇与探索欲。未来我也将继续深耕生态与气候变化领域，用青少年的视角探索生态保护与可持续发展的可行路径。

分工与合作：

清华大学王焓老师指导本课题的选题立意与研究方案设计，稳定同位素生态学相关基础知识的指导。

在清华大学周建老师的指导协助下，本人主要负责树木样本获取、树轮宽度测量、数据整理统计与结果图表绘制，完成年轮去趋势处理、相关性分析及多元回归模型构建等数据分析工作。

在厦门大学吴浩老师的专业指导下，本人参与实验方案设计，独立完成树轮纤维素提取与稳定碳同位素（$\delta^{13}C$）测试等核心实验操作，顺利完成本研究的实验测定工作。吴老师在数据分析方法、研究框架搭建及论文整体结构把控方面给予了关键性指导。

2026 S. T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖公示

我校万丹老师在论文撰写与定稿阶段，对全文内容进行细致校对、逻辑梳理与内容把关，有效提升了论文的规范性与完整性。

本研究指导均为无偿指导。

AI 使用情况说明：

在本研究的数据准备与处理阶段，本人使用了人工智能助手（网页端）作为辅助工具，使用前已事先征得指导教师许可。AI 使用严格遵循“辅助而非替代”的原则，仅用于规则允许的辅助性工作，具体包括：解读中国地面气候资料月值数据集（北京地区 1951—2015 年月值数据）的官方格式说明，明确 26 个气象要素的字段定义、计量单位及缺测值和特殊编码（如 32766 缺测、32744 现象未出现）的含义；在 AI 辅助下编写并调试 Python 数据解析脚本，完成单位换算（0.1℃→℃、0.1hPa→kPa 等）与上述特殊编码的规范化处理，生成结构化数据文件与数据字典；以独立方式对脚本输出与原始数据逐项交叉核验，确认全部 1170 条记录完整无丢失、标准化数值与原始值一一对应。AI 使用时间为 2026 年 5 月份的数据准备与处理阶段，同时，对于一些基本概念也会咨询 AI。相关聊天记录已完整留存，将按要求作为“其他材料”随研究报告提交组委会核查。AI 产出的代码与数据处理结果均经本人逐项人工核验后采用，研究报告的选题构思、研究设计、核心论证、实验验证与学术表达等主体部分均由本人独立完成，未将 AI 作为“代写”工具，未使用 AI 生成虚假文献或伪造数据，同时所用数据均为公开气象数据集，未上传任何涉密、敏感或未经授权数据。特此如实说明。

2026 S.-T. Yau High School Science Award
仅用于2026丘成桐中学科学奖论文公示