

# 河北坝上杨树人工林径向生长与气候因子关系数据集

刘亚玲<sup>1</sup>, 信忠保<sup>1\*</sup>, 李宗善<sup>2</sup>, 买尔当·克依木<sup>2</sup>

1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

**摘 要:** 作者在河北省坝上地区波罗素林场 (41°03'N–41°27'N, 114°20'E–115°58'E) 采集了健康和衰退杨树树芯样品, 进行实验分析后得到河北坝上地区杨树径向生长与气候因子关系数据集。该数据集包括: (1) 河北坝上小叶杨防护林样地基本信息; (2) 健康和衰退杨树标准年表及年表主要特征参数和公共区间分析结果; (3) 健康和衰退杨树生长与气候因子关系分析数据, 即, 健康和衰退杨树年表与单月和季节尺度气候因子的相关性 (月平均温度、月最高温度、月最低温度、月降水量、月平均相对湿度、帕默尔干旱指数) 以及健康和衰退杨树年表与主要月份气候因子的滑动相关分析 (月平均温度、月最高温度、月降水量、帕默尔干旱指数); (4) 健康和衰退小叶杨树轮宽度时间序列及交叉定年检验结果。数据集存储为.txt、.xlsx、.out 格式, 由4个数据文件组成, 数据量为404 KB (压缩为1个文件, 152 KB)。

**关键词:** 河北坝上; 小叶杨; 衰退; 径向生长; 气候响应

**DOI:** <https://doi.org/10.3974/geodp.2020.01.09>

**CSTR:** <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.01.09>

**数据可用性声明:**

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2021.08.01.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2021.08.01.V1>.

## 1 前言

京津风沙源生态人工林是京津地区重要生态屏障<sup>[1]</sup>。近年来, 河北坝上地区杨树人工林出现不同程度衰退现象, 受到行业、公众广泛关注, 其衰退机理成为当前行业亟待回答的科学问题<sup>[2,3]</sup>。目前, 河北坝上地区杨树防护林衰退原因主要概括为3种: (1) 树木生理层面, 我国北方小叶杨处于树龄30年以上的便进入成熟阶段, 生理功能下降, 生命力逐步衰退, 进而导致死亡<sup>[3]</sup>。(2) 河北坝上地区环境条件恶劣, 小叶杨生长状况差, 该地区具有深厚的钙积层, 而杨树属于深根性植物, 根系不能穿透钙积层, 无法得到充足的水分, 并且随退化程度的加深, 小叶杨树叶凋落加剧, 为维持其正常的光合作用需要更多的土壤水分, 而河北坝上地区干旱少雨, 水分缺乏加剧杨树的衰退和死亡<sup>[4,5]</sup>。(3) 遭遇干旱后杨

收稿日期: 2021-08-25; 修订日期: 2021-11-20; 出版日期: 2022-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41877539, 42177319); 教育部 (2017ZY02)

\*通讯作者: 信忠保 0000-0002-1653-8679, 北京林业大学水土保持学院, [xinzhongbao@126.com](mailto:xinzhongbao@126.com)

数据引用方式: [1] 刘亚玲, 信忠保, 李宗善等. 河北坝上杨树人工林径向生长与气候因子关系数据集[J]. 全球变化数据学报, 2022, 6(1): 65–72. <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.01.09>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.01.09>.

[2] 刘亚玲, 信忠保, 李宗善等. 河北坝上杨树人工林径向生长与气候因子关系数据集[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2021. <https://doi.org/10.3974/geodb.2021.08.01.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2021.08.01.V1>.

树易遭受病虫害，加速了坝上地区杨树防护林的衰退<sup>[6-8]</sup>，还没有健康和衰退杨树生长对气候因素响应方面的研究。树木年轮能够记录树木过去生长过程<sup>[9]</sup>，为分析树木生长-气候关系提供了难得契机，通过研究健康和衰退杨树生长对气候变化响应的差异可以分析其衰退原因。本文以河北省张北县波罗素林场健康和衰退小叶杨为研究对象，利用树木年轮气候学方法建立健康和衰退小叶杨标准年表，并与当地气候因素进行相关性分析，生成了河北坝上杨树人工林径向生长与气候因子关系数据集，为气候变暖背景下河北坝上地区杨树人工林的经营管理提供理论支撑。

2 数据集元数据简介

《河北坝上杨树人工林径向生长与气候因子关系数据集》<sup>[10]</sup>的名称、作者、地理区域、数据年代、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 《河北坝上杨树人工林径向生长与气候因子关系数据集》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	河北坝上杨树人工林径向生长与气候因子关系数据集
数据集短名	Climate&PopulusSimoniiBashang
作者信息	刘亚玲，北京林业大学，liuyaling0720@126.com 信忠保 0000-0002-1653-8679，北京林业大学，xinzhongbao@126.com 李宗善，中国科学院生态环境研究中心，zqli_st@rcees.ac.cn 买尔当·克依木，中国科学院生态环境研究中心，mktrees@126.com
地理区域	河北省张北县坝上地区波罗素林场（41°03'N-41°27'N，114°20'E-115°58'E）
数据年代	健康杨树（1975-2017 年）、衰退杨树（1982-2017 年）
数据格式	.txt、.xlsx、.out
数据量	152 KB（压缩后）
数据集组成	（1）河北坝上小叶杨防护林样地基本信息；（2）健康和衰退杨树标准年表及年表主要特征参数和公共区间分析结果；（3）健康和衰退杨树与气候因子关系分析数据；（4）健康和衰退小叶杨树轮宽度时间序列及交叉定年检验结果
基金项目	国家自然科学基金项目（41877539，42177319）；教育部（2017ZY02）
数据计算环境	WINDENDRO，中国科学院生态环境研究中心所内平台
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a>
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、通过《全球变化数据仓储电子杂志（中英文）》发表的实体数据集和通过《全球变化数据学报（中英文）》发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 <sup>[11]</sup>

### 3 研究区概况与数据研发方法

#### 3.1 研究区概况与样地信息

##### 3.1.1 研究区概况

研究区位于张北县二台镇的波罗素林场(41°03'N–41°27'N, 114°20'E–115°58'E), 为典型的农牧交错带, 海拔 1,370–1,390 m。气候属中温带大陆性季风气候区, 受内蒙古高压影响, 该地区主要的气候特征为风大雨少, 干旱严重, 气候多变。年均气温 3.67 °C, 最高气温 24.84 °C, 最低气温 -20.01 °C, 年积温为 2,100–2,800 °C, 无霜期 64–90 天(1975–2017 年)。年降水量在 400 mm 左右, 其中 64% 的降水量集中于夏季, 年蒸发量为年降水量的 4–5 倍。该地区大风天数多, 每年 7 级以上大风约 30 天。该区域成土母质主要包括片麻岩、花岗岩、玄武岩以及风积沙土, 土壤侵蚀严重, 以风蚀为主, 主要土壤类型为栗钙土类, 低洼地区分布有草甸土, 天然次生林地区有棕壤及褐土的分布。土壤质地主要为砂土、壤质砂土和砂质壤土, 土壤容重为 1.60–1.65 g/cm<sup>3</sup>, 总孔隙度为 29.97%–38.57%<sup>[12,13]</sup>。该地区栗钙土内有不同程度的钙积层分布, 出现的深度一般为 30–50 cm, 厚度大致为 20–60 cm, 呈坚实粉末状, 钙化层硬度较高<sup>[8]</sup>。河北坝上地区现有防护林树种丰富, 乔木主要有小叶杨(*Populus simonii*)、山杨(*Populus davidiana*)、青杨(*Populus cathayana*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、榆树(*Ulmus pumila*)、云杉(*Picea asperata*)、落叶松(*Larix gmelini*)、油松(*Pinus tsbulaeformis*)等; 灌木主要有柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、丁香(*Syringa reticulata*)、小红柳(*Salix microstachya*)、沙柳(*Salix psammophila*)等; 草本植物以多年生耐寒旱生植物为主, 主要有紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)、田旋花(*Convolvulus arvensis*)、艾蒿(*Artemisia argyi*)等<sup>[14]</sup>。

##### 3.1.2 样地基本信息

2018 年 7–8 月在波罗素林场(面积为 6.4 km<sup>2</sup>)内进行树芯采集工作。将 Landsat TM8 和 Google Earth 相结合, 从人工防护林退化程度方面出发, 选择立地相对一致、空间相对集中的 52 个杨树人工林样地来采集健康和衰退杨树树芯样品<sup>[15]</sup>。研究以枯梢率来划分健康和衰退杨树, 是指枯树梢长度占树高的百分比(%)。当杨树枯梢率低于 20% 时就将其定义为健康杨树, 当枯梢率在 20% 之上时为衰退杨树<sup>[15]</sup>。在样地内选择长势好的树木进行树芯采集工作, 在树木胸径 1.3 m 处用瑞典 haglof 300 mm 生长锥(内径为 5.15 mm)沿东西方向钻取 1 个树芯。共采集杨树树芯 278 个, 其中, 健康杨树 202 个, 衰退杨树 76 个。编号后带回实验室, 同时采用森林样地调查的方法, 对每个样地植被类型、胸径、树高、郁闭度、密度等生态结构特征进行调查与统计(表 2)。

#### 3.2 数据处理

##### 3.2.1 样品预处理

将采集的树芯根据树木年代学标准方法进行预处理<sup>[16]</sup>。首先为树芯样品的粘贴, 将样芯编号撰写在木槽的侧面, 把样品小心从塑料管中取出, 放置在木槽中, 年轮样芯要把导管细胞的横切面放在上面, 就像样品在树木中的原始位置一样, 如果发生轻微扭曲, 可以把样品掰断, 分别用白乳胶粘贴。然后用绳子将粘贴好的样品缠绕固定, 尽可能的使样品

表 2 河北坝上小叶杨防护林样地基本信息表（节选）

样地编号	防护林类型	经度 (°E)	纬度 (°N)	海拔 (m)	密度 (株/hm <sup>2</sup> )	郁闭度	盖度 (%)	平均胸径 (cm)	平均树高 (m)
1	农田防护林带	114.868	41.340	1,380.8	1,000	0.60	0.49	20.6	14.1
2	农田防护林带	114.866	41.342	1,378.7	550	0.38	0.57	20.7	12.4
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
54	农田防护林	114.872	41.340	1,378.8	1,400	0.73	0.56	15.8	11.9
56	防风固沙林	114.871	41.336	1,379.0	1,275	0.47	0.48	16.8	10.3

与木槽紧贴，防止样芯尾部翘起。放在通风处自然晾干后为样品的打磨，将其切割成单个样芯，按照 400、800 和 1200 目的砂纸目数逐步打磨和抛光，直到在显微镜下能够清晰分辨样品的年轮界线。

3.2.2 树轮宽度测量及交叉定年

样品达到树木年代学分析要求后，用高清数字扫描仪扫描预处理后的样品，通过扫描仪保存 1,200 dpi 分辨率的高清图像，图像的保存格式为\*.tif 格式。利用树木年轮宽度测量仪 Win DENDROTM（Regent instrument inc.Canada，精度 0.001 mm）导入图像并获取树木年轮原始宽度时间序列。最后用 COFECHA 程序检验和校准交叉定年和测量结果，剔除与主序列相关性差的树轮宽度序列<sup>[17]</sup>。通过交叉定年进行年表建立的健康和衰退杨树样品分别有 104 个和 35 个。

3.2.3 年表建立

由于研究集中在杨树生长与气候因子的关系上，应剔除树木随年龄增长和其他非气候因素导致的生长趋势<sup>[18]</sup>。用 R 语言中 dplR 扩展包中的负指数函数对健康和衰退杨树树轮宽度时间序列进行去趋势处理<sup>[19]</sup>，最后利用双权重平均法合成标准年表（Standard chronology, STD）、差值年表（Residual chronology, RES）和自回归年表（Arstan chronology, ARS）<sup>[20]</sup>。本研究利用健康衰退杨树标准年表进行树木生长与气候因子间的相关分析。

3.2.4 气象数据获取

从中国气象数据网<sup>1</sup>中选取距取样点最近、直线距离 47.2 km 的张北气象站的月平均数据（1975–2017）。气候因子包括：月平均气温（TMP）、月最低气温（TMN）、月最高气温（TMX）、月降水量（PRE）和月平均相对湿度（RH）。为更好的研究树木生长与土壤有效利用水分的关系，本研究亦使用了荷兰皇家气象研究所全球气候数据库<sup>[21]</sup>中分辨率为 0.5°×0.5° CRU 网格点的帕默尔干旱指数（Palmer drought severity index, PDSI）数据，时间段为 1975–2017 年。

3.2.5 气候响应分析

本研究利用 DendroClim 2002 程序<sup>[22]</sup>中的 bootstrap 相关分析来研究健康和衰退杨树生长与气候因子的关系，明确限制健康和衰退杨树生长的气候因素。考虑到杨树生长不仅受当年气候状况的影响，还受上一年气候条件的影响，因此选用上一年 6 月到当年 10 月（共 17 个月）的气候数据作为气候相关性分析窗口。季节性的气候状况对树木径向生长的影响更具代表性，并且考虑当地防护林树种的生长习性和气候变化特征，对单月气候因子进行

<sup>1</sup> 张强, 张志强, 何小明等. 中国气象数据网应用软件(V1.0 版)建设. 国家气象信息中心, 2016-12-16.

了月份组合<sup>[23]</sup>，分析季节性气候因子对健康衰退杨树径向生长的影响。1975 年以来河北坝上地区升温明显，为了解健康和衰退杨树生长与主要气候因素的动态变化关系，亦利用 DendroClim 2002 中滑动相关分析来揭示健康、衰退杨树生长-气候关系的时间稳定性（滑动区间 20 a）。

3.3 技术路线图

本研究以京津风沙源河北坝上地区小叶杨防护林为研究对象，以本地历史气候数据为基础，通过树木年轮气候学途径，研究河北坝上地区健康和衰退杨树径向生长对气候变化的响应差异，为河北坝上杨树防护林的经营管理提供理论支撑。本研究具体技术路线如图 1 所示。

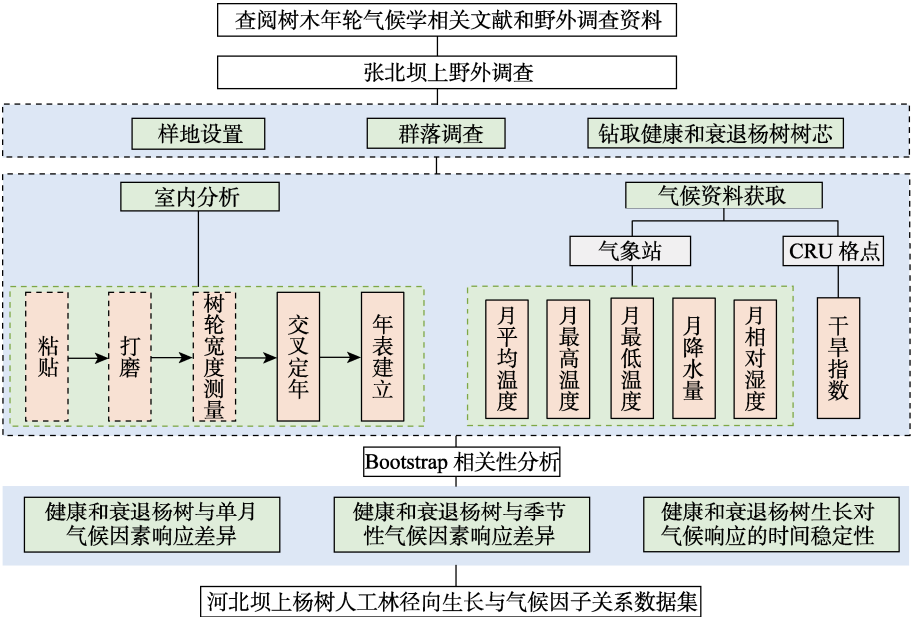


图 1 数据研发技术路线图

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

（1）河北坝上小叶杨防护林样地基本信息，包括防护林类型、经纬度、海拔、郁闭度、草本密度、胸径、树高、枯梢率等基本信息；

（2）健康和衰退杨树标准年表及年表主要特征参数和公共区间分析结果，其参数包括标准差、树间相关系数、一阶自相关系数、信噪比、样本总体代表性等；

（3）健康和衰退杨树生长与气象因子关系分析数据，包括：1）健康和衰退杨树与单月和季节尺气象因子的相关性分析数据；2）健康和衰退杨树与主要月份单月和季节尺度气象因子 20 年滑动相关分析数据。

（4）健康和衰退小叶杨树轮宽度时间序列及交叉定年检验结果，包括健康小叶杨树轮宽度时间序列、衰退小叶杨树轮宽度时间序列以及健康和衰退小叶杨树轮宽度时间序列交叉定年检验结果。

4.2 数据结果

建立健康和衰退杨树标准年表，其年表长度分别为 43 年和 36 年，健康杨树年表有上升趋势，衰退杨树年表有下降趋势（图 2）。由年表主要特征参数及公共区间分析结果可知衰退杨树年表质量较高，包含丰富的气候信号（表 3）。

表 3 健康和衰退杨树标准年表主要特征参数及公共区间分析结果

统计特征	健康杨树	衰退杨树
经纬度	114.88°E, 41.34°N	114.88°E, 41.34°N
海拔（m）	1,379	1,379
序列长度（年）	1975–2017	1982–2017
样芯数（个）	104	35
平均生长速率（mm/a）	2.533	2.570
标准差	1.544	1.900
树间相关系数	0.306	0.445
一阶自相关系数	0.590	0.609
信噪比	33.995	20.617
样本总体代表性	0.971	0.954

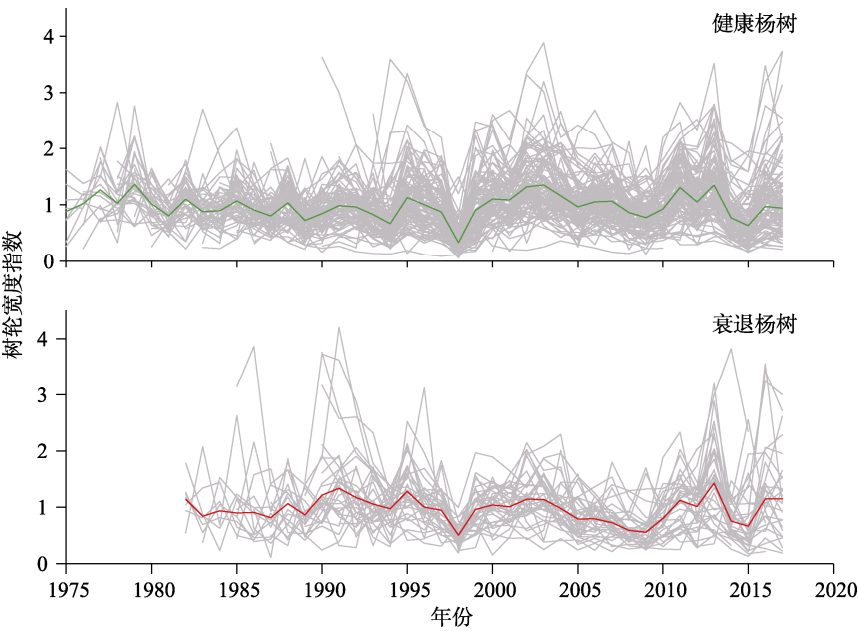


图 2 河北坝上健康和衰退杨树标准年表

4.3 数据验证

由健康和衰退杨树年表与气候因子的相关性可知，在河北坝上地区杨树生长与温度因素多呈负相关关系，与降水、相对湿度和帕默尔干旱指数多呈正相关关系（表 4），此结果与半干旱区（大兴安岭南段）山杨生长对气候的响应结果较为一致<sup>[24]</sup>。衰退杨树年表较健康杨树年表包含更多的气候信号，这与标准年表特征参数中的标准差相统一，标准差越大说明包含的气候信息更多。一阶自相关系数越大，说明包含上一年的气候信号越多，由统

计特征可以看出衰退杨树生长受上一年气候因素的影响更大,健康杨树生长与上一年 12 月温度因素和 9 月降水和相对湿度呈显著相关 ( $P < 0.05$ ),衰退杨树与上一年 9 月和 11 月降水,9 月相对湿度以及 9–12 月 PDSI 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。

河北坝上地区健康和衰退杨树生长对单月温度因素和 PDSI 的响应较季节性温度因素强,季节性降水和相对湿度对健康和衰退杨树的影响比单月尺度影响大,累积降水和相对湿度对杨树生长的促进作用更大。随着河北坝上地区温度升高,降水量减少,影响衰退杨树生长的因素由温度引起的干旱胁迫转变为缺水引起的干旱胁迫,这与当地气候因素变化相一致<sup>[15]</sup>。

表 4 健康和衰退杨树年表与气候因子的相关性统计

月份	健康杨树						衰退杨树					
	TMP	TMX	TMN	PRE	RH	PDSI	TMP	TMX	TMN	PRE	RH	PDSI
–6	0.10	0.08	0.14	0.02	0.00	–0.03	–0.21	–0.19	–0.21	0.10	0.01	0.04
–7	0.08	0.07	0.08	–0.07	–0.02	–0.02	–0.06	–0.09	0.02	0.16	0.12	0.07
–8	–0.07	–0.06	–0.11	0.24	0.09	0.03	–0.06	0.02	–0.21	–0.01	0.00	0.09
–9	0.06	0.00	0.09	0.28*	0.35*	0.09	–0.21	–0.30	–0.07	0.37*	0.31*	0.32*
–10	–0.11	–0.15	–0.06	0.17	0.31	0.20	–0.25	–0.26	–0.25	0.09	0.18	0.38*
–11	–0.16	–0.16	–0.19	0.15	0.20	0.20	–0.09	–0.11	–0.13	0.40*	0.18	0.42**
–12	–0.27*	–0.30*	–0.26*	0.16	0.21	0.15	–0.08	–0.11	–0.14	0.23	0.27	0.37*
1	–0.14	–0.17	–0.12	–0.20	0.18	0.17	–0.19	–0.21	–0.20	0.08	0.22	0.41*
2	–0.04	0.02	–0.06	–0.01	–0.20	0.16	–0.10	–0.05	–0.12	–0.20	0.00	0.36*
3	–0.12	–0.14	–0.06	0.09	0.04	0.17	–0.04	–0.10	0.07	0.08	0.14	0.33*
4	–0.44**	–0.45**	–0.37**	0.06	0.06	0.16	–0.46**	–0.44**	–0.47**	–0.30	–0.20	0.18
5	0.01	0.03	0.05	–0.01	0.16	0.15	–0.05	–0.04	–0.11	–0.07	0.03	0.18
6	–0.02	–0.08	0.09	0.10	0.23	0.27	–0.18	–0.21	–0.13	0.23	0.12	0.45**
7	–0.18	–0.17	–0.16	0.14	0.13	0.26	–0.26*	–0.33*	–0.07	0.51**	0.45**	0.44**
8	0.03	0.00	0.11	–0.04	0.16	0.30	0.09	0.06	0.11	–0.07	0.17	0.51**
9	–0.24	–0.14	–0.34	–0.02	0.03	0.14	–0.34*	–0.30*	–0.34*	0.11	0.10	0.34*
10	–0.04	0.00	–0.06	0.13	0.16	0.20	–0.41*	–0.35*	–0.38*	0.05	0.20	0.35*

注：TMP，月平均温度；TMN，月最低温度；TMX，月最高温度；PRE，月降水量；RH，月平均相对湿度；PDSI，帕默尔干旱指数；\*  $P < 0.05$ ，\*\*  $P < 0.01$ 。

5 总结

本研究建立了河北坝上地区健康和衰退杨树标准年表,分析了树木生长对气候响应的异质性特征,并发布了河北坝上杨树人工林径向生长与气候因子关系数据集。健康和衰退杨树数据年代分别为 1975–2017 年和 1982–2017 年。通过相关性和滑动相关性分析方法,对健康和衰退杨树对气候变化的响应进行了比较,最终得到结论,干旱是该区域杨树衰退甚至死亡的主要驱动因素。本数据集丰富了国际树木年轮数据库,帮助我们了解健康和衰退杨树生长对气候响应的的时间变异规律,可为全球气候变化领域提供基础数据资料。

作者分工：信忠保和李宗善对数据集的开发做了总体设计；刘亚玲和买尔当·克依木采集和处理了健康和衰退小叶杨树轮宽度序列和河北坝上地区杨树径向生长与气候因子关系数据；李宗善提供了树木年轮分析平台 WINDENDRO 并做了数据验证；刘亚玲完成了数

据论文的撰写。

**利益冲突声明：**本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

## 参考文献

- [1] 郑春雅, 许中旗, 马长明等. 冀西北坝上地区退化防护林的土壤性质[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 203–207.
- [2] 邢海富. 坝上杨树防护林死亡原因浅析[J]. 河北林业科技, 2015, (1): 76–77.
- [3] 苗博, 孟平, 张劲松等. 基于稳定同位素和热扩散技术的张北杨树水分关系差异[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2111–2118.
- [4] 张欢, 曹俊, 王化冰等. 张北地区退化杨树防护林的水分利用特征[J]. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1381–1388.
- [5] 程月明, 张愿, 崔硕等. 张北县杨树种群衰退原因初探——以盘城营为例[J]. 林业资源管理, 2015, (1): 152–155, 167.
- [6] 孙守家, 李春友, 何春霞等. 基于树轮稳定碳同位素的张北杨树防护林退化原因解析[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2119–2127.
- [7] 李晓航, 刘晓龙. 干旱导致防护林衰退死亡研究进展[J]. 防护林科技, 2016, (12): 59–60.
- [8] 郑春雅, 许中旗, 马长明等. 冀西北坝上地区杨树防护林退化的影响因素[J]. 林业资源管理, 2018, (1): 9–15, 147.
- [9] Fritts, H. C. Tree Rings and Climate [M]. New York: Academic Press, 1976.
- [10] 刘亚玲, 信忠保, 李宗善等. 河北坝上杨树人工林径向生长与气候因子关系数据集[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2021. <https://doi.org/10.3974/geodb.2021.08.01.V1>. <https://cstr.esi.cn/cstr/20146.11.2021.08.01.V1>.
- [11] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. DOI: 10.3974/dp.policy.2014.05 (2017年更新).
- [12] 沈晗悦, 王敏敏, 梁潇瑜等. 河北坝上地区防护林土壤性质特征[J]. 中国水土保持科学, 2021, 19(5): 63–71.
- [13] 孙立博, 余新晓, 陈丽华等. 坝上高原杨树人工林的枯落物及土壤水源涵养功能退化[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 104–110.
- [14] 苏王新, 李卓, 陈书琴等. 河北坝上地区植被覆盖演化特征及其风险评估[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 686–694.
- [15] 刘亚玲, 信忠保, 李宗善等. 近40年河北坝上地区杨树人工林径向生长对气候变化的响应差异[J]. 生态学报, 2020, 40(24): 9108–9119.
- [16] Stokes, M. A., Smiley, T. L. An Introduction to Tree Ring Dating [M]. Chicago: University of Chicago Press, 1968.
- [17] Holmes, R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement [J]. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43: 51–67.
- [18] Brubaker, L. B., Fritts, H. C. Tree rings and climate [J]. *Ecology*, 1977, 58(6): 1400–1401.
- [19] Bunn, A. G. A dendrochronology program library in R (dplR) [J]. *Dendrochronologia*, 2008, 26(2): 115–124.
- [20] 邵雪梅, 吴祥定. 华山树木年轮年表的建立[J]. 地理学报, 1994, 61(2): 174–181.
- [21] Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J., et al. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3.10 dataset [J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(3): 623–642.
- [22] Biondi, F., Waikul, K. DENDROCLIM2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies [J]. *Computers & Geosciences*, 2004, 30(3): 303–311.
- [23] 董志鹏, 郑怀舟, 方克艳等. 福建三明马尾松树轮宽度对气候变化的响应[J]. 亚热带资源与环境学报, 2014, 9(1): 1–7.
- [24] 贺敏, 魏江生, 石亮等. 大兴安岭南段山杨径向生长和死亡对区域气候变化的响应[J]. 生态学杂志, 2018, 37(11): 3237–3244.