

DOI: 10.20103/j.stxb.202312132720

范璞, 田沁花, 秦莉, 张同文, 张永. 坦博拉火山爆发对青藏高原东部不同针叶树径向生长的影响. 生态学报, 2025, 45(1): 168-181.

Fan P, Tian Q H, Qin L, Zhang T W, Zhang Y. Impact of the 1815 Mount Tambora eruption on conifer growth in the eastern Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(1): 168-181.

坦博拉火山爆发对青藏高原东部不同针叶树径向生长的影响

范 璞^{1,4}, 田沁花², 秦 莉³, 张同文³, 张 永^{1,*}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101

2 国家气候中心, 北京 100081

3 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 中国气象局树木年轮理化研究重点实验室, 乌鲁木齐 830002

4 中国科学院大学, 北京 100101

摘要: 强火山爆发往往会引发区域甚至全球性的干旱和降温事件, 进而影响森林生长变化。选取了国际树轮网中青藏高原东部地区树木年轮宽度数据, 总计 33 个样点 (包含 5 个针叶树种), 调查 1815 年坦博拉火山爆发后青藏高原东部不同针叶树径向生长变化情况。选取 1799—1808 年期间树木的平均生长状态作为研究火山爆发后树木生长变化的基准, 计算在 1809—1830 年火山爆发后树木轮宽变化率, 并通过改进的时序叠加法比较火山爆发前后 (1799—1830 年) 树木轮宽指数变化以及显著程度。结果表明, 该次强火山爆发后, 青藏高原东北部以及中部树木生长变化较为相似且轮宽变化幅度大, 东南部地区轮宽变化相对较小。坦博拉火山爆发引发的 1816—1819 年青藏高原低温干旱事件, 导致树木轮宽变化率于 1816 年开始减小, 但在 1822 年超过 63% 的样点树木轮宽达到火山爆发前轮宽值。青藏高原树木在极端气候事件发生后 3 年大部分可恢复正常生长, 可见高原森林对气候变化具有高度敏感性和较强的生态弹性。将为深入了解强火山爆发后森林动态响应情况, 包括气候和树木生长变化关系提供一定的参考依据, 将有助于我们深入理解极端气候条件下森林动态响应特征及恢复机制。

关键词: 树轮; 径向生长; 火山爆发; 青藏高原

Impact of the 1815 Mount Tambora eruption on conifer growth in the eastern Tibetan Plateau

FAN Pu^{1,4}, TIAN Qinhua², QIN Li³, ZHANG Tongwen³, ZHANG Yong^{1,*}

1 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 National Climate Center, Beijing 100081, China

3 Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Key Laboratory of Tree-ring Physical and Chemical Research of China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Severe volcanic eruptions often trigger regional or global droughts and cooling events, which subsequently affect forest growth patterns. This study utilized tree-ring width data from the International Tree-Ring Data Bank for the eastern Tibetan Plateau, encompassing 33 sample sites and five conifer species. The investigation focused on climate changes in different regions of the eastern Tibetan Plateau and the radial growth changes of various conifer species after the 1815

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFA0606602); 国家自然科学基金项目 (41977392); 中国沙漠气象科学研究基金项目 (Sqj202214); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目 (IDM2022003)

收稿日期: 2023-12-13; **网络出版日期:** 2024-09-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangyong@igsrr.ac.cn

eruption of Mount Tambora. To study the interannual radial growth at each sample site, the measurement data were fitted using the ARSTAN program to calculate the mean values. A double-weighted averaging method was used to establish the standard tree ring width chronology (STD) for each sample site. The average growth state of trees from 1799 to 1808 was taken as the baseline to calculate the ring width change rates from 1809 to 1830 after the eruption. Subsequently, a modified superposed epoch analysis (SEA) was employed to compare the changes and significance of tree ring width indices before and after the eruption (1799—1830), analyzing the radial growth differences of different species across various regions. The results indicated that post-eruption, tree growth changes in the northeastern and central parts of the Tibetan Plateau were relatively similar, exhibiting significant variations in ring width, while changes in the southeastern region were comparatively smaller. The study found that the 1816—1819 cold and drought events on the Tibetan Plateau, triggered by the eruption of Mount Tambora, has led to a decrease in tree-ring width starting in 1816. However, over 63% of the sample trees' ring widths had returned to pre-eruption levels by 1822. This indicated that most trees on the Tibetan Plateau can recover normal growth within three years after extreme climate events, demonstrating the high sensitivity and resilience of plateau forests to climate change. This research serves as a pivotal reference for understanding forest dynamics following significant volcanic eruptions, encompassing the relationship between climate change and changes in tree growth. It significantly enhances our comprehension of how forests dynamically respond and recover under extreme climatic conditions.

Key Words: tree rings; radial growth; volcanic eruptions; Tibetan Plateau

森林生态系统对全球碳循环至关重要,且森林变化与复杂的气候因素密切相关^[1]。在当前全球气候变暖、极端气候事件频发的气候变化背景下,森林生态系统对气候变化,特别是对极端气候事件的动态响应,将极大影响森林固碳能力,也可能进一步影响应对气候变化的措施的制定。因此,调查森林在异常气候变化条件下的生长特征具有十分重要的科学意义。

强火山爆发往往会导致极端气候事件,致使全球性的气候变化^[2-7],进而影响森林系统。例如 Guillet 等^[8]发现 1257 年萨玛拉斯火山引发极端寒冷事件,致使 1259 年树木呈现显著的低生长;Allende 等^[9]发现在 1943 年帕里库廷火山爆发引发的极端干旱事件后,墨西哥中部区域树木生长抑制持续了 3 年。这种火山爆发后的极端气候可能会改变森林的结构和组成^[10],进而影响森林生产力和生态服务功能^[11]。

作为过去 600 年以来全球最大的一次火山爆发^[12],坦博拉火山(1815 年 4 月 11 日和 12 日爆发,火山爆发等级 7 级)引发的极端气候为科研人员提供了研究非人为影响的极端气候背景条件下森林动态变化的宝贵视角,因而备受关注^[13-15]。而最新的研究显示^[16],该次火山爆发对全球不同地区的树木生长均产生了重要影响,但不同地区树木生长对该次火山爆发的响应存在显著的差异,高原地区整体上在坦博拉火山后树木恢复时间比其他地区更长,考虑到高原生态环境的敏感性,高原不同地区不同植被在强火山爆发后的生长变化情况如何是个值得关注、但鲜有研究的问题。

我国青藏高原东部森林资源丰富,树木生长对环境变化十分敏感^[17-19],已有大量研究从不同角度调查了气候变化对森林的多方面影响,但是多是依据过去几十年的观测数据^[20-21],对于历史时期不同区域森林对火山爆发的响应工作十分有限。树木年轮作为研究气候与环境变化的代用资料,具有样本定年准确、分辨率高、记录连续性强及复本量好等优点^[10, 22],在研究气候变化及其影响方面发挥着重要作用,能够很好地评估火山活动、树木年轮变化和气候之间的联系^[23]。在大量的气候重建工作中,也发现了历史时期的气温和降水等气候要素的变化与火山爆发存在较好的对应关系^[8, 14, 15, 24-29],但是历史时期强火山爆发后区域的森林生长的动态变化研究仍然较为薄弱^[30]。

因此本研究重点关注了坦博拉火山爆发后青藏高原东部针叶树种径向生长的变化情况,利用国际树轮库中我国青藏高原东部地区的树轮宽度数据,建立了树轮宽度年表,基于 1815 年火山爆发前后不同树种年表轮宽指数,分析不同地区不同树种径向生长的前后变化情况,调查区域树木生长对强火山引发的极端气候的响

应情况。

1 数据和方法

1.1 树轮数据

本文树轮数据下载自国际树轮网 (<https://www.ncei.noaa.gov/products/paleoclimatology/tree-ring>) 的国内树轮宽度数据库。为了降低少量样本引起的年表指数方差变大以及不同树龄对树木生长的影响,剔除了在公元 1700 年样本量少于 15 棵芯的样点。这样共分析了 33 个样点的树轮宽度数据(图 1),包含五个树种(祁连圆柏(JUPR *Juniperus przewalskii* Komarov)、大果圆柏(JUTI *Juniperus tibetica* Komarov)、川滇冷杉(ABFO *Abies forestii* Rogers)、云南铁杉(TSDU *Tsuga dumosa* Eichler)、丽江云杉(PCLI *Picea likiangensis* Pritzel)),其中 29 个样点的样本对降水或湿度响应敏感,被用于分析各个地区的降水或者 PDSI 等气候指标的长期变化,其他 4 个样点样本对气温变化敏感。具体样点名称、树种、经纬度、海拔、序列起始年以及样本量等信息,见表 1。

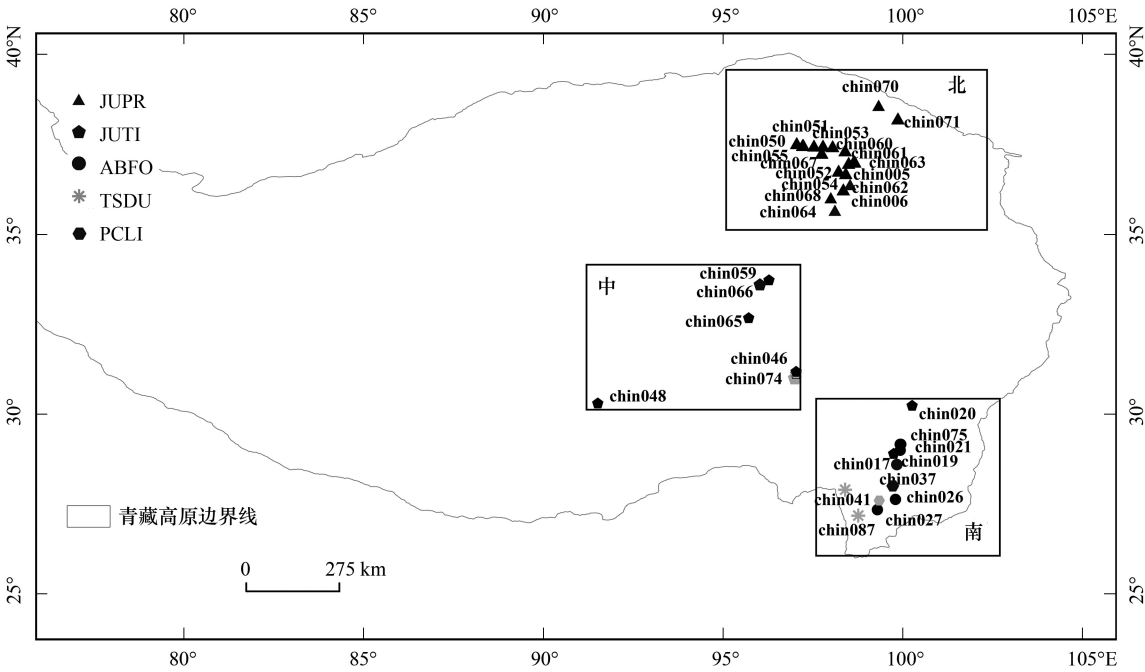


图 1 树轮样点空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of tree-ring sites in this study

黑色图标表示样点样本对降水和湿度响应敏感,灰色则是样点样本对气温敏感;JUPR:祁连圆柏 *Juniperus przewalskii* Komarov; JUTI: 大果圆柏 *Juniperus tibetica* Komarov; ABFO: 川滇冷杉 *Abies forestii* Rogers; TSDU: 云南铁杉 *Tsuga dumosa* Eichler; PCLI: 丽江云杉 *Picea likiangensis* Pritzel

1.2 树轮数据处理方法

为了研究各样点树木年际径向生长情况,将各样点的量测数据导入 ARSTAN 程序^[40],计算各量测数据的平均值并进行拟合,采用双权重加权平均法,建立各样点的树轮宽度标准年表(Standard Chronology, STD),来反映各个样点平均的年际径向生长变化。

已有研究显示^[41],1809 年存在一次未知的强火山爆发事件,与 1815 年坦博拉火山爆发时间接近,为了尽可能避免强火山信号的影响,比较不同树种在火山爆发前后径向生长的变化差异,我们选取 1799—1808 年期间树木的平均生长状态作为研究火山爆发后树木生长变化的基准,该时段之前的 15 年未有强火山爆发,进而分析 1799—1830 年间树轮径向生长特征。

表 1 树轮样点信息表

Table 1 Site information for the tree-ring series in this study

编号 Number	样点 Site code	位置 Locations	树种 Tree species	序列起始年 Sequence start year	结束年 End year	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude	1700 年 样本数 Sample size(1700)	参考文献 References	气候信息 Climate information
1	chin005	乌兰县	祁连圆柏 JUPR	840	1993	98.50°	37.00°	79	Sheppard P R 等 ^[31]	降水
2	chin006	都兰县	祁连圆柏 JUPR	159	1993	98.00°	36.00°	103	Sheppard P R 等 ^[31]	降水
3	chin017	乡城县	大果圆柏 JUTI	1452	2007	99.75°	28.90°	19	Cook E R 等 ^[32]	PDSI
4	chin019	乡城县马熊沟	川滇冷杉 ABFO	1509	2006	99.93°	29.15°	24	Cook E R 等 ^[32]	PDSI
5	chin020	理塘县	大果圆柏 JUTI	1306	2007	100.27°	30.23°	21	Cook E R 等 ^[32]	PDSI
6	chin021	乡城县	川滇冷杉 ABFO	1380	2007	99.93°	28.98°	16	Cook E R 等 ^[32]	PDSI
7	chin026	香格里拉市	川滇冷杉 ABFO	1516	2007	99.80°	27.62°	41	Cook E R 等 ^[32]	PDSI
8	chin027	维西傈僳族自 治县攀天阁乡	川滇冷杉 ABFO	1348	2007	99.30°	27.33°	27	Cook E R 等 ^[32]	PDSI
9	chin037	横断山	丽江云杉 PCLI	1429	2005	99.35°	27.58°	20	Fan Z X 等 ^[33]	夏季气温
10	chin041	横断山	云南铁杉 TSDU	1530	2005	98.40°	27.88°	15	Fan Z X 等 ^[33]	夏季气温
11	chin046	昌都市卡若区	大果圆柏 JUTI	449	2004	97.03°	31.12°	32	Brauning A 等 ^[34]	夏季降水
12	chin048	林周县唐古乡	大果圆柏 JUTI	1080	1998	91.52°	30.30°	40	Brauning A 等 ^[35]	降水
13	chin050	德令哈市	祁连圆柏 JUPR	843	2001	97.23°	37.47°	35	Shao X 等 ^[19]	降水
14	chin051	德令哈市	祁连圆柏 JUPR	828	2001	97.22°	37.47°	33	Shao X 等 ^[19]	降水
15	chin052	德令哈市	祁连圆柏 JUPR	404	2002	97.53°	37.45°	41	Shao X 等 ^[19]	降水
16	chin053	德令哈市	祁连圆柏 JUPR	451	2002	98.05°	37.43°	37	Shao X 等 ^[19]	降水
17	chin054	德令哈市	祁连圆柏 JUPR	711	2003	97.78°	37.45°	40	Shao X 等 ^[19]	降水
18	chin055	德令哈市	祁连圆柏 JUPR	1237	2002	97.05°	37.52°	52	Shao X 等 ^[19]	降水
19	chin059	曲麻莱县	大果圆柏 JUTI	1480	2002	96.13°	33.80°	18	Shao X 等 ^[19]	降水
20	chin060	乌兰县	祁连圆柏 JUPR	943	2003	98.40°	37.32°	40	Shao X 等 ^[19]	降水
21	chin061	乌兰县	祁连圆柏 JUPR	857	2003	98.63°	37.03°	34	Shao X 等 ^[19]	降水
22	chin062	乌兰县	祁连圆柏 JUPR	845	2001	98.67°	37.03°	39	Shao X 等 ^[19]	降水
23	chin063	乌兰县	祁连圆柏 JUPR	681	2001	98.22°	36.75°	43	Shao X 等 ^[19]	降水
24	chin064	乌兰县	祁连圆柏 JUPR	900	2001	98.42°	36.68°	36	Shao X 等 ^[19]	降水
25	chin065	杂多县	大果圆柏 JUTI	1290	2006	95.72°	32.67°	40	Shao X 等 ^[19]	降水

续表

编号 Number	样点 Site code	位置 Locations	树种 Tree species	序列起始年 Sequence start year	结束年 End year	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude	1700 年 样本数 Sample size(1700)	参考文献 References	气候信息 Climate information
26	chin066	治多县	大果圆柏 JUTI	1374	2002	96.28°	33.72°	42	Shao X 等 ^[19]	降水
27	chin067	德令哈市	祁连圆柏 JUPR	-2673	2011	97.75°	37.25°	247	Yang B 等 ^[36]	夏季降水
28	chin068	都兰县	祁连圆柏 JUPR	933	2011	98.35°	36.23°	103	Yang B 等 ^[36]	夏季降水
29	chin070	肃南县	祁连圆柏 JUPR	56	2011	99.33°	38.57°	45	Yang B 等 ^[36]	夏季降水
30	chin071	扎麻什乡	祁连圆柏 JUPR	432	2008	99.87°	38.20°	67	Yang B 等 ^[36]	夏季降水
31	chin074	昌都市	大果圆柏 JUTI	128	2010	97.00°	31.00°	103	Wang J L 等 ^[37]	气温
32	chin075	乡城县马熊沟	川滇冷杉 ABFO	1498	2013	99.95°	29.15°	21	Li J 等 ^[38]	湿度
33	chin087	高黎贡山	云南铁杉 TSDU	1520	2016	98.77°	27.17°	15	Fan Z X 等 ^[39]	气温

JUPR:祁连圆柏 *Juniperus przewalskii* Komarov; JUTI: 大果圆柏 *Juniperus tibetica* Komarov; ABFO: 川滇冷杉 *Abies forestii* Rogers; TSDU: 云南铁杉 *Tsuga dumosa* Eichler; PCLI: 丽江云杉 *Picea likiangensis* Pritzell

使用 1799—1830 年轮宽指数反映树木生长情况,计算 1809—1830 年间树木轮宽变化率 R_f (公式(1)),分析树木轮宽变化以及树木生长情况,并利用 ArcGIS 软件,将每年不同树种树木生长变化率展示在地图上。

$$R_f = \frac{\overline{RWI_i} - \overline{RWI_{1799-1808}}}{\overline{RWI_{1799-1808}}} \times 100\% \tag{1}$$

式中, $\overline{RWI_i}$ 为第 i 年的轮宽值, i 为年份(1809—1830 年), $\overline{RWI_{1799-1808}}$ 为火山喷发前(1799—1808 年)平均轮宽值。

为了进一步调查不同区域不同树种在火山爆发之后生长变化的显著程度,我们将青藏高原样点按照空间位置分为北部、中部、南部三个分区(图 1),参照 Gao 等^[16]研究工作,应用改进的时序叠加法^{:[42]}(Superposed epoch analysis,SEA),评估火山爆发与区域树木生长变化率(R_f)变化的关系。我们分别对 5 个树种和 3 个分区展开分析,将 1799—1808 年这 10 年的树木轮宽生长变化率(R_f)进行叠加,形成了一个平均序列,接着将 1809—1830 年的轮宽变化率数据进行叠加,形成另一个平均序列。通过比较这两个平均序列,可以调查 1815 年强火山爆发后,各组数据相对于 1799—1808 年的平均生长状态,各年径向生长变化率的显著性。其中,为了确定生长响应的统计显著性,制作了 1000 个唯一的复合矩阵,这些矩阵是通过随机组合约一半的区域树木轮宽变化率数据而成的,然后通过将其概率分布与 10000 次伪复合矩阵迭代生成的概率分布进行比较,确定了树木轮宽变化率的统计显著性。

2 结果

2.1 不同样点树轮径向生长的变化特征

由图 2 所示,高原东部地区的 33 个样点不同树种在火山爆发前后(1799—1830 年)树轮径向生长存在着明显的差异,为了便于说明,以下根据不同树种分别进行介绍。

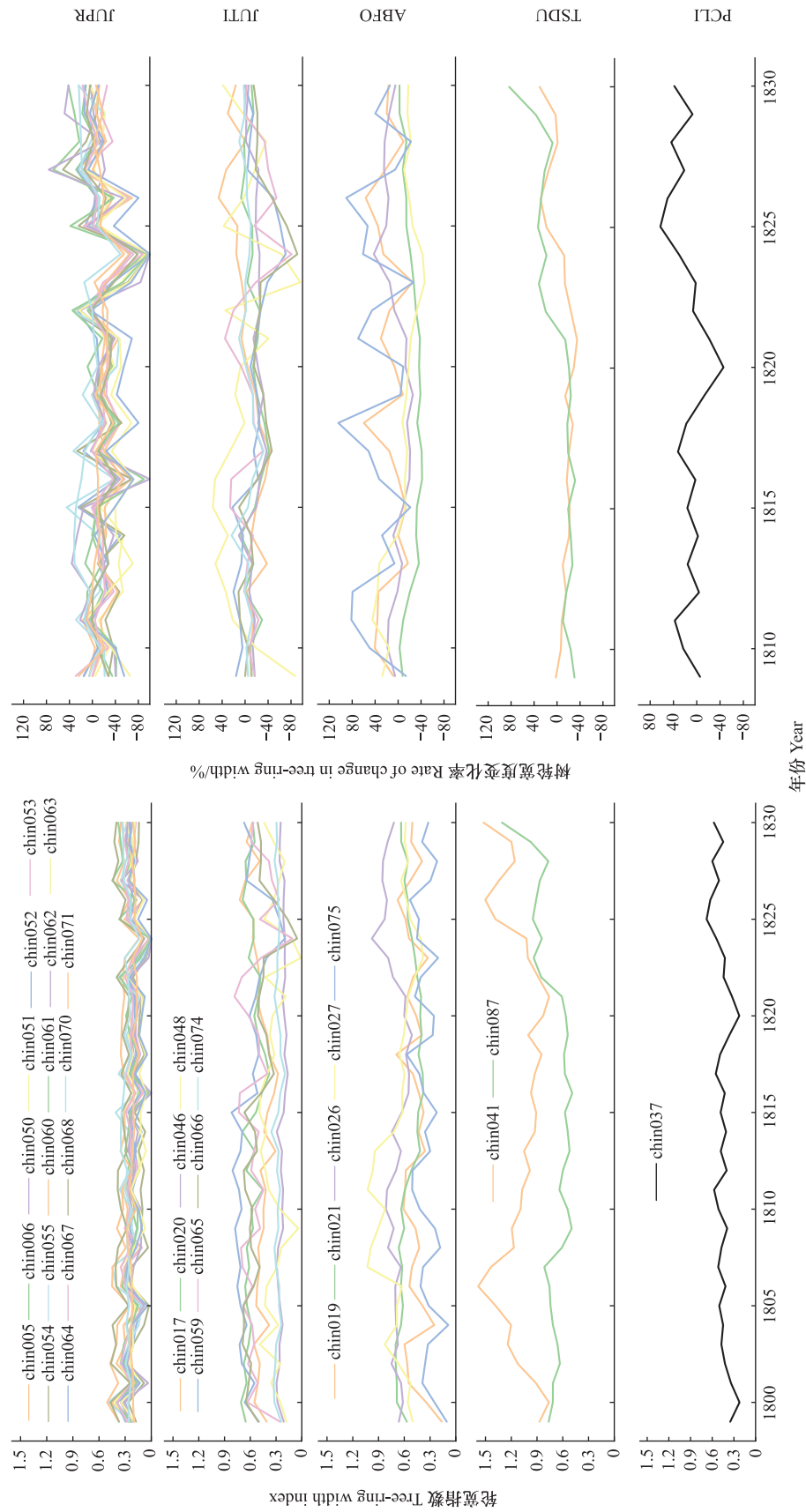


图2 不同树种在1799—1830年轮宽变化及变化率图
Fig.2 Ring width changes and change rates of different tree species from 1799 to 1830

17 个祁连圆柏(JUPR)样点主要分布在青海中北部地区,不同样点轮宽年际变动几乎相同,具有很好的 consistency。火山爆发前(1799—1808 年)树木轮宽整体均值高于火山爆发后(1809—1830 年)轮宽均值,1809—1815 年树木轮宽变化幅度较小,1815 年火山爆发后十年(1816—1826 年)树木轮宽变化率降低,1815—1818 年以及 1822—1827 年树轮宽度变化幅度大。1816 年轮宽均值较火山爆发前十年均值下降了 49.8%,1817—1821 年轮宽缓慢恢复至稳定,1823—1827 年轮宽值出现大幅度波动并逐渐恢复,1830 年轮宽值与 1815 年轮宽值基本相同。

大果圆柏(JUTI)在 1809 年火山爆发前(1799—1808 年)轮宽变化较为稳定,在 1809 年轮宽值以及轮宽变化率下降,同样在 1809—1815 年轮宽变化幅度较小,坦博拉火山爆发后 1816—1819 年树木轮宽变化率明显下降。1817—1830 年轮宽变化存在较大的差异,其中位于四川西部地区的两个样点(chin017、chin020),1817 年之后轮宽缓慢恢复,1820 年已经恢复至火山爆发前水平;青藏高原东部类乌齐县地区(chin046、chin074),1817 年轮宽值缓慢恢复,1828 年轮宽基本恢复火山爆发前水平;西藏中部林周地区(chin048)1815—1821 年轮宽值缓慢下降,1823 年更是呈现断崖式下降,之后逐渐恢复,但 1825—1830 年树轮宽度波动较大,到 1830 年才基本恢复火山爆发前水平;青藏高原东缘的杂多地区(chin059、chin065、chin066)1817—1822 年基本恢复至 1815 年轮宽水平,1822—1828 年轮宽值呈现大幅度波动,1830 年与火山喷发前十年平均轮宽值相近。

川滇冷杉(ABFO)在四川南部的 3 个样点,在 1813—1820 年轮宽值总体下降,1820—1830 年轮宽逐渐变宽,样点 chin019 与 chin075 位于同一地区,轮宽值均波动较大,样点 chin021 轮宽值变化很小;在云南北部地区(chin026、chin027)1810—1821 年树轮宽度持续变小,1821—1830 年处于恢复期,但恢复速度慢,其中一个样点到 1830 年也未恢复 1799—1808 年轮宽平均水平。

丽江云杉(PCLI)与云南铁杉(TSDU)样点分布在云南西北角,但是二者径向生长情况存在很大差异^[43-44],本研究中丽江云杉只有一个样点(chin037),该树种在 1817—1820 年树轮宽度变窄,1820 年开始轮宽值变大,1824 年前后已恢复到 1815 年轮宽。云南铁杉(TSDU)样点在 1809 年轮宽值变小,1809—1821 年轮宽变化率呈现负值,1822 年前后轮宽值逐渐变大,1827 年两个样点轮宽已经基本达到 1799—1808 年两个样点的最大轮宽值。

不同树种综合来看(图 3),青藏高原地区样点在 1816—1822 年轮宽变化率显著降低(最低为-100%,相比 1799—1808 年轮宽均值)。其中,祁连圆柏(JUPR)在 1815 年火山爆发后十年(1816—1825 年)轮宽变化率显著降低($P<0.05$),大果圆柏(JUTI)在 1816—1819 年树木轮宽变化率显著降低($P<0.05$),云南铁杉(TSDU)在 1809—1821 年轮宽变化率显著下降($P<0.05$)且下降幅度最大,持续时间长达 12 年,而川滇冷杉(ABFO)和丽江云杉(PCLI)在火山爆发后轮宽变化率虽也有下降,但整体序列在 1816—1822 年处于正常波动范围内。而后 1827 年左右,各树种轮宽变化率序列都处于上升状态或正常波动变化,总体呈现恢复趋势。

结合图 2 和图 4,在火山爆发后第 1 年(1816 年),80%的样点树木轮宽值比 1815 年轮宽值小,且 1816—1821 年研究区内有超过 80%的样点树木轮宽变化率呈现负值,其中 1819 年样点树木轮宽变化率呈现负生长比例最大,达到 91%,在 1822 年 63%样点轮宽变化率呈现正值。虽然,在 1822 年大多样点轮宽恢复正常,但在 1822 年至 1827 年位于西藏和青海地区的大多样点树木径向生长变化幅度大,其中两年波动范围最大达到-80%—100%。1827 年至 1830 年树木轮宽基本稳定,甚至存在树轮宽度超出 1799—1808 年轮宽均值的情况。

2.2 不同区域树轮径向生长的变化特征

从不同分区的平均状态来看,在 1816—1820 年所有区域树木轮宽变化率整体是显著下降的($P<0.05$)(图 5),特别是 1816—1818 年这 3 年,3 个区域轮宽变化率均为负值,但之后都在 1822 年前后恢复正常。北部地区树木(祁连圆柏)和中部地区树木(部分大果圆柏)1823 年开始轮宽变化率显著下降($P<0.05$),且分别在 1827 年和 1829 年前后恢复正常,而南部区域在 1823 年轮宽变化率虽有下降,但 1824 年就已经恢复至正

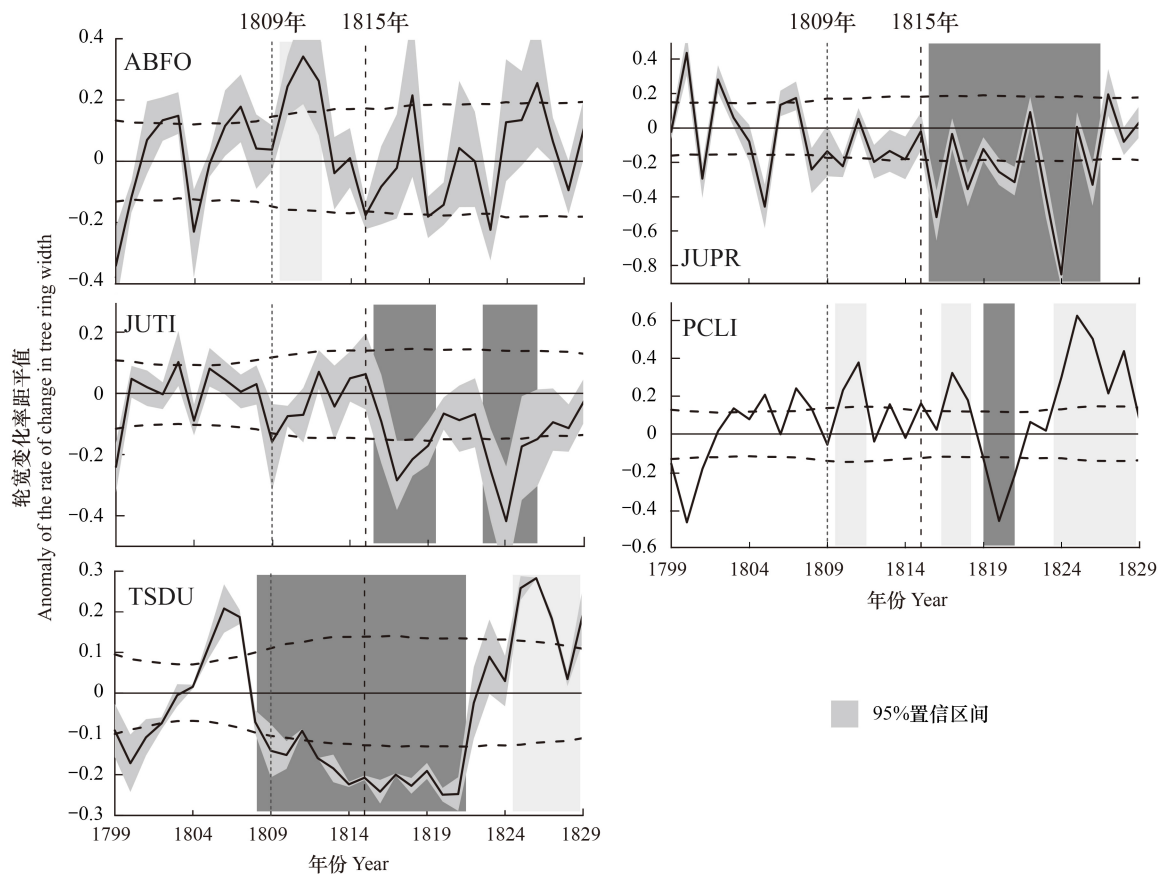


图3 不同树种在1809年和1815年火山爆发前后轮宽变化率评估图

Fig.3 Ring-width variation anomalies of different tree species before and after the 1809 and 1815 volcanic eruptions

曲线两侧灰色阴影为95%的置信区间,水平虚线表示不同树种序列在 $\alpha=0.05$ 显著性水平上的阈值,深灰色和浅灰色阴影分别标记了1809年以来不同树种树木显著的轮宽变化率降低和升高

常水平。

3 讨论

3.1 1815年坦博拉火山爆发对青藏高原东部气候的影响

强烈的火山喷发将大量火山气溶胶注入平流层大气,使陆海温度梯度减小,大气温度骤降,季风环流减弱^[2-7]。坦博拉火山喷发后,北半球中纬度地区1815年至1816年的气温下降了 0.8°C ^[45-46]。在青藏高原地区,1816年气温下降约 0.5°C ^[26],而夏季平均气温在1816年下降了 0.25°C ,在1817年则下降了 0.73°C ^[47],这种降温趋势在冬季也表现出来,冬季气温出现了明显的降低^[48-50]。此外,亚洲季风干旱数据集^[32]显示,青藏高原东部在坦博拉火山爆发后的1816年到1819年期间,经历了严重的干旱,其中1818年为最严重的一年^[15,51]。不过此次爆发对青藏高原东部的不同区域影响存在差异。

在青藏高原的东北部,基于树轮和湖泊沉积物重建的气温序列显示,在1809年火山后到1819年期间,气温逐渐下降^[52-53],并且在1815年到1819年期间存在一个明显的冷期^[48,54]。另一方面,有研究者对该区域历史降水和干旱年份进行了研究,结果显示,1816年到1817年的春季干旱十分严重^[55-56]。在青藏高原的中部,有关拉萨的备忘录提到,1816年6月出现了连续3天的异常大雪^[28],而Liang等^[14]的研究指出,1816年到1822年是该地区近379年中最冷的时期之一,其中1817年的最低气温比长期平均值低了约2个标准差,并将其解释为坦博拉火山喷发导致的。另外,该地区的降水、湿度等重建序列显示1820年代前后10年存在

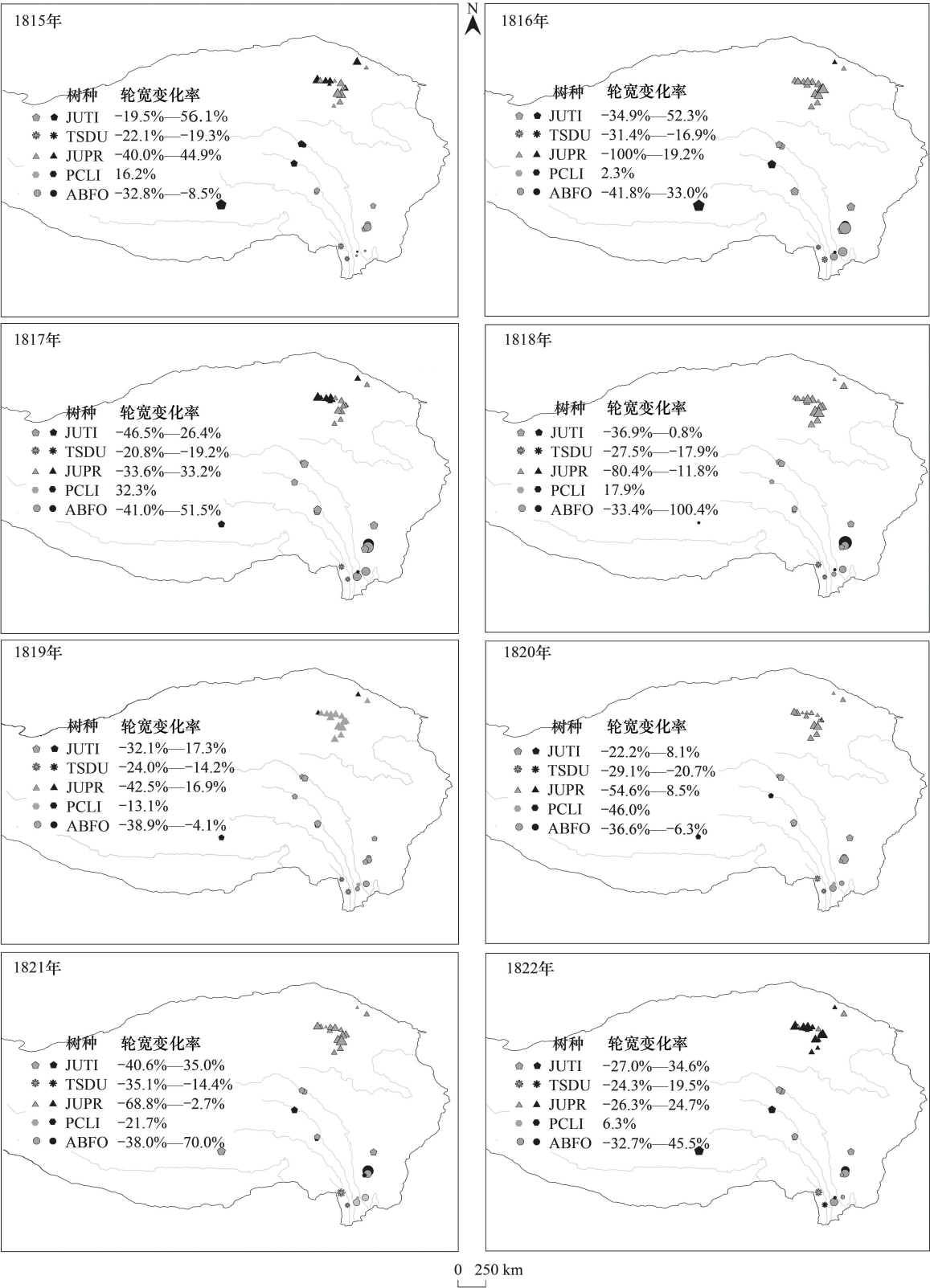


图4 33个样点1815—1822年样点树木轮宽变化率空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of tree-ring-width change rates at 33 sites from 1815 to 1822

不同的图标代表不同的树种,其中黑色代表样点树木轮宽变化率为正值,灰色代表轮宽变化率为负值,数值绝对值越大则图标越大,即图标的大小反应了样点树木径向生长相较于火山爆发前水平的变化程度;图中的百分比数字代表不同树种轮宽变化率的范围

干旱时期^[57-58],其降水变化趋势与青藏高原东北部趋势较为相似,和青藏高原东南部降水变化差异较为明显^[59-60]。在青藏高原的东南部,1816 年和 1817 年的夏季降温显著^[24],且许多研究指出在 1810 年代存在着一个十年的冷期^[61-62]。Feng 等人^[63]在云南天才湖基于 brGDGTs 重建的温度序列也显示火山爆发后 1815 年至 1817 年夏季和秋季极度寒冷,据记载 1815—1817 年云南省 8 月平均气温比其他年份低 2.5—3℃,造成云南近代史上最严重的饥荒^[38]。另外,Shi 等人^[64]使用树轮同位素重建了该区域降水变化,结果显示 1810 年代干旱持续到 1817 年,认为持续性干旱与多次火山爆发后区域季风流发生变化有关。

整体上看坦博拉火山喷发后 1—2 年青藏高原气候开始发生明显变化,出现干旱和降温趋势^[15,65],不同区域气候变化也存在差异:东北部和中部在坦博拉火山爆发后极端气候事件持续时间更长(到 1819 年),东南部极端气候持续影响到 1817 年。

3.2 树木生长变化与气候变化之间的关系

异常的降温或干旱事件,会降低树木光合速率^[66],减缓树轮的的生长速度^[67],总体上看,坦博拉火山后 1816—1819 年出现异常干旱和低温,这种极端气候以及森林对气候变化响应的敏感性,导致树木 1816 年径向生长显著减小,但在 1822 年大多树木生长恢复正常,对树木的影响大约持续 8 年以上。坦博拉火山爆发后青藏高原东北部和中部地区树木径向生长变化幅度大,东南部地区变化相对较小,这可能与青藏高原东北部以及中部气候变化较为相似有关^[59]。

具体来说,在青藏高原东北部和中部地区由于 1816—1819 年干旱及低温影响,1816 年开始轮宽指数与基准期轮宽指数相比显著降低(图 5),直到 1822 年区域样点轮宽值基本恢复(图 5)。本文中青藏高原东北部针叶树种为祁连圆柏,特别在柴达木盆地东缘地区,其生长对 5—6 月水分条件十分敏感^[19,68],该地区本身气候干旱,致使祁连圆柏生长缓慢,该地区祁连圆柏树木轮宽均值也显著小于其他树种轮宽均值,表现出多样点树轮指数年际变化的一致性(图 2)。另外,在青藏高原东北部和中部地区:轮宽变化率在 1809 年下降幅度是最小的,其次是 1816 年,轮宽变化率下降幅度最大的是 1824 年,考虑 1822 年在东南亚有强火山爆发^[18],此种不断变大的下降幅度可能反映了树木年轮对灾害的记录具有累积影响^[69],在连续 3 次火山爆发后,针叶树对累积的极端气候可能具有更强的记忆效应^[2,70-71]。

在青藏高原东南部 1810—1817 年持续干旱以及 1810 年代的持续冷期,导致树轮变化率在 1813 年开始显著降低(图 6),不过 70%样点在 1825 年轮宽值达到火山爆发前水平。在此区域分布有川滇冷杉与云南铁杉,其中早期生长季水分是限制高原东南部亚高山川滇冷杉树木生长的最关键因素^[38],本文川滇冷杉位于昆明附近,1816 年至 1818 年,昆明连续 3 年,突降大雪,春天和夏天持续的低温、阴雨天气,秋天和冬天持续的霜冻天气^[15],导致在 1816—1820 年,川滇冷杉轮宽值小于其他年份轮宽值(图 2);生长季节(5—8 月)的冷暖

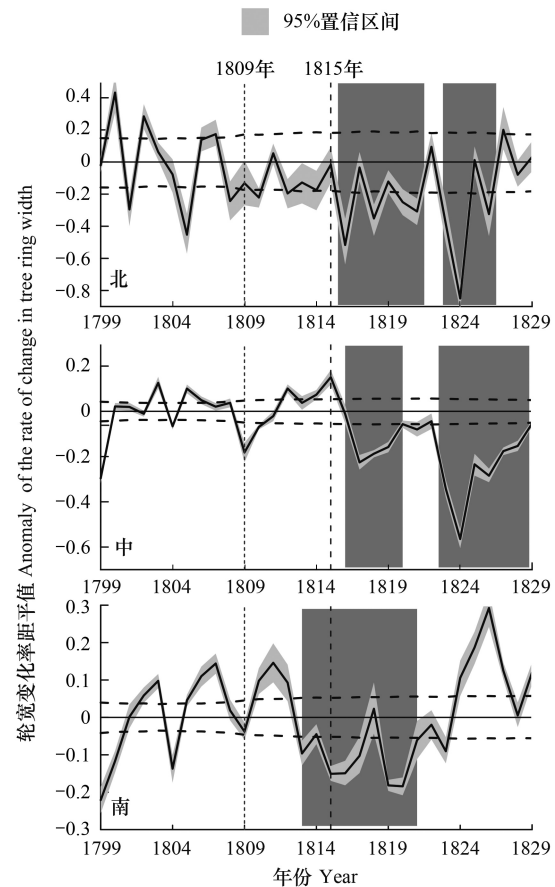


图 5 不同区域 1809 年和 1815 年火山爆发前后轮宽变化率评估图

Fig.5 Ring-width variation anomalies in different regions before and after the 1809 and the 1815 volcanic eruptions

曲线两侧灰色阴影为 95% 的置信区间,水平虚线表示不同区域树木序列在 $\alpha=0.05$ 显著性水平上的阈值,深灰色指示 1809 年以来不同区域树木显著的轮宽变化率降低

条件是限制云南铁杉径向生长的主要因素^[39],云南铁杉其中一个样点 chin087 位于高黎贡山地区,另一个样点 chin041 位于横断山,高黎贡山以北,据记载坦博拉火山爆发后 1815 年的低温冷害,首先对高黎贡山以西的腾越、龙陵等地造成影响,使这些地区夏秋多雨、低温,甚至出现夏季雨雪和飞霜这样的极端天气,之后才向四川延伸^[72],因此 chin087 样点树木轮宽指数在 1815 年前后均低于样点 chin041(图 2)。这种区域性的树木轮宽值变化差异,一定程度上反映了坦博拉火山爆发后,区域气候变化的差异引发的不同地域不同树种生长速率差异,也反映了高原东部不同针叶树种对区域气候变化响应的高敏感性。

3.3 火山爆发后树木恢复程度及其原因分析

Li 等^[73]在研究干旱后的森林恢复时发现,如果不超过弹性阈值,树木可以主动抵抗其影响,并在极端事件发生 1—4 年后森林会恢复到干扰前的生长水平,这与本文研究相符合。坦博拉火山爆发后,1822 年超过 63% 的树木轮宽达到火山爆发前轮宽值,但也有个体在此期间保持多年的低增长率,这表明虽然大部分青藏高原树木在遭受极端气候后 3 年内可恢复生长,但恢复情况也因树而异,且受多种因素(如树木本身生长特征、周围生物等)影响^[11,74—76]。

在 1822 年至 1827 年位于青藏高原东北部和中部大多样点树木径向生长变化幅度大,这可能与 1822 年东南亚火山爆发^[18]有关,此次火山爆发后 1823 年青藏高原中部和北部树木轮宽变化率显著下降($P < 0.05$),1824 年轮宽指数最小,1827 年 76% 的树木恢复火山爆发前轮宽值,树木轮宽生长变化与本文坦博拉火山爆发后树轮径向生长情况十分相似。这种树木轮宽变化的相似性表明,在火山爆发后,青藏高原森林中的树木不仅被动地对极端气候做出反应,而且还发展出生态生理弹性来抵御极端气候的影响,并在极端气候后三年左右可恢复过来^[77],可见高原森林对气候变化具有高度敏感性和较强的生态弹性。

本研究主要反映了成熟针叶林在强火山爆发后的生长特征。不同地区的树轮序列数量存在差异,特别是丽江云杉、云南铁杉样本偏少,火山对气候变化的影响的持续时间仍然存在不确定性,加之气候的复杂性与独特性,源于其他因素的干扰识别未来可能通过更精准的研究手段和技术进一步完善和提高。本研究集中探讨坦博拉火山爆发前后青藏高原东部地区气候和树木径向生长的变化,并针对不同区域不同针叶树进行了总结,这将为深入了解强火山爆发后森林动态响应情况,包括气候和树木生长变化之间的关系提供一定的参考依据。

4 结论

本文使用从国际树轮网获取的我国青藏高原东部地区的树轮量测数据,通过对不同区域不同树种的径向生长分析,研究了 1815 年坦博拉火山爆发前后区域内五个树种,包括川滇冷杉、祁连圆柏、大果圆柏、丽江云杉、云南铁杉的生长变化情况。在 1815 年坦博拉火山爆发后,青藏高原东北部以及中部树木生长较为相似且生长变化幅度大,东南部地区轮宽变化幅度相对较小。一般情况下青藏高原针叶林在极端气候事件后 3 年大部分可恢复正常生长,可见高原针叶林对气候变化具有高度敏感性和较强的生态弹性。

本文主要考虑了坦博拉火山爆发后区域极端气候变化的影响,所用的树轮宽度数据主要为气候敏感样点位置的样本,仅能代表部分森林生长信息。因此,考虑气候变化以及树木生长对气候响应复杂性和多样性,在未来的工作研究中还需要加强样本量以及考虑多方面因素,如:历史记录和社会政策情况、不同树龄结构的森林对火山的响应、不同强度的火山爆发对森林的影响情况以及不同树种气候因子敏感度差异等,以便于未来更好的理解诸如坦博拉强火山爆发导致的极端气候事件对森林动态变化的影响情况。

致谢:感谢中国气象科学研究院刘舸对本研究的帮助。

参考文献 (References):

- [1] Zhang R, Hu Z H, Cherubini P, Cooper D J, Zhu L J, Lei P F. Tree-ring data reveal trees are suffering from severe drought stress in the humid

- subtropical forest. *Forest Ecology and Management*, 2023, 546:121330.
- [2] 李明启, 邵雪梅, 张永. 392BC—2017AD 柴达木盆地东北部降水变化及其与太阳活动和强火山喷发的联系. *地理学报*, 2023, 78(1): 71-86.
- [3] 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 大气颗粒物与全球变暖. *气候变化研究进展*, 2022, 18(6): 791-794.
- [4] Scuderi L A. Tree-ring evidence for climatically effective volcanic eruptions. *Quaternary Research*, 1990, 34(1): 67-85.
- [5] 李心月, 陈显尧. 影响全球平均表面温度的主要过程. *科学通报*, 2021, 66(31): 4017-4027.
- [6] Guillet S, Corona C, Oppenheimer C, Lavigne F, Khodri M, Ludlow F, Sigl M, Toohey M, Atkins P S, Yang Z, Muranaka T, Horikawa N, Stoffel M. Lunar eclipses illuminate timing and climate impact of medieval volcanism. *Nature*, 2023, 616(7955): 90-95.
- [7] Rampino M R, Self S. Sulphur-rich volcanic eruptions and stratospheric aerosols. *Nature*, 1984, 310(5979): 677-679.
- [8] Guillet S, Corona C, Stoffel M, Khodri M, Lavigne F, Ortega P, Eckert N, Sielenou P D, Daux V, Churakova Sidorova O, Davi N, Edouard J L, Zhang Y, Luckman B H, Myglan V S, Guiot J, Beniston M, Masson-Delmotte V, Oppenheimer C. Climate response to the Samalas volcanic eruption in 1257 revealed by proxy records. *Nature Geoscience*, 2017, 10(2): 123-128.
- [9] Allende T C, Macías J L, Mendoza M E, Díaz J V. Influence of volcanic ash deposits on the radial growth of trees in Central Mexico: the case of Parícutin volcano. *European Journal of Forest Research*, 2022, 141(4): 605-615.
- [10] 李镇江, 于晨一, 刘升云, 闫瑞环, 黄心邓, 刘晓静, 陈志成, 王婷. 伏牛山南坡 3 种针叶树径向生长对气候变化的响应. *应用生态学报*, 2023, 34(5): 1178-1186.
- [11] Macedo T M, da Costa W S, das Neves Brandes A F, Valladares F, Barros C F. Diversity of growth responses to recent droughts reveals the capacity of Atlantic Forest trees to cope well with current climatic variability. *Forest Ecology and Management*, 2021, 480: 118656.
- [12] Oppenheimer C. Climatic, environmental and human consequences of the largest known historic eruption: Tambora volcano (Indonesia) 1815. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2003, 27(2): 230-259.
- [13] Liu W, Shi F, Xiao G Q, Xue H H, Yin Q Z, Liu F, Duan A M, Xiao C D, Guo Z T. Bidecadal temperature anomalies over the Tibetan Plateau and Arctic in response to the 1450s volcanic eruptions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, 127(5): e2021jd035769.
- [14] Liang E Y, Shao X M, Qin N S. Tree-ring based summer temperature reconstruction for the source region of the Yangtze River on the Tibetan Plateau. *Global and Planetary Change*, 2008, 61(3/4): 313-320.
- [15] Gao C C, Gao Y J, Zhang Q, Shi C M. Climatic aftermath of the 1815 Tambora eruption in China. *Journal of Meteorological Research*, 2017, 31(1): 28-38.
- [16] Gao S, Camarero J J, Babst F, Liang E Y. Global tree growth resilience to cold extremes following the Tambora volcanic eruption. *Nature Communications*, 2023, 14: 6616.
- [17] Langzhen J Y, Zhang Q B, Jia H F, Zheng J C, Fang J P. Tree rings reveal a growth-decline event in A.D. 1875—1883 in a Tibetan Plateau juniper forest. *Dendrochronologia*, 2022, 74: 125981.
- [18] Liang E Y, Dawadi B, Pederson N, Piao S L, Zhu H F, Sigdel S R, Chen D L. Strong link between large tropical volcanic eruptions and severe droughts prior to monsoon in the central Himalayas revealed by tree-ring records. *Science Bulletin*, 2019, 64(14): 1018-1023.
- [19] Shao X M, Xu Y, Yin Z Y, Liang E Y, Zhu H F, Wang S Z. Climatic implications of a 3585-year tree-ring width chronology from the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(17/18): 2111-2122.
- [20] 缪利, 陆晴, 刘根林, 危小建. 1999—2019 年青藏高原不同植被类型 NDVI 时空演变特征及其对气候因子的响应. *水土保持研究*, 2023, 30(1): 97-105.
- [21] 鲍艳, 魏宇晨, 南素兰, 臧文川. 全球 2℃ 温升背景下青藏高原植被对气候变化的响应. *高原气象*, 2023, 42(1): 49-59.
- [22] 程雪寒, 王树芝, 朱岩石. 丝绸之路青海道吐蕃时期墓葬出土木材记载的森林干扰史. *第四纪研究*, 2022, 42(1): 192-205.
- [23] Hughes M K. Dendrochronology in climatology-the state of the art. *Dendrochronologia*, 2002, 20(1/2): 95-116.
- [24] Li M Q, Huang L, Yin Z Y, Shao X M. Temperature reconstruction and volcanic eruption signal from tree-ring width and maximum latewood density over the past 304 years in the southeastern Tibetan Plateau. *International Journal of Biometeorology*, 2017, 61(11): 2021-2032.
- [25] Brönnimann S, Franke J, Nussbaumer S U, Zumbühl H J, Steiner D, Trachsel M, Hegerl G C, Schurer A, Worni M, Malik A, Flückiger J, Raible C C. Last phase of the Little Ice Age forced by volcanic eruptions. *Nature Geoscience*, 2019, 12(8): 650-656.
- [26] Wang Y J, Shao X M, Zhang Y, Li M Q. The response of annual minimum temperature on the eastern central Tibetan Plateau to large volcanic eruptions over the period 1380—2014 CE. *Climate of the Past*, 2021, 17(1): 241-252.
- [27] Zhang Y, Shao X M, Yin Z Y, Wang Y. Millennial minimum temperature variations in the Qilian Mountains, China: evidence from tree rings. *Climate of the Past*, 2014, 10(5): 1763-1778.
- [28] Brázdil R, Řezníčková L, Valášek H, Dolák L, Kotyza O. Climatic effects and impacts of the 1815 eruption of Mount Tambora in the Czech Lands. *Climate of the Past*, 2016, 12(6): 1361-1374.

- [29] Fang S W, Sigl M, Toohey M, Jungclauss J, Zanchettin D, Timmerck C. The role of small to moderate volcanic eruptions in the early 19th century climate. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(22): e2023GL105307.
- [30] Raible C C, Brönnimann S, Auchmann R, Brohan P, Frölicher T L, Graf H F, Jones P, Luterbacher J, Muthers S, Neukom R, Robock A, Self S, Sudrajat A, Timmerck C, Wegmann M. Tambora 1815 as a test case for high impact volcanic eruptions; earth system effects. *Wiley Interdisciplinary Reviews Climate Change*, 2016, 7(4): 569-589.
- [31] Sheppard P R, Tarasov P E, Graumlich L J, Heussner K U, Wagner M, Österle H, Thompson L G. Annual precipitation since 515 BC reconstructed from living and fossil juniper growth of northeastern Qinghai Province, China. *Climate Dynamics*, 2004, 23(7): 869-881.
- [32] Cook E R, Anchukaitis K J, Buckley B M, D'Arrigo R D, Jacoby G C, Wright W E. Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium. *Science*, 2010, 328(5977): 486-489.
- [33] Fan Z X, Bräuning A, Yang B, Cao K F. Tree ring density-based summer temperature reconstruction for the central Hengduan Mountains in Southern China. *Global and Planetary Change*, 2009, 65(1/2): 1-11.
- [34] Bräuning A, Grienbinger J. Late Holocene variations in monsoon intensity in the Tibetan- Himalayan region - evidence from tree rings. *Journal of Geological Society of India*, 2006, 68(3): 485-493.
- [35] Griebinger J, Bräuning A, Helle G, Thomas A, Schleser G. Late Holocene Asian summer monsoon variability reflected by $\delta^{18}\text{O}$ in tree-rings from Tibetan junipers. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(3): 045988.
- [36] Qin C, Yang B, Bräuning A, Sonechkin D M, Huang K. Regional extreme climate events on the northeastern Tibetan Plateau since AD 1450 inferred from tree rings. *Global and Planetary Change*, 2011, 75(3): 143-154.
- [37] Wang J L, Yang B, Qin C, Kang S Y, He M H, Wang Z Y. Tree-ring inferred annual mean temperature variations on the southeastern Tibetan Plateau during the last millennium and their relationships with the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Climate Dynamics*, 2014, 43(3/4): 627-640.
- [38] Li J B, Shi J F, Zhang D D, Yang B, Fang K Y, Yue P H. Moisture increase in response to high-altitude warming evidenced by tree-rings on the southeastern Tibetan Plateau. *Climate Dynamics*, 2017, 48(1): 649-660.
- [39] Fan Z X, Bräuning A, Tian Q H, Yang B, Cao K F. Tree ring recorded May-August temperature variations since A.D. 1585 in the Gaoligong Mountains, southeastern Tibetan Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 296(1/2): 94-102.
- [40] Cook E. A time series analysis approach to tree-ring standardization. The University of Arizona, 1985.
- [41] Dai J H, Mosley-Thompson E, Thompson L G. Ice core evidence for an explosive tropical volcanic eruption 6 years preceding Tambora. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1991, 96(D9): 17361-17366.
- [42] Rao M P, Cook E R, Cook B I, Anchukaitis K J, D'Arrigo R D, Krusic P J, LeGrande A N. A double bootstrap approach to Superposed Epoch Analysis to evaluate response uncertainty. *Dendrochronologia*, 2019, 55: 119-124.
- [43] 赵志江, 谭留夷, 康东伟, 刘琪璟, 李俊清. 云南小中甸地区丽江云杉径向生长对气候变化的响应. *应用生态学报*, 2012, 23(3): 603-609.
- [44] Guo G A, Li Z S, Zhang Q B, Ma K P, Mu C L. Dendroclimatological studies of *Picea likiangensis* and *Tsuga dumosa* in Lijiang, China. *IAWA Journal*, 2009, 30(4): 435-441.
- [45] Rampino M R, Self S. Historic eruptions of Tambora (1815), Krakatau (1883), and Agung (1963), their stratospheric aerosols, and climatic impact. *Quaternary Research*, 1982, 18(2): 127-143.
- [46] D'Arrigo R, Jacoby G. Northern North American tree-ring evidence for regional temperature changes after major volcanic events. *Climatic Change*, 1999, 41: 1-15.
- [47] Duan J P, Li L, Ma Z G, Esper J, Büntgen U, Xoplaki E, Zhang D J, Wang L, Yin H, Luterbacher J. Summer cooling driven by large volcanic eruptions over the Tibetan Plateau. *Journal of Climate*, 2018, 31(24): 9869-9879.
- [48] Liu X H, Qin D H, Shao X M, Chen T, Ren J W. Temperature variations recovered from tree-rings in the middle Qilian Mountain over the last millennium. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(4): 521-529.
- [49] Huang R, Zhu H F, Liang E Y, Liu B, Shi J F, Zhang R B, Yuan Y J, Griebinger J. A tree ring-based winter temperature reconstruction for the southeastern Tibetan Plateau since 1340 CE. *Climate Dynamics*, 2019, 53(5/6): 3221-3233.
- [50] Shi S Y, Li J B, Shi J F, Zhao Y S, Huang G. Three centuries of winter temperature change on the southeastern Tibetan Plateau and its relationship with the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Climate Dynamics*, 2016, 49(4): 1305-1319.
- [51] 聂文政, 李明启. 树轮数据揭示的强火山喷发对青藏高原地区气候的影响. *应用生态学报*, 2021, 32(10): 3771-3780.
- [52] Zhang J, Huang X Z, Wang Z L, Yan T L, Zhang E Y. A late-Holocene pollen record from the western Qilian Mountains and its implications for climate change and human activity along the Silk Road, Northwestern China. *The Holocene*, 2018, 28(7): 1141-1150.
- [53] Qiang M R, Chen F H, Zhang J W, Gao S Y, Zhou A F. Climatic changes documented by stable isotopes of sedimentary carbonate in Lake Sugan, northeastern Tibetan Plateau of China, since 2 kaBP. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(17): 1930-1939.

- [54] Wang B, Chen T, Xu G B, Wu G J, Li C J. Reconstructed annual mean temperatures for the northeastern margin of the Tibetan Plateau: associations with the East Asian monsoons and volcanic events. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(6): 3044-3056.
- [55] Huang J G, Zhang Q B. Tree rings and climate for the last 680 years in Wulan area of northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Climatic Change*, 2007, 80(3/4): 369-377.
- [56] Zhang Q B, Cheng G D, Yao T D, Kang X C, Huang J G. A 2, 326-year tree-ring record of climate variability on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(14): 1739.
- [57] Gou X H, Deng Y, Chen F H, Yang M X, Fang K Y, Gao L L, Yang T, Zhang F. Tree ring based streamflow reconstruction for the Upper Yellow River over the past 1234 years. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(36): 4179-4186.
- [58] He M H, Yang B, Bräuning A, Wang J L, Wang Z Y. Tree-ring derived millennial precipitation record for the south-central Tibetan Plateau and its possible driving mechanism. *The Holocene*, 2013, 23(1): 36-45.
- [59] Liu J J, Yang B, Qin C. Tree-ring based annual precipitation reconstruction since AD 1480 in south central Tibet. *Quaternary International*, 2011, 236(1/2): 75-81.
- [60] Griebinger J, Bräuning A, Helle G, Hochreuther P, Schleser G. Late Holocene relative humidity history on the southeastern Tibetan Plateau inferred from a tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ record: recent decrease and conditions during the last 1500 years. *Quaternary International*, 2017, 430: 52-59.
- [61] Shi C M, Wang K C, Sun C, Zhang Y D, He Y Y, Wu X X, Gao C, Wu G C, Shu L F. Significantly lower summer minimum temperature warming trend on the southern Tibetan Plateau than over the Eurasian continent since the Industrial Revolution. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(12).
- [62] Wang L, Duan J P, Chen J, Huang L, Shao X M. Temperature reconstruction from tree-ring maximum density of Balfour spruce in eastern Tibet, China. *International Journal of Climatology*, 2010, 30(7): 972-979.
- [63] Feng X P, Zhao C, D'Andrea W J, Liang J, Zhou A F, Shen J. Temperature fluctuations during the Common Era in subtropical southwestern China inferred from brGDGTs in a remote alpine lake. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 510: 26-36.
- [64] Shi C M, Daux V, Zhang Q B, Risi C, Hou S G, Stievenard M, Pierre M, Li Z S, Masson-Delmotte V. Reconstruction of southeast Tibetan Plateau summer climate using tree ring $\delta^{18}\text{O}$: moisture variability over the past two centuries. *Climate of the Past*, 2012, 8(1): 205-213.
- [65] Wang L, Liu Y, Li Q, Song H M, Cai Q F. Tree-ring oxygen isotope recorded precipitation variations over the past two centuries in the northeast Chinese Loess Plateau. *International Journal of Climatology*, 2022, 42(11): 5796-5806.
- [66] Battipaglia G, Cherubini P, Saurer M, Siegwolf R, Strumia S, Cotrufo M F. Volcanic explosive eruptions of the Vesuvio decrease tree-ring growth but not photosynthetic rates in the surrounding forests. *Global Change Biology*, 2007, 13(6): 1122-1137.
- [67] Brubaker L. Tree rings and climate. *Ecology*, 1977, 58: 1400-1401.
- [68] 徐贺年, 王江林, 彭小梅, 任子健. 青藏高原东北部祁连山圆柏径向生长对不同干旱类型的响应. *应用生态学报*, 2022, 33(8): 2097-2104.
- [69] Serra-Maluquer X, Granda E, Camarero J J, Vilà-Cabrera A, Jump A S, Sánchez-Salguero R, Sangüesa-Barreda G, Imbert J B, Gazol A. Impacts of recurrent dry and wet years alter long-term tree growth trajectories. *Journal of Ecology*, 2021, 109(3): 1561-1574.
- [70] Zhang Y, Shao X M, Yin Z Y, Liang E Y, Tian Q H, Xu Y. Characteristics of extreme droughts inferred from tree-ring data in the Qilian Mountains, 1700—2005. *Climate Research*, 2011, 50(2): 141-159.
- [71] Mu Y M, Lyu L X, Li Y, Fang O Y. Tree-ring evidence of ecological stress memory. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2022, 289(1885): 20221850.
- [72] 杨煜达, 满志敏, 郑景云. 嘉庆云南大饥荒(1815—1817)与坦博拉火山喷发. *复旦学报: 社会科学版*, 2005, 47(1): 79-85.
- [73] Li Y, Zhang Q B, Fang O Y, Mu Y M, Jia H F, Lyu L X. Recovery time of juniper trees is longer in wet than dry conditions on the Tibetan Plateau in the past two centuries. *Forest Ecology and Management*, 2021, 497: 119514.
- [74] Fang O Y, Qiu H Y, Zhang Q B. Species-specific drought resilience in juniper and fir forests in the central Himalayas. *Ecological Indicators*, 2020, 117(10): 106615.
- [75] Cole L E S, Bhagwat S A, Willis K J. Recovery and resilience of tropical forests after disturbance. *Nature Communications*, 2014, 5: 3906.
- [76] Seidl R, Vigl F, Rössler G, Neumann M, Rammer W. Assessing the resilience of Norway spruce forests through a model-based reanalysis of thinning trials. *Forest Ecology and Management*, 2017, 388: 3-12.
- [77] Fang O Y, Zhang Q B. Tree resilience to drought increases in the Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2019, 25(1): 245-253.