

# 极端干旱区湖岸柽柳径向生长对水环境演变的响应

肖生春 肖洪浪

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所)

**摘要:**该文利用黑河下游内蒙古西居延海 3 道湖岸堤上的湖岸林柽柳树轮年表,研究了柽柳树轮生长对水环境演变的生态响应.对 3 个年表进行的主成分分析结果表明,第一主成分的贡献率达到 53.3%,它反映了 3 道湖岸堤上柽柳轮宽生长对同一环境因子的共同响应;第二主成分的贡献率达到 30.7%,它反映了 3 道湖岸堤上柽柳轮宽生长对第一主成分以外因素的响应.相关分析表明,第一主成分与生长季节(5—8 月)湖泊水位波动呈显著正相关关系,第二主成分与区域年降水量呈显著正相关关系,与地下水位波动呈微弱负相关关系.上述结果表明,在地下水位可以满足湖岸柽柳生长条件下,地下水位的变化对柽柳轮宽生长作用占绝对优势.反之,天然降水将对维持柽柳的基本生存具有重要的贡献.柽柳径向生长的生态响应模式不仅体现在 3 道湖岸堤的空间尺度上,同样体现在同一样点年表在时间序列上的变化.通过石羊河、黑河和塔里木河 3 个干旱区内陆河流域柽柳生态水位对比,认为非地带性植被——柽柳的最大生态水位差异是由于区域降水差异造成的.

**关键词:**生态响应, 树轮年代学, 水环境演变, 柽柳, 生态水位, 极端干旱区

**中图分类号:**X143;S793.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1522(2006)02-0039-07

XIAO Sheng-chun; XIAO Hong-lang. **Response of radial growth of lakeshore tamarisk to changes in the water environment in extreme and arid regions.** *Journal of Beijing Forestry University* (2006)28(2) 39-45 [Ch, 23 ref.] Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000, P. R. China.

Using tree-ring chronology on samples from tamarisk, growing on beach bars at the shores of Lake West-Juyan, the terminal of the Heihe River in west China, the response of radial growth to the lake water environment has been measured and analysed by principal component analysis. The first principal component (PC<sup>1</sup>), which accounted for 53.3% of the total variance, reflects a common growth response of tree-rings, at three beach bars sites, to environmental factors. The second principle component (PC<sup>2</sup>) accounted for 30.7% of the variance and reflects tree-ring growth response at the three beach bars to other factors. Correlation analysis indicates that the relationship between PC<sup>1</sup> and fluctuations in the lake water level during the growing season, from May to August, is statistically significant as is the relationship between PC<sup>2</sup> and annual precipitation; PC<sup>2</sup> seems slightly correlated with fluctuations in the groundwater level. The results show that fluctuations in the groundwater level are the major factor controlling tree-ring growth while groundwater is suitable for tree-ring growth. In contrast, precipitation is the major factor in maintaining basic growth of tamarisk. In this tree-ring chronology the response models of radial growth exhibit both spatial and temporal patterns. We are of the opinion that the difference between the maximum groundwater level and the water level in the Shiyang, Heihe and Talimu watersheds was brought about by the differences in local precipitation.

**Key words** eco-response, dendrochronology, water environment evolution, tamarisk, eco-groundwater level, extremely arid region

在干旱区,地表和地下水文过程控制着绿洲自然植被的组成和格局,植被格局也对水文过程的改

收稿日期:2005-03-09

<http://journal.bjfu.edu.cn>

基金项目:国家自然科学基金项目(40371009)、中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-324, KZCX09-05).

第一作者:肖生春,博士生,助理研究员.主要研究方向:环境演变与树木年轮学.电话:0931-4967126 Email: xiaosc@ns.lzb.ac.cn 地址:730000 甘肃省兰州市东岗西路 260 号中国科学院寒区旱区环境与工程研究所.

变作出响应<sup>[1]</sup>. 干旱区地下水位埋藏深度极大地影响着不同深度土层的含水量,特别是植物主要根系层的含水量,从而影响植物的生长、发育、分布和植被演替<sup>[2]</sup>. 生态地下水位(简称生态水位)是维持非地带性自然植被生长所需水分的地下水位埋藏深度<sup>[3]</sup>,其中下限埋藏深度为最大生态水位. 当地下水位过低时,地下水不能通过毛管上升到植物根系可以吸收利用的程度,导致土壤干化和植被衰败<sup>[4]</sup>. 在石羊河下游地区的研究表明,怪柳的盖度随地下水位的下降呈现一种抛物线型变化. 怪柳的生长主要受地下水的影响,当地下水位达到9~10 m时,怪柳的生长达到旺盛阶段,之后,随着地下水位的下降逐渐衰退<sup>[5]</sup>. 根据植物出现频率和地下水位之间的关系研究表明,在塔里木河流域,有91%的怪柳分布在7 m以内的地下水埋深范围内<sup>[3]</sup>. 根据不同地下水位条件下怪柳灌丛长势调查结果显示,在黑河下游,怪柳的最大生态水位在7~8 m以内<sup>[6]</sup>.

干旱区绿洲自然植被主要是非地带性的隐域植被,它们不依赖于大气降水,而是靠地下水供给其蒸腾和蒸发<sup>[3]</sup>. 怪柳作为非地带性地下水植物,地下水位是影响其生长、发育的决定性因素,但怪柳灌丛生长随地下水位下降呈现出的抛物线型变化,还暗示了其中包含的其他环境因素的影响. 同时,3个研究区域都处于干旱区内陆河下游,环境相似,但怪柳生长的生态水位却有很大的差异.

植物生长和植被格局的演变是相对长时间尺度上水文过程作用的结果,这一水文过程不仅包括地表和地下水,还包括了干旱区有限的天然降水影响. 利用怪柳木质部纤维素中硫同位素的研究表明,怪柳幼年期的水分来源主要是天然降水,随着根系的向下扩展,在青壮年阶段水分来源逐渐转变为以地下水为主<sup>[7]</sup>. 干旱区有限的天然降水对于减小植物蒸腾、潜水和土壤蒸发有着不可替代的作用. 据计算,额济纳盆地每年天然降水对地下水的补给量约为 $1.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右<sup>[8]</sup>. 在地表径流补给逐渐减少,地下水位成为限制怪柳生长的情况下,干旱区天然降水对维持怪柳生长是否有影响,其贡献有多大,怪柳生长对水环境变化是如何响应的,对这一方面的研究还未见报道. 本文试图利用内蒙古西居延海不同湖岸阶地上怪柳的年轮宽度年表对这一问题进行探讨.

## 1 研究区域概况

额济纳绿洲位于黑河下游,在内蒙古自治区最西部,总面积 $11.46 \text{ 万 km}^2$ . 额济纳气候极度干旱,多年平均降水量在40 mm左右,最大为103 mm,最

小为7 mm,多年平均蒸发量为3 537 mm,最高达4 035 mm. 黑河上游来水是维系额济纳绿洲唯一的水源. 黑河下游又称为额济纳河,由于地势平缓,十几条支流呈辫状分布,形成多个终间湖,比较大的有东、西居延海和京斯图海子等. 额济纳绿洲的自然植物群落类型有胡杨(*Populus euphratica*)林、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)林、多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*)灌丛、芨芨草(*Achnatherum splendens*)草甸、芦苇(*Phragmites australis*)沼泽草甸及苦豆子(*Sophora alopecuroides*)次生植物群落等. 其中多枝怪柳灌丛林地 $6.82 \text{ 万 hm}^2$ ,主要分布于离河岸稍远的河漫滩地和湖岸阶地,占林地面积72.3%. 地带性土壤为灰棕漠土.

研究区位于西居延海西南部,在 $42^{\circ}20'16'' \sim 42^{\circ}21'9''\text{N}$ 和 $100^{\circ}41'51'' \sim 100^{\circ}42'31''\text{E}$ 之间. 此处有3条非常明显的湖岸堤,绵延数公里,从湖心向外分别记为B1、B2和B3(图1). 西居延海已于20世纪60年代初干涸. 从B3湖岸堤到湖心地形坡度比降在2.5/1 000~32.1/1 000之间,整个湖滨带均为疏松的盐碱化龟裂土,地表有薄层白色盐霜,湖心盐壳厚度大于20 cm. 湖心地下水位在2.5 m左右. 从B3湖岸堤到湖心盐壳边缘的直线距离约为2.5 km. 研究区地貌植被特征见表1.

## 2 研究材料与方法

选取各道湖岸堤上怪柳灌丛中2~3个最粗大者,沿地表(怪柳沙包为沙丘顶部)锯下树盘,进行编号标注. 从湖心向外,在B1湖岸堤北坡(B1样点)取21个样,在B2湖岸堤北坡(B2样点)取28个样(5个死树),B2~B3湖岸堤(B2-3样点)之间取24个样(3个死树),共计73个样本. 3个样点的海拔高度893.2~904.3 m,距湖底相对高度3.8~16.1 m.

按照树轮实验方法对所有样品进行打磨、抛光和交叉定年(曲线法)<sup>[9]</sup>,用1/100 mm精度的树木年轮测量仪(Lintab Tree-ring Measurement System)进行轮宽测量,每个树盘沿两个方向测定. 部分树盘由于单侧极端偏心生长,只测定了一个方向. 用COFECHA程序<sup>[10]</sup>检查交叉定年和轮宽测量结果. 3个样点的标准化年表(STD)建立用ARSTAN程序<sup>[11]</sup>完成. 对3个样点的年表序列的共同时段(1958—2002年)进行主成分分析<sup>[12-14]</sup>. 对各主成分和水环境因素进行相关统计分析和置信水平检验.

在各取样地点用大黄蜂系列GPS(PRO-MAX-10, Magellan system corp. USA)进行精确定位. 气候资料来自距西居延海最近的额济纳旗气象站(1957—2002年). 地下水水位变化资料来自于额济

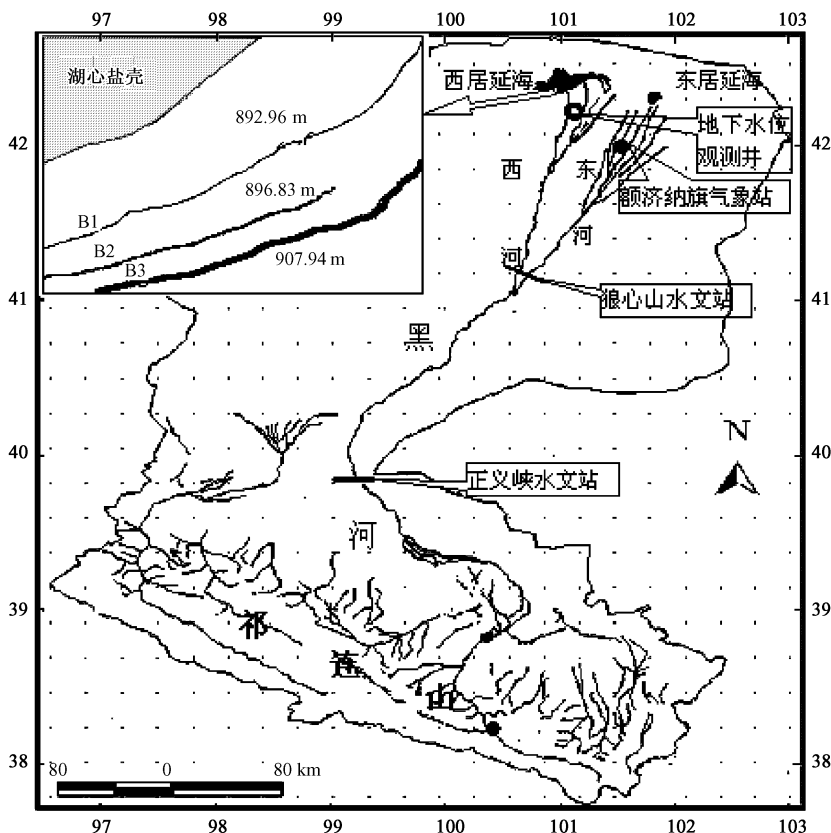


图1 研究区域略图及黑河流域下游水文气象站点位置

FIGURE 1 Local map of study region and the positions of the hydrology and weather stations in the lower reaches of Heihe River

表1 西居延海湖岸堤地貌植被特征

TABLE 1 The geomorphologic and vegetation characteristics of the beach bars in West-Juyan Lake in Inner Mongolia, China

	B3 沙堤	B2 沙堤	B1 沙堤
沙堤特征	堤面海拔 907.94 m, 高约 3~5 m, 堤面的砾石、钙板直径大于 10 cm, 距第 2 道沙堤 343 m	堤面海拔 896.83 m, 高 2~3 m, 堤面的砾石、钙板直径在 4 cm 左右, 距第 1 道沙堤 411 m	堤面海拔 892.96 m, 高 1 m 左右, 湖心海拔 888.2 m, 堤面的砾石、钙板直径在 2 cm 左右, 距湖心盐壳边缘 1 542 m
植被特征	堤面上为红砂 <i>Reaumuria</i> spp. 群落, 沙包发育, 平均高度小于 1 m; 以下至第 2 道沙堤前 90 m 范围内为红砂和衰败柽柳混生群落, 柽柳大多均已死亡, 红砂和柽柳沙包风蚀严重; 再下为纯柽柳群落, 柽柳沙包发育, 平均高度 2~3.5 m, 沙包顶部柽柳灌丛平均高度 2.5 m	沙堤北坡分布一排整齐的柽柳沙包, 平均高度 2~3.5 m, 沙包顶部柽柳灌丛平均高度 2.5 m. 低地中较高的沙洲上间或有部分柽柳生长, 柽柳灌丛平均高度 2~3 m, 沙包轻度发育, 多为枯落物	沙堤南、北坡各分布一排整齐的柽柳灌丛, 灌丛平均高度 2 m, 灌丛下多为枯落物. 有大量干枯藻类残体覆于地表. 从此处向湖心再无柽柳和其他植被
土壤	疏松盐碱土	疏松盐碱土, 地表为白色盐霜	疏松盐碱土, 地表为白色盐霜, 湖心盐壳厚度大于 20 cm

注: 纳旗水务局的西河赛汉泽尔地下水观测井(1995—2002年), 距取采样点 15 km.

### 3 结果与分析

西居延海不同湖岸堤上 3 个样点树轮宽度年表序列如图 2 所示. 3 个样点的树轮序列统计特征表明(表 2), 随样点距湖底相对高度降低, 年表序列敏

感度从 0.18 上升到 0.265, 波动幅度逐渐增加. 各样点内序列间相关性和信噪比的增加, 说明了各样点所有样本在轮宽形成上共同响应于某个环境因子. 平均一阶自相关系数从 0.67 下降到 0.50, 表明在年表序列中存在受某些次要影响因子产生的低频

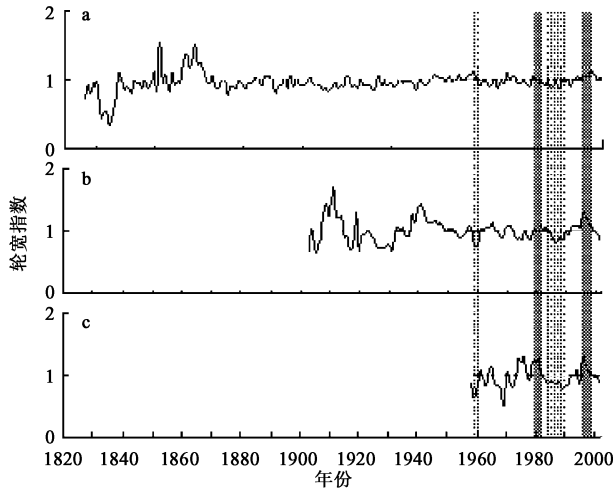
表2 3个样点的样本及柽柳树轮宽度年表特征

TABLE 2 Dendrochronological characteristics of *Tamarix ramosissima* ring-width chronologies at three beach bars in West-Juyan Lake in Inner Mongolia, China

样点位置	海拔/m	距湖底高程/m	序列长度/ 起止年	样本数	平均敏感度	序列间相 关系系数	信噪比	平均一阶自 相关系数	第 1、2 主成分 累计贡献率/%
B2-3	904.3	16.1	176(1827—2002)	24	0.180	0.34	2.03	0.67	27.0
B2	896.8	8.6	100(1903—2002)	28	0.217	0.36	5.45	0.66	35.1
B1	893.2	3.8	45(1958—2002)	21	0.265	0.57	6.37	0.50	61.8

变化逐渐被主要影响因子的作用所掩盖,从而表现出各样点序列内主成分累计贡献率的逐渐增加趋势.就同一样点年表的波动幅度随时间变化趋势来

看,B2-3样点从19世纪90年代以后波动幅度减小,B2样点发生在20世纪60年代初,而B1样点还没有出现.



a: B2-3 样点 b: B2 样点 c: B1 样点

图2 柽柳树轮宽度STD年表序列

FIGURE 2 *Tamarix ramosissima* ring-width chronologies at three beach bars in West-Juyan Lake of Inner Mongolia, China

注: 暗色条带指示了3个样点年表在共同区间几个典型阶段具有同步变化趋势; 深色为正相变化, 浅色为负向变化.

对3个样点轮宽序列的主成分分析表明(表3),在它们的共同时段内(1958—2002年),第1、2主成分(PC1、PC2)的贡献率分别为53.3%和30.7%.二者的累计贡献率达到了84%,说明它们的作用是十分显著的.在提取各主成分的序列中,3个样点轮宽序列所占有的权重是不相同的,体现了各主成分对湖岸林柽柳生长模式的不同影响.在图3中,PC1的权重都为正值,说明3个样点的样本轮宽生长都和PC1呈正相关关系,都受同一环境因子的影响.PC1从B1样点逐渐向B2-3样点下降,说明随样点距湖底相对高度增加,共同影响因子的作用逐渐降低,但这一差异是比较小的.PC2的权重在B2和B2-3这两个相对较高的样点为正值,在相对较低的样点B1为负值,说明PC2对两个相对较高样点的作用呈正相关关系,并且这一正相关作用随高度增加而更加显著.PC2权重值随3样点相对高度的显著变化体现了柽柳在生长过程中对PC1以外因子的高度响应.

表3 3个样点柽柳树轮年表序列(1958—2002年)的主成分特征

TABLE 3 Principal components of the *Tamarix ramosissima* chronologies (for the period 1958—2002) at three beach bars in West-Juyan Lake of Inner Mongolia, China

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
PC1	1.60	53.3	53.3
PC2	0.92	30.7	84.0
PC3	0.48	16.0	100

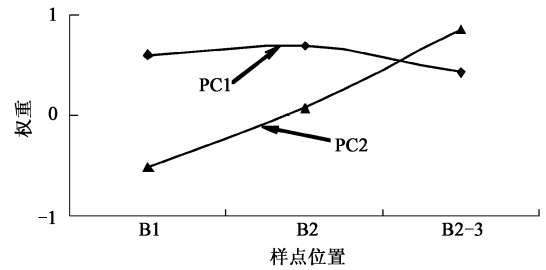


图3 3个样点柽柳树轮年表的主成分权重

FIGURE 3 Weights associated with the first (PC1) and second principal component (PC2) of site tree-ring chronologies of *Tamarix ramosissima* at three beach bars in West-Juyan Lake of Inner Mongolia, China

通过主成分分析方法从3个样点树轮年表中提取了PC1和PC2序列,如图4所示,PC1序列的最高和次高阶段位于1996—1999年和1979—1981年,最低和次低阶段位于1959—1960年和1983—1986年,表明3个样点的年表序列在这2个代表性阶段具有高度的正相和负相一致性.在图2中通过3个样点年表的对比,可以看出由黑色和灰色条带所标记的它们之间的同步性现象.PC2代表了PC1没有包括的其他影响因子.同样,PC2序列也具有上述正负相的一致性阶段和3个样点年表同步性现象.说明了PC1和PC2各自对研究区湖岸林灌木生长影响的一致性.

根据前面的分析,主要主成分反映了对湖岸林灌木生长产生重要影响的气候或环境因素,所以可以利用各主成分的序列值同环境或气候因素进行相关性分析,评价气候或环境因素同湖岸林树轮生长

的关系. 根据在该区域已有的研究结果<sup>[15]</sup>, 主要生长季节(5—8月)地下水位(在湖泊未干涸前代表湖泊水位波动)和年降水量是影响湖岸林生长的主要因素. 在没有湖泊水位器测记录的情况下, 距湖泊15 km的干河床附近的地下水位器测记录对干涸湖泊地下水位具有较高的代表性. 相关分析结果表明(表4), PC1与5—8月平均地下水位呈显著正相关关系( $P < 0.05$ ), 同年降水量相关不大. PC2与年降水量呈显著正相关关系( $P < 0.05$ ), 但同地下水位呈微弱的负相关关系. 这一结果意味着在地下水位可以满足湖岸柽柳生长条件下, 地下水位的变化对柽柳轮宽生长作用占绝对优势, 反之, 天然降水将对维持柽柳的基本生存具有重要的贡献.

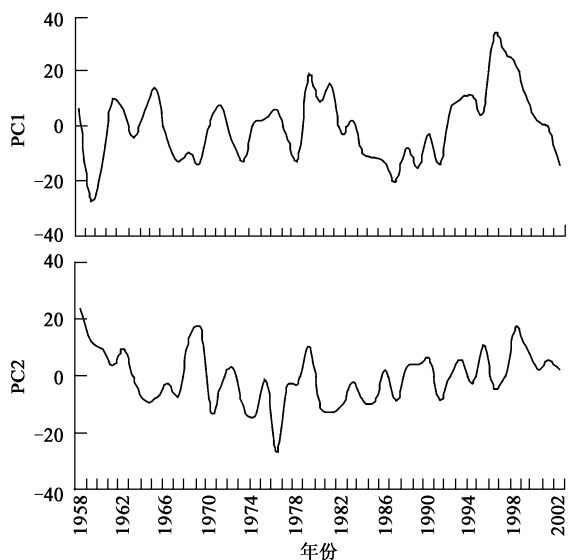


图4 3个样点柽柳树轮年表的第1、2主成分序列

FIGURE 4 The first and second principle components (PCs) of *Tamarix ramosissima* ring-width chronologies at three beach bars in Inner Mongolia, China

表4 地下水位、年降水量与柽柳树轮年表主成分相关统计

TABLE 4 The result of the correlated analysis of the first two principle components (PCs) of *Tamarix ramosissima* ring-width chronologies and the records of the local groundwater table and the regional total precipitation

项目		PC1	PC2
5—8月 平均地下水位	皮尔逊相关系数	0.803*	-0.125
	两尾检验值	0.016	0.769
	系列数	8	8
年降水量	皮尔逊相关系数	0.068	0.310*
	两尾检验值	0.659	0.038
	系列数	45	45

注: \*表示达到  $P < 0.05$  的显著水平.

## 4 讨论与结论

大尺度的研究表明, 树轮生长特征随分布区域和海拔而发生显著变化<sup>[14, 16-17]</sup>, 这对建立更为精确反映区域气候或环境变化的树轮年表具有重要的理论和实践意义. 研究结果揭示了内蒙古西居延

海湖岸柽柳的树轮年表不仅包括湖泊水位的影响, 同时也包含了天然降水的影响. 湖岸柽柳生长位置距湖泊水位相对高程越小, 湖泊水位对树轮生长的影响就越大, 反之, 天然降水的贡献就越大. B1样点处于3个样点的最低处, 同时干涸湖泊地下水位的相对高程从20世纪60年代以来一直在5 m以内波动, 它对PC1的正相权重较大, 但对PC2则为负相权重(图3), 即对PC1的贡献率较大, 对PC2有干扰作用. 在B2样点从20世纪60年代以来距湖心地下水位的高程在8.6~11.5 m之间, 它对PC1和PC2都具有正相权重, 但对PC1的权重更大. B2-3样点在20世纪60年代以后距湖心地下水位相对高程在16.1~18.9 m之间, 它对PC2的正相权重要大于对PC1的正相权重. 这些现象充分反映了地下水位对距地下水位相对高程较小的样点上柽柳生长的重要影响, 而降水则对相对高程较大的样点上柽柳生长产生影响. 这反映了柽柳在空间尺度上的生态响应模式.

上述现象也同样体现在同一样点年表在不同时间的变化上. 在20世纪初之前B2-3样点的地下水位(在湖泊未干涸之前为样点距湖泊水位的相对高程)在7.5 m以内, 20世纪初至20世纪50年代末期间在7.5~11.4 m之间, 20世纪60年代至今在16.1~18.9 m之间. 因此B2-3样点年表的波动幅度在19世纪90年代之前较大, 以后变小(图2a). 对于B2样点, 20世纪初至20世纪50年代末地下水位在4.8 m内, 20世纪60年代至今在8.6~11.5 m之间. 所以B2样点年表在20世纪60年代以后的波动幅度相对于之前的阶段较小(图2b). B1样点的地下水位一直在5 m以内波动, 其年表还未表现出波动幅度减小的现象(图2c). 3个样点年表都反映出在最大生态水位以内, 柽柳生长主要受地下水位波动的影响. 超过最大生态水位, 受到包括地下水位和天然降水等因子的综合影响. 这充分反映了随湖泊水位下降, 柽柳在时间尺度上对各主成分因子的生态响应模式.

据周茅先等<sup>[18]</sup>在黑河下游地区的研究表明, 阴雨天气由于云量多、空气湿度大等原因, 使柽柳群落蒸散量显著降低. Anderson<sup>[19]</sup>发现空气相对湿度对柽柳的蒸腾作用和组织水势有直接的影响. 这一生理现象揭示了柽柳在水分条件满足的情况下, 光照条件是柽柳生长的限制因子. 年降水量多, 意味着阴雨天气现象增多, 阴雨天气由于太阳净辐射降低, 导致光合效率降低, 最终使柽柳径向生长量减小. 这就是B1样点对PC2表现出负相权重的原因. 在水分条件成为限制因子时, 太阳辐射的增加更是加

剧了水分胁迫作用,而阴雨天气则同时缓解了这两方面的限制和胁迫,使怪柳生长量相对增加。

Anderson<sup>[20]</sup>的研究表明,怪柳是一种有大量根系通过毛细管作用和地下水水位接触的深根系植物。曾凡江等<sup>[21]</sup>从灌溉前后样地土壤含水量的变化和怪柳的根系分布情况推断,怪柳灌水后蒸腾速率的增加是其利用地下水的结果,而不是上层土壤含水量增加引起的。这些结果都说明地下水水位变化是怪柳生长的主要影响因素,与我们研究结果中地下水水位作为PC1的结果相一致。

从PC2与降水的显著相关关系来看,在地下水水位下降到一定阶段时,降水对怪柳生长的贡献率开始增大,弥补了地下水作用的不足,使得怪柳并不随地下水水位下降而快速衰退,而是维持相当一段时间。当降水作用无法弥补地下水水位下降导致的怪柳生长水分亏缺时,怪柳的生长才开始衰退。这一推论很好地解释了在石羊河流域下游关于怪柳生长和地下水水位之间呈抛物线生长模式的现象。在石羊河下游,怪柳的最大生态水位在10 m以内。在黑河下游额济纳地区的研究表明,地下水埋深在5 m以内怪柳生长旺盛,5~7 m以内可维持生长,7~8 m以上时生长严重衰退、大部分植株死亡<sup>[6]</sup>。这与塔里木河流域关于怪柳生态水位的研究结果基本一致。在塔里木河下游多年平均降水量在42 mm以下<sup>[22]</sup>,黑河下游为38.2 mm<sup>[15]</sup>,而石羊河流域下游则在108.9 mm<sup>[5]</sup>。因此,在石羊河流域怪柳的最大生态水位可以达到10 m,而塔里木河和黑河下游地区只能在7~8 m以内。这体现了不同区域降水量大小对地下水水位下降导致的水分亏缺的弥补程度,从而表现出不同区域怪柳生态水位的差异。作为深根性地下水植物,怪柳群落开始衰退标志着其分布区域地下水水位已经下降到天然降水也无法弥补其水分胁迫的程度,标志着该地区的水环境已经极度恶化,已经不足以维持该地区非地带性植被的生长和群落的稳定。

从主成分分析结果来看,PC1和PC2的累计贡献率为84%,所以除地下水水位和降水因素之外,还存在诸如微地形、土壤、盐分、风沙活动、放牧等因素也影响着怪柳的生长。He等<sup>[23]</sup>报道了风沙干扰对沙生怪柳(*Tamarix taklamakanensis*)群落形成、发展和衰亡全过程的影响。在研究区域同样存在土壤、盐分差异、牲畜采食以及灌丛积沙形成怪柳沙包的现象。怪柳生长对这些因素的生态响应还有待于更深入地研究。

总之,在西北干旱区,在怪柳生长的生态水位范围内,地下水水位是影响怪柳生长的主要水环境因素。在地下水条件恶化情况下,天然降水对于怪柳生长

也具有较大的贡献。同时,由于天然降水的作用使不同区域怪柳生长的最大生态水位产生差异。这些结论都体现了深根性地下水植物——怪柳生长对其水环境变化的生态响应。

## 参 考 文 献

- [1] 赵文智,常学礼,何志斌. 额济纳荒漠河岸林分布格局对水文过程响应[J]. 中国科学: D辑 地球科学, 2003, 33(增刊): 21-30.  
ZHAO W Z, CHANG X L, HE Z B. The response of the riparian forest distribution to the hydrological process in Ejina Oasis [J]. *Science in China: Ser. D Earth Sciences*, 2003, 33 (Supp.): 21-30.
- [2] 赵广东,刘世荣,马全林. 沙木蓼和沙枣对地下水水位变化的生理生态响应(I) [J]. 植物生态学报, 2003, 27(2): 228-234.  
ZHAO G D, LIU S R, MA Q L. Ecophysiological responses of two xerophytes *Atraphaxis frutescens* and *Elaeagnus angustifolia* to the change of groundwater depth in arid area (I) [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(2): 228-234.
- [3] 宋郁东,樊自立,雷诗栋,等. 中国塔里木河流域水资源及生态问题研究[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2000: 202-260.  
SONG Y D, FAN Z L, LEI S D, et al. Study on the problems of water resources and ecology in Tarim Watershed, China [M]. Urumchi: Xinjiang People's Publishing House, 2000: 202-260.
- [4] 赵文智,程国栋. 干旱区生态水文过程若干问题评述[J]. 科学通报, 2001, 46(22): 1 851-1 857.  
ZHAO W Z, CHEN G D. Review of several problems on the study of eco-hydrological processes in arid zone [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(22): 1 851-1 857.
- [5] 杨自辉,高志海. 沙漠绿洲边缘降水和地下水对白刺群落消长的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(6): 923-926.  
YANG Z H, GAO Z H. Impact of precipitation and underground water level in the edge of oases on growth and decline of *Nitraria tangutorum* community [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(6): 923-926.
- [6] 冯起,程国栋,谭志刚. 荒漠绿洲植被生长与生态地下水位的研究[J]. 中国沙漠, 1998, 18(增刊1): 106-109.  
FENG Q, CHENG G D, TAN Z G. Study on the relationship between the vegetation growth and ecological groundwater level in oasis [J]. *Journal of Desert Research*, 1998, 18(Supp. 1): 106-109.
- [7] YANG W B, SPENCER R J, KROUSE H R. Stable sulfur isotope hydrogeochemical studies using desert shrubs and tree rings, Death Valley, California, USA [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(16): 3 015-3 022.
- [8] 武选民,史生胜,黎志恒,等. 西北黑河下游额济纳盆地地下水系统研究(上) [J]. 水文地质工程地质, 2002(1): 16-20.  
WU X M, SHI S S, LI Z H, et al. Study on the groundwater flow system in Ejina Basin of the lower reaches of Heihe River, northwest China (first part) [J]. *Journal of Hydrogeology and Engineering-geology*, 2002(1): 16-20.

- [9] 吴祥定. 树木年轮与气候变化[M]. 北京: 气象出版社, 1990; 222-224.  
WU X D. *Tree ring and climate change* [M]. Beijing: China Meteorology Press, 1990; 222-224.
- [10] HOLMES R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement[J]. *Tree Ring Bulletin*, 1983, 43; 69-78.
- [11] COOK E R. PETER K. The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies[J]. *Tree Ring Bulletin*, 1981, 41; 45-53.
- [12] GRISSINO-MAYER H D, HOLMES R L, FRITTS H C. The international tree-ring data bank program library. *user's manual* [M]. 2nd ed. International Tree-Ring Data Bank, Tucson, Ariz. 1996.
- [13] BRUBAKER L B. Spatial patterns of tree growth anomalies in the Pacific Northwest[J]. *Ecology*, 1980, 61; 798-807.
- [14] ZHANG Q B, HEBDA R J. Variation in radial growth patterns of *Pseudotsuga merziesii* on the central coast of British Columbia, Canada[J]. *Can J For Res*, 2004, 34; 1 946-1 954.
- [15] 肖生春, 肖洪浪, 周茅先, 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 on the past 100 years recorded in the tree ring of the shrubs on the lake banks [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(5); 557-562.
- [16] 勾晓华, 陈发虎, 杨梅学, 等. 祁连山中部地区树轮宽度年表特征随海拔高度的变化[J]. 生态学报, 2004, 24(1); 172-176.  
GOU X H, CHEN F H, YANG M X, *et al.* Analysis of the tree-ring width chronology of Qilian Mountains at different elevation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1); 172-176.
- [17] YOO S J, WRIGHT B D. Persistence of growth variation in tree-ring chronologies[J]. *For Sci*, 2000, 46; 507-520.
- [18] 周茅先, 肖洪浪, 张小由, 等. 额济纳绿洲柽柳群落蒸散特征的初步分析[J]. 中国沙漠, 2004, 24(4); 479-483.  
ZHOU M X, XIAO H L, ZHANG X Y, *et al.* Preliminary analysis on evapotranspiration of saltcedar community in Ejina Oasis [J]. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(4); 479-483.
- [19] ANDERSON J E. Factors controlling transpiration and photosynthesis in *Tamarix chinese Lour.* [J]. *Ecology*, 1982, 63(1); 46-50.
- [20] ANDERSON J E. Transpiration and photosynthesis in saltcedar[J]. *Hydrology and Water Resources in Arizona and the Southwest*, 1977, 7; 125-131.
- [21] 曾凡江, ANDREA F, 李向义, 等. 策勒绿洲多枝柽柳灌溉前后水分生理指标变化的初步研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(7); 849-853.  
ZENG F J, ANDREA F, LI X Y, *et al.* A preliminary study on the effect of irrigation on water physiology of *Tamarix ramosissima* in Cele Oasis[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(7); 849-853.
- [22] 张宏锋, 李卫红, 葛洪涛, 等. 塔里木河下游地下水与水化学成分关联度排序分析[J]. 干旱区地理, 2003, 26(3); 260-263.  
ZHANG H F, LI W H, GE H T, *et al.* Compositor analysis on correlation between groundwater level and water chemical contents in lower reaches of Tarim River[J]. *Arid Land Geography*, 2003, 26(3); 260-263.
- [23] HE X D, GAO Y B, REN A Z. Role of wind-sand disturbance in the formation and development of *Tamarix taklamakanensis* community[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(11); 1 285-1 290.

(责任编辑 冯秀兰 李文军)