



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

张 芸^{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:以塔里木河下游干旱荒漠区胡杨为研究对象,选择英苏、依干不及麻、阿拉干、喀尔达依 4 个不同断面,通过定点监测 4 个典型断面的地下水位,并测定计算胡杨的径向生长量,对比分析 4 个不同断面的胡杨径向生长与地下水埋深之间的关系,定量研究胡杨生长的合理水位,为塔里木河下游胡杨健康生长和恢复提供理论依据。结果表明:(1)4 个断面的胡杨年轮宽度在 2000 年以后有明显上升,英苏断面年轮宽度变化起伏最为明显,依干不及麻断面年轮宽度变化起伏最平缓。在 2000 年以前(为排除人工输水的干扰),胡杨年轮指数的变化有显著差异性,起伏最明显为依干不及麻断面,最平缓为阿拉干断面,喀尔达依断面有明显下降趋势。(2)4 个断面的胡杨径向生长量与地下水埋深之间呈负相关关系,建立回归模型,拟合方程均通过 0.05 水平检验,拟合关系较好。(3)4 个断面的胡杨径向生长量随着地下水位的下降,其灵敏度呈先增大后减小的趋势。灵敏度最大值对应的地下水位分别是:英苏断面 5.38 m、喀尔达依断面 6.66 m、阿拉干断面 7.81 m、依干不及麻断面 7.84 m。说明 4 个断面的胡杨径向生长对地下水位变化响应的敏感度存在差异,胡杨生长敏感的地下水位范围在 5.4~7.8 m 之间。

关键词:塔里木河下游;地下水;胡杨;径向生长量

中图分类号:Q948.1 **文献标志码:**A

Sensitivity Analysis of *P. euphratica* Radial Growth to Groundwater Changes in the Different Transects of the Lower Reaches of Tarim River

ZHANG Yun^{1,2} YE Mao^{1,2*}

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

Abstract: In the arid desert region downstream of the Tarim River, we selected Yingsu, Kaerdayi, Alagan, Yiganbujima four different sections. Through the four typical sections of the underground water level monitoring and calculation, determination of radial growth of *Populus euphratica*, with the method of mathematical statistics, comparative analysis of different cross section of the radial growth of *P. euphratica* and the relationship between the groundwater depth, quantitative study of *P. euphratica* growth reasonable levels, we provided a theoretical basis for the healthy growth and lower Tarim River *Populus* recovery. The results are as follow: (1) After 2000, the four sections of *Populus* ring width has increased significantly. Yingsu section has the most obvious changes in tree ring width. Yiganbujima section has the most

收稿日期: 2015-10-12; 修改稿收到日期: 2016-04-22

基金项目: 新疆师范大学地理学博士点支撑学科开放课题基金项目(XJNU-DL-201509); 国家自然科学基金(41461045); 自治区青年科技创新人才培养工程(2013721032)资助

作者简介: 张 芸(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事干旱区水文过程研究。E-mail: zhangyun0221@sina.com

* 通信作者: 叶茂, 教授, 硕士生导师, 主要从事干旱区水文研究过程。E-mail: yamao1111@163.com

gentle ring width changes. Before 2000 (to exclude the interference of artificial water), *Populus* ring index changes are significant differences, the most obvious ups and downs for the Yiganbujima section. Alagan section is the most gentle, Kaerdayi section has a clear downward trend. (2) In four radial sections, *Populus* growth and significant negative correlation with groundwater level. A regression model of radial growth of *Populus* and groundwater level found: four sections fit through the 0.05 level to test the equation, fitting better relationship. (3) *Populus* radial growth decrease with the decline in the four sections of the groundwater level. The sensitivity was first increased, then decreased. Groundwater level corresponding to the maximum sensitivity are: Yingsu section 5.38 m, Kaerdayi section 6.66 m, Alagan section 7.81 m and Yiganbujima section 7.84 m. *Populus* radial growth in four sections differ in response to the sensitivity of groundwater level changes. *Populus* growth sensitive groundwater level range is between 5.4—7.8 m.

Key words: the lower reaches of Tarim River; groundwater level; *Populus euphratica*; radial increment

20 世纪初期,美国科学家道格拉斯(A. E. Douglass)创立树木年轮学后,其重要性已被科学界广泛认可,树木年轮水文学(Dendrohydrology)也得到了长足的发展^[1-4]。大量研究成果表明^[5-8],包括胡杨(*Populus euphratica*)在内的树木年轮记录,在很大程度上能反映出地表径流和地下水等相关信息。

由于干旱区年降水量极少,对植物的生长作用不大,因而地下水资源为植被提供了生长和存活的条件^[9]。新疆作为典型的干旱、半干旱地区,在历史资料缺乏的情况下,年轮资料对了解过去的水文变化无疑具有重要意义。新疆的天然植被在抑制荒漠化和保持生态平衡等方面有着重要的作用。地下水作为关键的生态因子,是绿洲生态系统构成、稳定和发展的依据和基础^[10-11]。

胡杨作为塔里木河下游唯一的天然乔木,对地下水的增加或者减少表现较为敏感^[12-13]。河两岸分布着大片的原始胡杨林,其面积占世界胡杨林总面积的 54%,占中国胡杨林总面积的 89%^[14],其长势、生长量均能反映生态恢复的效应。目前,针对地下水与植被生长关系的研究,主要集中在植被生长最适地下水位的确定、生态输水对植被生长量的影响以及对植被生长需水量的估算^[15-18]等方面,树木年轮水文学的应用也大部分集中在气候、水文要素的重建上^[19],然而从树木年轮的角度研究干旱区内陆河流域胡杨生长的最适合生态水位的报道较少。因此,本文以干旱荒漠区胡杨为研究对象,通过数理统计方法,对比分析不同断面的胡杨径向生长与地下水埋深之间的关系,定量研究胡杨生长的合理水位,可以为维持塔里木河流域生态系统的平衡和经济生产活动建设、规划提供理论依据。

1 研究区概况

塔里木河下游河段系指从尉犁县的恰拉至若羌

的台特玛湖,主河道长约 428 km,主要位于罗布泊微弱凹陷区,是新疆乃至全国生态环境最为脆弱的地区之一,也是综合整治塔里木河流域生态环境、防治土地沙化的前沿地区。该区域气候干燥,多风沙天气,年均温 10.8℃,平均降水量在 17~34 mm 之间,而平均年蒸发量高达 2 500~3 000 mm,属大陆性暖温带极端干旱气候。在塔里木河下游,乔木主要有胡杨(*Populus euphratica* Oliv.);灌木主要有怪柳(*Tamarix* spp.)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum* Murr.);草本植物主要有大叶白麻(*Poacynum hendersonii* (Hook. f.) Woodson)、花花柴(*Karelinia caspica* Less.)、芦苇(*Phragmites communis* Trin. ex Steud.)等。大量研究表明^[20-22],胡杨生长的水分供应主要依靠潜水或河流泛滥水。但是自 1972 年大西海子水库建成,造成对塔里木河的拦截,导致下游 321 km 河道出现断流,从而使地下水成为胡杨生长的生命源泉。

2 研究方法

2.1 树木年轮取样和径向生长量的测定

2013 年 9~10 月在塔里木河下游按胡杨退化程度选择英苏(A)、喀尔达依(B)、阿拉干(C)、依干不及麻(D)4 个典型断面,在永久样地中随机地选取生长特征相似(包括胸径、高度和长势)的健康胡杨 5~10 棵进行取样,用生长锥按照“十字交叉”法,采集每株胡杨树干的树芯,将采集的胡杨树干样本进行晾干、镶嵌、打磨等预处理;利用 LINTABTM6 型树木年轮测定仪器测量年轮宽度,即胡杨径向生长量。利用 COFECHA 交叉定年质量控制程序进行交叉定年检验和生长量订正,确保交叉定年的准确性,并用 ARSTAN 程序建立标准年表。

2.2 地下水数据获取

为了准确掌握地下水与胡杨生长量之间的关

系,自 2000 年起,在塔里木河下游布设了监测断面,在每个断面按一定间距布设地下水位观测井。本研究选取塔里木河下游 4 个监测断面,分别是英苏断面、喀尔达依断面、阿拉干断面、依干不及麻断面,其分布见图 1。

2.3 数据分析处理

为了排除树龄对径向生长的影响,对 4 个监测断面胡杨进行年轮指数分析,标准化处理径向生长量数据。通过比值方法求取新的指数序列。年轮指数(I_i)的求取,原年轮宽度序列实测读数(W_i)比上从胡杨径向生长趋势曲线上读出的年轮宽度值(Y_i),

公式为: $I_i=W_i/Y_i(1)$

地下水数据选自 2000 年至 2011 年的年均地下水位资料,并与相同年份的胡杨径向生长量的平均值一一对应。用 SPSS19.0 软件检验地下水位与胡杨径向生长量之间的相关性,并建立方程^[23]。

为了反映不同地下水埋深下的胡杨径向生长的变化速率,运用灵敏度指数公式^[24]: $S_k=(dy/dx) \cdot (x/y)(2)$ 。其中, x 是地下水埋深, y 是胡杨径向生长量。 S_k 反映了胡杨径向生长量对地下水埋深变化响应的敏感程度。 S_k 值越小,说明胡杨径向生长变化速率对地下水埋深变化响应越迟缓,反之亦然。

3 结果与分析

3.1 不同断面胡杨径向生长差异性

图 2 是塔里木河下游 4 个典型断面胡杨年轮宽度变化趋势图。英苏断面胡杨年轮宽度自 1987 年至 1999 年,呈波动起伏,并在 1994 年出现最小值(0.097);2000 年以后,有明显的增加,并在 2003 年出现最大值(0.565)。喀尔达依断面的年轮宽度在 1993 年之前变化不明显,1993 年出现最小值(0.10),1995 年后开始有明显上升趋势,并在 2013 年出现最大值(0.41);阿拉干断面胡杨年轮宽度在 2000 年以后有增长的趋势,并在 2003 年达到最大值(0.29),随后开始下降,在 2010 年出现最小值(0.10);依干不及麻断面胡杨年轮宽度整体变化差异性不大,2002 年以后,有较为明显的增长,最大值出现在 2006 年(0.23),最小值出现在 1993 年(0.06)。

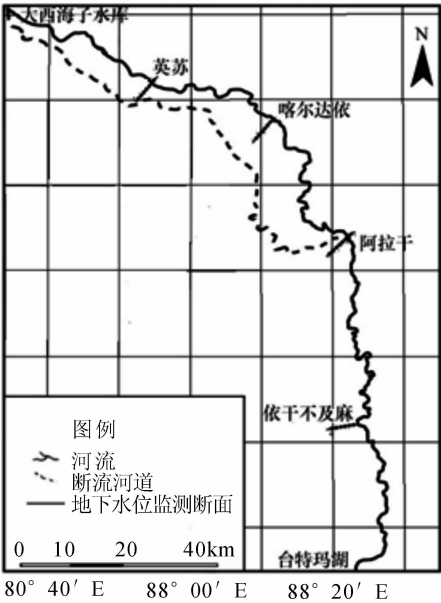


图 1 塔里木河下游输水河道及监测断面分布
Fig. 1 Sketch map of the lower reaches of the Tarim River

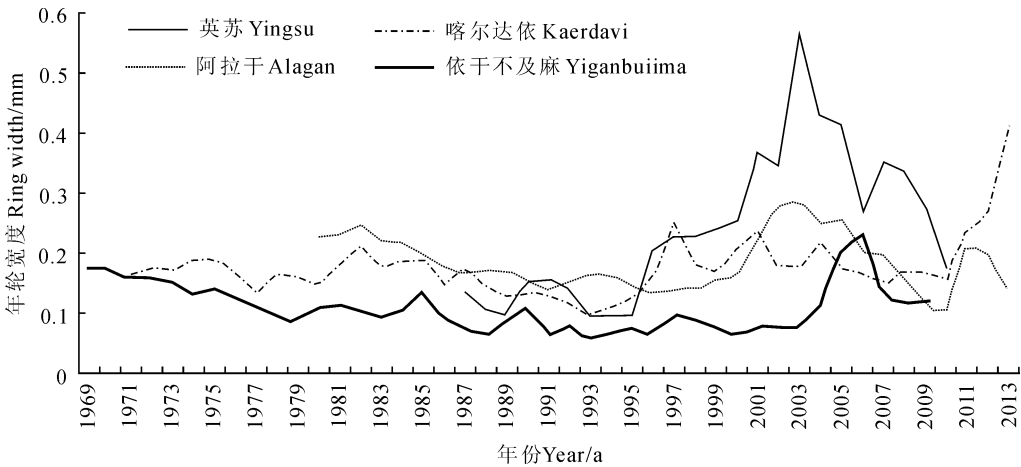


图 2 4 个断面胡杨年轮宽度变化特点
Fig. 2 The characteristics of the ring width of *P. euphratica* in the four sections

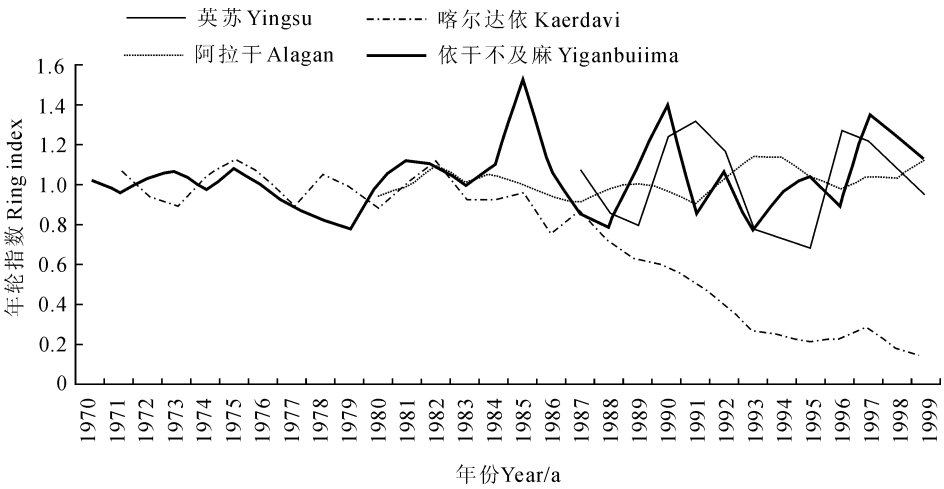


图 3 4 个断面胡杨年轮指数变化特点

Fig. 3 The characteristics of the ring index of *P. euphratica* in the four sections

为排除人工输水对塔里木河下游植被生长的影响,选用 2000 年以前的年轮指数进行分析(图 3)。英苏断面的胡杨年轮指数有两个非常明显的高峰期和低谷期,高分期发生在 1991 年和 1996 年,低谷期发生在 1989 年和 1995 年。与英苏断面不同,喀尔达依断面胡杨年轮指数整体呈大幅下降趋势;阿拉干断面的胡杨年轮指数与英苏和喀尔达依断面相比整体起伏变化不大;依干不及麻断面胡杨年轮指数在 1982 年之前变化不明显,在 1982 年之后年际间变化幅度非常大。

从以上 4 个断面胡杨变化趋势可以看出,英苏断面年轮宽度变化起伏最为明显,在 1994 出现最小值(0.097),2003 年出现最大值(0.565);依干不及麻断面年轮宽度起伏变化最平缓,在 1993 年出现最小值(0.06),2006 年出现最大值(0.23)。喀尔达依断面胡杨年轮指数有明显下降的趋势,年轮指数变化起伏最明显的断面为依干不及麻,在 1985 年出现最大值(1.53),1993 年出现最小值(0.77);变化最平缓的是阿拉干断面,1994 年出现最大值(1.14),1987 年出现最小值(0.91)。沿河道自上而下 4 个断面中,英苏断面年轮宽度平均值最大(0.242),依次逐渐递减,依干不及麻断面年轮宽度平均值最小(0.109)。由此推断,胡杨径向生长量的变化可能与地下水位有关。

3.2 不同断面胡杨径向生长量与地下水位的关系

为了进一步定量分析胡杨径向生长量与地下水埋深之间的相互关系,在两者之间建立相关模型(图 4)。英苏(A)、喀尔达依(B)、阿拉干(C)、依干不及麻(D)4 个断面的胡杨径向生长量随着地下水埋深

的变化而有所不同。利用统计学的方法,计算相关系数,对不同断面的胡杨径向生长量与地下水埋深进行回归分析。

结果表明:4 个断面胡杨径向生长量与其地下水埋深的关系呈负相关。其中,英苏(A)断面的胡杨径向生长量随地下水埋深的不断下降常有波动起伏,整体呈下降趋势,拟合方程为: $y=0.003x^4-0.065x^3+0.404x^2-0.943x+0.974(R^2=0.307)$ (3),拟合方程通过 0.05 水平检验,拟合的回归方程关系效果很好;喀尔达依(B)断面的胡杨径向生长量随地下水埋深的下降呈缓慢下降趋势,拟合方程为: $y=0.006x^3-0.138x^2+0.959x-1.980(R^2=0.066)$ (4),拟合方程通过 0.05 水平检验,拟合关系较好;阿拉干(C)断面胡杨径向生长量随地下水埋深的下降呈缓慢下降趋势,拟合方程为: $y=0.009x^3-0.229x^2+1.744x-4.087(R^2=0.220)$ (5)拟合方程通过 0.05 水平检验,拟合的回归关系效果较好;依干不及麻(D)断面的胡杨径向生长量随地下水埋深的下降呈下降趋势,拟合方程为: $y=0.003x^4-0.077x^3+0.711x^2-2.776x+3.995(R^2=0.081)$ (6)拟合方程通过 0.05 水平检验,拟合的回归关系效果很好。

3.3 不同断面胡杨径向生长对地下水位变化的灵敏度分析

胡杨径向生长量变化速率是指:每一年胡杨年轮宽度变化的值,即年际间年轮宽度差值比上对应的年份。胡杨径向生长量变化速率为负值,说明胡杨年轮宽度的变化率是减小的。为了准确反映地下水埋深变化对胡杨径向生长率的影响,利用不同断

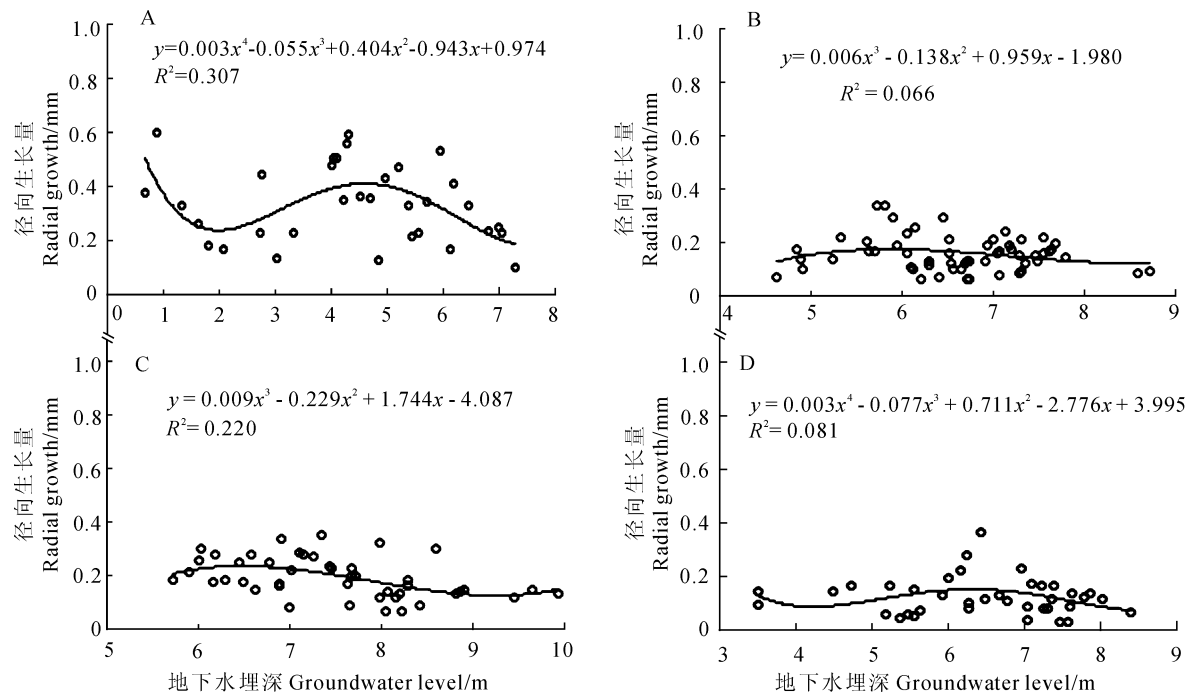


图 4 不同断面胡杨径向生长量与地下水位的关系

Fig. 4 The relationship between variations of *P. euphratica*'s radial increment and groundwater level in different sections

面地下水埋深与胡杨径向生长关系的拟合方程(3~6),根据灵敏度计算公式(2),可得出 S_k 的基本变化特征曲线。

如图 5 所示,英苏断面的胡杨径向生长率随着地下水埋深的下降,其降低的幅度也不断增加,当地下水埋深在 5.38 m 时,其降低速率到了最大值,为 134%。当地下水埋深深度大于 5.38 m 时,胡杨径向生长率的降低幅度逐渐减小,说明地下水埋深大于 5.38 m 后,地下水埋深的变化对胡杨径向生长的影响不大。因此,可以认为,英苏断面的胡杨径向生长变化最敏感的地下水埋深为 5.38 m。

喀尔达依断面胡杨径向生长率变化对地下水埋深变化的响应表现为:随着地下水埋深的下降,其降低幅度呈现先增加后减少的趋势。当地下水埋深到达 6.66 m 时,其降低速率达到最大值为 247%。当埋深大于 6.66 m 时,胡杨径向生长率变化幅度逐渐减少,说明地下水埋深大于 6.66 m 后,地下水埋深的变化对径向生长的影响不大,喀尔达依断面的胡杨径向生长变化最敏感地下水位为 6.66 m。

与喀尔达依断面相比,阿拉干断面的胡杨径向生长率随地下水埋深变化的响应较为迟缓。当地下水埋深下降至 7.81 m 时,其降低速率到达最大值为 301%。当地下水埋深大于 7.81 m 时,胡杨径向生长率降低幅度逐渐减少,说明当地下水埋深大于 7.81 m 后,地下水位的变化对胡杨径向生长率的影

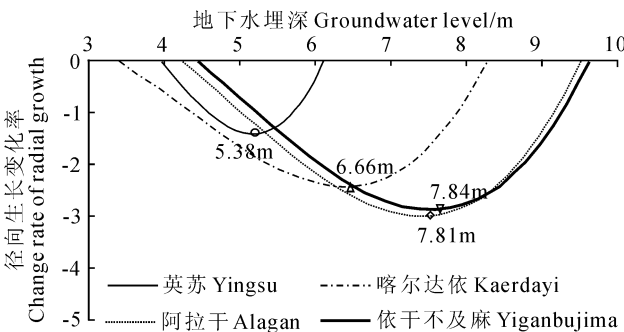


图 5 4 个断面不同地下水埋深胡杨径向生长量变化灵敏度曲线

Fig. 5 Radial increment sensitivity curves of *P. euphratica* in different groundwater depths in four sections

响不大。即地下水埋深位于 7.81 m 时,阿拉干断面胡杨径向生长对地下水埋深变化响应最为敏感。

依干不及麻断面的胡杨径向生长率随着地下水埋深下降,其降低的幅度也快速增加,当地下水位位于 7.84 m 时,其降低速率达到了最大值为 298%。当地下水埋深的下降大于 7.84 m 时,胡杨径向生长率降低幅度逐渐减小,说明地下水埋深大于 7.84 m 后,地下水埋深的变化对胡杨径向生长变化影响不大。因此,本研究认为依干不及麻断面胡杨径向生长率变化最为敏感的地下水埋深位于 7.84 m 处。

通过上述分析得知,地下水埋深不同,胡杨径向

生长变化率对地下水埋深变化的响应程度也不相同。随着地下水埋深增大,胡杨径向生长对其变化的响应程度表现为先增大,当地下水埋深到达一定深度时,胡杨径向生长对地下水埋深变化的响应最敏感,在地下水埋深超过一定深度时,胡杨径向生长的变化率开始减少并逐渐趋向零。

4 结 论

本研究结果表明,在2000年以后,塔里木河下游4个断面胡杨径向生长量均呈明显的上升趋势,这与塔里木河下游人工输水使胡杨在整体上有明显的梯度变化,胡杨径向生长量出现明显响应的结果相一致^[13]。而在2000年之前,排除人工输水的影响,4个断面胡杨年轮指数的变化趋势不同。除喀尔达依断面外,其他3个断面胡杨年轮指数均呈波动起伏,且有缓慢增长的趋势,其原因可能与“中国西北地区1897~2000年的年均降水量增加显著”^[25]有关。

在胡杨径向生长量与地下水埋深之间建立回归模型。4个断面的胡杨径向生长量与地下水埋深之间均呈负相关,且拟合方程均通过0.05水平检验。随着地下水埋深的下降胡杨径向生长量的变化处于波动状态。这可能是因为胡杨的生长存在合理水位区间和胁迫水位区间。当地下水埋深达到胡杨生长

的合理水位区间时,胡杨生长状态最好,拟合曲线呈现上升趋势;当地下水波动范围在胁迫水位区间时,胡杨生长受到胁迫作用,胡杨径向生长量减少,则呈下降趋势。这与安红燕等^[20]在分析塔里木河下游胡杨径向生长与地下水的关系得到的结论相一致。

樊自立等^[26]根据潜水蒸发与土壤盐渍化及荒漠化的关系,把适宜生态水位确定在2~4 m;徐海量等^[18]根据多年塔河下游地区植被的监测结果,并结合胡杨的生理指标,得出塔里木河下游草本植被生态恢复的最低水位为3.5 m,引起胡杨水分胁迫的地下水位出现在5.0 m;陈亚宁等^[12]通过分析塔里木河下游胡杨在不同地下水埋深条件下的生理响应和适应性,推测出塔河下游胡杨合理的生态水位在4~9 m;叶茂等^[24]通过分析胡杨不同等级胸径得出,不同生长阶段下,胡杨生长的合理水位在3.3~7.9 m。本研究的塔里木河下游4个断面的胡杨径向生长量随着地下水埋深的下降,其灵敏度呈先增大、后减小的趋势;灵敏度最大值对应的地下水位分别是:英苏断面5.38 m、喀尔达依断面6.66 m、阿拉干断面7.81 m、依干不及麻断面7.84 m。这说明4个断面的胡杨径向生长对地下水埋深变化响应的敏感度存在差异,胡杨生长敏感的地下水位范围在5.4~7.8 m之间,与前人研究得出的合理生态水位差别不大。

参考文献:

[1] BRITO-CASTILLO L, DÍAZ-CASTRO S, SALINAS-ZAVALLA C A, *et al.* Reconstruction of long-term winter streamflow in the Gulf of California continental watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, **278**(1): 39-50.

[2] LOAICIGA H A, HASTON L, MICHAELSEN J. Dendrohydrology and longterm hydrologic phenomena[J]. *Reviews of Geophysics*, 1993, **31**(2): 151-171.

[3] 刘普幸,勾晓华,张齐兵,等. 国际树轮水文学研究进展[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.

[4] 李江凤,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.

[5] 韩路,王海珍,彭杰,等. 塔里木河上游天然胡杨林种群空间分布格局与动态研究[J]. 西北植物学报, 2007, **27**(8): 1 668-1 673.
HAN L, WANG H Z, PENG J, *et al.* Spatial distribution patterns and dynamics of major population in *Populus euphratica* forest in upper reaches of Tarim River[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, **27**(8): 1 668-1 673.

[6] 张永香,勾晓华,胡文东,等. 树轮记录的贺兰山区近百年的干旱事件[J]. 生态学报, 2005, **25**(8): 2 121-2 126.
ZHANG Y X, GOU X H, HU W D, *et al.* The drought events recorded in tree ring width in Helan Mt. over past 100 years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(8): 2 121-2 126.

[7] 肖生春,肖洪浪,周茂先,等. 近百年来西居延海湖泊水位变化的湖岸林树轮记录[J]. 冰川冻土, 2004, **26**(5): 557-562.
XIAO S C, XIAO H L, ZHOU M X, *et al.* Water level change of the West Juyan Lake in the past 100 years recorded in the tree ring of the shrubs in the lake banks[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, **26**(5): 557-562.

[8] 张绘芳,李霞. 塔里木河下游胡杨种群空间分布格局分析[J]. 西北植物学报, 2006, **26**(10): 2 125-2 130.
ZHANG H F, LI X. Spatial distribution pattern of *Populus euphratica* populations in the lower reaches of Tarim River [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, **26**(10): 2 125-2 130.

[9] 叶茂,徐海量,王晓峰,等. 塔里木河下游阿拉干断面胡杨根

系空间分布规律研究[J]. 西北植物学报, 2011, **31**(4): 801-807.

YE M, XU H L, WANG X F, *et al.* Spatial distribution characteristics of root system of *Populus euphratica* in the Algan Transection of the lower Tarim River[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2011, **31**(4): 801-807.

[10] 地理学词典[M]. 上海: 上海辞书出版社, 1982.

[11] 司建华, 常宗强, 苏永红, 等. 胡杨叶片气孔导度特征及其对环境因子的影响[J]. 西北植物学报, 2008, **28**(1): 125-130.

SI J H, CHANG Z Q, SU Y H, *et al.* Stomatal conductance characteristics of *Populus euphratica* leaves and response to environmental factors in the extreme arid region[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2008, **28**(1): 125-130.

[12] 陈亚宁, 李卫红, 徐海量, 等. 塔里木河下游地下水位对植被的影响[J]. 地理学报, 2003, **58**(4): 542-549.

CHEN Y N, LI W H, XU H L, *et al.* The influence of groundwater on vegetation in the lower reaches of Tarim River, China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, **58**(4): 542-549.

[13] 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.

[14] 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏, 等. 新疆塔里木河下游断流河道输水与生态恢复[J]. 生态学报, 2007, **27**(2): 538-545.

CHEN Y N, LI W H, CHEN Y P, *et al.* Water conveyance in dried-up river way and ecological restoration in the lower reaches of Tarim River, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(2): 538-545.

[15] 张 丽, 董增川, 黄晓玲. 干旱区典型植物生长与地下水位关系的模型研究[J]. 中国沙漠, 2004, **24**(1): 110-113.

ZHANG L, DONG Z C, HUANG X L. Modeling on relation between major plants growth and groundwater depth in arid area[J]. *Journal of Desert Research*, 2004, **24**(1): 110-113.

[16] 蒋晓辉, 刘昌明. 黑河下游植被对调水的响应[J]. 地理学报, 2009, **64**(7): 791-797.

JIANG X H, LIU C M. The response of vegetation to water transport in the lower reaches of the Heihe River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, **64**(7): 791-797.

[17] 王根绪, 程国栋. 干旱区内陆河流域生态需水量及其估算——以黑河流域为例 [J]. 中国沙漠, 2002, **22**(2): 129-134.

WANG G X, CHEN G D. Water demand of eco-system and estimate method in arid inland river basins[J]. *Journal of Desert Research*, 2002, **22**(2): 129-134.

[18] 徐海量, 宋郁东, 陈亚宁. 生态输水后塔里木河下游地下水的动态变化[J]. 中国环境科学, 2003, **23**(3): 327-332.

XU H L, SONG Y D, CHEN Y N. Dynamic change of groundwater after ecological water transport at the lower reaches of Tarim River [J]. *China Environmental Science*, 2003, **23**(3): 327-332.

[19] 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: 385-410.

[20] 安红燕, 徐海量, 叶 茂, 等. 塔里木河下游胡杨径向生长与地下水的关系[J]. 生态学报, 2011, **31**(8): 2 053-2 059.

AN H Y, XU H L, YE M, *et al.* The relationship between *Populus euphratica*'s radial increment and groundwater level at the lower reach of Tarim River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(8): 2 053-2 059.

[21] 龚君君, 叶 茂. 生态输水对塔里木河下游胡杨主干径向生长量影响研究——以依干不及麻为例[J]. 干旱区资源与环境, 2011, **25**(2): 162-166.

GONG J J, YE M. Influence of ecological irrigation on the trunk growth of *Populus euphratica* in the lower reaches of the Tarim River—A case of Yiganbujima Section[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, **25**(2): 162-166.

[22] 徐海量, 叶 茂. 流域水文过程与生态环境演变的耦合关系——以塔里木河流域为例[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社.

[23] 米 红, 张文璋. 实用现代统计分析与 SPSS 应用[M]. 北京: 当代中国出版社, 2000: 131-132.

[24] 叶 茂, 徐海量, 龚君君, 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): 172-175.

YE M, XU H L, GONG J J, *et al.* Rational ecological groundwater level of *Populus euphratica* with different diameter in lower reaches of Tarim River[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, **31**(2): 172-175.

[25] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, **23**(2): 152-164.

SHI Y F, SHEN Y P, LI D L, *et al.* Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in northwest China[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, **23**(2): 152-164.

[26] 樊自立, 马英杰, 张 宏, 等. 塔里木河流域生态地下水位及其合理深度确定[J]. 干旱区地理, 2004, **27**(1): 8-13.

FAN Z L, MA Y J, ZHANG H, *et al.* Research of eco-water table and rational depth of groundwater of Tarim River drainage basin [J]. *Arid Land Geography*, 2004, **27**(1): 8-13.

(编辑: 潘新社)