

DOI: 10.5846/stxb201606271264

张芸, 叶茂, 汪亮亮, 王敬哲. 塔里木河源流和干流胡杨年轮生长的差异性. 生态学报, 2017, 37(18): 6081-6090.

Zhang Y, Ye M, Wang L L, Wang J Z. The difference analyses of tree-ring growth of *Populus euphratica* in the headstreams and mainstreams area of Tarim River. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 6081-6090.

塔里木河源流和干流胡杨年轮生长的差异性

张 芸^{1,2}, 叶 茂^{1,2,*}, 汪亮亮^{1,2}, 王敬哲^{3,4}

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

3 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

4 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

摘要:借助树木年轮学的方法和技术手段,通过对阿克苏河、叶尔羌河和塔里木河干流不同河段胡杨年轮样本采集,分析了塔里木河两源流与干流不同河段胡杨年轮生长特征;采用单因素方差分析方法和 Kendall 协同系数(W)研究了塔里木河两源流和干流不同河段胡杨年轮指数的差异性;利用突变检验和小波分析方法探讨了塔河两源流、塔河干流不同河段胡杨径向生长的周期和突变性。研究结果表明:(1)1980—2010 年期间,塔里木河两源流和干流不同河段年轮宽度和年轮指数均呈下降趋势。在阿克苏河、肖夹克、沙子河口 3 个断面胡杨年轮宽度和年轮指数下降趋势明显,而叶尔羌河和新渠满断面的胡杨年轮宽度和年轮指数下降趋势不明显。(2)塔里木河两源流和干流不同河段的胡杨年轮生长在空间上不具有一致性($W < 0.5$),阿克苏河断面与肖夹克、沙子河口断面,叶尔羌河与肖夹克、沙子河口断面,肖夹克与新渠满断面,新渠满与沙子河口断面之间胡杨年轮指数均具有显著的差异性($P < 0.05$)。(3)塔里木河两源流胡杨年轮指数的突变时间与河道径流量突变时间相同或者滞后,这可能与地表水转化为地下水过程有关。(4)塔里木河两源流和干流不同河段的胡杨年轮指数变化的周期均小于其地表径流变化的周期,这可能与胡杨自身的生理特点和当地气温、水分对胡杨生长综合影响有关。本研究有助于深入了解干旱区内陆河流域胡杨生长特征变化规律,同时可为该流域胡杨资源生态保育提供参考。

关键词:年轮指数;胡杨;突变检验;小波分析;塔里木河流域

The difference analyses of tree-ring growth of *Populus euphratica* in the headstreams and mainstreams area of Tarim River

ZHANG Yun^{1,2}, YE Mao^{1,2,*}, WANG Liangliang^{1,2}, WANG Jingzhe^{3,4}

1 College of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China

2 Key Laboratory of Lake Environment and Resource in Arid Zone, Urumqi 830054, China

3 College of Resource and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

4 Key Laboratory of Oasis Ecology under Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

Abstract: Based on the method and technique of dendrochronology, the tree-ring samples of *Populus euphratica* were collected in the Aksu River, Yarland River and the different sections of Tarim River. Tree-ring growth change characteristics of *Populus euphratica* were analyzed in the two headstreams and the different sections of mainstream of Tarim River. The single factor variance analysis method and Kendall W were applied to study the differences of annual ring index in the two headstreams and the different sections of the Tarim River. The periodicity and mutation variation of *Populus euphratica* in different sections of Tarim River were analyzed by methods of mutation testing and wavelet analysis. The results show that:

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

收稿日期:2016-06-27; **网络出版日期:**2017-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yemao1111@163.com

(1) The tree-ring width and the tree-ring index of the two headstreams of the Tarim River were decreased between 1980 and 2010. The tree-ring width and tree-ring index of *Populus euphratica* have obvious declining trend in the Aksu River, Xiaojiake and Shazihekou, while the trend of tree-ring width and tree-ring index of *Populus euphratica* in the Yar land and XinQuman is not obvious. (2) The tree-ring index of *Populus euphratica* was not consistent ($W < 0.5$) in different sections of the two headstreams and the upstream and middle reaches of Tarim River. There were significant differences of tree-ring index between Aksu River and Xiaojiake, Shazihekou; Yarland and Xiaojiake, Shazihekou; Xiaojiake and Xinquman, Xinquman, Shazihekou ($P < 0.05$). (3) The mutation time of tree-ring index of *Populus euphratica* in the two headstreams had the same or lagged behind the mutation time of the mainstream's river runoff, which may be related to the duration of river runoff converting to groundwater. (4) The variation period of *Populus euphratica*'s tree-ring index in the two headstreams and different section of mainstream of the Tarim River is faster than that in their surface runoff, which may be related to the physiological characteristics of *Populus euphratica* and the local temperature and moisture effect on *Populus euphratica*. These results can provide reference for deeply understanding the growth change trend and irrationally protecting of *Populus euphratica* forest in extreme arid area.

Key Words: tree-ring index; *Populus euphratica*; mutation test; wavelet analysis; Tarim River Basin

树木年轮具有连续性强、区域广、容易获取、与环境要素相关度高的等特点,其宽度变化序列中蕴藏了丰富的水文条件变化信息,因此在反映水资源条件变化方面具有独特优势和不可替代作用^[1-3]。国外学者利用树木年轮重建径流、极端水文事件和其它气候要素等做了许多工作^[4-7]。国内学者在西北、东北、青藏高原、黄土高原等地区利用树轮重建区域气候、河流径流量、径流深度、洪水、湖泊水位等水文事件^[8-11]。可以看出,国内外关于树木年轮水文学研究集中在利用树轮延长水文记录和重建水文气候变化方面,对于分析树木生长区域水文环境变化具有重要的意义。

塔里木河是中国干旱区最大的内陆河,其鲜明的地域特色、极端脆弱的生态系统和突出的生态问题闻名于世。不合理的水资源配置和利用是造成塔里木河生态问题日益严重的核心。因此,近几十年来塔里木河荒漠河岸林的生长和保护及其与水分关系一直备受国内外学者高度关注^[12]。许多学者研究塔里木河流域胡杨林种群结构、空间分布格局及生理生态变化^[13-17],从树木年轮的角度研究塔里木河源流与干流上、中游胡杨生长差异较少。因此,本文利用树木年轮的方法和手段,采用距平分析、突变检验、小波分析等方法分析塔里木河主要源流阿克苏河和叶尔羌河以及塔里木河上、中游胡杨年轮生长特点和变化趋势,研究塔里木河两源流与干流之间胡杨年轮生长的差异性,探讨不同源流和干流不同河段胡杨年轮生长差异性原因,可为胡杨林的保护和科学管理,维持流域生态系统的平衡和稳定提供理论依据和科学参考。

1 研究地区概况与研究方法

1.1 研究区概况

塔里木河流域地处亚欧大陆腹地,远离海洋,属于温带大陆性气候。历史上,曾有九条河流注入塔里木河干流。受不合理人类活动的影响,目前只有阿克苏河、叶尔羌河、和田河及开都-孔雀河水流进塔里木河,其他河流已经断流,形成塔里木河流域水资源“四源一干”的格局^[18-19]。塔里木河干流上有阿拉尔、新渠满、英巴扎、乌斯满、恰拉等水文观测站,其中阿拉尔至英巴扎为塔河干流上游,全长 495km,河道水量稳定,且河漫滩宽阔;英巴扎至恰拉为中游段,河段约长 398km(图 1)。在极端干旱气候控制下,该区主要植物有荒漠河岸林胡杨(*Populus euphratica* Oliv.), 怪柳(*Tamarix* Spp.)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum* Murr.)、花花柴(*Karelinia caspica* Less.)、芦苇(*Phragmites communis* Trin.ex Steud.)等^[18-20]。

1.2 研究方法

(1) 树木年轮取样和数据获取

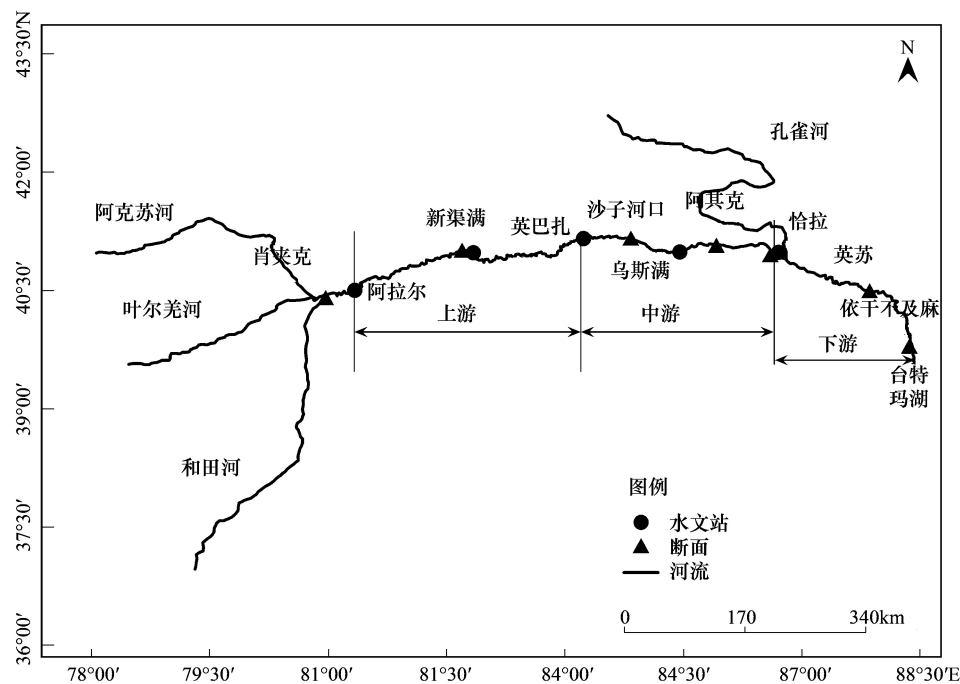


图 1 塔里木河水文站和采样点示意图

Fig.1 Map of hydrological stations and sampling sites in the Tarim River

本文选择了两个源流区阿克苏河下游断面、叶尔羌河中下游断面,以及塔里木河干流 3 个不同河段:肖夹克、新渠满和沙子河口断面。在每个断面离河道 200—300m 处作为胡杨年轮的取样地(表 1)。在每个样地内分别选取长势良好、无病虫害的胡杨 20—40 棵,在每棵树的树高 1.3m 处钻取样芯 2 个,将采集的胡杨样芯编号后带回实验室进行晾干、粘贴、固定、打磨等处理,然后对其交叉定年。利用 LINTAB^{TM6} 型树木年轮测定仪(德国制造,精度 0.001mm)测定胡杨年轮宽度,通过 COFECHA 软件来实现对胡杨径向生长量的订正,运用交叉定年法来控制其质量,准确交叉定年。标准年表的建立用 ARSTAN 程序完成^[21-22]。

表 1 塔里木河两源流和干流胡杨年轮采样点基本信息

Table 1 Basic information of tree-ring sampling of *Populus euphratica* in the headstreams and mainstream of Tarim river

河段 Section	阿克苏河	叶尔羌河	肖夹克	新渠满	沙子河口
树芯 Tree core (tree)	20	20	30	40	35
平均树高 Tree height/m	13.5	17.08	18.10	15.91	13.90
平均冠幅 Canopy /m ²	48.161	55.32	59.39	35.42	41.15
平均胸径 DBH/cm	40.51	41.12	37.07	35.71	36.22
平均树龄 Tree age/a	34	34	30	32	27

(2) 胡杨年轮数据标准化处理

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)的求取,每年实际生长值,即原年轮宽度序列实测读数(W_i),比上从生长趋势曲线上读出预测的年轮宽度值(Y_i),公式为: $I_i = W_i / Y_i$

式中, $i=1,2,\dots,n$ 所得 I_i ,是年轮指数序列。这种序列消除了年龄对树木生长影响,突出环境限制因子作用,便于对比分析年轮生长与环境限制因子之间的关系。序列总平均值为 1.0,最小值大于 0,一般在 1.0 左右,需要根据实际情况进行修匀。

(3) 基础数据处理方法

采用单因素方差分析方法(ANOVA)处理不同样点胡杨年轮生长差异性;采用多变量 Kendall 协同系数检

验塔河两源流和干流不同河段胡杨年轮生长之间是否有一致性;采用 M-K 突变检验方法分析不同区域胡杨年轮生长趋势突变性;采用 Morlet 小波方法分析胡杨年轮生长的周期。

2 结果与分析

2.1 塔里木河两源流和干流胡杨年轮生长变化特征

在 1980—2010 年期间,塔里木河两源流和干流不同河段年轮宽度均呈下降趋势,如图 2 所示。1980—1997 年,阿克苏河、肖夹克、沙子河口 3 个断面胡杨年轮宽度呈大幅下降趋势,1997 年之后 3 个断面胡杨年轮宽度趋于平缓。而叶尔羌河和新渠满断面的胡杨年轮宽度变化趋势不明显。

胡杨年轮指数变化趋势和年轮宽度变化趋势基本一致。从图 3 年轮指数变化趋势看,在 1980—2010 年期间,阿克苏河、夹克和沙子河口胡杨年轮指数呈明显下降趋势。而叶尔羌河和新渠满断面的胡杨年轮指数也呈现下降趋势,但下降趋势不明显。

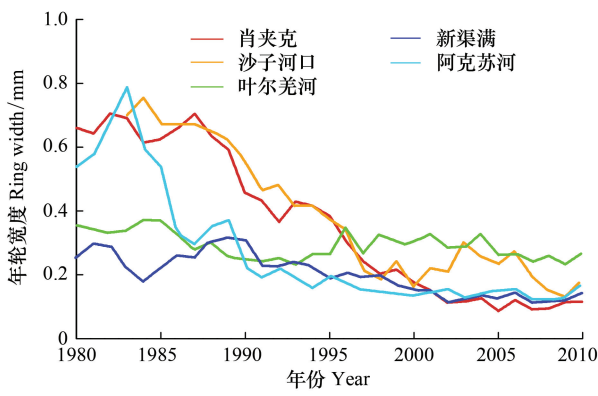


图 2 1980—2010 塔里木河胡杨年轮宽度变化特点
Fig. 2 Tree-ring width change of *Populus euphratica* in the Tarim River between 1980 and 2010

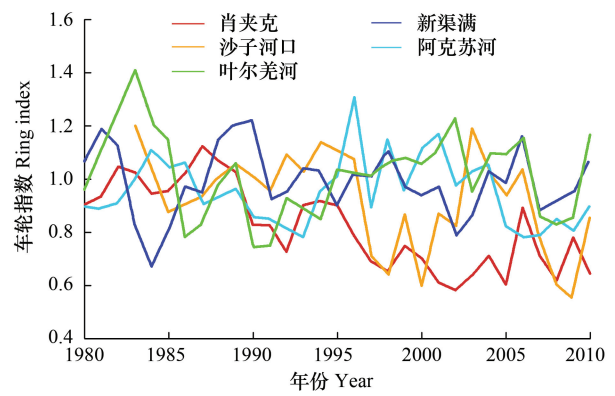


图 3 1980—2010 塔里木河胡杨年轮指数变化特点
Fig. 3 Tree-ring index change of *Populus euphratica* in the Tarim River between 1980 and 2010

分别将两源流和干流各河段胡杨年轮指数进行距平分析,如图 4 所示。两源流在 1983—1985 年和 1998—2002 年间高于平均值;在 1990—1994 年和 2007—2009 年间低于平均值。干流间各河段均在 1988—1990 年和 1993—1994 年及 2006 年高于平均值;在 1999 年—2002 年和 2007—2009 年间低于平均值。这说明两源流与干流各河段胡杨年轮指数在这期间具有相同的生长态势。

2.2 塔里木河两源流与干流不同河段胡杨年轮生长一致性和差异性分析

为验证塔里木河两源流与干流各个断面之间胡杨年轮指数是否具有-致性,分别对塔河各断面胡杨年轮指数进行一致性检验(表 2)。一致性检验结果表明:各个断面胡杨年轮指数的 KendallW 值不显著,说明阿克苏河和叶尔羌河中下游与塔河干流不同断面的胡杨年轮生长变化不具有一致性。

表 2 塔里木河不同河段胡杨年轮指数一致性检验

Table 2 Consistency test of tree-ring index of *P. euphratica* in the each section of the Tarim River

不同断面 Sections		Kendall W	卡方 F	渐进显著性 P
阿克苏河	叶尔羌河	0.084	2.613	0.106
	肖夹克	0.301	9.323	0.002
	新渠满	0.009	0.29	0.590
	沙子河口	0.033	0.926	0.336
叶尔羌河	肖夹克	0.176	5.452	0.02
	新渠满	0.051	1.581	0.209
	沙子河口	0.005	0.143	0.705
肖夹克	新渠满	0.459	14.226	0.000
	沙子河口	0.184	5.143	0.023
新渠满	沙子河口	0.046	1.286	0.257

为了进一步验证各河段之间胡杨年轮指数变化是否具有差异性,分别将各个断面的年轮指数进行单因素

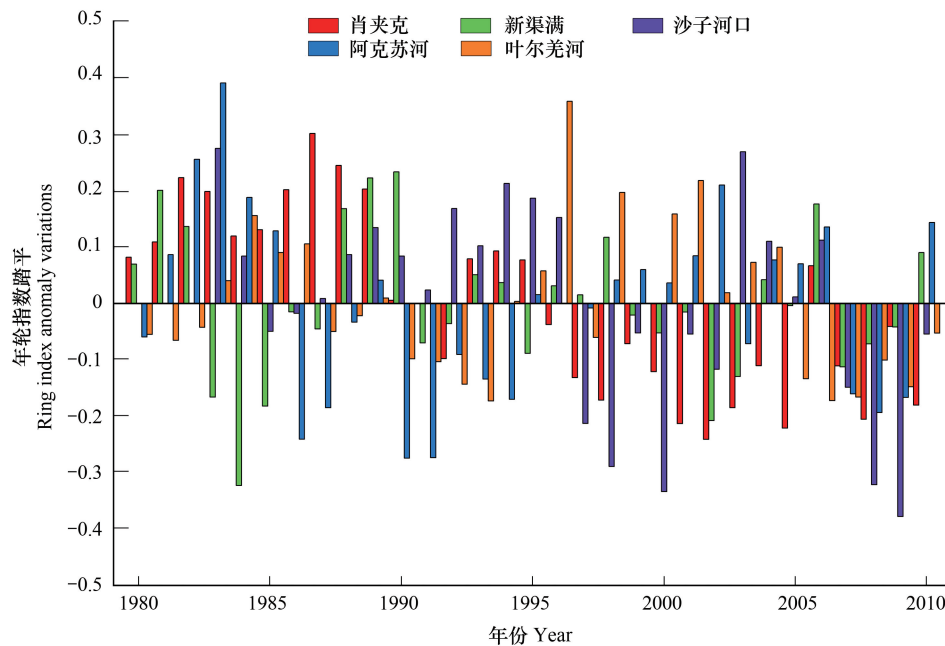


图 4 1980—2010 年塔里木河胡杨年轮指数距平变化

Fig.4 Tree-ring index anomaly change of *Populus euphratica* in the Tarim River between 1980 and 2010

方差分析,检验结如表 3 所示。阿克苏河与肖夹克、沙子河口断面,叶尔羌河与肖夹克、沙子河口断面,肖夹克与新渠满断面,新渠满与沙子河口断面之间胡杨年轮指数具有明显的差异性,且均通过 0.05 水平检验。

通过对研究区胡杨年轮指数进行 Kendall 协同系数检验和单因素方差分析可以看出,源流与干流之间的胡杨年轮指数不具有-致性,且大部分断面之间存在差异性。

表 3 塔里木河两源流和干流不同河段胡杨年轮指数差异性检验

Table 3 Difference test of tree-ring index of *populous euphratica* in each section of the Tarim River

不同断面 Sections		均值差 Mean Difference	标准误差 Standard error	显著性 Sig.	95%置信区间 Confidence interval	
					下限 lower limit	上限 upper limit
阿克苏河	叶尔羌河	0.064	0.1738	0.096	0.0002	0.1278
	肖夹克	0.195 *	0.0575	0.001	0.0817	0.3086
	新渠满	0.0267	0.0575	0.643	-0.0868	0.1401
	沙子河口	0.264 *	0.0590	0.000	0.1473	0.3802
叶尔羌河	肖夹克	0.131 *	0.0575	0.024	0.0177	0.2448
	新渠满	-0.037	0.0575	0.517	-0.1508	0.0761
	沙子河口	0.1997 *	0.0590	0.001	0.0832	0.3162
肖夹克	新渠满	-0.168 *	0.0575	0.004	-0.2820	-0.0550
	沙子河口	0.0686	0.0590	0.247	-0.0479	0.1851
新渠满	沙子河口	0.237 *	0.0590	0.000	0.1206	0.3536

* 均值差的显著性水平为 0.05

2.3 塔里木河两源流与干流不同河段胡杨年轮生长突变性分析

为进一步探讨塔里木河两源流和干流各个断面之间差异性原因,本文对塔里木河源流与干流不同断面进行 Mann-Kendall 突变检验(图 5)。塔河两源流与干流上、中游各个断面年轮指数的突变曲线表明,在 1983 年阿克苏河 UF 曲线与临界线有交点,年轮指数显著增长,随后开始下降,1992 年至 1994 年达到显著下降水平,之后下降趋势减缓,阿克苏河胡杨年轮指数突变发生在 1984 年、1999 年和 2007 年;叶尔羌河 UF 曲线在 1984 和 1986 与临界线有两个交点,因此在 1984 年以前年轮指数有上升趋势但不明显,1984 至 1986 年年轮指数显

著上升,随后 UF 曲线变化呈波动趋势,但均不明显,叶尔羌河胡杨年轮指数突变发生在 1991 年、1993 年和 2005 年;肖夹克断面的 UF 和 UB 曲线在 1995 年临界线之间有一个交点,在 1987 年和 1989 年 UF 曲线与临界线有两个交点,年轮指数呈显著上升趋势,随后上升趋势减缓,直至 1996 年后 UF 曲线超出了临界线,因此肖夹克胡杨年轮指数在 1995 年发生突变,1996 年后呈显著下降;新渠满与沙子河口断面的 UF 和 UB 曲线基本上都是在显著水平 $\alpha=0.05$ 的临界线内,UF 和 UB 曲线有几个交点,在有交点的年份有波动,但变化趋势不显著,没有明显突变现象。

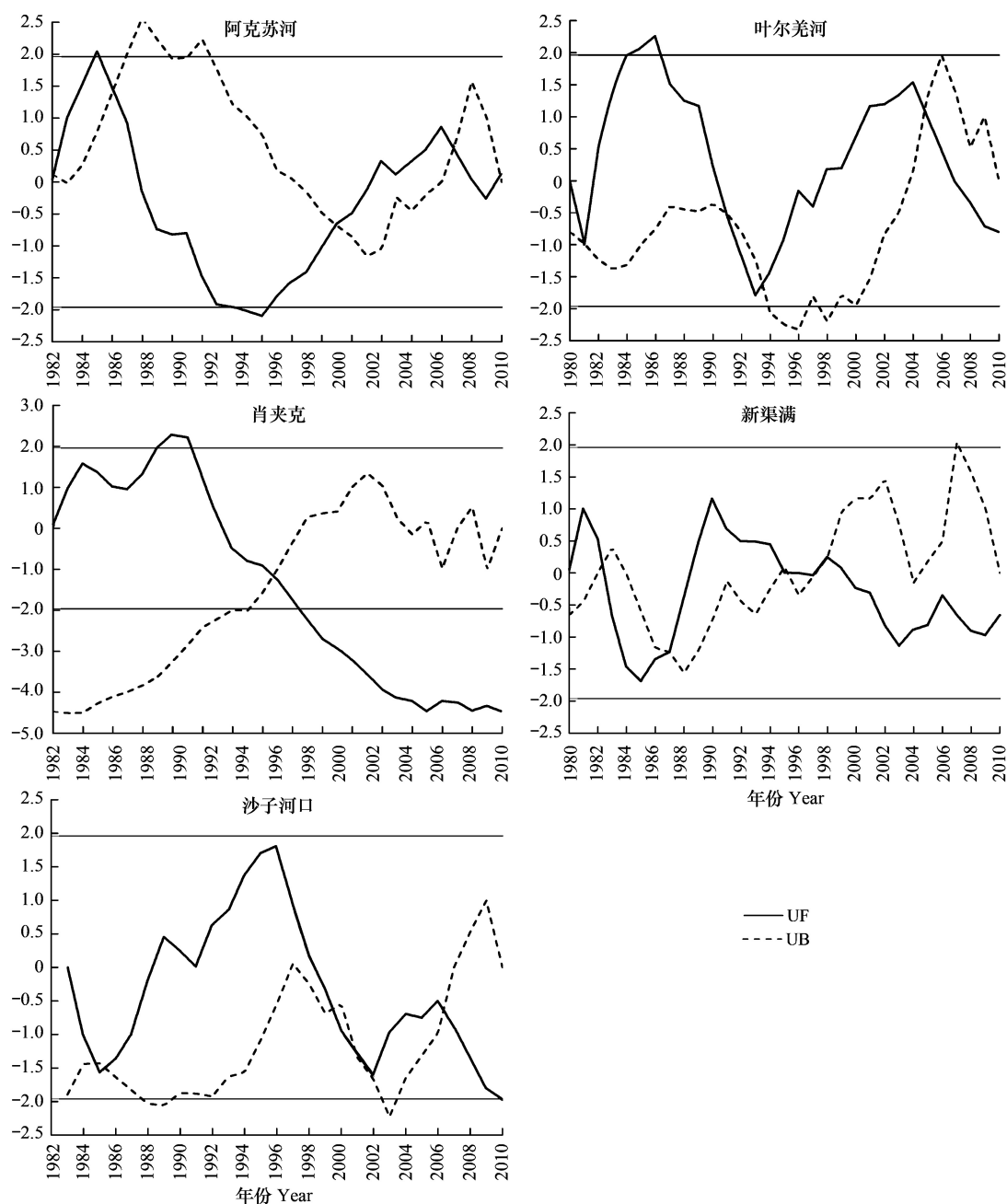


图 5 塔里木河不同河段胡杨年轮指数突变检验

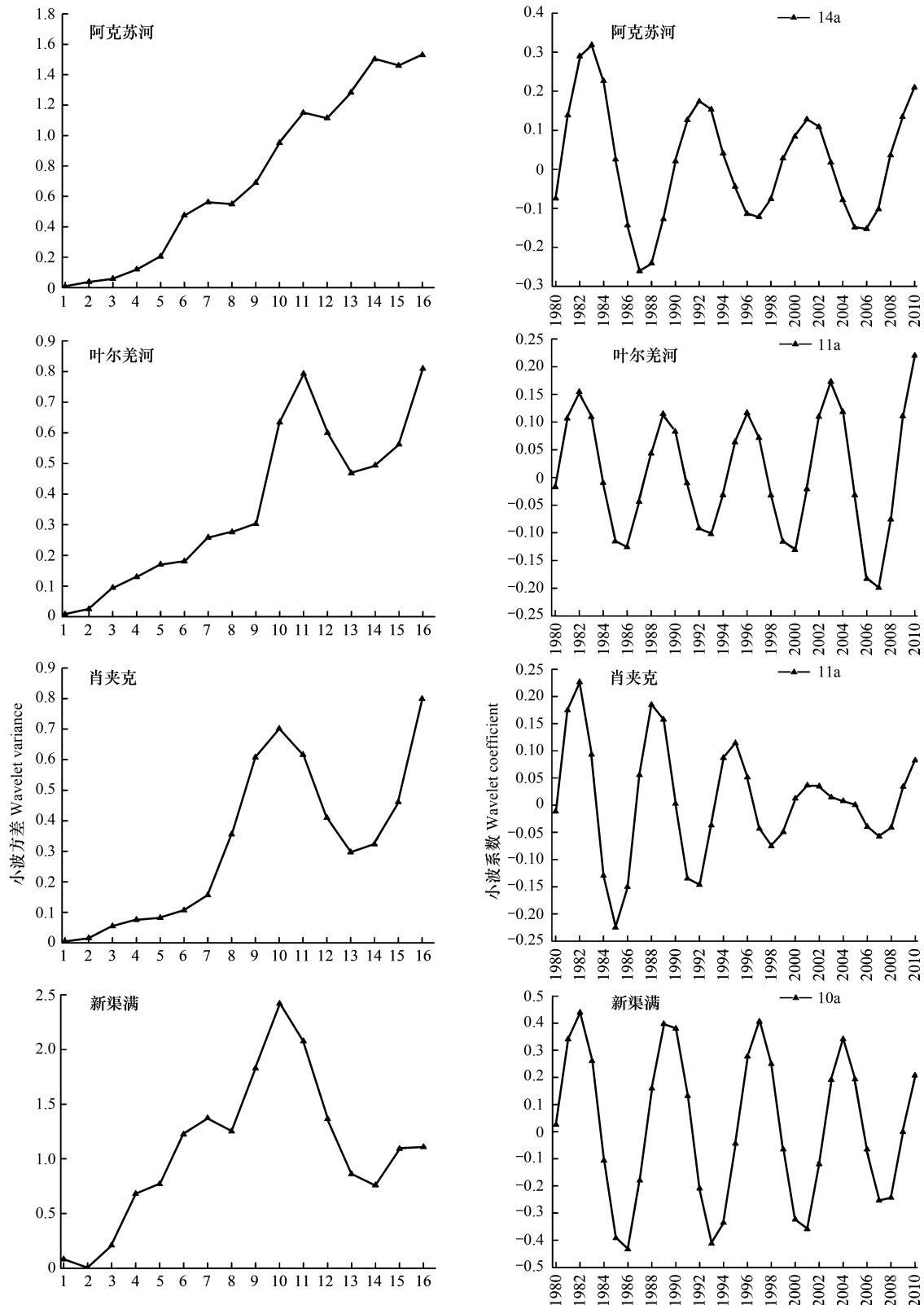
Fig.5 Mutation test of tree-ring index of *populus euphratica* in the different sections of Tarim River

2.4 塔里木河两源流与干流不同河段胡杨年轮生长周期性分析

塔里木河两源流和干流不同河段近 30a 的小波分析结果表明(图 6),胡杨年轮指数的变化特点有周期

性。图 6 分别给出了各个断面年轮指数序列小波方差和主周期尺度小波系数曲线图。由小波方差曲线图(左)可以看出,阿克苏河胡杨年轮指数序列以 14a 为主周期,叶尔羌河胡杨年轮指数序列以 11a 为主周期,肖夹克断面胡杨年轮指数序列以 10a 为主周期,新渠满断面胡杨年轮指数序列以 10a 为主周期,沙子河口断面胡杨年轮指数序列以 11a 为主周期。

从小波系数曲线图(右)可以看出,对于阿克苏河,14a 的周期尺度在整个时间序列上经历了 3 个上升期



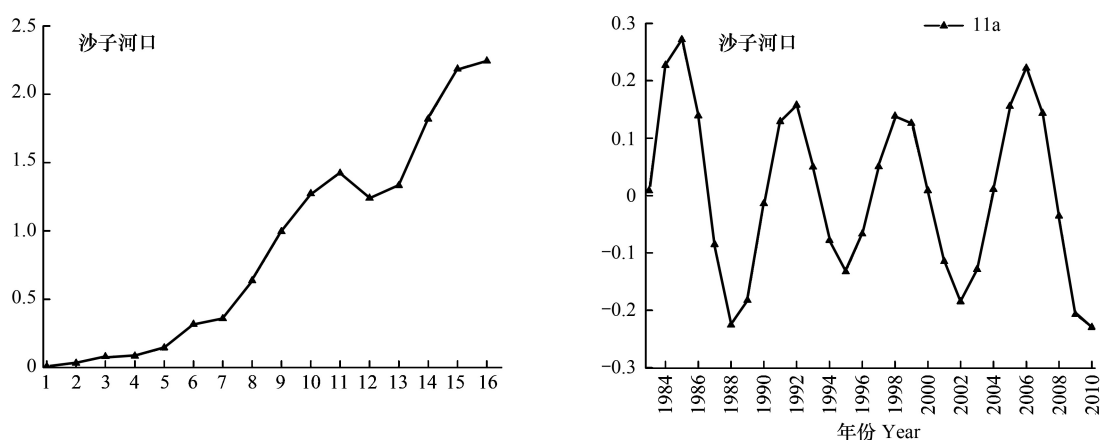


图6 塔里木河不同河段胡杨年轮指数小波方差和小波系数曲线

Fig.6 Wavelet variance and wavelet coefficients curve of tree-ring index of *populus euphratica* in the different sections of the Tarim River

和3个下降期;叶尔羌河在11a的周期尺度上,整个时间序列经历了4个上升期和4个下降期;肖夹克断面在10a时间尺度上,表现为2000年以前呈明显波动,2000年以后波动起伏减小,整个时间序列经历了4个上升期和4个下降期;对于新渠满断面,10a周期尺度在整个时间序列上都比较明显,经历了4个上升期和4个下降期;沙子河口在11a的时间尺度上,经历了4个上升期和3个下降期。

通过对塔河不同断面胡杨年轮指数进行小波分析和突变检验可以看出:阿克苏河胡杨年轮指数以14a为主周期,经历3个上升期和下降期,1983年显著上升,1992至1994年显著下降;叶尔羌河胡杨年轮指数以11a为主周期,经历4个上升期和下降期,1984至1986年显著上升;肖夹克胡杨年轮指数以10a为主周期,2000年以前波动起伏明显,2000年以后趋于平缓,有4个上升期和下降期,1987至1989年显著上升,1996年之后显著下降;新渠满胡杨年轮指数以10a为主周期,经历4个上升期和下降期,沙子河口断面胡杨年轮指数以11a为主周期,经历4个上升期和3个下降期,新渠满与沙子河口UF曲线有波动但变化不显著。

3 讨论

3.1 塔河两源流和干流径流量对胡杨年轮生长的影响探讨

干旱地区地下水位是影响植被生长的关键因子^[23]。在塔里木河这样降水稀少蒸发强烈的极端干旱地区,不同河段的地表径流量和河道形态等变化特征影响地表径流与地下水的相互转化,进而影响地下水位,再对胡杨生长产生一定的影响。因此,塔里木河源流和干流的地表径流量间接影响着荒漠河岸林胡杨的生长。受气候变化的影响,塔里木河源流径流量近50年以来呈现增加趋势^[24],而在强烈的人类活动对水资源不合理利用的干扰下,自20世纪90年代以来,阿克苏河径流量增长呈缓慢趋势,叶尔羌河中下游则出现下降趋势^[25-26]。塔里木河干流上游耕地的大幅扩大导致干流中下游地表径流量显著下降^[27]。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,进一步说明了塔里木河两岸的胡杨受地表径流影响,这一结果也与涂文霞研究结论一致^[28]。

3.2 塔河两源流和干流径流量的周期与突变性与胡杨年轮生长的关系探讨

胡杨年轮生长的突变性与周期性可能受到河道地表径流量的突变性与周期性有影响。木塔里普·托乎提等^[29]学者研究表明,在1987—2008年间,两源流阿克苏河与叶尔羌河径流量皆在1993年发生显著性突变;涂文霞等^[28]研究得出,塔里木河干流新渠满水文站径流量发生突变的年份在1974年;本文研究胡杨年轮指数在突变性时间上,阿克苏河中下游胡杨生长在1999年发生突变,叶尔羌河中下游胡杨生长在1993年发生了突变,塔里木河干流的新渠满与沙子河口断面不存在明显突变年份。可以看出,塔里木河两源流胡杨年轮指数的突变时间与径流量突变时间相同或者滞后,这可能与地表水转化为地下水过程有关。而在塔里木河干流,新渠满断面的胡杨年轮指数没有明显突变年份,与新渠满水文站径流突变年份不一致。

从河道地表径流量的变化周期看,陈亚宁等^[30]学者研究表明,近 50 年,阿克苏河和叶尔羌河径流变化以 17a 为主周期。陈忠升等^[31]研究证明,塔里木河干流阿拉尔、新渠满、英巴扎水文站径流量周期均表现为 17a 的主周期。本文关于胡杨年轮指数变化的周期性表明,在 1980—2010 年期间,阿克苏胡杨年轮指数以 14a 为主周期、叶尔羌河断面胡杨年轮指数以 11a 为主周期,胡杨年轮指数在塔里木河干流的肖夹克和新渠满断面以 10a 为主周期、在沙子河口断面以 11a 为主周期。可以看出,塔里木河两源流和干流不同河段的胡杨年轮指数变化的周期均小于其地表径流变化的周期,这可能与胡杨自身的生理特点和当地的气温和水分综合影响有关。

综上所述,河道河流径流周期性变化和突变性与胡杨的生长存在复杂的关系,而且地表径流对树木年轮生长的影响具有明显的“滞后效应”^[32],造成胡杨年轮生长量的突变点及变化周期与径流量的不一致,说明河流径流与胡杨年轮生长有持续和密切的影响。

4 主要结论

(1)塔里木河两源流和干流不同河段年轮宽度和年轮指数在 1980—2010 年期间均呈下降趋势。在阿克苏河、肖夹克、沙子河口 3 个断面胡杨年轮宽度和年轮指数下降趋势明显,而叶尔羌河和新渠满断面的胡杨年轮宽度和年轮指数下降趋势不明显。

(2)阿克苏河和叶尔羌河中下游与塔河干流不同断面的胡杨年轮生长变化在空间上不具有一致性($W < 0.5$)。阿克苏河断面与肖夹克、沙子河口断面,叶尔羌河与肖夹克、沙子河口断面,肖夹克与新渠满断面,新渠满与沙子河口断面之间胡杨年轮指数具有明显的差异性($P < 0.05$)。

(3)在 1980—2010 年期间,阿克苏河中下游胡杨年轮指数 14a 为主周期;叶尔羌河中下游胡杨年轮指数 11a 为主周期;塔里木河干流的肖夹克断面胡杨年以 10a 为主周期;新渠满和沙子河口断面胡杨年轮指数均以 10a 为主周期。

(4)阿克苏河中下游胡杨年轮指数在 1999 年发生突变,叶尔羌河中下游胡杨年轮指数在 1993 年发生了突变,肖夹克断面在 1995 年发生突变,新渠满与沙子河口断面没有明显突变现象。

参考文献 (References):

- [1] Loaiciga H A, Haston L, Michaelsen J. Dendrohydrology and long-term hydrologic phenomena. *Reviews of Geophysics*, 1993, 31(2): 151-171.
- [2] 李江风,袁玉江,由希尧.树木年轮水文学研究与应用.北京:科学出版社,2000.
- [3] 程其畴.塔里木河研究.南京:河海大学出版社,1993.
- [4] Woodhouse C A. A tree-ring reconstruction of streamflow for the Colorado front range. *Journal of the American Water Resources Association*, 2001, 37(3): 561-569.
- [5] Timilsena J, Piechota T. Regionalization and reconstruction of snow water equivalent in the upper Colorado River basin. *Journal of Hydrology*, 2008, 352(1/2): 94-106.
- [6] Graumlich I J, Pisarcic M F J, Waggoner L A, et al. Upper Yellowstone River flow and teleconnections with Pacific basin climate variability during the past three centuries. *Climatic Change*, 2003, 59(1/2): 245-262.
- [7] Horton J L, Kolb T E, Hart S C. Responses of riparian trees to interannual variation in ground water depth in semi-arid river basin. *Plant, Cell & Environment*, 2001, 24(3): 293-304.
- [8] 李江风.塔里木河中游年轮与水热指数.干旱区地理,1988,11(4):17-23.
- [9] 刘普幸,陈发虎,靳立亚,勾晓华,张永香,彭剑峰.基于胡杨年轮重建黑河下游近 100 年春季径流量.干旱区地理,2007,30(5): 696-700.
- [10] 邵雪梅,黄磊,刘洪滨,梁尔源,方修琦,王丽丽.树轮记录的青海德令哈地区千年降水变化.中国科学 D 辑:地球科学,2004,34(2): 145-153.
- [11] 刘普幸,陈发虎,勾晓华,彭剑峰,黄小忠.额济纳旗近 100a 来胡杨年表的建立与响应分析.中国沙漠,2005,25(5): 764-768.
- [12] 徐海量,宋郁东,王强,艾合买提.塔里木河中下游地区不同地下水位对植被的影响.植物生态学报,2004,28(3): 400-405.
- [13] 韩路,王海珍,周立正,李志军.塔里木河上、中游胡杨种群结构与统计分析.生态学报,2007,27(4): 1315-1322.
- [14] 于君,王海珍,陈加利,韩路.塔里木河流域荒漠河岸林胡杨群落的空间格局研究.中国沙漠,2011,31(4): 913-918.

- [15] 王海珍,韩路,李志军,彭杰,马春晖.塔里木河上游胡杨与灰杨光合水分生理特性.生态学报, 2009,29(11):5843-5850.
- [16] 陈亚鹏,陈亚宁,徐长春,李卫红,付爱红.塔里木河下游地下水埋深对胡杨气体交换和叶绿素荧光的影响.生态学报, 2011,31(2): 0344-0353.
- [17] 徐梦辰,陈永金,刘加珍,王丹,刘亚琦.塔里木河中游水文影响下的胡杨种群格局动态.生态学报,2016,36(9): 2646-2655.
- [18] 蒋艳,周成虎,程维明.新疆阿克苏河流域年径流时序特征分析.地理科学进展, 2005, 24(1): 87-96.
- [19] 谢富明,毛伟峰,张建岗,高前兆,沈永平,王进,王顺德.塔里木河流域 2005 年四源流对干流供水径流情势分析.冰川冻土, 2007, 29(4): 559-569.
- [20] 王永斌,努尔巴依·阿布都沙力克, Thevs N. 胡杨(*Populus euphratica* Oliv.) 根繁殖特征.生态学杂志, 2007, 26(12): 1937-1941.
- [21] Stockton C W, Meko D M. Drought recurrence in the great plains as reconstructed from long-term tree-ring records. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1983, 22(1): 17-29.
- [22] 龚君君.塔里木河下游胡杨径向生长量对生态输水响应研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2011.
- [23] 赵文智,刘鹄.荒漠区植被对地下水埋深响应研究进展.生态学报, 2006, 26(8): 2702-2708.
- [24] 徐海量,叶茂,宋郁东.塔里木河源流区气候变化和年径流量关系初探.地理科学, 2007, 27(2): 219-224.
- [25] 傅丽昕,陈亚宁,李卫红,徐长春,何斌.塔里木河三源流区气候变化对径流量的影响.干旱区地理, 2008, 31(2): 237-242.
- [26] 凌红波,徐海量,张青青,史薇.新疆塔里木河三源流径流量变化趋势分析.地理科学, 2011, 31(6): 728-733.
- [27] 贡璐,吕光辉,丁建丽,刘新春,潘晓玲.塔里木河上游土地利用变化中的生态价值损益分析.生态学杂志, 2006, 25(5): 526-530.
- [28] 涂文霞.塔里木河不同河段胡杨径向生长与地表径流的关系研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2014.
- [29] 木塔里甫·托乎提,徐海量,刘新华.塔里木河流域径流变化趋势分析及预测.水资源与水工程学报, 2012, 23(2): 77-82.
- [30] 陈亚宁,郝兴明,徐长春.新疆塔里木河流域径流变化趋势分析.自然科学进展, 2007, 17(2): 205-210.
- [31] 陈忠升,陈亚宁,徐长春.近 50a 来塔里木河干流年径流量变化趋势及预测.干旱区地理, 2011, 34(1): 43-51.
- [32] 邓潮洲,张希明,李利,吴俊侠,刘国军,闫海龙,朱军涛,吕朝燕.河道输水对塔里木河下游胡杨生长状况的影响.中国沙漠, 2010, 30(2): 312-318.