

塔里木河中游胡杨径向生长 对气候变化的响应研究

苟晓霞^{1,2}, 叶茂^{1,2*}, 高生峰^{1,2}, 徐俏^{1,2}

(1 新疆师范大学 地理科学旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 2 新疆干旱区湖泊与资源实验室, 乌鲁木齐 830054)

摘要:以塔里木河中游荒漠河岸林胡杨为研究对象, 选择中游河道新沙吉利克、坎白吾斯旦两个断面, 分析塔里木河中游胡杨径向生长量的特点, 基于离断面较近的气象站长时间序列的气温数据, 采用相关性分析和 Mann-Kendall 突变检验方法研究塔里木河中游胡杨径向生长量对温度动态变化的响应。结果显示: (1) 塔里木河中游的河流沿岸, 胡杨径向生长变化与温度变化均呈增加趋势; 新沙吉利克、坎白吾斯旦断面胡杨径向生长量突变分别发生在 1993 年和 1998 年以后, 且该地区的胡杨径向生长量对温度具有滞后性。 (2) 从时段分析发现, 当年 6~9 月的温度对胡杨径向生长量的促进作用最大, 6~9 月的温度可能是该地区胡杨径向生长的限制性因子。 (3) 当年平均温度在 13~33 ℃ 时, 胡杨径向生长量达到最大值; 当温度超过 33 ℃, 胡杨径向生长量呈现减弱趋势。研究表明, 当年平均温度过高或过低都会抑制胡杨的径向生长。

关键词: 胡杨; 树木年轮; 气候变化; Mann-Kendall 突变检验; 塔里木河中游;

中图分类号: Q948.112⁺.2 **文献标志码:** A

Response of Radial Growth of *Populus euphratica* to Climate Change in the Middle Reaches of the Tarim River

GOU Xiaoxia^{1,2}, YE Mao^{1,2*}, GAO Shengfeng^{1,2}, XU Qiao^{1,2}

(1 College of Geography Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2 Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi 830054, China)

Abstract: Taking the *Populus euphratica* forest as the research object, we analyzed the two sections of Xinshajilike and Kanbaiwusitan, and the characteristics of the radial growth of *P. euphratica* in the middle reaches of the Tarim River. In the middle of the Tarim River, based on the temperature data of the long time series of the weather station near the cross section, the correlation analysis and the Mann-Kendall mutation test were used to study the response of the temperature change of the radial growth of *P. euphratica*. Research showed that: (1) the radial growth and temperature changes of *P. euphratica* showed an increasing trend along the riverside of the middle reaches of the Tarim River. The Mann-Kendall mutation analysis was used to analyze the change of radial growth of *P. euphratica* along 2 profiles. The result showed that the mutation of radial growth of *P. euphratica* along the profiles of Xinshajilike and Kanbaiwusitan occurred in 1993 and after 1998, respectively. And the radial growth of *P. euphratica* in this region had a lag to temperature. (2) From the time analysis, it was found that the temperature of June to

收稿日期: 2017-04-19; 修改稿收到日期: 2017-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(41461045); 新疆自治区青年科技创新人才培养工程(2013721032)

作者简介: 苟晓霞(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事干旱区水资源及恢复生态学研究。E-mail: gouxiaoxia1111@163.com

* 通信作者: 叶茂, 教授, 主要从事干旱区水资源及恢复生态学研究。E-mail: yemao1111@163.com

September had the greatest effect on the radial growth of *P. euphratica*. The temperature of June to September might be a limiting factor for the radial growth of *P. euphratica* in this area. (3) *P. euphratica* growth temperature in 13–33 °C, would greatly promote their growth. Although more than 33 °C, the temperature of *P. euphratica* growth promoting role, but had a tendency to decrease. Temperature too high or too low would inhibit the growth of *P. euphratica*.

Key words: *Populus euphratica*; tree rings; the climate change; Mann-Kendall mutation test; the middle reaches of the Tarim River

近年来随着全球气候变暖的加剧,区域气候变化趋势及其对全球气候变化响应研究成为了科学界关注的焦点^[1-2]。塔里木河流域地处亚欧大陆腹地,为世界上典型的内陆河流域,也是全球气候变化的敏感区域^[3]。随着中国“一带一路”战略实施,新疆成为了中国主要的经济枢纽之一。塔里木河作为新疆经济发展的重要水源,其气候变化趋势对新疆生态环境和经济发展具有重要意义。塔里木河荒漠河岸胡杨林对控制沙漠化、改善流域生态环境有重要的生态作用^[4]。研究表明,在极端干旱区的塔里木河流域,水热条件是控制胡杨生长的主要因子^[5-8]。然而在塔里木河河岸生长的胡杨林,地下水已经不是胡杨生长的限制因子。在全球气候变化背景下,气温变化是否对胡杨生长产生影响,胡杨生长对气温变化响应如何?因此,分析气温变化对胡杨径向生长量的影响,探讨胡杨生长对气候变化的响应,对区域天然植被的保护具有实践意义。

树木年轮具有很高的分辨率,连续性较好,样本分布范围最广,且定年准确,在中纬度干旱区得到广泛利用^[9-12]。关于气候变化与树轮关系研究主要集中在气候重建、树木年轮与 NDVI、树木年轮与地下水等之间的关系方面^[13-21]。本研究借鉴树木年轮学的方法,重点研究气温要素对树轮生长的影响,提出胡杨径向生长的适宜温度,为塔里木河中游的胡杨保护提供理论依据。

1 研究区概况

塔里木河中游是指从英巴扎至恰拉的流域,河道长 398 km^[22-23]。流入塔里木河干流河道的水量丰富,河水主要来自高山冰雪融水,水量年际变化较大,河岸水量充足^[22]。研究区位于塔克拉玛干沙漠北缘,降水稀少,蒸发十分强烈,多年平均降水量 550 mm 左右,蒸发量高达 1 125~1 600 mm,气候炎热干燥。图 1 是采样点以及气象站点的分布情况。该县 6 月降水最多,降水量在 140 mm 左右,平均气温高达 24 °C;7 月是气温最高的月份,平均温度超过了 25 °C,降水量 119 mm 左右,蒸发能力极

强。在极其恶劣的环境下,发育了大面积胡杨为主要建群种的荒漠河岸林植物群落^[6]。本试验以胡杨年轮为研究对象,选取的采样点在河道沿岸,新沙吉利克采样点距离河岸 82 m,坎白吾斯坦采样点距离河岸 151 m,河流能为胡杨生长供给充足的水源。

2 研究方法

2.1 胡杨年轮样本选取

2016 年 8 月在塔里木河中游的新沙吉利克断面和坎白吾斯坦断面,沿河道常有地表水的两岸附近进行采样。在断面随机地选取生长健康、长势良好的胡杨 15~20 棵,用生长锥按照“十字交叉”法,在每棵树上取 2 个样芯。将样芯保存在干净塑料管中,然后用干净的软木条填补钻出的孔洞。将采集好的树芯样本带回实验室进行处理。

2.2 年轮样本宽度测定

在实验室,将干燥后样放入样本槽(木质纤维必须垂直于样本槽),用白乳胶固定,放置在通风处 1~2 d,待胶彻底干燥,进行打磨,读取数据。在读数据的过程中,首先定年,从公元整十年开始,间隔时间同样为 10 年。除此之外,应详细记录一些偏窄轮、伪、缺、断轮,并做详细说明。利用 LINTABTM 6 型树木年轮测定仪器测量年轮宽度(精确度为 0.0001 mm),将树轮宽度值与年代以测量格式直接

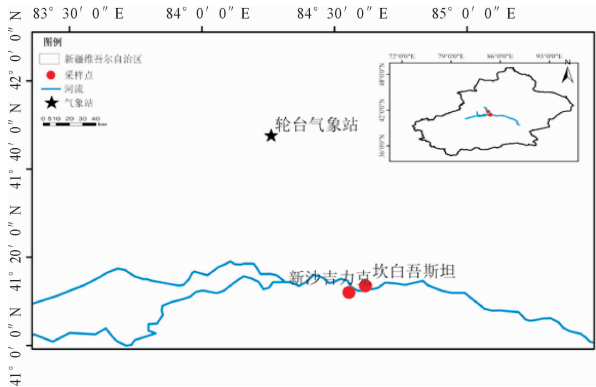


图 1 塔里木河中游树轮采样点及气象站点分布图

Fig. 1 Round of sampling points and the Tarim River middle reaches tree meteorological site map

导入计算机,即胡杨径向生长量。

2.3 气象数据选择

本研究气象数据来源于新疆维吾尔自治区轮台县气象站(84.25E,41.78 N,976.1 m)。研究区属于极端干旱气候,蒸发量大,降水量远远小于蒸发量。降水对于该地区胡杨生长意义不大。胡杨年轮采样点位于塔里木河中游河道近岸,胡杨生长所需水分充足。可以看出,胡杨年轮宽度变化可能与当地气温变化关系密切。基于此,选用1959~2014年的温度(月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温)数据分析胡杨生长与温度变化的关系。

2.4 年轮指数计算方法

树木年龄会影响年轮的宽窄,为了排除树龄对年轮生长的影响,本研究采用胡杨年轮指数进行分析,标准化处理径向生长量实测数据,通过数学方法求得新的年轮指数序列。求取年轮指数(Li),用年轮宽度序列实测读数(Wi)比从胡杨径向生长趋势曲线上读出的年轮宽度值(Yi),公式为:

$$Li = Wi/Yi \tag{1}$$

2.5 Mann-Kendall 突变检验方法

为了了解当年胡杨径向生长是否受到前几年温度的影响,用 Mann-Kendall 突变检验分别计算出胡杨径向生长、温度的突变年份。计算原理如下:

首先,对于时间序列 X(含有 n 个样本),构造一个秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \tag{2}$$

其中

$$r_i = \begin{cases} +1 & x_i > x_j \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \tag{3}$$

秩序列 S_k 是第 i 个时刻数值大于 j 个时刻时,数值个数的累加。

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{Var(s_k)}} \tag{4}$$

其中 $UF_k=0$, $E(s_k)$ 和 $Var(s_k)$ 分别是 S_k 的均值和方差,且 x_1, x_2, \dots, x_n , 互相独立时,它们具有相同连续分布,可以由下式推算出:

$$E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} \tag{5}$$

$$Var(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \tag{6}$$

式中, UF_k 为标准正态分布,它是按照时间序列 X 的顺序 (x_1, x_2, \dots, x_n) 计算出的统计量顺序,给定显著性水平 α ,查正太分布表,若 $UF_k > U_\alpha$,则表明序列存在明显的趋势变化。

再按照时间序列 X 的逆序 ($x_n, x_{n-1}, \dots, x_2, x_1$),重复上述过程,并且令 $UB_k = UF_k (k=n, n-1, \dots, 1)$, $UB_1=0$ 。

我们一般认为显著水平 $\alpha=0.05$,临界值 $U_{0.05}=1.96$ 。将 UB_k 和 UF_k 两个统计量序列曲线和 ± 1.96 两条直线绘制在一张图上。若 UB_k 和 UF_k 的值大于 0,则表示序列呈现上升趋势,小于 0 则表示呈下降趋势。当他们超过临界直线时,表明上升或下降趋势显著,超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域。如果 UB_k 和 UF_k 两条曲线出现交点,且交点在临界线之内,那么交点对应的时刻便是突变开始的时间。

2.6 相关分析

利用 SPSS 相关性分析方法,对胡杨年轮指数变化与平均温度、平均最高气温、平均最低气温 3 个指标做相关性分析,找到限制胡杨径向生长的因子。用函数分析计算不同月份胡杨径向生长量与气候组合要素之间的关系。

3 结果与分析

3.1 胡杨径向生长量变化和气温变化

图 2 显示,在新沙吉利克断面,1959~1977 年年轮宽度虽波状起伏,但整体呈现下降的趋势,于 1977 达到最小值(1.15 mm),1977 年以后呈增加趋势。坎白吾斯坦断面的树轮宽度变化趋势与新沙吉利克断面大致相同,1963~1979 年呈现下降的趋势,1979 年达到最小值为(1.227 mm);胡杨年轮宽度在

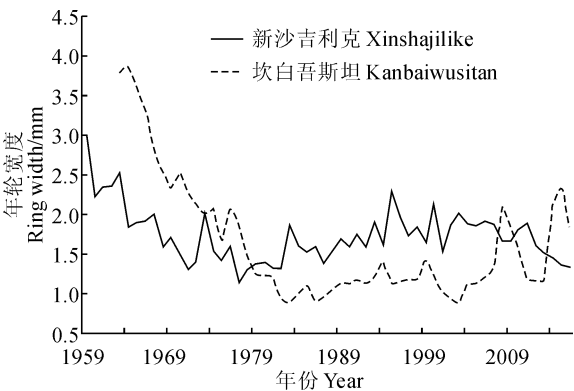


图 2 塔里木河中游典型断面胡杨年轮宽度变化趋势
Fig. 2 *P. euphratica* tree-ring width change trend of two sections in the middle reaches of Tarim River

1979 年以后逐渐增加,2006 年以后增加幅度明显。

从图 3 可以看出,两个断面胡杨年轮指数呈波动上升趋势。新沙吉利克断面的胡杨年轮指数在 2015 年最大(1.282),1977 年出现最小值(0.821)。坎白吾斯坦断面的胡杨年轮指数较新沙吉利克断面胡杨年轮指数上升更为明显,1977 年出现最小值(0.778),2015 年达到最大值(2.018)。

从研究区轮台气象站 1959~2014 年期间 56 年的年平均气温变化趋势(图 4),综合研究区年平均最高气温变化趋势拟合方程的显著性($P<0.05$),平均最高气温变化趋势拟合方程的显著性($P<0.01$)和平均最高气温变化趋势拟合方程的显著性($P<0.01$),可知研究区年平均气温、年平均最低气温和年平均最高气温变化均呈现显著增加趋势。其中,年平均最低气温增加的趋势较大,增加率为 $0.0753\text{ }^{\circ}\text{C/a}$;年平均气温增加 $0.038\text{ }^{\circ}\text{C/a}$;年平均

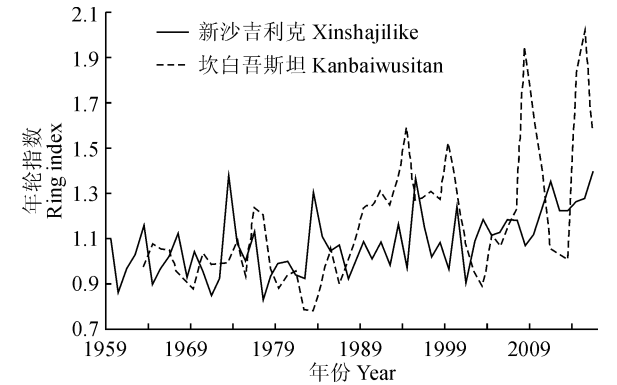


图 3 两个断面胡杨年轮指数变化趋势

Fig. 3 *P. euphratica* tree-ring index change trend of two sections

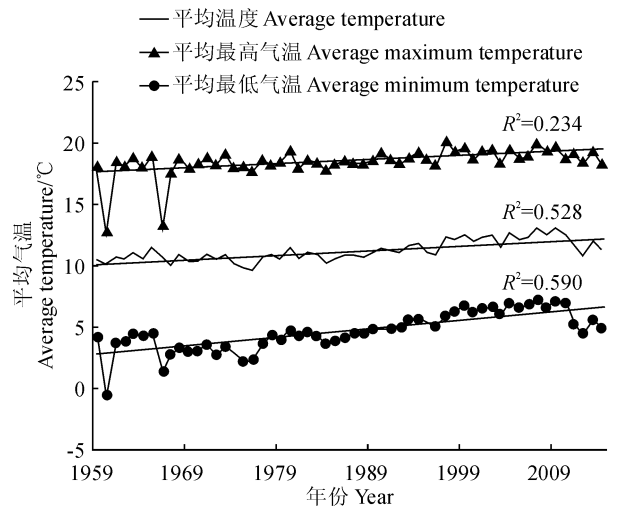


图 4 研究区轮台气象站年平均温度变化趋势

Fig. 4 Change trend of average annual temperature in meteorological station of Luntai

最高气温增加趋势最小为 $0.0374\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 。

综上所述,塔里木河河道沿岸两个典型断面胡杨年轮指数呈波动上升的趋势,年平均气温、年平均最高气温和年平均最低气温变化均呈现增加趋势。可以看出,研究区胡杨年轮变化趋势和年平均温度趋势具有明显的一致性。

3.2 胡杨径向生长量和气温变化的突变性分析

为了进一步了解温度变化和胡杨年轮变化特点,本研究采用 Mann-Kendall 突变检验法,分析年平均气温和胡杨年轮指数突变特征(图 5 和图 6)。从图 5 可以看出,当研究区年平均气温突变的临界值为 1.96 时,气温突变的置信水平为 95%。UF 曲线变化可以检验平均温度突变性。除个别年份以外,UF 值都大于 0;而且从 1992 年开始,UF 的值都大于临界值 1.96,温度呈现明显的上升趋势。观察 UF 和 UB 曲线的交点,发现交点位置在 1991 年,这表明轮台气象站的平均气温在 1991 年发生突变。

依据突变检验法绘制新沙吉利克断面和坎白吾斯坦断面的胡杨年轮突变图(图 6),从 UF 曲线分析可知,新沙吉利克断面胡杨径向生长量在个别年份呈增加趋势,多数年份 UF 的值小于 0,在 1968~1989 年期间,UF 的值小于 -1.96,呈现明显的减小趋势;UF 和 UB 的交点在 1993 年,因此在 1993 年胡杨年轮径向生长发生了突变。坎白吾斯坦断面自 1963 年以来,胡杨径向生长量呈现明显的下降趋势,下降趋势最明显发生在 1980 年,自此以后胡杨径向生长虽呈现下降趋势,但相对来说,下降趋势不明显,发生突变的时间可能在 1980 年以后,1998 年突变的统计值达到最大,因此突变发生在 1998 年以后可能性最大。以上分析可以看出,研究区两断面胡杨年轮发生突变时间均在年平均温度突变时间之

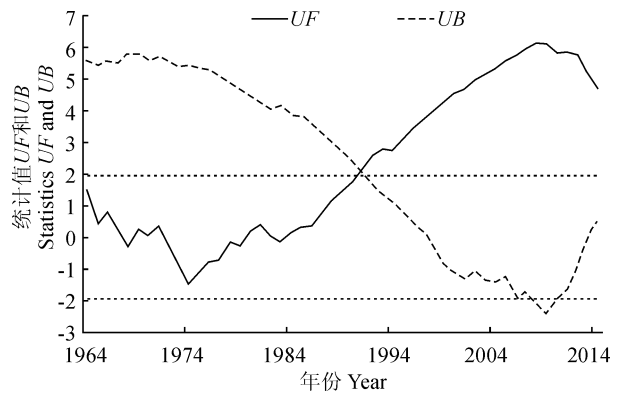


图 5 轮台气象站年平均温度突变检验

Fig. 5 Test average temperature mutations in meteorological station of Luntai

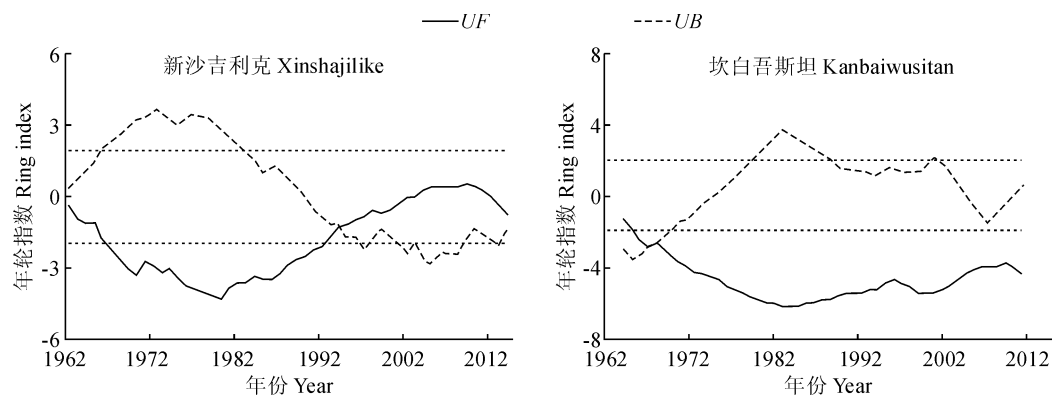


图6 塔里木河中游两个断面胡杨年轮指数突变分析

Fig. 6 The mutation of *P. euphratica* tree-ring index in the two sections of the middle reaches of Tarim River

后,说明研究区温度变化对胡杨年轮生长的影响具有“滞后效应”。年平均温度的变化可能影响下一年或者更长时间胡杨年轮的生长。

3.3 树木年轮指数与年平均气温相关性分析

表1显示,在坎白吾斯坦断面,采样点胡杨年轮指数与年平均温度、年平均最低温度均呈显著正相关关系($P<0.01$),说明年平均温度和年平均最低温度对胡杨径向生长有显著促进作用;胡杨年轮指数与年平均最高气温呈正相关关系,但不显著($P>0.05$)。在新沙吉利克断面,胡杨年轮指数与年平均最低气温呈显著的正相关关系($P<0.01$),说明年平均最低温度能使胡杨年轮生长量达到最大化;胡杨年轮指数与年平均温度和年平均最高气温均呈现正相关关系,但不显著($P>0.05$)。可见,两个断面胡杨的年轮指数均与年平均最低气温的正相关关系显著,年平均最低气温是显著影响两个断面胡杨年轮指数的共同因子。

3.4 树木年轮指数与月平均气温相关性分析

进一步分析研究区内不同月份的平均气温对胡杨年轮生长的影响,本研究将胡杨年轮指数与每月的平均温度进行相关性分析,相关系数超过显著性水平的月份和时段,确定为胡杨径向生长对气温变化响应的最佳时段。基于胡杨年轮生长对气温变化响应有“滞后效应”,因此本研究选择不同断面胡杨径向生长量与上年6月至次年12月的每个月气温数据进行相关性分析,分析结果如图7所示。

从图7,A可以看出,两个断面的胡杨年轮指数与6~12月的各月平均气温呈正相关。在新沙吉利克断面,胡杨年轮生长量与当年9月的平均气温相关性最高,均达到极显著水平($P<0.01$);与前一年6月、8月、9月、10月的平均气温相关性显著($P<0.05$),其中与前一年8月的相关性最高,相关系数

表1 塔里木河中游胡杨年轮指数与年平均气温的相关分析

Table 1 Correlative analysis of radial growth and annual temperature of *P. euphratica* in the middle reaches of the Tarim River

项目 Item	年平均气温 The annual average temperature	年平均最高气温 Annual average maximum temperature	年平均最低气温 Annual average minimum temperature
新沙吉利克 Xinshajilike	0.234	0.206	0.336 *
坎白吾斯坦 Kanbaiwusitan	0.476 **	0.267	0.473 **

注: * 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 的显著性水平

Note: * and ** represent correlative significance at 0.05 and 0.01 level, respectively

为 0.518。在坎白吾斯坦断面,胡杨年轮指数与当年6月、7月、9月的平均气温相关性极显著($P<0.01$);与前一年9月的相关系数最大(0.482)。对胡杨年轮指数与月平均最高气温的相关性分析可以看出(图7,B),两断面胡杨年轮生长量与6~9月的单月平均最高气温呈正相关。在新沙吉利克断面,胡杨年轮指数与当年7~9月的平均最高气温相关关系显著($P<0.05$),其中,与当年7月的平均最高气温相关性最高,相关系数为 0.425。在坎白吾斯坦断面,胡杨年轮指数与当年9月平均最高气温的相关性显著($P<0.05$),与当年6月和7月平均最高气温的相关性极显著($P<0.01$);胡杨年轮指数与前一年7月和9月的平均最高气温的相关性显著($P<0.05$)。对胡杨年轮指数与各月平均最低气温的相关性分析可以看出(图7,C),新沙吉利克断面的胡杨年轮指数与当年4月、5月的月平均最低气温相关性显著($P<0.05$),与当年7~10月各月的平均最低气温相关性极显著($P<0.01$),其中与当年9月的平均最低温度相关系数最高(0.453);与前一年6月和8月平均最低气温的相关性显著($P<$

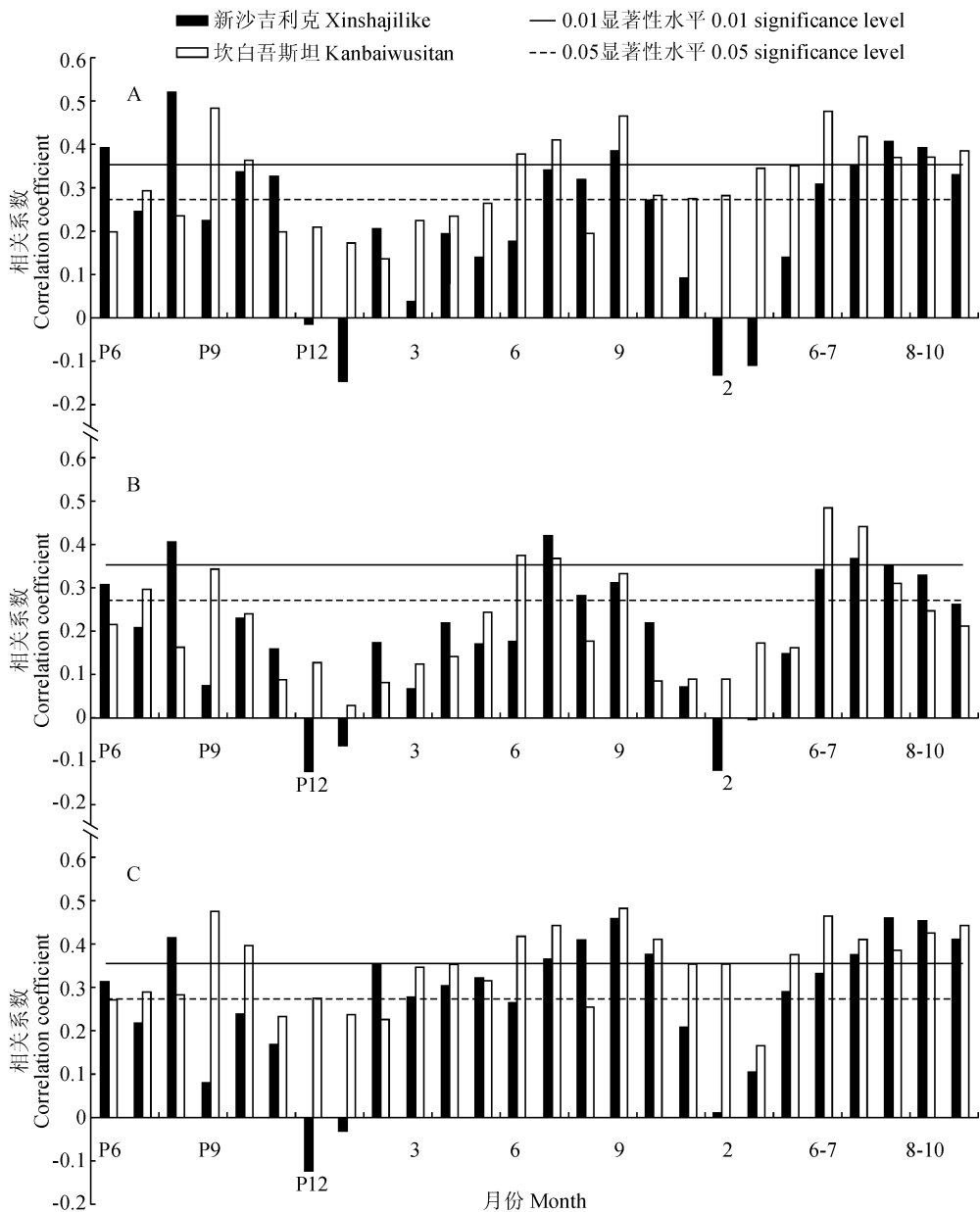


图7 胡杨年轮指数与月平均温度(A)、月平均最高温度(B)、月平均最低温度(C)的相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis between tree-ring index of *Populus euphratica* and average annual temperature(A), monthly average maximum temperature(B) and monthly average minimum temperature(C)

0.05),与前一年8月的相关系数最大达0.41。坎白吾斯丹断面胡杨年轮指数与当年每个月的平均最低温度呈正相关关系。其中,胡杨年轮指数与当年3~6月的各月最低平均气温相关性显著($P<0.05$),与当年6~11月各月最低平均气温相关性极显著($P<0.01$)。当年9月平均最低气温与胡杨年轮指数的相关性最高,相关系数为0.482;前一年6~10月平均最低气温与胡杨年轮指数的相关性显著($P<0.05$)。

各月温度可能对胡杨年轮生长产生综合影响,为了确保分析结果的可靠性和准确性,将不同月份

温度组合成不同时段,以便确定胡杨径向生长的最佳响应时段。从图7,A分析可知,在坎白吾斯丹断面,胡杨年轮指数与各月平均气温的相关性极显著的时段是6~7月、6~8月、8~9月、8~10月、8~11月($P<0.05$)。在新沙吉利克断面,胡杨年轮指数与6~8月、8~9月、8~10月这3个时段的相关系数最大,相关关系极显著($P<0.01$)。从图7,B分析可知,新沙吉利克断面胡杨年轮指数与平均最高气温相关关系最佳时段是6~8月、8~9月,坎白吾斯丹断面胡杨年轮指数与平均最高气温相关关系最佳时段是6~7和6~8月。图7,C结果表明,各

月平均最低气温对胡杨年轮指数的响应均为明显。在新沙吉利克断面,平均最低温度对胡杨年轮指数影响最强的时段是 6~8 月、8~9 月、8~10 月和 8~11 月这 4 个时段($P<0.05$)。坎白吾斯坦断面的胡杨年轮指数与这四个时段的月平均最低温度相关关系都很显著($P<0.05$),这可能由于在胡杨生长的温度范围内,较低温度更有利于胡杨的年轮生长。

通过以上分析可以看出,胡杨年轮生长与月平均温度相关最高的时间是当年 9 月,月平均温度是 19.56℃;与月平均最高气温相关性最好的时间是 7 月,平均最高气温为 32.9℃,相关系数相对较低的 9 月,月平均最高气温为 27.4℃;胡杨年轮生长与月平均最低温度相关性最好的时间为当年 9 月,此时的月平均最低温度为 12.32℃。综合以上分析可知促进胡杨年轮生长温度在 12.5~33℃。

4 讨 论

在干旱区水分充足条件下,温度是影响胡杨径向生长量的重要因素,它能影响到胡杨的、呼吸作用以及光合作用等,进而影响到胡杨的径向生长量^[24-25]。从胡杨生理学角度可以理解为,在这个温度范围内,冰雪快速融化,径流量增大,大量的河水转化为地下水,使地下水水位抬升,为胡杨生长提供了足够的水源。当水位过高时,较高的气温会增加蒸发能力,利于过湿土壤层水分的散失,增强了胡杨的光合作用和呼吸作用,利于胡杨的生长,所以在 12.5~33℃时,胡杨径向生长量随温度的增加而增加^[26]。33℃以上,温度虽对胡杨生长起促进作用,但是有减弱的趋势,据资料知,多种树木生长在温度达到 45℃以上会受到抑制^[13]。当温度过高时,胡杨体内的代谢过程和生物酶的活性受到影响,叶片气孔关闭,呼吸作用、光合作用等间接受到影响^[13,27]。植物的生态幅的最低标准因植物种类而异,一般植物在 0℃以上就可以进行光合作用,制造

有机物。温度过低,植物制造的有机物不足以补充呼吸作用消耗的有机物,可能造成物种死亡^[28]。

通过分析还发现胡杨径向生长不仅与本年度温度有关,而且和前一年同时期的温度呈现正相关,胡杨径向生长量与前一年 6~10 月气温相关性较高,其中相关性最好的月份是前一年 8 月。以上结果说明前一年的 6~10 月的温度影响到了当年的胡杨径向生长,这与李江风等得出的结论一致^[8]。从胡杨生理学的角度理解为,当前一年 6~10 月的水量充足,在胡杨生长的生态幅内,温度逐渐升高,水、无机盐以及有机物的运输速度加快,植物体内存储了足够的能量,当来年气候适宜时,植物细胞快速分裂,胡杨形成宽轮,因此得出了当年 6~10 月温度与胡杨径向生长量呈正相关的结论。

5 结 论

通过对塔里木河中游新沙吉利克断面和坎白吾斯坦断面的胡杨年轮生长的研究,利用数学方法去除因胡杨年龄等因素带来的影响,求出胡杨年轮指数,并分析胡杨年轮指数与轮台气象站气温的相关性,得出了以下结论:

(1)塔里木河中游的河流沿岸,胡杨径向生长变化与温度变化均呈现增加趋势。新沙吉利克、坎白吾斯坦断面胡杨径向生长量突变分别发生在 1993 年和 1998 年以后,且本地区的胡杨径向生长量对温度具有滞后性。

(2)从时段分析发现,当年 6~9 月的温度对胡杨径向生长量的促进作用最大,6~9 月的温度可能是该地区胡杨径向生长的限制性因子。

(3)当水量充足时,温度在 12.5~33℃时,会极大促进胡杨径向生长;33℃以上,温度虽对胡杨径向生长都起促进作用,但是有减弱的趋势。温度过高或过低会抑制胡杨的生长。

参考文献:

[1] 丁金梅,严军平. 近 50 年来陕甘宁山区气候变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(6):124-129.
DING J M, YAN J P. An analysis on characteristics of climate change in Shan-Gan-Ning region in recent 50 yeres[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(6): 124-129.

[2] 毛伟峰,樊 静,沈永平,等. 近 50 年来新疆区域与天山典型流域极端洪水变化特征及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土,

2012,(5):1 037-1 046.
MAO W F, FAN J, SHEN Y P, *et al.* Variations of extreme flood of the rivers in Xinjiang region and some typical watersheds from Tianshan Mountains and their response to climate change in recent 50 years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012,(5):1 037-1 046.

[3] 冯兆东,陈发虎,张虎才,等. 末次冰期——间冰期蒙古高原与黄土高原对全球变化的重要贡献[J]. 中国沙漠,2000,20(2): 171-177.
FENG Z D, CHEN F H, ZHANG H C, *et al.* Contribution to

global change of Mongolian plateau and Loess plateau in the last glacion and interglacial periods[J]. *Journal of Desert Research*, 2000, **20**(2): 171-177.

[4] 季 方,马英杰,樊自立. 塔里木河冲积平原胡杨林的土壤水分状况研究[J]. 植物生态学报, 2001, **25**(1): 17-21.
JI F, MA Y J, FAN Z L. Soil water regime in *Populus euphratica* forest on the Tarim river alluvial plain[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, **25**(1): 17-21.

[5] 张 芸,叶 茂. 塔里木河下游不同断面胡杨径向生长对地下水变化的敏感性研究[J]. 西北植物学报, 2016, **36**(4): 818-824.
ZHANG Y, YE M. Sensitivity analysis of *Populus euphratica* radial growth to groundwater changes in the different transects of the lower reaches of Tarim River[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia*, 2016, **36**(4): 818-824.

[6] 涂文霞,叶 茂,徐海量,等. 塔里木河不同河段胡杨径向生长及径流的影响差异[J]. 干旱区研究, 2014, **31**(3): 508-515.
TU W X, YE M, XU H L, *et al.* Radial growth of *Populus euphratica* and the effect of runoff in the Tarim River basin[J]. *Arid Zone Research*, 2014, **31**(3): 508-515.

[7] 叶 茂,徐海量,等. 不同胸径胡杨径向生长的合理生态水位研究[J]. 地理科学, 2011, **31**(2): 172-177.
YE M, XU H L, *et al.* Radial ecological groundwater level of *Populus euphratica* with different diameter in the lower reaches of Tarim River[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, **31**(2): 172-177.

[8] 李江风,袁玉江,由希尧. 树轮水文学的研究及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

[9] BRIFFA K R, JONES P D, *et al.* Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the past 600 years[J]. *Nature*, 1998, **93**, 450-455.

[10] PEDERSON N, HESSL A E, BAATAR BILEG N, *et al.* Pluvials, Droughts, the Mongol Empire, and Modern Mongolia[J]. *Proc Natl Acad Sci, USA*, 2014.

[11] BRITO-CASTILLOL, DIAZ-CASTRO S, *et al.* Reconstruction of long-term winter streamflow in the Gulf of California continental watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, **278**(1): 39-50.

[12] LOAICIGA H A, HASTION L, MICHAEL SEN J. Dendrohydrology and California continental watershed[J]. *Reviews of Geophysics*, 1993, **31**(2): 151-171.

[13] 秦 莉,尚华明,苏佳佳,等. 巴丹吉林沙漠西南缘胡杨径向生长对气候的响应[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, **10**(02): 77-81.
QIN L, SHANG H M, *et al.* Radial growth of *Populus euphratica* response to climate change at southwest edge of Badain Jaran desert[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2016, **10**(2): 77-81.

[14] 王亚军,陈发虎,勾晓华,等. 祁连山中部树木年轮宽度与气候因子的响应关系及气候重建[J]. 中国沙漠, 2001, (2): 135-140.
WANG Y J, CHEN F H, GOU X H, *et al.* Study on response relationship between tree-ring and climate factors and climate reconstruction in middle region of Qilianshan Mountains[J]. *Journal of Desert Research*, 2001, (2): 135-140.

[15] 康兴成,张其花, LISA J, 等. 青海都兰过去 2000 年来的气候重建及其变迁[J]. 地球科学进展, 2000, (2): 215-221.
KANG X C, ZHANG Q H, LISA J, *et al.* Reconstruction and variation of climate in Dulan region, Qinghai during last 2 000 year[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2000, (2): 215-221.

[16] 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, (18): 1-10.
ZHANG Y, YE M, WANG L L, *et al.* The difference anulyses of tree-ring growth of *Populus euphratica* in the head-streams and mainstreams area of Tarim River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, (18): 1-10.

[17] 王 敏. 塔里木河下游不同林龄胡杨径向生长与地下水关系初探[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.

[18] D. A. VROBLESKY, T. M. YANOSKY, 徐 淳. 树轮化学在证明历史上地下水水污染事件方面的应用[J]. 地质地球化学, 1992, (4): 33-39.
D. A. VROBLESKY, T. M. YANOSKY, XU T. Application of tree - ring chemistry in proving historical groundwater pollution events[J]. *Geology-geochemistry*, 1992, (4): 33-39.

[19] 柳凯茜. 不同气候背景下树轮宽度与 NDVI 的关系[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.

[20] 汪青春,时兴合,刘义花,等. 青海湖布哈河流域树轮宽度指数与 NDVI 植被指数的关系[J]. 冰川冻土, 2012, (6): 1 424-1 432.
WANG Q C, SHI X H, LIU Y H, *et al.* Relationship between tree ring indices and vegetation index(NDVI) in Buha River basin, Qinghai[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, (6): 1 424-1 432.

[21] 高卫东,袁玉江,张瑞波. 基于树木年轮的呼图壁河流域草地归一化植被指数重建[J]. 东北林业大学学报, 2012, (4): 26-30.
GAO W D, YUAN Y J, ZHANG R B. Reconstruction of normalized difference vegetation index of grassland in Hutobi River basin based on tree-ring[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2012, (4): 26-30.

[22] 宋郁东,樊自立,雷志栋,等. 中国塔里木河水资源与生态问题研究[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2000: 37-38.

[23] 陈亚宁,张小雷,等. 新疆塔里木河下游断流河道输水的生态效应分析[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2004, **34**(5): 475-482.
CHEN Y N, ZHANG X L, *et al.* Ecological effect of water conveyance in dried-up riverway in the lower reaches of Tarim River[J]. *Science in China: D Series*, 2004, **34**(5): 475-482.

[24] BHATTARCHARYY A, LAMARCH V C, TELEWSKI F W. Dendrochronological reconnaissance of the conifers of northwest Indian[J]. *Tree-ring Bulletin*, 1988, **48**: 21-30.

[25] BORGAONKAR H P, PANT G B, KUMAR K R. Tree-ring chronologies from western Himalya and their dendroclimatic potential[J]. *International Association of Wood Anatomists*, 1999, **20**: 295-309.

[26] 刘普幸,勾晓华,张齐兵,等. 国际树轮水文学进展[J]. 冰川冻土, 2004, **26**(6): 720-728.
LIU P X, GOU X H, ZHANG Q B, *et al.* Advances in dendrohydrology around the world[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, **26**(6): 720-728.

[27] OBERHUBER, W., M. STUMBÖCK, W. KOFLER. Climate-tree-growth relationships of Scots pine stands (*Pinus sylvestris* L.) exposed to soil dryness[J]. *Trees*, 1998, **13**: 19-27.

[28] 张其德. 温度对植物光合作用的影响[J]. 植物杂志, 1989, **3**: 28-30.
ZHANG Q D. Effects of temperature on plant photosynthesis[J]. *Journal of Plant*, 1989, **3**: 28-30.

(编辑: 潘新社)