

塔里木河中游胡杨径向生长对气温和径流量的响应

康利飞^{1,2}, 叶 茂^{1,2 *}

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

摘 要: 基于树木年轮学的理论与方法, 运用年代际均值、相关性分析和多元线性回归方法对塔里木河中游胡杨径向生长与气温和径流量的响应关系进行探究, 以明确胡杨的径向生长规律和对环境变化的响应特征, 并为胡杨林的保护和管理提供理论依据。结果表明: (1) 在 1983~2014 年期间, 塔里木河中游气温最高和径流量接近最小值的时期均出现在 2005~2009 年, 而这一时期胡杨年轮宽度也达到了最小值; 出现径流量最大的 2010~2014 年, 胡杨年轮宽度既出现了最大值, 也出现了较窄的年轮。(2) 沙子河口断面胡杨径向生长主要受到 4~9 月生长季径流量的影响, 上一年秋季的径流量也有一定滞后影响, 而气温影响不明显; 阿其克断面胡杨径向生长受到 1~3 月径流量的影响比较大, 当年 6 月和上一年 11 月的高温成为其径向生长的限制性因子。(3) 春季和夏季, 以及上一年秋季充足的径流量, 是沙子河口断面胡杨径向生长的最理想条件, 但在这 3 个季节有些月份径流量较小, 其余月份径流量充足的情况下, 依然有可能会形成宽轮, 但在这 3 个季节径流量均不充足的情况下, 就必然会形成窄轮; 阿其克断面胡杨径向生长的理想条件是在上一年秋末径流量小的情况下, 较低的气温更有利于来年胡杨径向生长。研究认为, 塔里木河中游胡杨径向生长对径流量呈正相关性响应, 在径流量偏小的情况下, 对气温呈负相关性响应, 并且二者都存在滞后响应。

关键词: 塔里木河中游; 胡杨; 年轮指数; 径流量; 气温

中图分类号: Q948.112⁺.3 **文献标志码:** A

Response of Radial Growth of *Populus euphratica* to Temperature and Runoff in the Middle Reaches of the Tarim River

KANG Lifei^{1,2}, YE Mao^{1,2 *}

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

Abstract: Based on the theory and method of dendrochronology, we studied the response relationship between the radial growth of *Populus euphratica* and the temperature and runoff in the middle reaches of Tarim River by means of interdecadal mean, correlation analysis and multiple linear regression, in order to understand the radial growth law of *P. euphratica* and its response to environmental change, and finally to provide a theoretical basis for the protection and management of *P. euphratica* forest. The results show that: (1) during the period from 1983 to 2014, the periods with the highest temperature and the lowest runoff in the middle reaches of the Tarim River occurred between 2005 and 2009, and the annual ring width

收稿日期: 2019-12-04; 修改稿收到日期: 2020-04-23

基金项目: NSFC-新疆联合基金项目(U1803245)

作者简介: 康利飞(1989—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事干旱区水文过程研究。E-mail: klf1112@163.com

* 通信作者: 叶 茂, 教授, 主要从事干旱区水文过程研究。E-mail: yemao1111@163.com

of *P. euphratica* reached the minimum during this period; From 2010 to 2014, the width of the annual rings of *P. euphratica* appeared to be the largest and narrower. (2) The radial growth of *P. euphratica* in the section of Shazihekou is mainly affected by the runoff in the growing season from April to September. The runoff in the previous year also has a certain lag effect, but the effect of temperature is not obvious. The radial growth of *P. euphratica* in the section of Aqike was greatly affected by the runoff from January to March. The high temperature in June of that year and November of the previous year became the limiting factor for its radial growth. (3) Sufficient runoff in spring and summer and the autumn of the previous year are the ideal conditions for the radial growth of *P. euphratica* in the section of Shazihekou. However, in some of these three seasons, the runoff is small and the rest is sufficient. It is still possible to form a wide tree-ring, but if the runoff in these three seasons is not sufficient, narrow tree-ring will inevitably be formed. The ideal condition for the radial growth of *P. euphratica* in Aqike section is that the lower temperature is more favorable for the radial growth of *P. euphratica* in the next year when the runoff at the end of autumn is small. The results show that the radial growth of *P. euphratica* in the middle reaches of Tarim River has a positive correlation response to runoff, a negative correlation response to temperature when runoff is small, and both of them have a lag response.

Key words: the middle reaches of the Tarim River; *Populus euphratica*; tree-ring index; runoff; air temperature

全球气候变化对人类生存环境和地球生态环境的影响,已成为世界关注的热点问题^[1]。气候变化直接作用于树木生理过程,进而影响树木的径向生长^[2]。树木年轮的宽窄变化反映了气候变化的信息^[3],而且树木年轮连续性强,分辨率高,并清晰地保留着自然干扰和人为干扰的痕迹,是可靠的年代及环境条件变化的信息源^[4]。

胡杨作为干旱区的重要植被,对气候的变化较为敏感^[5]。塔里木河流域分布着大片的原始胡杨林,但是由于人类活动以及气候的变化等原因,导致塔里木河流域生态环境受到威胁,对塔里木河流域的生态环境保护,尤其是胡杨林的保护迫在眉睫。近年来,一些学者已经通过对胡杨年轮的研究来了解胡杨的长势、生长量等健康状况,及其对生态恢复效应的反馈。其研究主要集中在胡杨径向生长对流域环境变化的指示意义,胡杨径向生长对地下水的敏感性,生态输水前后对胡杨树木年轮的影响等方面^[6-8],对于塔里木河中游胡杨径向生长与气温和地表径流量的响应研究较少。

本研究试图通过探讨塔里木河中游胡杨径向生长量与气温和地表径流量的关系,揭示胡杨适合生长的自然环境条件,为今后塔里木河流域胡杨的保护及其生态环境的保护提供科学依据。

1 研究区概况

塔里木河位于塔里木盆地内塔克拉玛干沙漠的北缘,是中国最长的内流河,全长 2 137 km。本研究区为塔里木河的中游河段,是指从英巴扎至恰拉

河段,河道长 398 km^[9]。该区域属于大陆性暖温带极端干旱气候,降水稀少,蒸发十分强烈,平均降水量在 17.4~42 mm 之间,而平均年蒸发量高达 2 500~3 000 mm^[10]。尽管在这样恶劣的环境条件下,但由于有径流和地下水的补给,在塔里木河两岸发育了大片的原始胡杨林。本文以胡杨年轮为研究对象,选取的采样点在塔里木河中游的沙子河口和阿其克,采样区的具体位置如图 1 所示。

2 研究方法

2.1 胡杨年轮样本选取和年轮宽度测定

在塔里木河中游,距河道近的沙子河口和距河道较远的阿其克 2 个采样点,随机选取生长健康、长势良好的胡杨 35 棵,其中沙子河口断面采集 15 棵,阿其克断面采集 20 棵,在每棵树的树高 1.3 m 处,用生长锥按照“十字交叉”法采集 2 个样芯,由于剔除了部分朽的样芯,最后共采集 62 个样芯(表 1)。将采集的样芯带回实验室晾干后,按照树木年轮处理的标准程序,对样本进行粘贴、固定、打磨等预处理。利用 LINTABTM 型树木年轮测定仪器(精度为 0.001 mm)测量年轮宽度,使用 TSAP 软件和 COFECHA 程序对胡杨年轮序列进行交叉定年及对其结果进行质量检验,并使用 ARSTAN 程序建立标准年表^[11-12]。

2.2 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局,径流量水文数据来源于乌斯满水文站,之所以选取这两个站点的原因是它们离采样点最近。

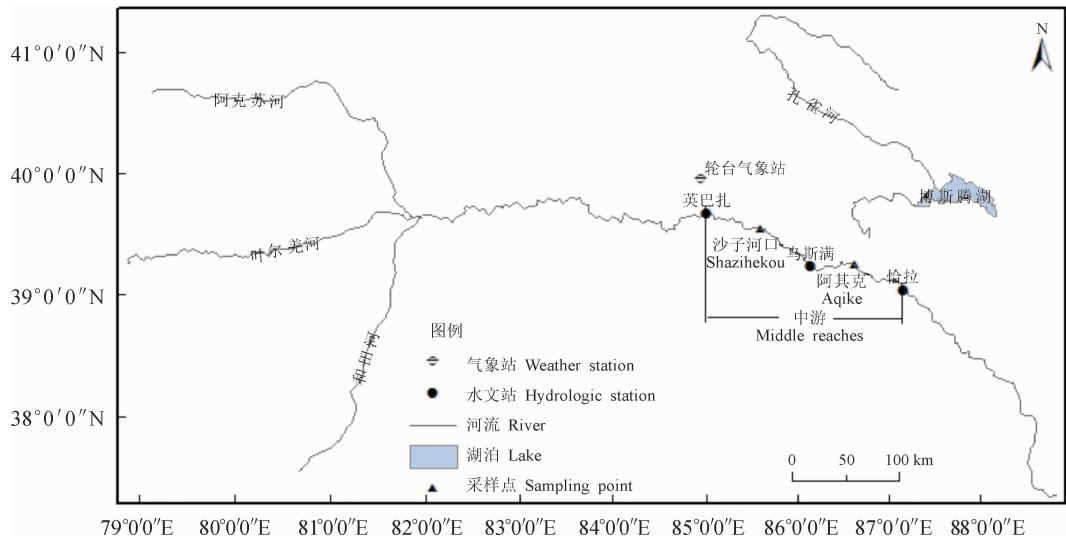


图1 塔里木河中游采样点及气象站和水文站点分布

Fig. 1 Distribution of sampling points and meteorological and hydrological stations in the midstream of the Tarim River

表1 采样点概况

Table 1 Description of sampling sites

样点 Site	样本量(树/样芯) Sample size (tree/radii)	平均树龄 Tree age/a	平均胸径 Avg DBH/cm	最大胸径 Max DBH/cm	最小胸径 Min DBH/cm
沙子河口 Shazihekou	15/25	30	17.38	26.98	7.56
阿其克 Aqike	20/37	28	15.16	21.94	8.49

由于本研究的两个采样点位于塔里木河中游河道沿岸附近,而且本研究区属于大陆性暖温带极干旱气候区,降水量稀少,蒸发量极大,所以影响胡杨径向生长的主要是径流量和气温,降水对胡杨径向生长的意义不大。为了分析胡杨径向生长量与气温、径流量的相关关系,选用轮台气象站 1982 年~2014 年的气温,乌斯满水文站 1982 年~2014 年的径流量数据。

2.3 基础数据处理

为了消除树龄对胡杨年轮宽度的影响,对年轮数据进行标准化处理。树木年轮数据标准化可以用比值方法,获得新的年轮指数序列。年轮指数(I_i)为每年实际生长值(W_i)与从生长趋势曲线上读出预测的年轮宽度值(Y_i)之比,公式为:

$$I_i = W_i / Y_i \tag{1}$$

以 5 年的跨度为单位,运用年代际均值分析法探究胡杨径向生长与径流量和气温的变化趋势。采用 SPSS 相关性分析胡杨径向生长与气温和径流量的相关性程度,观察影响胡杨径向生长的主要因子及其时间段。采用多元线性回归模型探究胡杨径向生长与环境因子的关系。

3 结果与分析

3.1 两个断面胡杨径向生长的变化与径流量和气温变化的关系

从研究区轮台气象站的年平均气温来看,1985~2014 年期间的年平均气温呈持续上升状态,在 2009 年后才开始有所下降;从研究区乌斯满站的塔里木河年径流量来看,1985~2014 年期间的径流量趋势是先下降,2000 年后开始波动上升,在 2011 年达到最大值。从 1985~2014 年期间,沙子河口和阿其克这两个不同断面的胡杨年轮宽度指数均呈先缓慢下降后上升的趋势,但是下降趋势不是特别明显,后期上升趋势比较明显。如图 2 所示,1985~2009 年,沙子河口断面胡杨年轮宽度指数呈波动缓慢下降趋势,2010 年开始呈明显上升趋势;1985~2007 年,阿其克断面胡杨年轮宽度指数呈波动下降趋势,2008 年开始呈明显上升趋势。

为便于进一步分析比较气温和径流量与胡杨年轮宽度指数之间变化趋势的关系,对气温、径流量和两个断面的胡杨年轮宽度指数以年代际为基本时间单位取其平均值制图。从 1985~2014 年,沙子河口

断面胡杨年轮宽度指数年代际均值最大的时期为 2010~2014 年(图 2),说明这段时期沙子河口断面胡杨年轮宽度最宽(1.367),年代际均值最小的时期为 2005~2009 年,说明这段时期沙子河口断面胡杨年轮宽度最窄(0.885),其次年代际均值比较小的时期还有 1995~1999 年;阿其克断面胡杨年轮宽度指数年代际均值最大的时期为 1990~1994 年,其最大值为 1.169,年代际均值最小的时期为 2005~2009 年,其最小值为 0.501。沙子河口断面不同年代际的极差较小,其变幅为 0.482,阿其克断面不同年代际的极差较大,其变幅为 0.668,说明阿其克断面胡杨径向生长对区域环境变化的响应要比沙子河口断面更大。从图中还可以看出,沙子河口和阿其克断面胡杨年轮宽度指数年代际均值的最小值均出现在 2005~2009 年。

从 1985~2014 年,乌斯满水文站的径流量年代际均值最大的时期为 2010~2014 年(图 2),说明这段时期径流量最大,年代际均值最小的时期为 1995~1999 年,说明这段时期径流量最小,其次年代际均值比较小的还有 2005~2009 年;研究区轮台气象站的气温年代际均值最大的时期为 2005~2009 年,说明这段时期气温最高,年代际均值最小的时期为 1985~1989 年,说明这段时期气温最低。

通过以上分析可以看出,在 2010~2014 年,径

流量年代际均值最大,同时,沙子河口断面胡杨年轮宽度指数年代际均值也最大,而阿其克断面胡杨年轮宽度指数年代际均值却较小,沙子河口和阿其克断面胡杨年轮宽度指数年代际均值最小值均出现在 2005~2009 年,同时,气温的年代际均值最大值也出现在此时期,径流量的年代际均值也接近最小值。这说明,气温最高的时期和径流量最小时期,是胡杨年轮宽度最窄的时期,径流量最大的时期,既有可能产生胡杨最宽年轮,也有可能产生较窄轮。

3.2 两个断面胡杨径向生长与气温和径流量的月相关性分析

基于胡杨径向生长对环境因子的变化具有一定的滞后效应,因此本研究选取上一年 10 月到当年 10 月的月平均气温和月径流量进行相关性分析,分析结果如图 3 所示。通过分析胡杨径向生长与单月环境因子的相关关系发现,沙子河口断面胡杨年轮指数与当年 5 月、8 月、9 月、上一年 11 月径流量呈显著正相关($P<0.05$),与当年 4 月、上一年 10 月径流量呈极显著正相关($P<0.01$),其中与当年 4 月的径流量相关性最大,相关系数为 0.516;沙子河口断面胡杨年轮指数与各月平均气温相关性微弱且多呈负相关,均未达到显著相关水平。阿其克断面胡杨年轮指数与当年 1 月、2 月、3 月径流量呈显著正相关($P<0.05$),其中与 3 月的径流量相关性最大,

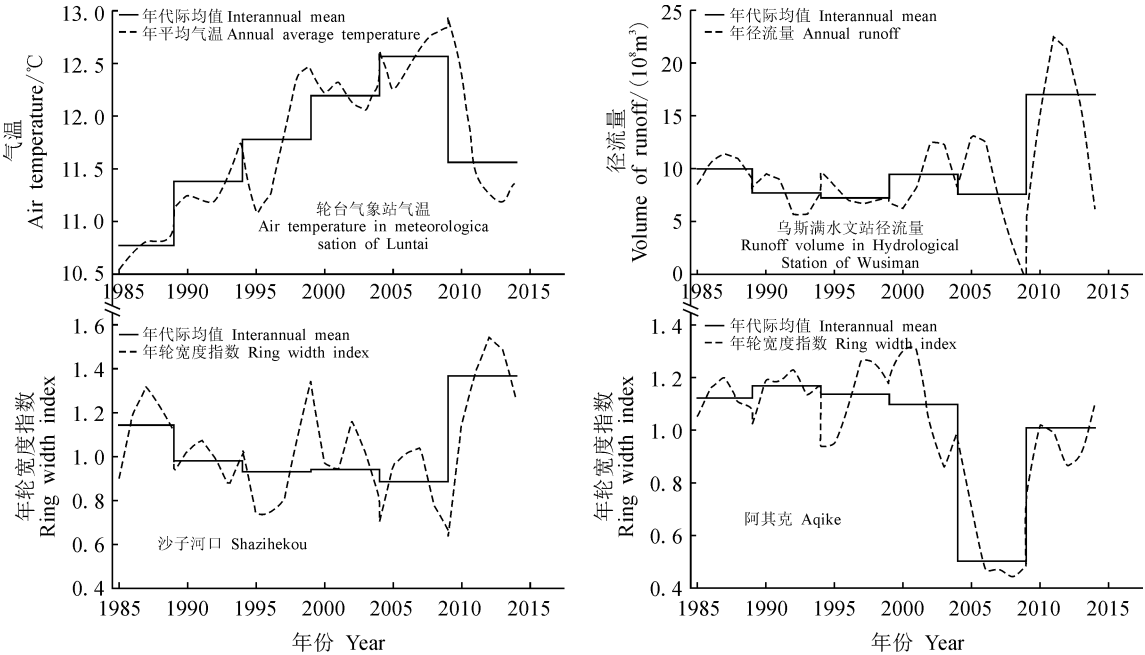


图 2 塔里木河中游气温和径流量以及两个断面胡杨年轮指数年代际均值及变化趋势

Fig. 2 Temperature and runoff in the middle reaches of the Tarim River and the interannual mean and trend of the ring width index of *P. euphratica*

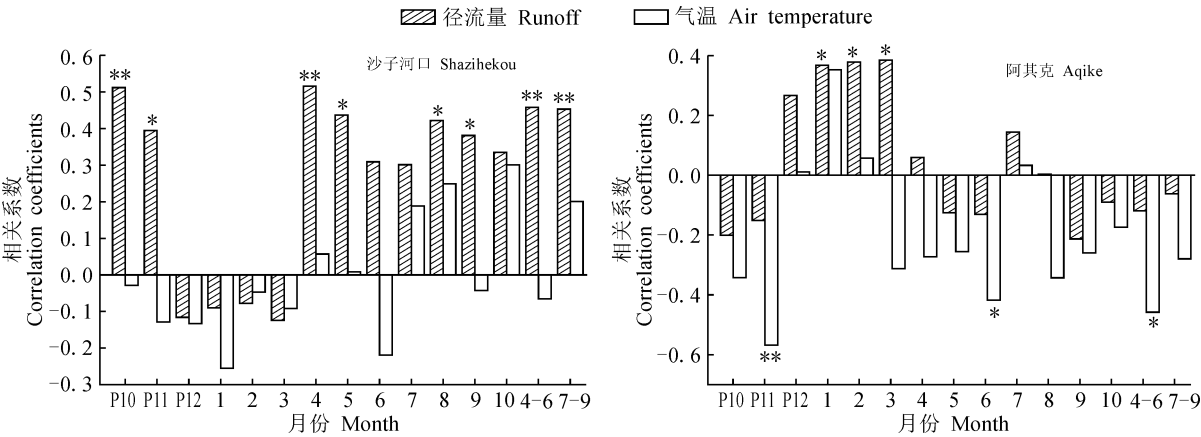


图3 塔里木河中游两个断面胡杨年轮指数与月径流量和月平均气温的相关性分析

P in the figure represents the previous year; *. $P<0.05$; **. $P<0.01$

Fig.3 Correlation analysis of tree-ring index and monthly runoff and monthly mean temperature of two sections of *P. euphratica* in the midstream of the Tarim River

相关系数为 0.385,阿其克断面胡杨年轮指数与当年 6 月平均气温呈显著负相关($P<0.05$),与上一年 11 月平均气温呈极显著负相关($P<0.01$)(图 3)。

考虑到胡杨径向生长可能受到各月平均气温和月径流量的综合影响,将环境因子进行了不同月份的组合,分析胡杨径向生长与环境因子不同月份组合之间的相关关系,结果显示,沙子河口断面胡杨年轮指数与 4~6 月和 7~9 月径流量均呈极显著正相关($P<0.01$),与 4~6 月和 7~9 月月平均气温的相关性未达到显著性水平;阿其克断面胡杨年轮指数与 4~6 月月平均气温呈显著负相关($P<0.05$)。

3.3 多元线性回归模型分析

在对胡杨径向生长与气温和径流量进行相关分析后,将气温和径流量因子做标准化处理,采用多元线性回归方法建立胡杨径向生长与气温和径流量之间的关系模型^[13],回归过程选用后退回归。由此得到沙子河口断面和阿其克断面胡杨径向生长与气温和径流量的关系模型,最优回归方程为:

$$I_{SZHK} = 0.619 + 0.61Q_4 + 0.077Q_8 + 0.3Q_{-10} - 0.864Q_{-11} \tag{2}$$

$$I_{AQK} = 1.277 - 0.11 T_{-11} \tag{3}$$

在以上模型中,方程(2)中的 I_{SZHK} 为沙子河口断面胡杨年轮宽度指数, Q_4 、 Q_8 、 Q_{-10} 、 Q_{-11} 分别表示当年 4 月、8 月、上一年 10 月和 11 月的径流量。决定系数 $R^2 = 0.501$,表明回归方程的拟合度较高,调整自由度后的解释方差为 $R^2 = 0.427$, $F = 6.769$,超过 0.01 的极显著水平,能较好模拟胡杨径向生长与径流量之间的关系^[14]。方程(3)中的 I_{AQK}

为阿其克断面胡杨年轮宽度指数, T_{-11} 表示上一年 11 月平均气温,决定系数 $R^2 = 0.323$,调整自由度后的解释方差 $R^2 = 0.299$, $F = 13.368$ 也超过了 0.01 的极显著水平,因此也能够较好模拟胡杨径向生长与气温之间的关系。

从线性回归分析的结果来看,沙子河口断面胡杨径向生长主要是受径流量因子的影响,气温的影响不显著,从而在多元线性回归模型中未体现出气温因子;从影响胡杨径向生长的径流量月份来看,其影响主要是上一年的秋季和当年的春季和夏季。而阿其克断面胡杨径向生长受上一年 11 月的平均气温影响最大,因而在多元线性回归模型中仅保留了上一年 11 月的平均气温。为进一步分析胡杨径向生长与径流量和气温的关系,本研究利用乌斯满水文站 1983~2014 年的径流量和轮台气象站 1984~2013 年的气温数据代入多元线性回归方程,模拟这 32 年的沙子河口断面胡杨年轮宽度指数和 30 年的阿其克断面胡杨年轮宽度指数,重建值与实测值的曲线对比见图 4。从图中可以看出,沙子河口和阿其克两个断面的胡杨年轮宽度指数的拟合曲线和实测曲线吻合度都比较高,具有相同的变化趋势和波动特征;两者相关系数,沙子河口断面胡杨的为 0.708($P<0.01$),阿其克断面胡杨的为 0.568($P<0.01$),二者的独立样本 t 检验结果,沙子河口和阿其克断面胡杨都为 $P=0.998$,表明实测值和重建值之间无显著差异,体现了较高的拟合程度^[15]。

基于模型能较好地模拟胡杨径向生长与径流量和气温之间的关系,我们提取了 1982~2014 年乌斯

满水文站 33 年水文资料中出现沙子河口断面胡杨极宽轮和极窄轮年份的 4 月、8 月以及上一年 10 月、11 月的径流量,同时分别计算了这四个月的 32 年平均值($0.156 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $3.399 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.323 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.101 \times 10^8 \text{ m}^3$);同样,我们也提取了 1984~2013 年轮台气象站 30 年气象资料中出现阿其克断面胡杨极宽轮和极窄轮年份的上一年 11 月份的月平均气温,同时计算了 11 月平均气温 30 年平均值($2.48 \text{ }^\circ\text{C}$)。根据图中出现的极宽年轮和极窄年轮年份建立各极端年份所对应月份的统计表(表 2 和表 3),以多年月径流量平均值和多年月平均气温的平均值为参照探究出现极宽年轮以及极窄年轮的径流量和气温条件,用以揭示影响胡杨径向生长的环境因子。

从表 2 中可以看出,促成沙子河口断面胡杨极

宽轮和极窄轮的环境因子是不同月份径流量的多寡组合。其中,促使沙子河口断面胡杨形成极宽轮的条件有两个:①当年 4 月、8 月、上一年 10 月和 11 月的径流量均大于多年平均值;②这 4 个月份虽有些月径流量低于多年平均值,但是其余月径流量大于平均值,这说明胡杨径向生长是多个月径流量共同作用的结果。促使沙子河口断面胡杨极窄年轮的条件是当年 4 月、8 月、上一年 10 月和 11 月的径流量均小于多年平均值。从表 3 中来看,促成阿其克断面胡杨形成极宽轮的条件是上一年 11 月平均气温低于多年平均值,而促成极窄轮的的条件是上一年 11 月平均气温均高于多年平均值。这就说明上一年 11 月份高于多年平均值的气温抑制了胡杨的径向生长。

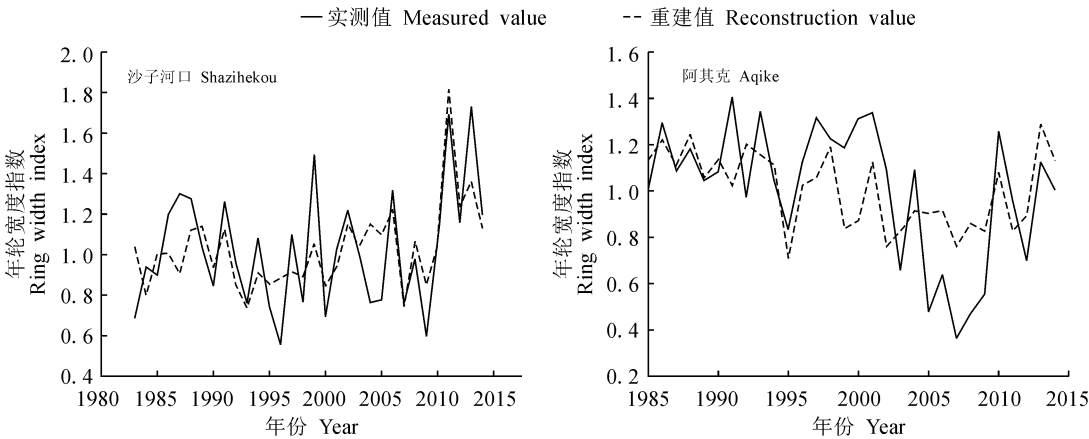


图 4 近 33a 来两个断面胡杨年轮宽度指数的重建

Fig. 4 Reconstruction of the two-section *P. euphratica* ring width index in recent 33a

表 2 特殊年份沙子河口月径流量的统计

Table 2 Statistics of monthly runoff of Shazihekou in special years

	年份 Year	主导环境因子 Dominant environmental factor			
		$Q_{-10}/10^8 \text{ m}^3$	$Q_{-11}/10^8 \text{ m}^3$	$Q_4/10^8 \text{ m}^3$	$Q_8/10^8 \text{ m}^3$
宽年轮 Wide tree-ring	1991	1.154	0.151	0.104	3.027
	1999	0.699	0.142	0.237	2.678
	2006	1.73	0.39	0.059	4.982
	2011	4.687	1.498	1.201	4.578
	2013	2.726	0.735	0.298	4.901
窄年轮 Narrow tree-ring	1996	0.415	0.111	0.036	2.759
	2000	0.546	0.181	0.00	2.866
	2009	0.771	0.016	0.00	0.129

注: Q_4 、 Q_8 、 Q_{-10} 、 Q_{-11} 分别表示当年 4 月、8 月、上一年 10 月和 11 月的径流量

Note: Q_4 , Q_8 , Q_{-10} , and Q_{-11} represent the runoff in April, August, and October and November of the previous year

表 3 特殊年份阿其克月平均气温的统计

Table 3 Statistics of the monthly average temperature of Aqike in special years

	年份 Year	主导环境因子 Dominant environmental factor	
		$T_{-11}/^\circ\text{C}$	$T_{\text{max}-11}/^\circ\text{C}$
宽年轮 Wide tree-ring	1991	2.3	10.2
	1993	1.1	8.8
	1997	2	9.2
	2001	1.4	7.9
	2010	1.8	7.5
窄年轮 Narrow tree-ring	2003	4.1	12.3
	2005	3.4	10.8
	2007	4.7	11.4

注: T_{-11} 表示上一年 11 月平均气温, $T_{\text{max}-11}$ 表示上一年 11 月平均最高气温

Note: T_{-11} represents the average temperature in November of the previous year, and $T_{\text{max}-11}$ represents the average maximum temperature of November of the previous year

4 讨 论

本研究中的研究区域为暖温带地区,且位于塔里木盆地内部,海拔在 800 m~900 m。从图 2 中可以看出,沙子河口断面的胡杨年轮宽度指数的年代际均值曲线与乌斯满水文站径流量的年代际均值曲线具有相同的变化趋势^[16]。在 2010~2014 年,径流量年代际均值最大时,沙子河口断面胡杨年轮宽度指数年代际均值也最大,而 2005~2009 年沙子河口断面胡杨年轮宽度指数年代际均值最小时,也是径流量年代际均值接近最小值的时期;同时,在这段时间也是阿其克断面胡杨年轮宽度指数年代际均值最小的时期,这说明塔里木河的径流量大时对应的胡杨的年轮宽度就有可能比较大,但是塔里木河径流量小时对应的胡杨年轮宽度就窄,因为胡杨生长的塔里木盆地,降水稀少,平均降水量在 17.4~42 mm 之间,而平均年蒸发量高达 2 500~3 000 mm,所以降水对胡杨的径向生长影响很小,主要是受塔里木河径流量和地下水的影响,塔里木河径流量的大小以及地下水的补给转化过程与胡杨径向生长有着密切的关系。其中,张芸在研究塔里木河源流和干流胡杨年轮生长的差异性中发现,塔里木河两源流干流各断面胡杨年轮生长的变化趋势与其径流变化趋势基本一致,这与本研究结论吻合^[17]。从两个断面的胡杨径向生长趋势差异来看,1985~2004 年塔里木河径流量起伏变化不大,所以沙子河口断面和阿其克断面的胡杨年轮指数曲线变化也相对比较平缓,2005~2010 年,径流量有个先急剧减小,再急剧增大的变化过程,对应的沙子河口断面和阿其克断面的胡杨年轮指数曲线也有同样的变化,但是沙子河口断面的胡杨年轮指数下降的幅度较小,而上升的幅度较大,这与沙子河口断面胡杨离河道近,地下水位较高,径流量的减小对其影响较小有关,之后随着径流量的急剧增大,沙子河口断面的胡杨年轮指数也急剧增大,二者具有很好的响应关系。而阿其克断面的胡杨年轮指数下降幅度要更大,这可能与阿其克距离河道比较远,地下水位较低,径流量的减小对其影响更有关,之后随着径流量的急剧增大,阿其克断面的胡杨年轮指数也有一个增大的过程,但也仅仅是恢复到减小之前的水平。

另外,本研究也发现,沙子河口和阿其克断面胡杨年轮宽度指数年代际均值最小时期,对应的是气温年代际均值最大时期和径流量年代际均值接近最小值时期,这就说明胡杨径向生长时,假如气温很

高,而径流量很小的话,就会抑制胡杨径向的生长,将产生窄的年轮。

胡杨的生长季为 4~9 月,在这期间气温高,在合适的径流量和地下水的情况下,有利于进行光合作用,制造有机物,促进胡杨径向的生长^[18]。沙子河口断面胡杨径向生长与 4~6 月和 7~9 月径流量呈极显著正相关,与这段时间气温上升比较快以及高温、蒸腾作用加剧和土壤水分蒸发增大,胡杨的生长需要大量的水,以避免出现干旱胁迫有关^[19]。阿其克断面胡杨径向生长与当年 1~3 月径流量呈显著正相关,这与胡杨的生长对径流量的反映存在一定的滞后效应有关,冬春季地表径流转化为地下水并被胡杨生长吸收可能存在一定的滞后,所以,冬季和初春的地表径流为生长季的胡杨提供充足的水分,更有利于胡杨径向的生长。这一结果与涂文霞、李霞等研究的胡杨径向生长与 1~2 月径流量正相关和认为春季输水对树木的恢复效果要优于其他时段输水的结果相吻合^[20-21]。此外,胡杨径向生长与径流量存在一定滞后还表现在沙子河口断面的胡杨径向生长与上一年的 11 月径流量存在显著正相关性,与上一年的 10 月径流量存在极显著正相关性,这是因为上一年 10 月和 11 月胡杨生长变缓慢,但是仍有较弱的生理活动,因此树体内就有可能储存足够的水分供来年生长所需。李江风等^[22]对胡杨树轮的研究表明,年径流量的信息往往可以反映在后 1~3a 的树轮指数中,本研究结果与这一结论相一致。沙子河口断面胡杨径向生长与气温相关性不显著,阿其克断面胡杨径向生长与 4~6 月平均气温呈显著负相关,与上一年 11 月平均气温呈极显著负相关,这可能与 4~6 月气温迅速升高,而径流量较小,气温过高引起蒸腾作用加剧和土壤水分蒸发增大,这样会造成胡杨生长季初期供水不足,从而导致胡杨光合作用能力降低,不利于胡杨径向的生长^[23-24]。而与上一年 11 月份气温负相关,可能与 11 月份的气温较高,尤其是平均最高温较高,而径流量接近全年最小值,这样胡杨的代谢作用就会增强,加速体内所存储的以供次年生长所需的营养物质的消耗,对胡杨的次年生长不利^[25-26]。

通过分析多元线性回归模型中径流量和气温与胡杨年轮宽窄的关系,我们发现 32a 中上一年的秋季,以及春夏季充足的径流量是沙子河口断面胡杨径向生长的理想条件,但是这 3 个季节的有些月份径流不是很充足,而其余月份径流量较充足的情况下,依然有可能会形成宽轮,比如 1991 年和 1999

年,这说明胡杨径向生长在径流量不充足,但是也不过于低的情况下,在之后生长季期间遇到充足径流量的时候依然可能会形成宽年轮。但在这 3 个季节径流量均不充足的情况下,就必然会形成窄轮。通过分析统计表中极宽年轮年份所对应月份的平均值,我们得出上一年 10 月、11 月和当年 4 月、8 月的最佳径流量分别为 $2.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.583 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.379 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $4.033 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

从 30a 中上一年 11 月份的平均气温来看,我们发现阿其克断面胡杨径向生长的理想条件是秋末较低的气温,而较高的气温会导致形成窄轮,从 11 月份的月平均最高气温也可以看出这一点,这说明在上一年 11 月径流量极低的情况下,较高的气温也会使处于微弱生理活动的胡杨消耗增加,不利于营养物质的积存,从而影响来年胡杨径向的生长^[27]。

5 结 论

(1)在 1983~2014 年期间,塔里木河中游气温最高和径流量接近最小值的时期均出现在 2005~

2009 年,而这一时期胡杨年轮宽度也达到了最小值;出现径流量最大的 2010~2014 年,胡杨年轮宽度既出现了最大值,也出现了较窄的年轮。这表明,气温最高时期和径流量最小时期,是胡杨年轮宽度最窄的时期,径流量最大时期,既有可能产生胡杨最宽年轮,也有可能会产生较窄轮。

(2)沙子河口断面胡杨径向生长主要受到 4~9 月生长季径流量的影响,上一年秋季的径流量也有一定滞后影响,气温影响不明显;阿其克断面胡杨径向生长受到 1~3 月径流量的影响比较大,当年 6 月和上一年 11 月的高温成为其生长的限制性因子。

(3)沙子河口断面胡杨径向生长最理想的条件是上一年的秋季,当年的春季和夏季充足的径流量,但是这 3 个季节的有些月份径流不充足,而其余月份径流量较充足的情况下,依然有可能会形成宽轮,但在这 3 个季节径流量均不充足的情况下,就必然会形成窄轮。阿其克断面胡杨径向生长的理想条件是在秋末径流量小的情况下,较低的气温更利于来年胡杨径向的生长,而较高的气温会导致形成窄轮。

参考文献:

[1] 王 叶,延晓冬. 全球气候变化对中国森林生态系统的影响[J]. 大气科学, 2006, **30**(5): 1 009-1 018.
WANG Y, YAN X D. The response of the forest ecosystem in China to global climate change[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, **30**(5): 1 009-1 018.

[2] 吴祥定. 树木年轮与气候变化[M]. 北京: 气象出版社, 1990.

[3] 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): 1 341-1 352.
LIU M, MAO Z J, LI Y, *et al.* Response of radial growth of *Pinus koraiensis* in broad-leaved Korean pine forests with different latitudes to climatical factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(5): 1 341-1 352.

[4] 温达志,旷远文,周国逸,等. 树木年轮分析在环境监测中的应用进展[J]. 广西科学, 2004, **11**(2): 134-142.
WEN D Z, KUANG Y W, ZHOU G Y, *et al.* Progress on the applications of dendroanalysis in environmental monitoring[J]. *Guangxi Sciences*, 2004, **11**(2): 134-142.

[5] 吐尔逊·哈斯木. 整治塔里木河上、中游用水结构,恢复和重建下游绿色走廊[J]. 新疆环境保护, 2004, **26**(2): 23-26.
TURSUN·KASIM. Improvement of the upstream and the midstream of Tarim River, recovery and reconstruction of the downstream of Tarim River[J]. *Environmental Protection of Xinjiang*, 2004, **26**(2): 23-26.

[6] 徐海量,邓晓雅,赵新风. 河道断流对胡杨(*Populus euphratica*)径向生长量的影响[J]. 中国沙漠, 2013, **33**(3): 731-736.

XU H L, DENG X Y, ZHAO X F. Comparison of tree-ring growth of *Populus euphratica* under long-term zero flow condition in the lower reaches of the Tarim River[J]. *Journal of Desert Research*, 2013, **33**(3): 731-736.

[7] 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): 7 576-7 584.
ZHOU H H, LI W H, LI Y P, *et al.* Estimation of ecological water demand of a desert riparian forest using tree rings of *Populus euphratica* in the Lower Tarim River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(22): 7 576-7 584.

[8] 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.
ZHAO S J, WEI Q, XU H L, *et al.* Response of the tree-ring to ecological environment change of the Tarim River[J]. *Journal of Desert Research*, 2017, **37**(3): 594-600.

[9] 宋郁东,樊自力,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.

[10] 刘晏良. 塔里木河中下游实地踏勘报告[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000: 16-17, 163-178.

[11] HOLMES R. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement[J]. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43: 69-75.

[12] COOK E R, HOLMES R L. Users manual for program ARSTAN[M]. Tucson: Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, 1986.

[13] 张文涛,江 源,董满宇,等. 芦芽山不同海拔北落叶松

- 径向生长与气候因子关系的研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2011, **47**(3): 304-309.
- ZHANG W T, JIANG Y, DONG M Y, *et al.* *Larix principis-rupprechtii's* radial growth-climate relationship at different elevations in Luya Mountains[J]. *Journal of Beijing Normal University* (Natural Science), 2011, **47**(3): 304-309.
- [14] 张同文, 袁玉江, 魏文寿, 等. 开都河中游地区雪岭云杉林上下限树轮宽度对比及其气候响应分析[J]. 干旱区地理, 2013, **36**(4): 680-690.
- ZHANG T W, YUAN Y J, WEI W S, *et al.* Contrastive analysis and climate response of tree-ring width of *Picea schrenkiana* at the upper and lower forest limits in the middle section of the Kaiduhe River watershed[J]. *Arid Land Geography*, 2013, **36**(4): 680-690.
- [15] 秦 进, 白红英, 翟丹平, 等. 秦岭东部牛背梁自然保护区巴山冷杉树轮宽度与气候因子的关系[J]. 冰川冻土, 2017, **39**(3): 540-548.
- QIN J, BAI H Y, ZHAI D P, *et al.* The relationship between *Abies fargesii* tree-ring width and climate factors at Niubeiliang Natural Reserve in eastern Qinling Mountains of China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, **39**(3): 540-548.
- [16] 王振锡, 潘存德, 石鑫鑫. 胡杨年轮记录的塔里木河下游 54 年来区域水环境历史变迁[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(3): 637-645.
- WANG Z X, PAN C D, SHI X X. Change of regional water environment of the lower reaches of Tarim River recorded in *Populus euphratica* tree ring width in the past 54 years[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, **19**(3): 637-645.
- [17] 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): 6 081-6 090.
- ZHANG Y, YE M, WANG L L, *et al.* The difference analyses of tree-ring growth of *Populus euphratica* in the head-streams and mainstreams area of Tarim River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(18): 6 081-6 090.
- [18] 张 贇, 尹定财, 孙 梅, 等. 滇西北石卡雪山 2 个针叶树种森林上限径向生长对温度和降水的响应[J]. 生态学报, 2018, **38**(7): 2 442-2 449.
- ZHANG Y, YIN D C, SUN M, *et al.* Radial growth response of two conifers to temperature and precipitation at upper forest limits in Shika Snow Mountain, Northwestern Yunnan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(7): 2 442-2 449.
- [19] 张卫国, 肖德荣, 田 昆, 等. 玉龙雪山 3 个针叶树种在海拔上限的径向生长及气候响应[J]. 生态学报, 2017, **37**(11): 3 796-3 804.
- ZHANG W G, XIAO D R, TIAN K, *et al.* Response of radial growth of three conifer species to climate at their respective upper distributional limits on Yulong Snow Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(11): 3 796-3 804.
- [20] 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.
- [21] 李 霞, 侯 平, 杨鹏年. 塔里木河下游胡杨对水分条件变化的响应[J]. 干旱区研究, 2006, **23**(1): 26-31.
- LI X, HOU P, YANG P N. Analysis on the respond of the tree-rings of *Populus euphratica* to the change of moisture conditions in the lower reaches of the Tarim River[J]. *Arid Zone Research*, 2006, **23**(1): 26-31.
- [22] 李江凤. 树木年轮水文学研究与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-227.
- [23] 王 婷, 于 丹, 李江凤, 等. 树木年轮宽度与气候变化关系研究进展[J]. 植物生态学报, 2003, **27**(1): 23-33.
- WANG T, YU DAN, LI J F, *et al.* Advances in research on the relationship between climatic change and tree-ring width[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, **27**(1): 23-33.
- [24] 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.
- DONG Z P, ZHENG H Z, FANG K Y, *et al.* Responses of tree-ring width of *Pinus massiniana* to climate change in Sanming, Fujian Province[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2014, **9**(1): 1-7.
- [25] 张 贇, 尹定财, 田 昆, 等. 玉龙雪山东坡不同海拔长苞冷杉径向生长与气候因子的关系[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(7): 2 355-2 361.
- ZHANG Y, YIN D C, TIAN K, *et al.* Relationship between radial growth of *Abies georgei* and climate factors at different altitudes on the eastern slope of Yulong Snow Mountain, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(7): 2 355-2 361.
- [26] 赵敏丽, 刘普幸, 朱小娟, 等. 黑河下游绿洲胡杨物候期对 1960~2010 年气温变暖的响应[J]. 西北植物学报, 2012, **32**(10): 2 108-2 115.
- ZHAO M L, LIU P X, ZHU X J, *et al.* Respond of *Populus euphratica* Oliv. phenology to climate warming in the oasis of lower reaches of Heihe River from 1960 to 2010[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, **32**(10): 2 108-2 115.
- [27] SZEICZ J M, MACDONALD G M. A 930-year ring-width chronology from moisture-sensitive white spruce (*Picea glauca* Moench) in northwestern Canada[J]. *The Holocene*, 1996, **6**(3): 345-351.
- [28] 吴祥定, 邵雪梅. 采用树轮宽度资料分析气候变化对树木生长量影响的尝试[J]. 地理学报, 1996, **51**(S1): 92-101.
- WU X D, SHAO X M. A preliminary study on impact of climate change on tree growth using tree ring-width data[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, **51**(S1): 92-101.

(编辑:潘新社)