



青藏高原树木年轮生态学研究

张齐兵 方欧娅 吕利新 著



科学出版社

青藏高原树木年轮生态学研究

张齐兵 方欧娅 吕利新 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书介绍了青藏高原树木年轮生态学最新研究进展,是作者长期从事该领域研究的系统归纳。全书共分8章,第1、2章为绪论和研究方法,是树木年轮生态学的基础;第3~7章分别介绍了青藏高原树木生态弹性、森林衰退、高山林线、古树年龄及其他树木年轮生态学问题的最新研究进展;第8章对青藏高原树木年轮生态学的未来重点研究方向提出了建议。

本书可供树木年轮学、全球变化生态学、青藏高原森林生态学与气候学等领域科研人员 and 高校师生,以及青藏高原森林保护和生态建设的管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

青藏高原树木年轮生态学研究/张齐兵,方欧娅,吕利新著. —北京:科学出版社,2019.10

ISBN 978-7-03-062181-8

I. ①青… II. ①张… ②方… ③吕… III. ①青藏高原-森林生态学-年轮研究 IV. ①S718.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第182432号

责任编辑:李迪 / 责任校对:郑金红
责任印制:吴兆东 / 封面设计:刘新新

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年10月第一版 开本:720×1000 1/16

2019年10月第一次印刷 印张:8

字数:161 000

定价:128.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

“欲知大道，必先为史”，人类想要预知未来的环境状况，就需要首先了解环境状况的历史。树木年轮（简称“树轮”）数据具有空间分布广、时间序列长、分辨率高、定年准确且复本量大的特征，近 100 多年来，在古气候与古生态研究中发挥了重要的作用。

我国的树轮年代学自 20 世纪 70 年代开始以来，在古气候重建领域取得了丰硕的成果。在青藏高原柴达木盆地周边建立的祁连圆柏树轮宽度序列，从最初的近千年长度一直延伸到现在的 4000 多年；树轮年代学研究的指标也从仅树轮宽度一项到增加了密度、稳定性同位素及重金属元素等多项；除古气候变化研究外，在考古鉴定、冰川进退判断、地震滑坡灾害、森林火灾等方面的研究也取得了优异的成绩。

张齐兵研究员带领的树木年轮研究团队专注于研究青藏高原的树轮年代学，自 2001 年以来每年赴青藏高原进行野外考察和树轮样本采集工作，2004 年进入中国科学院植物研究所后率领团队一直致力于高原树木年轮生态学研究，在树轮生态学研究方法、树木生态弹性、森林衰退历史及高山林线等多方面取得了丰硕的成果。方欧娅博士自 2016 年从中国科学院地理科学与资源研究所博士毕业到中国科学院植物研究所后开展了高原森林退化与树木生态弹性的研究，近年来取得了显著成果。吕利新博士自 2006 年开始从事全球气候变化与高原林线的研究，获得了大量的林线树轮数据，取得了可喜的成果。该书综合考虑了青藏高原树轮生态学的内容，结合自身研究优势，对树木生态学研究方法、树木生态弹性、森林衰退历史、高山林线等重要生态学问题进行了分章详述，从方法、数据，到研究结果、结论，体现出作者对青藏高原树轮生态学进行了较深的研究，在利用树轮资料研究森林生态问题方面起到了引领作用，为我国树木年轮生态学的发展做出了贡献。

这些年我与作者团队有着紧密的联系，我非常高兴看见这样一本有关青藏高原树轮生态学的综合性图书出版。该书对于将要学习树木年轮生态学的学生，对于想要了解青藏高原森林生态过程的科学工作者都是非常有用的。当然，每一门科学都在持续地发展和进步，我也期待作者团队及更多的研究学者在青藏高原树轮生态学的未来研究中取得更好的成绩。

邵雪梅

2019 年 4 月 8 日

前 言

20 世纪初, 科研人员在利用树木年轮研究太阳黑子信号、气候变化、古遗址年代等方面的问题中, 建立了不同树木之间年轮宽度序列的交叉定年技术, 从而可以对每一树木年轮的形成年份给予准确定年。伴随该技术及相关原理的应用, 树轮年代学作为一门学科得以创建。与此同时, 基于对树木年轮与气候环境关系的分析, 树木年轮生态学也相应产生。目前, 国际上在树木生长对全球变化的响应、森林干扰历史、林线动态等树木年轮生态学领域取得了大量研究成果。

我国较早介绍树木年轮及其与气候关系的研究见于 1935 年郑子政发表在《气象杂志》的《探求古代气候之一途径——树木年轮之研究》。经过 20 世纪 70 年代和 80 年代的早期探索研究后, 我国科研人员在树木年轮气候学领域的研究开始快速发展, 对生态学问题也逐渐开始关注。本书在结合相关研究报道的基础上, 重点介绍作者研究团队自 2001 年开始在青藏高原进行的树木年轮生态学工作, 以服务于本学科及其他有关学科的研究, 并为相关部门的工作提供区域森林生态历史信息。

本书第 1 章简要介绍树木年轮生态学的研究背景、基本概念及其在青藏高原的研究意义和概况。第 2 章介绍树木年轮生态学研究的基本方法。第 3 章阐述树木生态弹性的概念与研究, 并介绍青藏高原的树木生态弹性与生长适应性。第 4 章介绍森林衰退历史研究。第 5 章介绍高山林线树木年轮研究, 包括海拔梯度上的树木生长、林线树木更新及位置移动。第 6 章介绍古树树龄鉴定方法与生长历史分析。第 7 章介绍青藏高原的树轮数据网络特征。第 8 章对树木年轮生态学未来研究方向提出展望。

感谢国家自然科学基金(重点项目 31330015)和中国科学院战略性先导科技专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”子课题“气候变化背景下生态系统脆弱性评估”(XDA20050101)对编著本书给予的经费支持。书中基础数据和分析结果来自作者过去与现在研究团队成员长期工作的积累, 感谢团队成员黄建国、邱红岩、余桂荣、李宗善、王婷、王晓春、刘勇波、郭改爱、石春明、吕利新、张潮、邢佩、聂昌远、段建平、邓徐、梁寒雪、刘娟、李宝、汪舟、程雪寒、牟玉梅、蒲星、方欧娅、李艳、宋馥杉、张启和贾恒锋。

我国青藏高原的树木年轮生态学研究虽然取得了一些成绩，但尚有许多工作需要继续开展，并可扩展到我国其他地区。本书在写作过程中难免有不足之处，敬请读者指正。

张齐兵

2019年4月4日

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 树木年轮生态学概念	2
1.3 青藏高原树木年轮生态学研究	3
第2章 树木年轮生态学研究方法	5
2.1 树木年轮样本的选择与采集	5
2.1.1 样点、树种、个体的选择	5
2.1.2 样本的采集	6
2.2 树木年轮的测量	8
2.2.1 树轮宽度	8
2.2.2 树轮密度	9
2.2.3 树轮稳定性同位素	9
2.3 树木年轮的交叉定年	10
2.3.1 交叉定年原理	10
2.3.2 交叉定年步骤	11
2.4 树木年轮年表	13
2.4.1 信号与噪声	13
2.4.2 树轮年表的制作	15
第3章 树木生态弹性	16
3.1 生态弹性的概念与研究	16
3.1.1 生态弹性的概念	16
3.1.2 树木生态弹性研究	16
3.2 青藏高原的树木生态弹性	19
3.2.1 树木年轮数据	19
3.2.2 极端干旱事件	21
3.2.3 树木生态弹性的计算	22
3.2.4 树木生态弹性的时空特征	22

3.2.5 青藏高原树木生态弹性的影响因素	24
3.3 青藏高原树木生长适应性策略	28
3.3.1 青海省同德县黄河河漫滩甘蒙怪柳林	29
3.3.2 影响甘蒙怪柳生长的环境因子	33
3.3.3 甘蒙怪柳的多株合生	36
第4章 森林衰退历史	38
4.1 研究背景	38
4.2 青海省曲麻莱县过去三个半世纪森林衰退历史	39
4.2.1 研究区概况与树轮数据	39
4.2.2 曲麻莱县森林衰退历史	39
4.2.3 曲麻莱县森林衰退原因探讨	41
4.3 青海省囊谦县过去四个世纪森林衰退历史	42
4.3.1 研究区概况与树轮数据	42
4.3.2 囊谦县森林衰退历史	43
4.3.3 囊谦县森林衰退原因探讨	44
4.4 青藏高原 18 世纪末森林死亡事件	45
4.4.1 研究区概况与树轮数据	45
4.4.2 青藏高原过去 400 年中的森林死亡事件	47
4.4.3 18 世纪末森林死亡事件的原因	48
4.4.4 18 世纪末森林死亡事件的后果	49
4.5 树木生长衰退鉴定方法	51
第5章 青藏高原高山林线树木年轮研究	52
5.1 研究背景	52
5.1.1 高山林线的概念	52
5.1.2 高山林线研究的科学问题	54
5.2 高山林线的树木生长	55
5.2.1 海拔梯度上的树木生长及其对气候的响应	55
5.2.2 高山林线树木生长及其与主要气候因子的关系	58
5.2.3 高山林线树木生长监测研究	63
5.3 高山林线的树木更新	63
5.4 高山林线位置的移动	66

第 6 章 古树树龄与生长历史	69
6.1 古树树龄鉴定方法	69
6.2 三江源区古树树龄与生长历史	71
6.2.1 区域树轮数据	71
6.2.2 杂多县古树树龄与生长历史	72
6.2.3 曲麻莱县古树树龄与生长历史	73
6.2.4 治多县古树树龄与生长历史	75
6.2.5 班玛县古树树龄与生长历史	77
第 7 章 青藏高原树轮数据网络	79
7.1 树轮数据的空间范围	79
7.2 树轮数据的时间长度	80
7.2.1 中国最长的树轮年表	80
7.2.2 千年树轮年表	81
7.3 树木生长与气候的关系	84
7.3.1 树轮宽度	84
7.3.2 树轮密度	87
7.3.3 树轮稳定性同位素	90
7.4 树木生长的时空格局	91
第 8 章 研究展望	94
参考文献	96

图 目 录

图 1-1	树木年轮早材和晚材	2
图 2-1	生态幅示意图	6
图 2-2	树木伪年轮图	10
图 2-3	树木丢失年轮示意图	10
图 2-4	树轮样本定年标点示意图	12
图 2-5	树轮交叉定年骨架图	12
图 2-6	树轮宽度序列去趋势	14
图 3-1	树木生长生态弹性变量计算示意图	18
图 3-2	青藏高原 28 个典型柏树林采样点分布图	20
图 3-3	极端干旱年的选取	22
图 3-4	区域树木抵抗力与恢复力计算示意图	23
图 3-5	极端干旱事件年及其前后树轮指数统计	23
图 3-6	树木个体对极端干旱的抵抗力与恢复力统计箱线图	24
图 3-7	极端干旱事件中各样点高抵抗力树木比例	25
图 3-8	极端干旱事件中各样点高恢复力树木比例	25
图 3-9	GLK 值计算示意图	26
图 3-10	树木抵抗力与其影响因素散点图	27
图 3-11	树木恢复力与其影响因素散点图	28
图 3-12	甘蒙柽柳采样点及气象站位置图	29
图 3-13	同德县然果村甘蒙柽柳林	30
图 3-14	同德县然果村一株甘蒙柽柳	30
图 3-15	同德县甘蒙柽柳树轮宽度标准年表	32
图 3-16	同德县甘蒙柽柳个体年龄递增与径向生长累加的关系	33
图 3-17	柽柳倒木圆盘样本	33
图 3-18	然果村甘蒙柽柳生长与风速的相关关系	34
图 3-19	然果村甘蒙柽柳生长与径流的相关关系	34
图 3-20	班多村甘蒙柽柳生长与风速的相关关系	35
图 3-21	班多村甘蒙柽柳生长与径流的相关关系	35

图 3-22	然果村甘蒙桤柳生长与风速的滑动相关	36
图 3-23	多株合生的桤柳	36
图 3-24	编号为 RG-X05 桤柳样本的分株年龄及半径	37
图 4-1	曲麻莱县一棵大果圆柏及其生境	40
图 4-2	过去 372 年曲麻莱县大果圆柏树木生长变化百分率	41
图 4-3	曲麻莱县大果圆柏生长与温度和降水的相关关系	41
图 4-4	囊谦县东坝乡树轮采样地实景	42
图 4-5	囊谦县东坝乡森林衰退历史	43
图 4-6	衰退树和非衰退树平均树轮宽度指数对比	44
图 4-7	西藏墨脱县的森林衰退景观	45
图 4-8	青藏高原东北部 11 个柏树树轮采样点位置分布图	46
图 4-9	青海省都兰县树轮采样点实景	46
图 4-10	青藏高原东北部树轮变化异常期鉴定	48
图 4-11	森林死亡事件中释放树与非释放树生长状况	49
图 4-12	18 世纪末青藏高原东北部树轮异常空间图	50
图 4-13	Dunde 冰芯记录的 10 年分辨率微粒数据	50
图 5-1	昌都市类乌齐县滨达乡川西云杉林线	53
图 5-2	西藏定结县不同海拔喜马拉雅冷杉宽度与气候因子的相关系数	56
图 5-3	西藏八宿县不同海拔云杉树轮序列平均敏感度及生长一致性	58
图 5-4	芬兰纬度和青藏高原海拔梯度上树木生长变化对比	59
图 5-5	芬兰纬度和青藏高原海拔梯度上树木生长关键期的变化	59
图 5-6	西藏亚东县高山林线附近高山柏树轮宽度与气候因子的相关系数	60
图 5-7	西藏八宿县川西云杉林线生态过渡带样方树木分布图	61
图 5-8	青藏高原南部三条高海拔林线树轮宽度指数与 5~7 月平均蒸散的关系	62
图 5-9	西藏昂仁县大果圆柏林线树轮宽度指数与 5~7 月平均风速的关系	62
图 5-10	西藏定结县不同海拔样地喜马拉雅冷杉更新历史和树轮宽度标准年表	64
图 5-11	西藏定结县喜马拉雅冷杉林线更新与平均温度的相关系数	64
图 5-12	去趋势后的冷杉幼苗更新与 6~9 月平均温度 (T_{JJAS}) 的对应关系	65
图 5-13	西藏昌都市丁青县川西云杉林线树木更新历史	66
图 5-14	西藏丁青县昌娘林线 (CNT) 三个样地树木空间分布图	67
图 6-1	三江源区大果圆柏树轮宽度标准年表及采样样本量	72
图 6-2	杂多县昂赛乡大果圆柏古树	72
图 6-3	杂多县昂赛乡大果圆柏古树树轮宽度序列	73

图 6-4	曲麻莱县约改镇岗当村大果圆柏古树·····	74
图 6-5	曲麻莱县约改镇岗当村大果圆柏古树树轮宽度序列·····	75
图 6-6	治多县立新乡夏日寺旁大果圆柏古树·····	76
图 6-7	治多县立新乡夏日寺旁大果圆柏古树树轮宽度序列·····	77
图 6-8	班玛县马可河林场哑巴沟川西云杉“三江源第一松”·····	77
图 6-9	班玛县马可河林场哑巴沟川西云杉“三江源第一松”树轮宽度序列·····	78
图 7-1	青藏高原树木年轮数据库 Google Earth 地图·····	79
图 7-2	青海都兰县热水古墓墓室的祁连圆柏原木·····	80
图 7-3	青海都兰县公元前 326 年至公元 2000 年祁连圆柏树轮 宽度年表与样本量·····	81
图 7-4	西藏比如县大果圆柏树轮宽度标准年表与样本量·····	82
图 7-5	西藏昌都市卡若区大果圆柏树轮宽度标准年表与样本量·····	83
图 7-6	西藏林芝巨柏·····	83
图 7-7	西藏比如县标准化降水蒸发指数 (SPEI) 重建·····	85
图 7-8	西藏昌都市卡若区疏林和郁闭林大果圆柏 (a)、西藏云杉 (b) 与 气候因子的相关性·····	87
图 7-9	藏东南川西云杉树轮最大晚材密度与温度的空间相关·····	88
图 7-10	藏东南川西云杉树轮密度年表重建 4~9 月温度·····	88
图 7-11	藏东南 4~9 月温度波动与太阳活动的关系·····	89
图 7-12	昌都市川西云杉树轮最大晚材密度年表·····	89
图 7-13	青藏高原南部川西云杉树轮最大晚材密度与树轮宽度差值序列·····	90
图 7-14	波密地区云杉树轮氧同位素序列及云量反演·····	91
图 7-15	青藏高原 23 个树木年轮采样点位置·····	92
图 7-16	青藏高原 23 个样点在公共区间上的主成分及聚类分析·····	93

表 目 录

表 3-1	青藏高原 28 个典型柏树林采样点信息	20
表 3-2	青海省同德县甘蒙怪柳采样信息	31
表 4-1	曲麻莱县大果圆柏树轮统计特征	40
表 4-2	囊谦县东坝乡大果圆柏树轮采样信息	43
表 4-3	青藏高原北部 11 个柏树树轮采样点信息	47
表 6-1	三江源区杂多县、曲麻莱县、治多县和班玛县树轮统计特征	71
表 7-1	青藏高原东南部 5 个树轮采样点信息	89

第1章 绪 论

1.1 研究背景

中国森林面积 2.08 亿 hm^2 ，森林覆盖率 21.63%，其中天然林占全国森林总面积的 55.36%（国家统计局和环境保护部，2017）。作为重要的陆地生态系统之一，森林具有巨大的社会、经济和生态效益，在调节气候、水土保持、防风固沙、保护生物多样性、提供资源和服务等多方面都发挥着重要的作用。在目前全球变暖 and 人类活动加剧的背景下，树木的生长速率、种间关系、物候和空间分布会发生变化，森林蓄积量、群落结构和功能等方面也相应地发生变化。为保证人类社会与经济的可持续发展，就需要准确评估全球气候变化和人类活动影响下的森林生态健康风险，以制定科学管理政策。

准确评估森林生态健康风险依赖于对森林生态过程和格局的认识程度。生态过程包括树木对气候及其他环境因子变化的响应和适应、树间竞争或互利、树木更新等过程；生态格局包括种群或群落结构、树木空间分布、景观格局等。这些生态过程和格局的形成大多跨越较长的时间尺度。通过现代观测记录和实验方法仅可以获得短时间尺度的生态学知识，而全面认识森林生态过程和格局需要获得更长时间尺度的相关数据。

森林中的树木可以生长数百年甚至上千年，见证了森林生态过程和格局形成的历史，并将相关信息记录在每一年的树木年轮（简称“树轮”）之中。通过分析树轮与环境变化的关系，可获得树木生长的生态过程信息，还可推测塑造森林生态格局的环境因子变化信息，包括气候、森林火、虫害、环境污染等。因此，通过对树轮的研究，可加深对长时间尺度森林生态过程和格局的认识，有利于准确评估森林生态健康风险的发生条件、过程和结果。这种利用树轮来研究树木生长及其与环境关系的学科被称为树木年轮生态学（简称“树轮生态学”，*dendroecology*），它是古生态学研究的重要分支之一。

树木年轮的形成

树木茎干的韧皮部与木质部中间存在一圈形成层，其在生长季早期向内分裂形成的木质部细胞在分化时体积大、壁薄、颜色较浅，称为早材，在生长季末形成的细胞则体积小、壁厚、颜色较深，称为晚材。浅色早材和深色晚材合

起来就是树木一年所形成的木材，即年轮（图 1-1）。

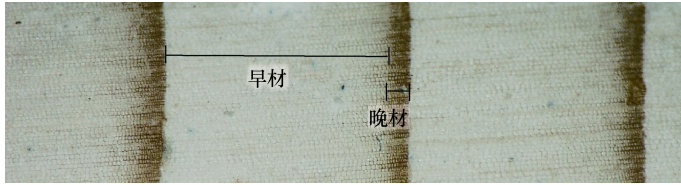


图 1-1 树木年轮早材和晚材

1.2 树木年轮生态学概念

树木年轮生态学是树轮年代学（dendrochronology）的一个分支学科。树轮年代学是基于对树轮形成的年份给以准确定年，并分析在时间维度上树轮变化的特征及环境原因（如气温、降水、森林火灾、虫害、人类活动等），进而研究相关气候及生态因子在树木生长时期的变化历史或确定某一事件发生年代的一门学科。树轮年代学的相关书籍见 Fritts (1976)、Cook 和 Kairiukstis (1990)、Schweingruber (1996) 和 Speer (2010)。树轮年代学的核心是对树轮的形成年份进行准确定年。在此基础上，利用树轮数据对不同领域科学问题的研究形成树轮年代学的各分支学科，如研究过去气候变化的树轮气候学（dendroclimatology）、研究过去水文条件变化的树轮水文学（dendrohydrology）、研究过去地貌变化的树轮地貌学（dendrogeomorphology）、研究过去冰川变化的树轮冰川学（dendroglaciology）、研究过去森林虫害历史的树轮虫害学（dendroentomology）、研究过去森林火灾历史的树轮火灾学（dendropyrochronology）、研究过去环境污染或土壤中植物营养元素变化的树轮化学（dendrochemistry）、研究古迹年代鉴定的树轮考古学（dendroarchaeology）等。广义的树轮生态学涵盖从树轮中获取各种环境信息（包括气候、水文、地貌、冰川等）的研究（Schweingruber, 1996），而狭义的树轮生态学专注于回答树木生长的生态过程与格局问题，包括树木生长对自然干扰的响应与弹性、树木生长与生境因子的关系、森林结构的形成与维持等。本书所述论的树轮生态学着重介绍树木生长的生态过程与格局研究。

树木年轮生态学主要包含以下 4 方面的应用。

第一，树木年轮的形成年份可通过对树轮宽度序列的交叉定年而精确确定，并进而获得各年份的树轮密度及化学元素等信息，这些信息可直观地说明树木自身在过去的生长轨迹，可应用于鉴定树木生长释放、抑制、衰退、生长弹性、生理过程等特征。

第二，树木径向生长是各种环境因子综合作用的结果，因而利用树轮数据可分析树木生长与各环境因子的关系。

第三，树木通常具有较长的寿命，利用森林群落树轮数据及树轮所包含的环境信息可研究不同时间尺度的森林生态过程（如树间竞争、互利、森林动态、自然干扰发生的频率、强度变化等）。

第四，树木具有较广的空间分布，利用大范围的树轮网络数据库可研究不同空间尺度的生态格局（如种群与群落结构、生境空间异质性、景观格局等）。

1.3 青藏高原树木年轮生态学研究

青藏高原位于我国西南部，平均海拔超过 4000m，被誉为“世界屋脊”“第三极”。其东接黄土高原、秦岭山脉和横断山脉，西抵帕米尔高原和喀喇昆仑山脉，南起喜马拉雅山南部边缘，北至祁连山、阿尔金山、昆仑山北部边缘。高原东西横跨 31 个经度，长约 2800km，南北纵贯 13 个纬度，宽达 1500km，总面积约 $2.50 \times 10^6 \text{km}^2$ （张镜锂等，2002）。巨大的高原存在地形和热力效应，使得西风发生绕流，南亚季风强度受到调控，从而影响了多地区的气候条件（Immerzeel et al., 2010; Duan et al., 2012）；同时高原对全球气候变化敏感，是全球变暖的指示区（Yao et al., 2012）。

青藏高原是我国重要的生态安全屏障和战略资源储备基地。高原上有着丰富的水资源，是中国重要的两条母亲河的发源地，同时发育了多条内陆河及外流河，故而也被称为“亚洲水塔”。高原上的森林类型主要包括常绿阔叶林、落叶阔叶林、山地松林、亚高山暗针叶林、高山灌丛等。这些森林在水源涵养、土壤保持、生物多样性保护和森林生态系统服务价值等方面具有重要服务功能（钟祥浩等，2008）。我国在 1973~1976 年组织了对青藏高原的首次综合科学考察工作，并在 2017 年启动了第二次综合科学考察，更加强调了多学科综合集成研究及与全球环境变化相联系的研究。高原上有着独特的动植物种类，保护其栖息地生态稳定对于维护高寒生物多样性具有重要意义。

分布在青藏高原的森林受到人类活动的影响相对较小，有大片树龄较大的成熟林，对气候变化和自然干扰响应敏感，树木年轮生态学是研究高寒生态过程和格局的重要方法。过去的研究已经在青藏高原多地区建立了较长时间段的树轮宽度（如 Shao et al., 2009; Yang et al., 2014a）、密度（如 Duan et al., 2017; Li et al., 2018b）及稳定同位素（如 Griebinger et al., 2011; Qin et al., 2015）年表，开展了大量的过去气候重建工作（如 Shao et al., 2010; Gou et al., 2015; Zhang et al., 2015; Duan et al., 2017; Yang et al., 2017b）。在树轮生态学领域，开展了树木生态弹性（如 Fang and Zhang, 2019）、森林衰退与死亡（如 Liang et al., 2016a;

Fang et al., 2018; Mou et al., 2018)、高山林线动态(如 Liang et al., 2012, 2016b; Lyu et al., 2016a, 2019)、海拔梯度上树木生长比较(如 Esper et al., 2016; Lyu et al., 2016b, 2017), 以及树木维管形成层活动(如 He et al., 2016; Liang et al., 2016c; Ren et al., 2018) 等研究。这些研究已产生了树轮数据的空间网络, 为进一步研究森林生长的时空特征奠定了基础。