

曹英楠, 孙英. 基于树木年轮的旱灾逐年趋势变化建模分析[J]. 灾害学, 2019, 34(2): 21-25. [CAO Yingnan, SUN Ying. Modeling and Analysis of Annual Trend Change of Drought Based on Tree Rings[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(2): 21-25. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.02.005.]

# 基于树木年轮的旱灾逐年趋势变化的建模分析\*

曹英楠<sup>1</sup>, 孙英<sup>2</sup>

(1. 内蒙古工业大学 能源与动力工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 呼和浩特市环境监测中心站, 内蒙古 呼和浩特 010030)

**摘要:**传统基于树轮宽度重建气候数据的方法,忽略了早材、晚材树轮宽度的差异,导致数据重建结果存在局限性,为此提出新的基于树木年轮的旱灾逐年趋势变化建模分析方法。在科尔沁沙地采集树木年轮样、收集水文气象资料,建立科尔沁沙地树木标准年轮年表;分析年轮指数与气象因子的相关性,获取不同水文气象因子对树木生长的作用关系,根据该结果采用干旱指数重建科尔沁沙地气候数据,实现科尔沁沙地旱灾逐年趋势变化分析。实验结果表明,所提方法获取的数据重建结果真实、可靠,采用该方法可知科尔沁沙地过去321年经历了6个潮湿阶段、5个干旱阶段,科尔沁沙地蒙古栎的年轮宽度与当年最低气温存在显著的正相关关系。

**关键词:**旱灾;树木年轮;树轮宽度;树轮密度;干旱指数;气象因子;重建

**中图分类号:** X43; X915.5; P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2019)02-0021-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.02.005

由于几百年前关于气候记载的有效信息较少,若要对某地的气候进行研究,必须对其进行气候数据重建。树木年轮作为气候的表达与体现因素,是气候数据重建的一种有效手段<sup>[1]</sup>。树木年轮在气候重建方面存在定年准确率高、易获取、辨别难度低的优势,且能够提供不间断的气候信息,在全球范围内得到广泛利用。贾敏等<sup>[2]</sup>利用树轮宽度重建准噶尔盆地西南缘降水日数,充分发挥了树木年轮宽度在地区以往气候数据重建方面的优势,但是忽略了早材、晚材树轮宽度的差异,获取的数据重建结果存在局限性,不能对当地气候进行有效分析;史景宁等<sup>[3]</sup>采用树木年轮记录当地的PDSI指数变化情况,并通过该结果分析干旱指数对额尔齐斯河径流变化的影响,但是该方法对树木年轮的分析较少,未建立树木标准年轮年表,导致获取的干旱指数的重建结果误差较大,难以准确分析干旱指数对当地河流变化的影响;刘敏等<sup>[4]</sup>通过研究不同纬度阔叶红松林红松径向生长状况,分析其对气候因子的响应,忽略了树木年轮在气候因子分析中的作用,使得研究结果精确度较低。

针对上述方法存在的问题,本文提出新的基于树木年轮的旱灾逐年趋势变化建模方法,基于干旱指数重建科尔沁沙地以往的气候数据,为当地景观的恢复、干旱情况研究提供有效依据。

## 1 建立科尔沁沙地树木标准年轮年表

通过在科尔沁沙地采集树木年轮样及收集水文气象资料,建立科尔沁沙地树木标准年轮年表。

### 1.1 树木年轮采样

在2017年8-9月对科尔沁沙地进行树木年轮信息采集,树木年轮信息采集以气象学中树木年轮采样要求为前提,严格分析空间与坡向的位置因素<sup>[5]</sup>。蒙古栎是此次年轮信息采集的树木品种,在两个采样点进行样本采集,采样数量为45,共采集到94个样芯。

树木年轮信息获取步骤如下:①对采集的样芯实施除湿、固定、打磨以及交叉定年处理,并测量样品的年轮宽度,测量仪器名称为Velmex,测量精度为0.001 mm,年轮测量数据的准确程度需采用COFECHA程序对其实施验证。②年轮测量完成,即完成树木年轮的定年,然后对样本实施分段、切片以及X光片拍摄等操作。③在以上处理完成之后,采用树木年轮密度分析系统对样本的相关参数进行获取,包括树轮宽度、早材宽度、晚材宽度、早材平均密度、晚材平均密度、早材最小密度以及晚材最大密度在内的7种参数<sup>[6]</sup>,早材与晚材的区分可通过浮动法计算晚材最大密度与早材最小密度的比例来实现。

树木年轮信息数据处理过程如下:样本树木年轮信息的分类可采用SELTOTUC程序实现<sup>[7]</sup>,在研究交叉定年数据的基础上,对样本的密度信息进行更正与调整,同时将因外力因素导致的密度信息异常数据进行清除,最终输出样本的树轮宽度曲线与晚材密度最大值曲线。采用ARSTAN程序构建树木年轮密度年表,样本树木年轮的宽度与密度信息的生长趋势拟合可通过负指数函数来实现,样本生长趋势清除完毕后,采用双权重

\* 收稿日期: 2018-09-06 修回日期: 2018-11-01

基金项目: 内蒙古工业大学科学研究项目(X201311)

第一作者简介: 曹英楠(1980-),女,内蒙古满洲里市人,硕士,讲师,研究方向为水文水资源。E-mail: sunying568@eyou.com

平均法对序列实施合并操作,利用获取的树轮宽度与密度指数序列构建相应的树轮宽度与密度标准化年表、差值年表以及自回归年表<sup>[8]</sup>。通过相关性分析结果可知,利用科尔沁沙地两个采样点的树轮宽度与密度之间的相关性获取两个采样点的样本信息合并结果。

### 1.2 水文气象采样

通过选取科尔沁沙地两个采样地点的月降水量、月温度均值相关资料来获取两个采样地点的水文气象信息。经分析得出,两个采样地点的降水量、温度都存在较大的相关性,即两个采样地点的气候状况比较吻合;同时,收集涵盖整个科尔沁沙地的干旱指数格点信息。在收集的树木年轮样本、水文气象结果基础上,构建科尔沁沙地树轮宽度与密度年表(表1)。从表1可看出,采样树木年轮7种参数的敏感度均值、标准差、树间相关系数均值以及信噪比等信息。

## 2 年轮指数与气象因子的相关性分析

通过标准化样本树木年轮信息的方式,将除气候引起的年轮变化以外的干扰因素剔除,排除立地环境等因素对于树木年轮数据的干扰。

具体的标准化过程如下:获取样本树木的生长期望值与年轮指数<sup>[9]</sup>。树木的生长期望值,即生长趋势曲线中的树轮宽度信息,在研究树轮序列分布特点的基础上,采用曲线拟合方程计算树木的生长期望值<sup>[10]</sup>;树木的年轮指数则是对气候因子影响树轮程度的表达,可采用如下公式计算:

$$Q_i = G_r/A_r; \quad (1)$$

$$A_r = (G_{r-1} + G_r + G_{r+1})/3. \quad (2)$$

式中:年轮指数用 $Q_i$ 表示;在 $r$ 年时,树木年轮宽度的测量值用 $G_r$ 表示;树木生长的年轮期望值 $A_r$ 表示。

采用响应函数计算树轮宽度同气象因子间的关系,一方面能够表达不同因子对树木生长的作

用,另一方面能判断不同气象因子间的作用关系。响应函数为:

$$G_r = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 H_i + \varepsilon_2 M_i + \varepsilon_3 H_i^2 + \varepsilon_4 M_i^2 + \varepsilon_5 H_i M_i + \varepsilon_6 H_i^3 + \varepsilon_7 M_i^3 + \varepsilon_8 H_i^2 M_i + \varepsilon_9 H_i M_i^2 \gamma. \quad (3)$$

式中: $G_r$ 为树木年轮的宽度; $H$ 为本年度树木生长期的温度; $M$ 为降水均值; $\varepsilon$ 为对数基数; $\gamma$ 表示空气湿度。

通过上述方法能表达树木年轮宽度与不同的气象因子(降水、温度)之间的关系,进而得到不同水文气象因子对树木生长的作用关系<sup>[11]</sup>。结果表明,不同的气象因子与树木的生长存在相关关系,早材的良好成长得益于充足的水分,晚材成长所需的营养物质大部分来源于充足的水源,第二年树木的成长也从中受益;适中的温度为树木的生长提供良好的生存环境,为促进树木的快速生长发挥了积极的作用。通过温度、降水因素能够获取该地区的干旱指数,干旱指数(PDSI)通常反映了降水、气温以及土壤中水分的含量等因素<sup>[12]</sup>,通过分析干旱指数能够表达土壤对于树木生长的水分供应状况,通过分析树木年轮指数与水文气象因子的关系,来揭示不同水文气象因子对树木生长的作用关系。

## 3 基于干旱指数的科尔沁沙地旱灾逐年趋势变化建模分析

### 3.1 重建科尔沁沙地干旱指数

基于前面得到的不同水文气象因子对树木生长的作用关系,依据干旱指数重建气候数据,为科尔沁沙地景观的恢复重建及过去气候的分析提供依据<sup>[13]</sup>。在分析相关性、重建方程的科学性以及植物生理学等相关标准的基础上,获取科尔沁沙地干旱指数的重建区间<sup>[14]</sup>,即1-8月份,暂时选定1982-2017年,对其干旱指数进行逐步回归分析,获取最优重建方程:

表1 科尔沁沙地树轮宽度与密度标准化年表信息的统计特征

年表名称	年轮宽度 /cm	早材宽度 /cm	晚材宽度 /cm	早材密度均值 /(g/cm <sup>3</sup> )	晚材密度均值 /(g/cm <sup>3</sup> )	晚材密度最大值 /(g/cm <sup>3</sup> )	早材密度最小值 /(g/cm <sup>3</sup> )
敏感度均值	0.154	0.173	0.144	0.036	0.04	0.038	0.076
标准差	0.244	0.255	0.233	0.103	0.065	0.061	0.152
一阶自相关系数	0.415	0.478	0.552	0.245	0.304	0.304	0.205
树间相关系数均值	0.212	0.22	0.12	0.092	0.103	0.107	0.096
信噪比	13.518	14.104	8.04	4.521	5.463	7.133	6.302
树木的整体代表性	92.5	92.7	88	83.8	85.7	88.6	85.4

表2 稳定程度独立检验统计结果

统计量	年份	相关系数	方差解释量/%	误差缩减量	效率系数	符号检验
验证期	1952-1981年	0.610	0.510	0.402	0.484	24+/4-
	1982-2017年	0.650	0.424	0.44	0.407	28+/6-
建模期	1952-1981年	0.710	0.510			24+/4-
	1982-2017年	0.550	0.424			28+/6-
整体时段	1952-2017年	0.686	0.475			

$$PDSI_{1-8} = 11.812LWW - 12.127. \quad (4)$$

式中: 科尔沁沙地 1-8 月份的指数均值用  $PDSI_{1-8}$  表示, 晚材宽度的标准化年表序列用  $LWW$  表示。

将 1952-1981 年作为验证期、1982-2017 年作为建模期(图 1)。分析图 1 可知, 真实测量数据与重建数据的吻合程度较高。因此, 公式(4)表示的重建方法能够用于科尔沁沙地以往干旱情况的重建过程中。

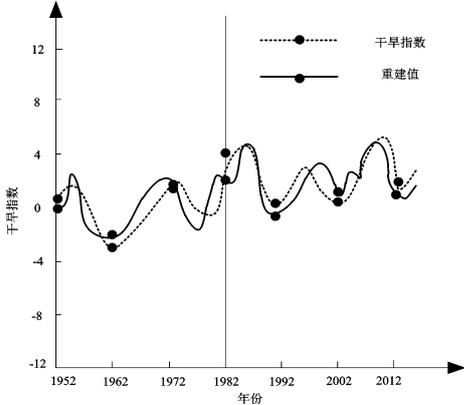


图 1 验证期和建模期干旱指数与重建数据的对比情况

采用本文构建的回归方程对两个年限实施稳定程度独立检验<sup>[15]</sup>(表 2)。分析表 2 能够看出, 整体时段 1952-2017 年与验证期 1952-1981 年的相关系数分别为 0.686、0.610, 方差解释量分别为 0.475%、0.510%, 两者的相关程度较大; 两者的误差缩量与效率系数均在 0 以上, 且相应的置信度符合标准。根据以上数据可知, 公式(4)表示的

重建方法的稳定程度与准确程度较高。

数据重建的标准为子样本信号强度高于 80%, 子样本信号强度为 80% 时的年份为 1697 年, 所以将 1697-2017 年作为数据重建的年限。

### 3.2 干旱指数重建序列特征

1697-2017 年 1-8 月份干旱指数序列和相应的 20 年低通滤波曲线用图 2 表示。-0.79 是重建的干旱指数序列的均值, 1.88 是其标准差  $\sigma$ 。根据当地气候状况确定科尔沁沙地的湿润条件、干旱或湿润生长季的临界值, 获取的湿润条件为: 干旱指数处于平均值  $\pm\sigma$  的区间内; 干旱或湿润生长季的临界值为:  $PDSI_{1-8} \leq -3.0$  或  $2.0$ 。

将图 2 中的 20 年低通滤波曲线情况与这两项标准数据结合, 获取 1697-2017 年干旱指数重建结果(即对干湿年份的划分), 较湿润区间包括 1697-1727 年, 1755-1787 年, 1827-1839 年, 1872

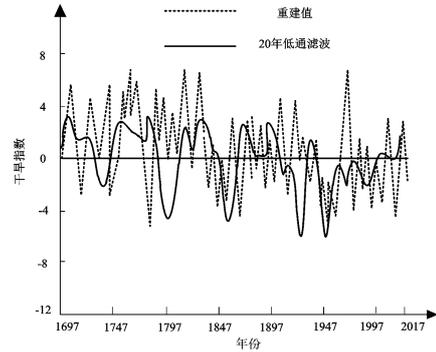
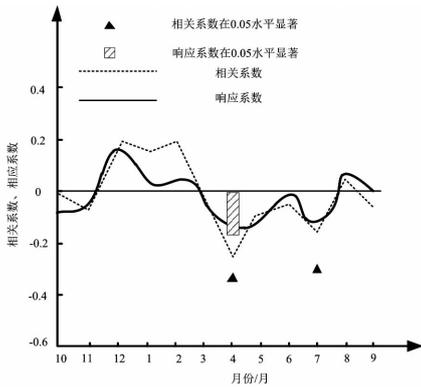
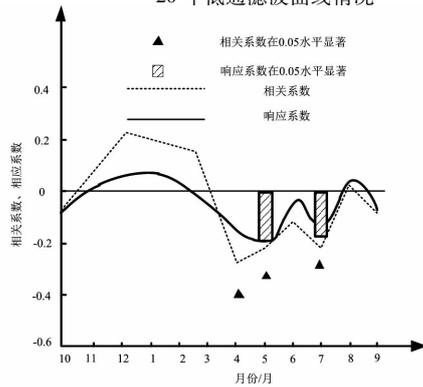


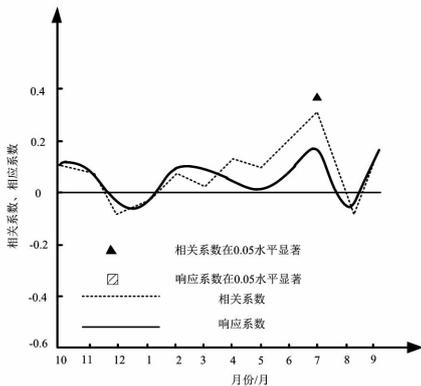
图 2 1697-2017 年 1-8 月份干旱指数序列和相应的 20 年低通滤波曲线情况



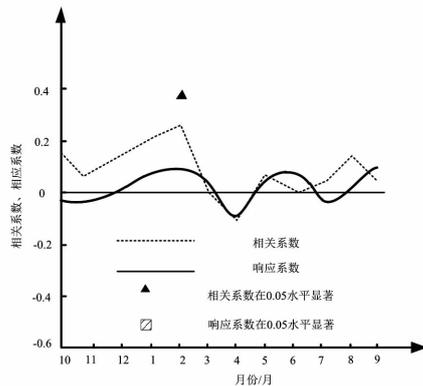
(a) 树轮宽度与气温均值的相关系数、响应系数



(b) 树轮宽度与降水量的相关系数、响应系数



(c) 树轮宽度与最高气温均值的相关系数、响应系数



(d) 树轮宽度与最低气温均值的相关系数、响应系数

图 3 树轮宽度与气候因子的相关系数、响应系数

-1903年, 1927-1939年, 2006-2017年; 较干区间包括1728-1754年, 1788-1826年, 1840-1871年, 1904-1926年, 1940-2005年, 由此可知科尔沁沙地过去321年经历了6个潮湿阶段和5个干旱阶段。根据本文的方法对科尔沁沙地的干旱指数进行建模分析, 获取以往气象信息的重建数据, 为科尔沁沙地景观的恢复重建及过去气候的分析提供依据。

## 4 实验分析

### 4.1 树轮宽度与气温降水的关系分析

本文建模分析方法获取的科尔沁沙地树轮宽度与气候因子的相关系数、响应系数如图3所示, 其中, 图3a为树轮宽度与气温均值的相关系数、响应系数情况, 图3b为树轮宽度与降水量的相关系数、响应系数情况, 图3c为树轮宽度与最高气温均值的相关系数、响应系数情况, 图3d为树轮宽度与最低气温均值的相关系数、响应系数情况。

从相关性角度分析, 图3a中, 树轮宽度与4月份、7月份的气温均值高度负相关, 图3b中, 树轮宽度与7月份的降水量高度正相关, 图3c中, 树轮宽度与4月份、5月份、7月份的最高气温均值高度负相关; 从响应函数角度分析, 图3a中, 树轮宽度与4月份的气温均值高度负响应, 图3c中, 树轮宽度与5月份、7月份的最高气温均值高度负响应。

上述数据表明, 本文建模分析方法得出科尔沁沙地的蒙古栎的年轮宽度同一年中最低气温存在显著的正相关关系, 即一年中的最低气温大于最低气温的均值, 那么该气温环境有利于树木的生长。综合图3中的信息能看出, 本文建模分析方法分析得出科尔沁沙地树木年轮宽度与气候因子的响应系数同相关系数变化状态高度吻合, 响应函数系数的显著性要低于相关系数。

由于本文方法基于干旱指数对科尔沁沙地旱灾逐年趋势实施变化建模, 采用降水与气温两种气象因子研究科尔沁沙地的干旱状况, 并对科尔沁沙地过去的干旱指数实施重建, 能够获取以往气象信息的重建数据, 为科尔沁沙地景观的恢复重建及过去气候的分析提供依据。

### 4.2 气候数据重建的可靠性分析

为验证本文方法在干旱指数重建方面的可靠性, 采用本文方法进行数据重建实验, 同时对与科尔沁距离较近的浑善达克沙地进行以往气候数据重建, 由于这两个地区距离接近, 干旱变化状况接近, 若两地的干旱指数重建结果接近, 则说明本文方法可靠, 可用于科尔沁沙地的以往干旱指数的重建。具体实验方法为: 采用本文方法分别对浑善达克沙地地区、科尔沁沙地进行以往干旱指数序列重建, 并对指数序列实施20年低通滤波处理, 获取的结果如图4所示。分析图4能够看出, 浑善达克沙地与科尔沁沙地的干旱指数变化

情况基本吻合, 差异较小, 两者的相关系数为0.377, 符合显著性检验标准。该数据表明, 采用本文方法可对科尔沁沙地以往干旱指数数据进行有效重建; 另外, 文中中对气候数据重建方程的验证同样说明采用本文方法获取的结果可靠程度较高, 能够为科尔沁沙地景观的恢复重建及过去气候的分析提供有效依据。

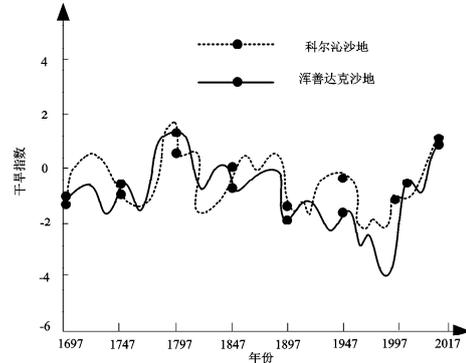


图4 浑善达克沙地与科尔沁沙地干旱指数重建的20年低通滤波结果对比情况

采用世纪尺度计算方法对两地区的干旱指数进行相关运算, 获取的结果如表3所示。分析表3数据可知, 同一年限内两地区的干旱指数存在显著差异。在1697-2017年期间, 两地区的相关系数为0.377, 相关性较小; 在1697-1463年期间, 两地区的相关系数为0.431, 大于0.4, 相关程度有所增长; 在1464-1863年期间, 两地区的相关系数达到0.657; 但在1864-1963年期间, 两地区的相关系数仅为-0.011, 相关性较弱; 最后, 在1964-2017年期间, 两地区的相关系数达到0.768, 相关性有所提升, 该数据证明了浑善达克沙地与科尔沁所在地区向着湿润气候发展的势头, 与实际的气候状况相符, 再次验证本文方法的有效性和可靠性。

表3 浑善达克沙地与科尔沁沙地干旱指数的相关系数

序列	相关系数
1697-2017年	0.377
1697-1463年	0.431
1464-1863年	0.657
1864-1963年	-0.011
1964-2017年	0.768

本文在计算树轮宽度时采用响应函数, 对树轮宽度同气象因子间的关系进行分析, 一方面能够表达不同因子对于树木生长的作用, 另一方面能判断不同气象因子间的作用关系, 基于该方法获取不同水文气象因子对树木生长的作用关系, 将其用于过去气象数据的重建, 所以采用本文方法获取的数据重建结果真实、可靠, 能够用于科尔沁沙地景观的恢复工作中, 还可以为相关活动的开展提供科学依据。

## 5 结论

本文基于树木年轮对科尔沁沙地的旱灾情况

进行逐年趋势分析。首先, 在科尔沁沙地采集树木年轮样品、收集当地水文气象资料, 在此基础上建立科尔沁沙地树木标准年轮年表; 其次, 分析年轮指数与气象因子的相关性, 获取不同水文气象因子对树木生长的作用关系; 最后, 根据树木标准年轮年表、不同水文气象因子对树木生长的作用关系, 采用干旱指数重建科尔沁沙地气候数据, 实现科尔沁沙地旱灾逐年趋势变化建模分析。将 1952 - 1981 年作为验证期, 经检验可知所构建最优重建方程能够有效重建科尔沁沙地的气候数据。通过对干旱指数序列重建, 获取科尔沁沙地过去 1697 - 2017 年的干旱指数重建结果, 由此可知科尔沁沙地过去 321 年经历了 6 个潮湿阶段、5 个干旱阶段。实验结果表明, 所提方法获取的数据重建结果真实、可靠, 采用该方法可知科尔沁沙地的蒙古栎的年轮宽度与一年中最低气温存在显著的正相关关系, 树木年轮宽度与气候因子的响应系数、相关系数变化状态高度吻合, 响应函数系数的显著性要低于相关系数。

综上所述, 本文提出的基于树木年轮的旱灾逐年趋势变化建模分析方法能够对科尔沁以往的气候信息进行有效建模分析, 获取有效的气候重建数据, 为科尔沁沙地景观的恢复、气候状况的分析提供科学依据。

## 参考文献:

[1] 周洪华, 李卫红, 李玉朋, 等. 基于树木年轮技术的塔里木河下游河岸胡杨林生态需水量研究[J]. 生态学报, 2017, 37

(22): 7576 - 7584.

- [2] 贾敏, 朱万泽, 王文志. 树木径向生长主要趋势方法与误差分析[J]. 世界林业研究, 2017, 30(3): 59 - 63.
- [3] 史景宁, 于健, 周华, 等. 基于 R 软件的树木年轮宽度测量方法[J]. 生态学杂志, 2017, 36(7): 2052 - 2059.
- [4] 刘敏, 毛子军, 厉悦, 等. 不同纬度阔叶红松林红松径向生长对气候因子的响应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1341 - 1352.
- [5] 孟盛旺, 周光, 于健, 等. 利用 GIS 工具测定树木圆盘年轮的方法[J]. 生态学杂志, 2017, 36(6): 1746 - 1751.
- [6] 张宇波, 成丽君. 农业气象灾害等级优化预测仿真研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(6): 440 - 444.
- [7] 赵少军, 魏强, 徐海量, 等. 树木年轮对塔里木河生态环境变迁的印证[J]. 中国沙漠, 2017, 37(3): 594 - 600.
- [8] 张宁, 刘琪璟, 孟盛旺, 等. 不通过髓心的树木圆盘年轮直径测定方法[J]. 生态学杂志, 2017, 36(1): 258 - 266.
- [9] 张芸, 叶茂, 汪亮亮, 等. 塔里木河源流和干流胡杨年轮生长的差异性[J]. 生态学报, 2017, 37(18): 6081 - 6090.
- [10] ZHANG R, SHANG H, YU S, et al. Tree-ring-based precipitation reconstruction in southern Kazakhstan, reveals drought variability since A. D. 1770[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(2): 741 - 750.
- [11] 苟晓霞, 叶茂, 高生峰, 等. 塔里木河中游胡杨径向生长对气候变化的响应研究[J]. 西北植物学报, 2017, 37(9): 1864 - 1871.
- [12] 常永兴, 陈振举, 张先亮, 等. 气候变暖下大兴安岭落叶松径向生长对温度的响应[J]. 植物生态学报, 2017, 41(3): 279 - 289.
- [13] 苏金娟, 王晓春. 张广才岭北部三大硬阔树木生长-气候关系的时空变异[J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1484 - 1495.
- [14] 崔诗梦, 向玮. 间伐与气候对长白落叶松树轮宽度的影响[J]. 林业科学, 2017, 53(12): 1 - 11.
- [15] 王亚军, 马玉贞, 鲁瑞洁, 等. 祁连山东延余脉——兴隆山树木径向生长记录的公元 1845 年来夏季 NDMI 变化[J]. 地理研究, 2016, 35(4): 653 - 663.

# Modeling and Analysis of Annual Trend Change of Drought Based on Tree Rings

CAO Yingnan<sup>1</sup> and SUN Ying<sup>2</sup>

(1. Inner Mongolia University of Technology College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia 010051, China; 2. Hohhot Environmental Monitoring Center, Inner Mongolia 010030, China)

**Abstract:** Traditional methods based on tree ring width to reconstruct climate data neglect the difference of tree ring width between early wood and late wood, which leads to the limitation of data reconstruction results. Therefore, a new method of annual trend change modeling and analysis of drought based on tree ring is proposed. We collected tree ring samples and hydro-meteorological data in Horqin sandy land and established standard tree ring chronology in Horqin sandy land. By analyzing the correlation between tree ring index and meteorological factors, the relationship between different hydro-meteorological factors and tree growth is obtained, and based on this result, by using drought index to reconstruct the climate data of Horqin sandy land, we are able to realize the annual trend change analysis of drought disaster in Horqin Sandy land. The experimental results show that the data reconstructed by the proposed method are real and reliable. The method get us to know that the Horqin sandy land has experienced six wet and five drought stages in the past 321 years. The annual ring width of *Quercus Mongolica* in Horqin sandy land has a significant positive correlation with the lowest temperature in that year.

**Key words:** tree ring; tree ring width; tree ring density; drought index; meteorological factors; reconstruction