

DOI: 10.5846/stxb201804140857

阿依加马力·克然木, 玉米提·哈力克, 塔依尔江·艾山, 买尔当·克依木, 祖皮艳木·买买提, 艾力亚尔·艾尼瓦尔. 流域水文变化对胡杨荒漠河岸林林窗及形成木特征的影响. 生态学报, 2019, 39(17): - .

Ayjamal Keram, Ümüt Halik, Tayierjiang Aishan, Maierdang Keyimu, Zulpiya Mamat, Ailiya Ainiwaer. Influence of river hydrological change on the characteristics of canopy gaps and gap makers of *Populus euphratica* desert riparian forest. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): - .

流域水文变化对胡杨荒漠河岸林林窗及形成木特征的影响

阿依加马力·克然木^{1,2}, 玉米提·哈力克^{1,2,*}, 塔依尔江·艾山^{1,2}, 买尔当·克依木³, 祖皮艳木·买买提^{1,3}, 艾力亚尔·艾尼瓦尔^{1,2}

1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 新疆维吾尔自治区绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

3 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要: 林窗作为森林生态系统得以长期维持的主要驱动力之一, 能够促进森林的自然更新与演替, 优化森林结构和养分循环, 从而提高生物多样性及生态系统服务功能。本文基于塔里木河中游历年径流量、耗水量与地下水埋深等水文数据, 利用回归模型、拟合优度 t 检验与种群结构动态定量相结合的方法, 分析了研究区水文条件对胡杨荒漠河岸林林窗数量及其形成木种群结构与动态的影响。结果表明: 1) 1970 年前塔里木河中游水量较为充足, 在一定程度上可满足胡杨生存发育的需水量。自 1980 年来, 塔里木河中游年径流量 ($R^2 = 0.785$, $P < 0.01$) 与耗水量 ($R^2 = 0.524$, $P < 0.01$) 呈明显减少趋势, 地下水日益匮乏, 其埋深呈直线下滑趋势 ($R^2 = 0.8618$, $P < 0.01$)。这导致河道两岸的胡杨林生态用水日益紧缺, 从而引起胡杨林林窗现象频繁出现, 尤其是在 1997—2006 年期间。2) 随着中游年径流量与耗水量逐渐减少, 地下水埋深逐渐增加, 林窗内胡杨形成木数量则变为增长趋势。3) 林窗形成木除 1957—1966、1967—1976 年属衰退型外, 1977—1986、1987—1996、1997—2006 和 2007—2016 年均呈现增长型特征。特别是林窗内胡杨形成木 II 级幼龄树大幅度增加, 其表现出胡杨林年龄结构的老龄化特征。4) 由模型显示, 林窗及其形成木数量与径流量之间存在显著性负相关, 径流量降至 $17.81 \times 10^8 \text{ m}^3$ 时, 林窗内的胡杨将面临高峰死亡。由此可知, 在干旱区水文条件是决定胡杨生死的主导因子, 也是塔里木河中游荒漠河岸林林窗形成的主要原因。

关键词: 塔里木河; 水文变化; 胡杨荒漠河岸林; 林窗; 林窗形成木; 径级结构

Influence of river hydrological change on the characteristics of canopy gaps and gap makers of *Populus euphratica* desert riparian forest

Ayjamal Keram^{1,2}, Ümüt Halik^{1,2,*}, Tayierjiang Aishan^{1,2}, Maierdang Keyimu³, Zulpiya Mamat^{1,2}, Ailiya Ainiwaer^{1,2}

1 College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Ministry of Education Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang Uighur Autonomous Region, Urumqi 830046, China

3 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: *Populus euphratica* is a member of the Salicaceae family, and is a key tree species of the desert riparian forest. Forest gaps can promote the natural renewal and succession of forests and optimize forest structures and nutrient cycling,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31860134, U1703102); 新疆大学优秀博士研究生创新基金项目 (XJUBSCX-2015013)

收稿日期: 2018-04-14; **网络出版日期:** 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: halik@xju.edu.cn

thereby, which is regarded as a main driver for increasing biodiversity and ecosystem services. In this study, field data were obtained from six plots with a typical sampling method within study area. The effects of hydrological conditions on the number of canopy gaps, formation and dynamics of gap maker populations were analyzed by using a combined method of the regression model, the goodness-of-fit t test and the dynamic quantitative of population structure, based on the hydrological data such as runoff, water consumption and groundwater depth in the middle reaches of the Tarim River. The result showed that: 1) Before the 1970s, the amount of water in the middle reaches of the Tarim River was sufficient, to a certain extent, which could meet the water requirement for the survival and development of *P. euphratica* forests to some extent. Since the beginning of 1984, the annual runoff ($R^2 = 0.785$, $P < 0.01$) and water consumption ($R^2 = 0.5238$, $P < 0.01$) in the middle reaches of the Tarim River have shown a significant decreasing trend, the groundwater is increasingly scarce and its depth is in a declining trend ($R^2 = 0.8618$, $P < 0.01$), especially during the period of 1997—2006. 2) As the annual runoff and water consumption gradually decrease, the groundwater depth also increases; the number of gap maker population becomes a growing trend. 3) In addition to the recession type in 1957—1966 and 1967—1976, the forest gap maker population showed a growing trend in 1977—1986, 1987—1996, 1997—2006 and 2007—2016. Particularly, the juvenile *P. euphratica* tree gap makers in the forest gap increased significantly, which showed the aging characteristics of *P. euphratica* forests. 4) According to the model output, there is a significant negative correlation between runoff and the number of canopy gaps, and gap makers. Large number of *P. euphratica* in forest gaps will face with mortality, when runoff is decreased to the $17.81 \times 10^8 \text{ m}^3$. Thus, hydrological conditions in the arid area are the dominant factors determining the life and death of *P. euphratica*, and also the main driver for the formation of desert riparian forest gaps in the middle reaches of the Tarim River.

Key Words: Tarim River; hydrological change; *Populus euphratica* desert riparian forest; forest gap; gap makers; DBH structure

林窗 (Forest gap), 也称为林隙或林冠空隙, 是森林生态系统中普遍存在的小尺度干扰形式^[1,2]。林窗研究作为森林循环理论的基础之一, 具有重要的理论和实际意义^[3,4]。Watt (1925) 首次提出林窗一词至今^[5], 林窗特征及其动态研究已取得很大进展, 并成为当前森林生态研究的热点之一^[6,7]。朱教君 (2018) 和 Hu (2009) 等学者基于自然干扰过程的研究成果, 建立了林窗直径与林窗边缘木高度的关系^[2,8]。虽然, 国内外学者对热带^[9,10]、亚热带^[11]、北温带^[12,13]到寒温带^[14]等不同气候区主要森林类型林窗形成机制进行了研究, 但对暖温带干旱区林窗方面的研究很罕见^[1]。

胡杨 (*Populus euphratica* Oliv.) 是杨柳科 (Salicaceae) 杨属中最古老的原始树种之一, 是荒漠河岸林重要的建群种, 也是珍贵的抗逆种质资源^[15]。它已成为抵御风沙、遏制沙化、维护区域生态平衡、保护生物多样性和保障绿洲农牧业生产的重要屏障, 在维持干旱区生态系统结构和功能方面起到关键作用^[16]。至今, 诸多学者针对塔里木河流域天然胡杨林的发生发育规律及生理生态特性做了多方面的研究, 旨在力求揭示胡杨个体、种群、群落及生态系统不同尺度上的适应策略与调控机制^[17,18,19,20], 使得干旱区内陆河流域生态水文过程研究得以重要进展, 从而提高了我国在干旱区受损生态系统相关研究领域的国际知名度^[21,22]。然而, 针对荒漠河岸林演替与更新的主要驱动因素——林窗干扰及其对流域水文过程响应机理的研究尚为欠缺。本文选取塔里木河中游具有代表性的 6 个样点予以研究, 通过地面监测获取林窗及其形成木特征参数, 分析了不同水文条件下林窗数量及其形成木种群结构特征, 探讨林窗及其形成木对流域水文变化的响应, 揭示胡杨种群的死亡机理, 以期为塔里木河流域天然胡杨林的恢复与生态保护提供理论依据和科学参考。

1 研究区概况

研究区位于塔里木河中游轮台县境内国家胡杨林自然保护区英巴扎断面 (图 1), 地理坐标为 $41^\circ 10'$

25"—41°16'00"N 和 84°15'18"—84°23'00"E,属暖温带极端干旱大陆性荒漠气候,多年平均气温 9.7 ℃,最高气温 43.6 ℃,最低气温 -30.9 ℃;年平均降水量 30—34 mm,年平均蒸发量却高达 2400—2900 mm^[23]。年均日照时数为 2778 h,≥ 10 ℃ 年积温为 4039 ℃,多风沙、浮沉天气,最大风速达 40 m/s^[24]。英巴扎断面处于塔里木河中游的起点,河道过水情况良好,洪水季节 6—8 月河岸林常受到洪水漫淹^[25]。该区域是我国胡杨林面积最大、受人类破坏较少的原始森林分布区^[1]。然而,水热值的极端现象限制了植物种类的多样性,使得植物群落与生态系统的结构十分简单^[26]。研究区代表性的植物有胡杨(*Populus euphratica*)、灰杨(*Populus pruinosa*)、多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)、铃铛刺(*Halimodendron halodendron*)、芦苇(*Phragmites australis*)、罗布麻(*Apocynum venetum*)、花花柴(*Karelinia caspica*)、疏叶骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、甘草(*Glycyrrhiz auralensis*)等。

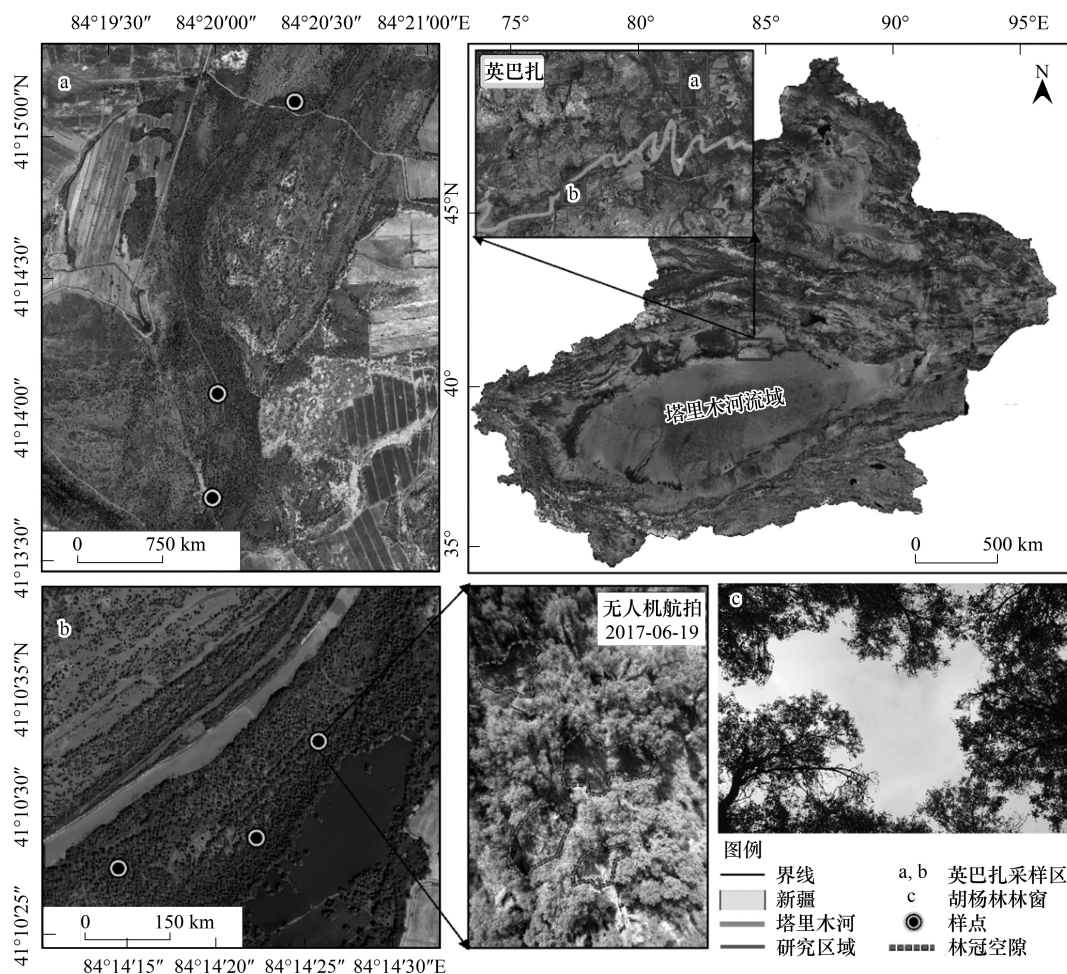


图1 研究区域示意图

Fig.1 Study area

2 材料与方法

2.1 样地设置与地面监测

野外工作于 2017 年 5 月 10 日至 6 月 10 日进行,考虑到塔里木河丰水和枯水发生特点以及塔里木河流域管理局布设的地下水监测井分布情况,依据离河道距离、胡杨分布密度以及国内外林窗判定标准,在英巴扎断面选定 50 m × 50 m 栅格单元的 6 个地面监测样地。在每个样地内均监测了 10 个林窗,分别测定林窗特征参数(高度,面积,形状)以及形成木株数、树高(TH)、胸径(DBH)、冠幅(CD)等树形指标(林窗内没有形成木

的记为“0”)。同时获取每个样地附近的地下水监测井地下水埋深数据。

2.2 水文数据收集

1955 年建站以来至 2016 年的径流量、耗水量等数据来自于塔里木河上游水流量进入中游的控制点——英巴扎水文站。1990—2016 年的地下水埋深数据取自塔里木河流域管理局在研究区按水分梯度布设的 49 眼地下水监测井。

2.3 数据分析

2.3.1 林窗年龄的估算

林窗年龄 (Gap age) 系指林窗自形成以来至调查时的年数^[27]。由于调查时条件的限制,以林窗内最先倒下的一株形成木(形成林窗的腐木)的腐烂程度结合保护区周围采伐树桩的腐朽状况并参考当地林业工作者的实践经验来估算林窗年龄^[28]。由此,参照前人的研究方法^[29],把腐木的腐朽级别划分为 9 个等级,见表 1。

表 1 腐木腐朽级别与林窗年龄的对应关系

Table 1 The decomposition degree scale used for the estimation of log age

部分 Part	年龄 Age	形成的年份 Formed years	描述 Description
树冠 Crown	1—2	1 (2015—2016)	大多数叶子还在枝上,有些还是绿色的
	3—5	2 (2012—2014)	大多数细枝还在,有些叶子发黄
	6—10	3 (2007—2011)	没有叶子,少数细枝无,大多数树皮还在,木质仍坚硬,未腐
	11—20	4 (1997—2006)	无细枝,但主要的分枝还在、支撑着整个树干,只有小面积还有树皮,木质开始腐烂
树干 Trunk	21—30	5 (1987—1996)	树干已经腐烂到 1—2 cm 深,一把小刀便可刺穿木质
	31—40	6 (1977—1986)	树干倒在地面或被非常粗的树干支撑着,腐烂的木头达 5—10 cm 深,一把小刀可以穿过木质;树枝脱离树干,并可用手移开
原木 Log	41—50	7 (1967—1976)	整个原木腐烂,几乎无分枝,原木依旧保留着圆柱体的形状
	51—60	8 (1957—1966)	整个原木非常软弱,已经塌陷至原来直径的一半以下;用脚可以踩碎
	61—70	9 (1947—1956)	原木分解完毕,仅能在下部找到部分原木碎片

2.3.2 林窗形成木径级(年龄)划分与分布格局

采用林窗乔木形成木径级结构代替其年龄结构的方法,将乔木形成木划分为 5 个径级:Ⅰ级幼龄树:胸径 <5 cm,高度 <4 m;Ⅱ级幼龄树:5 cm < 胸径 < 10 cm,高度 ≥ 4 m;Ⅲ级中龄树:10 cm < 胸径 < 15 cm;Ⅳ级中龄树:15 cm < 胸径 < 20 cm;Ⅴ级大龄树(或老龄树):胸径 > 20 cm。按上述标准用拟合优度 t 检验法统计各年际不同径级林窗形成木胡杨株数,以径级为横坐标,林窗形成木数量出现频率为纵坐标,做出林窗形成木胡杨径级结构分布图,并判定塔里木河中游不同年代的林窗形成木种群总个体数与不同径级分布类型^[30]。

2.3.3 林窗形成木种群结构动态指数

采用种群结构量化分析法,对研究区林窗形成木种群动态进行定量描述。种群结构动态指数 (V_{pi}) 可反映种群结构个体数量增长、稳定或衰退的变化趋势。若 $0 < V_{pi} \leq 1$,则数值越大,形成木种群增长性越强;若 $-1 \leq V_{pi} < 0$,则数值越小,形成木种群衰退性越强。无外部干扰下种群内两相邻级间个体数量动态变化 (V_n) 的具体计算方法如下:

$$V_n = \frac{S_n - S_{n+1}}{(S_n - S_{n+1})_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, S_n 为第 n 径级形成木种群个体数, S_{n+1} 为第 $n+1$ 径级形成木种群个体数, $(\dots)_{\max}$ 为选取括号中数列最大值。种群年龄结构的变化动态指数 (V_{pi}) 计算公式为:

$$V_{pi} = \frac{1}{\sum_{n=1}^{K-1} S_n} \times \sum_{n=1}^{K-1} (S_n \cdot V_n) \quad (2)$$

式中, S_n 与 V_n 式(1)中意义同上, K 为林窗形成木种群年龄级数量, V_{pi} 取负、零和正值与 V_n 一致。在考虑到外部干扰的情况下, 经受随机干扰和非随机干扰的林窗形成木径级结构动态指数 (V_{pi}' 、 V_{pi}'') 的具体计算方法见文献^[31]。

3 结果与分析

3.1 塔里木河中游水文特征

3.1.1 年径流/耗水量变化

英巴扎水文站位于塔里木河上、中游的交界处, 是上游水量下泄到中游的控制点站。其水文站 1955 至 2016 年径流/耗水量时序监测资料表明(图 2), 自 20 世纪 80 年代中期以来, 塔里木河上游进入中游的年径流量与耗水量大幅度减少, 河水无法以漫溢形式补给河道两岸的胡杨林。时间序列与年径流、耗水量的回归方程分别为 $y_{\text{径流量}} = -1.892x + 24.912$ ($R^2 = 0.785$, $P < 0.01$) 和 $y_{\text{耗水量}} = -0.165x + 346.730$ ($R^2 = 0.524$, $P < 0.01$)。由回归曲线表明, 中游年径流量与耗水量先呈直线下滑趋势, 2010 年后保持稳定状态, 且耗水量趋势线先位于径流量线下方, 然后逐渐合并。这说明向塔里木河下游人工调水后中游补给地下水的水量开始减少, 从而引起塔里木河中游地区生态环境的恶化势头。

3.1.2 地下水埋深变化

获取塔里木河流域管理局在研究区按水分梯度布设的 49 眼地下水监测井数据。由 1990 至 2016 年塔里木河中游地下水埋深变化情况可知, 1990 至 2003 年地下水埋深保持在 3 m 左右; 2004 年开始, 地下水埋深均增至 4 m 以上, 并随时间推移继续加深(图 3)。由回归模型表明, 塔里木河中游地下水埋深随着年度的变化先呈线性增加趋势, 2010 年后保持在 5 m 左右 ($R^2 = 0.862$, $P < 0.01$), 与年径流量与耗水量变化情况基本一致。这是由于塔里木盆地在 40—50 年前曾受到过大规模开垦的干扰, 耕地面积及灌溉用水量骤然增加所引起的^[32,33]。

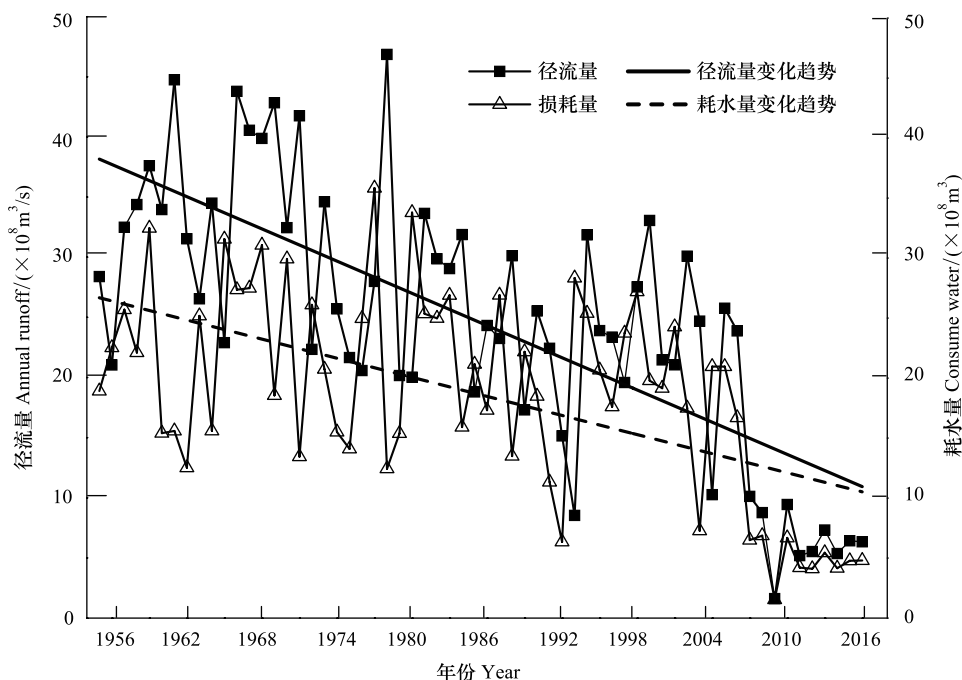


图2 塔里木河中游年径流/耗水量变化

Fig.2 Annual runoff/water consumption changes in the middle reaches of the Tarim River

3.2 胡杨林林窗特征

3.2.1 不同年度林窗干扰状况

本文采用腐烂等级代替林窗发生时间^[28], 将林窗发生时间划分为 9 个等级(见表 1)。由 60 个林窗的调

查结果可知,塔里木河中游河岸林林窗形成木种群组成简单,仅有胡杨、灰杨两种乔木。图 4 得知,本次调查的林窗最大年龄约 50—60 a,最小年龄约 6—10 a,说明塔里木河流域荒漠河岸林的林窗是在近 50 a 内形成的。各样地内以 1997—2006 年形成的林窗数量最多(17 个),其次是 2007—2011 年(14 个);1957—1966 年形成的林窗最少,仅有 2 个。在荒漠河岸林中,林窗形成木在 60—70 a 左右逐渐分解完毕,此年龄阶段的倒木残骸难以辨认。因此,森林中没有 60 a 以上的林窗存在。塔里木河流域经过 50 多年大规模的水土开发和人为活动的影响,水环境发生巨大变化,从而引起该地区地表水骤减、地下水资源日益匮乏^[34],致使胡杨死亡而形成的林窗现象频繁出现。

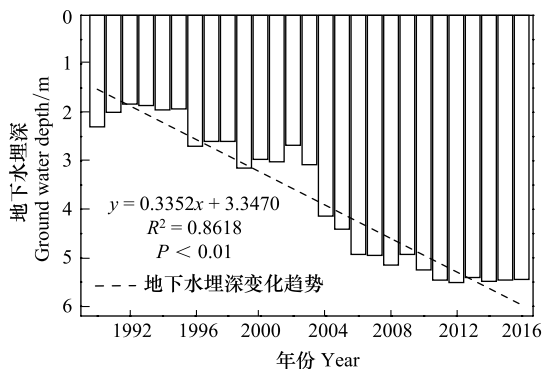


图 3 塔里木河中游地下水埋深变化

Fig.3 Ground water depth changes in the middle reaches of the Tarim River

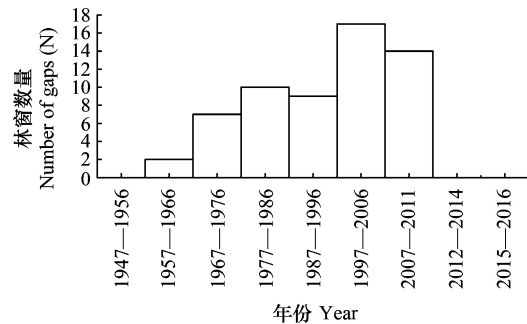


图 4 塔里木河中游林窗数量年际变化

Fig.4 Change of canopy gap numbers in the middle reaches of the Tarim River

3.2.2 林窗形成木种群结构特征

塔里木河中游不同年度林窗胡杨形成木种群数量及其径级结构差异明显(表 1),反映了不同水分条件对胡杨种群的影响。由图 5 可知,除了 1967—1976 年代以外,塔里木河中游各年林窗形成木胡杨 II 级幼龄树大幅度增加,其中,1997—2006 年最多。据统计,1967—1976 年间林窗形成木 IV 级中龄树缺失(株数为 0),其他各径级形成木也极度稀缺(总株数为 15)。1987—2016 年间各径级林窗形成木较为丰富,尤其是 2007—2016 年间极为明显(表 1)。综上所述,20 世纪 50 年代后塔里木河流域受大尺度干扰^[35],再加上 2000 年塔里木河中游堤防修建后,地下水维系的胡杨种群与水资源失去联系,从而其遭遇陆续丧失或稀缺^[15],表现为幼龄胡杨难以生存,种群更新能力明显降低的特征。

表 2 塔里木河中游胡杨林林窗形成木胸径特征描述

Table 2 Descriptive statistics of gap maker DBH characteristics in middle reaches of Tarim River

年代 Years	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	数目 Number	方差 Variance	标准差 Standard deviation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 Variation coefficient	P-值 P-Value
1957—1966	4.0	46.5	13.8	21	129.250	11.370	1.956	3.228	0.825	0.147
1967—1976	2.9	25.7	9.2	15	40.075	6.330	1.637	2.512	0.691	0.100
1977—1986	4.2	36.4	11.3	25	66.730	8.170	2.112	4.021	0.721	0.100
1987—1996	3.2	34.3	10.1	49	47.630	6.900	2.174	4.424	0.684	0.056
1997—2006	2.8	50.0	9.7	82	49.155	7.011	3.216	14.058	0.726	0.071
2007—2016	1.9	20.9	8.2	51	19.072	4.367	1.041	0.960	0.531	0.134

3.2.3 林窗形成木种群结构动态

林窗形成木径级结构动态指数(V_{pi})可反映形成木种群结构个体数量增长、稳定或衰退的变化趋势,而通过观察 V_{pi}' 、 V_{pi}'' 的取值变化,可以分析林窗乔木形成木在经受随机与非随机干扰时的稳定程度。由表 2 可知,

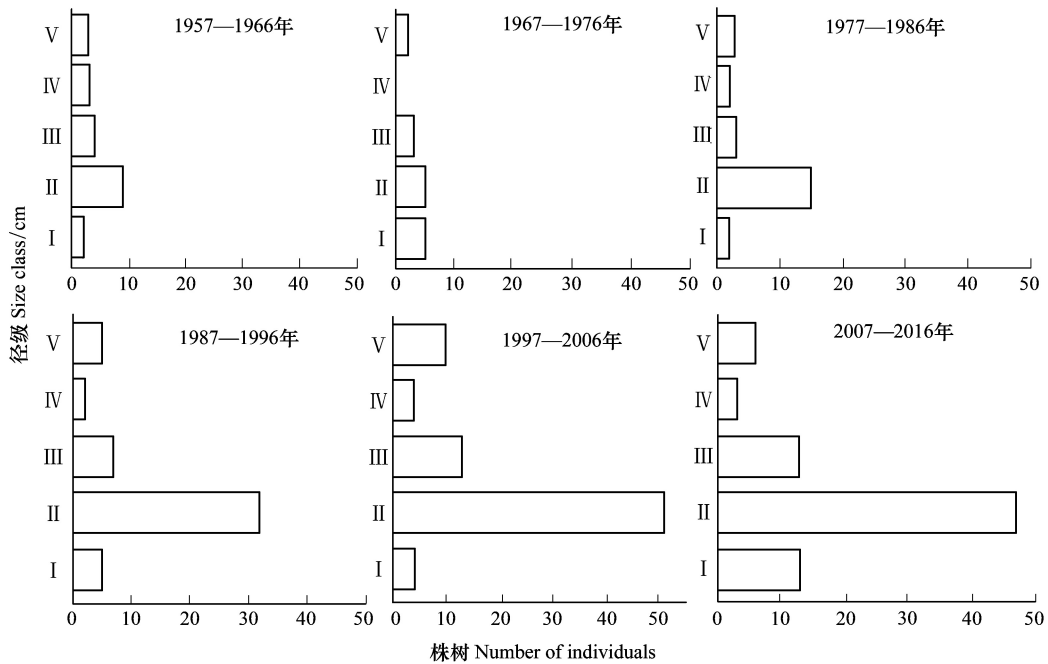


图5 胡杨林窗形成木种群径级结构

Fig.5 DBH structure of *Populus euphratica* gap makers population

在无外部干扰下,塔里木河中游各年代(1957—1966、1967—1976、1977—1986、1987—1996、1997—2006 和 2007—2016)的 V_{pi} 值分别为: -0.073、-0.060、0.000、0.040、0.200 和 0.460。在考虑到外部干扰的情况下,经受随机干扰和非随机干扰的形成木径级结构动态指数 (V_{pi}' 、 V_{pi}'') 分别为: -0.0040、-0.0019、0.0025、0.0071、0.0057、0.0084 和 -0.0180、-0.0300、0.0600、0.0970、0.0400、0.0554。由此可见,1977—1986、1987—1996、1997—2006 与 2007—2016 年间塔里木河中游胡杨林窗形成木种群结构呈增长趋势,1957—1966 与 1967—1976 年间则为减少。实施生态输水的前期与初期(1997 至 2004),地下水埋深保持 3 m 左右,可满足各龄级胡杨生长发育的水分需求。随后,塔里木河中游径流量与耗水量持续减少,导致地下水埋深不断增加,河道两岸生态用水紧缺。林窗形成木结构动态指数增加趋势逐步提高,这是因为胡杨种群应对外界干扰的抵抗能力持续降低(表 3)。

表3 林窗形成木种群径级结构动态分析

Table 3 Dynamic analysis of size-class structure of gap makers population

年份 Years	径流量 Runoff/ 10^8 m^{-3}	V_1	V_2	V_3	V_4	V_{pi}	P	V_{pi}'	P'	V_{pi}''
1957—1966	33.34	-0.92	0.75	0.69	-0.67	-0.073	0.0095	-0.0040	0.2670	-0.0180
1967—1976	31.05	-0.77	0.55	0.25	0.00	-0.060	0.0040	-0.0019	0.1430	-0.0300
1977—1986	27.85	-0.84	0.78	0.71	-0.60	0.000	0.0080	0.0025	0.5000	0.0600
1987—1996	21.83	0.87	0.80	0.33	-0.33	0.040	0.0039	0.0071	0.6350	0.0970
1997—2006	22.84	0.00	0.40	1.00	-1.00	0.200	0.0133	0.0057	0.5600	0.0400
2007—2016	8.10	-0.57	0.57	0.13	0.33	0.460	0.0154	0.0084	0.6599	0.0554

V_1 : I—II 径级变化动态指数 Dynamic index value of I—II class sizes; V_2 : II—III 径级变化动态指数 Dynamic index value of II—III class sizes; V_3 : III—IV 径级变化动态指数 Dynamic index value of III—IV class sizes; V_4 : IV—V 径级变化动态指数 Dynamic index value of IV—V class sizes; V_{pi} : 无外部干扰变化动态指数 Dynamic index value under no external disturbance; V_{pi}' : 完全随机干扰变化动态指数 Dynamic index value under completely random disturbance; V_{pi}'' : 非随机干扰下变化动态指数 Dynamic index value of non-random disturbance; P : 完全随机干扰下的风险极大值 Maximum risk value under completely random disturbance; P' : 非随机干扰下的风险极大值 Maximum risk value under non-random disturbance.

3.3 林窗形成木结构动态与年径流量的关系

水是影响植物生存、生长发育诸多环境因子中最主要的限制因子之一^[36]。地表径流是维系干旱区地下水依赖型胡杨种群生长发育的重要水资源, V_{pi}' 表示林窗胡杨形成木种群在随机干扰下的径级结构动态。如图 6 所示, V_{pi}' 与地表径流量具有显著性负相关, 其回归方程为 $y = 0.0005x - 0.0146$ ($R^2 = 0.8405$, $P < 0.01$)。该模型显示, 随径流量的增加, 林窗形成木结构动态指数不断下降。当径流量降至 $25.86 \times 10^8 \text{ m}^3$ 时, 林窗形成木增长指数变为正值, 林窗形成木种群出现增长型现象。这表明地表径流量的减少是导致胡杨种群死亡的主要原因。尤其是, 地下水与其重要补给来源关系被切断, 使地下水埋深逐渐加深^[37], 林分自然更新受制, 严重阻碍了胡杨林的正常生长发育。

3.4 林窗及其形成木数量与径流量的关系

由图 7 可见, 林窗数量与年径流量之间存在较好的拟合负相关, 其拟合方程为 $y = -0.0728x^2 + 1.6458x + 6.1206$ ($R^2 = 0.624$, $P < 0.01$)。拟合曲线表明, 林窗数量随着年径流量的增加而不断下滑趋势, 径流量越多, 林窗数量就越少。径流量在 $6.53 \times 10^8 \text{ m}^3$ — $17.81 \times 10^8 \text{ m}^3$ 范围内林窗数量最多, 说明在其范围的径流量很有可能对林窗的形成有着显著的影响。相对其而言, 林窗形成木数量与流域的年径流量之间存在显著性负相关。如图 7c 所示, 林窗形成木数量随着年径流量的增加而大幅度减少趋势, 其拟合方程为 $y = -0.562x^2 + 13.39x$ ($R^2 = 0.8137$, $P < 0.01$)。径流量越多林窗内死亡树木就越少, 与林窗数量随着年径流量的变化趋势基本一致。这可能是由于地表水与地下水有直接的关系, 间接影响到胡杨的生存生长, 从而导致干旱区林窗现象的频繁出现。

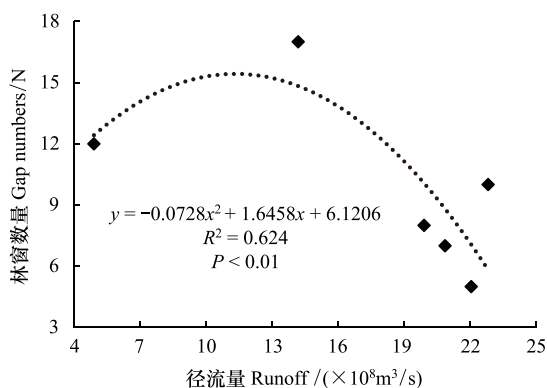


图 7 林窗数量与径流量关系

Fig. 7 Relationship between the number of forest gap and annual runoff

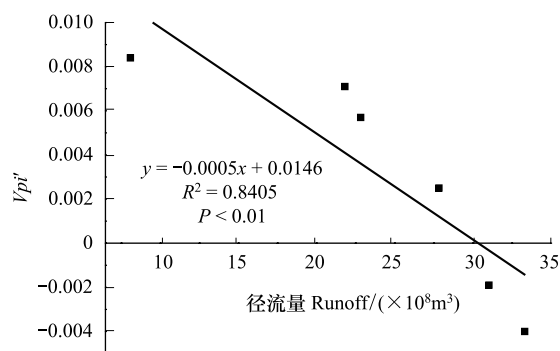


图 6 塔里木河中游林窗形成木种群结构动态与径流量的关系

Fig. 6 Relationship between structure dynamic of gap makers population and annual runoff in the middle reaches of the Tarim River

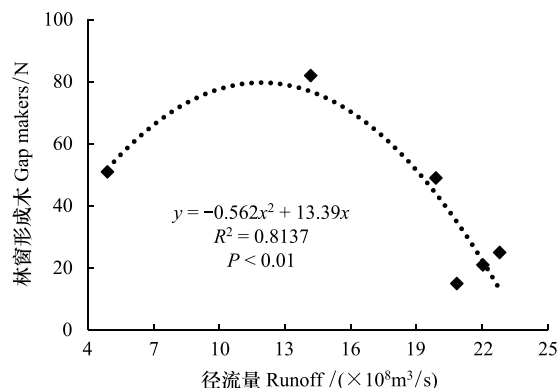


图 8 林窗数量与径流量关系

Fig. 8 Relationship between the number of forest gap and annual runoff

4 讨论

从年际变化来看, 塔里木河中游年径流量和耗水量均呈直线下滑趋势, 同时地下水埋深不断加深。徐梦辰 (2016) 等学者借助稳定同位素技术分析水文补给关系, 证明了塔里木河中游地下水主要依靠地表径流水来补给^[15]。2000 年的堤防修建和人工调水阻碍了洪水漫溢^[38], 地下水失去其补充水源, 河道两岸不具备植

物生存的环境条件,引起无法满足个体对水分因子的需求而种内竞争与排斥加剧。至于大龄树(或老龄树)阶段,个体对环境的要求高,尤其是对水资源的需求。然而,河道两岸地下水位不断降低,个体以积累大量资源为维持生存,对水分、光照、空间及营养的争夺达到顶峰,使个体面临死亡,从而导致林窗现象的频繁出现。

干旱区降水稀少,几乎没有有效降水供给胡杨生存^[39-40]。洪水漫溢消失后,胡杨的生长发育主要依靠河道径流侧渗与生态输水补给。由林窗胡杨形成木种群结构动态指数与地表径流量的回归模型显示,当径流量降至 $25.86 \times 10^8 \text{ m}^3$ 时,形成木种群转变为增长趋势。在塔里木河中游地表水逐年减少的影响下,河道两岸地下水位不断降低,胡杨生长所需的生态用水日益匮乏,直接制约了胡杨种群的生存。随地表径流量的降低,林窗形成木种群结构动态指数不断增加,除丰水期(1957—1966 与 1967—1986 年代)呈衰退型以外,其余年段(1987—1996、1997—2006 和 2007—2016)均表现为增长型特征,这种动态指数反映了胡杨林林窗形成木种群对水文变化的响应机制。为应对干旱区环境恶化,荒漠河岸胡杨林林窗形成木在种群结构上做出了生态响应。地下水位的逐年降低使林窗形成木种群结构动态指数不断增加并转入增长趋势,形成木种群具有幼化且长期增长的特征。在不同水文影响下,胡杨林已出现了长期的林窗形成木种群增加现象。由拟合模型显示,林窗及其形成木随径流量的减少而大幅度增加趋势。径流量在 $6.53 \times 10^8 \text{ m}^3$ — $17.81 \times 10^8 \text{ m}^3$ 范围内林窗形成木数量将持续增长,将面临一次高峰死亡。由此可知,由于种群结构失调、胡杨林生存受限,若不采取适当的保育措施,胡杨种群将逐渐退化。

5 结论

1)塔里木河中游地下水只能依靠地表径流的侧渗与生态输水补给,这不仅从影响范围还是补充水量上都无法取代来自洪水的自然漫溢效果,与此同时,受年径流量、耗水量逐年减少的影响,地下水补给更加受损。塔里木河中游水文条件的变化导致该地区水资源日益匮乏,河道两岸生态用水骤减,从而导致该区域干旱、盐碱胁迫加剧。

2)1970 年前的外界干扰还没影响到水文过程,由于 1970 年后的人类干扰对环境变化具有迟滞性特征,1984 年开始地表径流量大幅度减少,其滞后效应使地下水埋深 2003 年后持续增加,林窗胡杨形成木种群变为增长型,这验证了林窗形成木对水文变化的响应。

3)地下水作为维系胡杨林生存繁衍的基础,它主要依靠地表水的补给。从 2000 年起向塔里木河下游实施人工生态输水工程后,虽然下游“绿色走廊”得以一定程度的恢复,生态环境日渐好转,但对中游河段的水文过程带来了一定的压力乃至产生了负面影响。随着来自洪水漫溢的地表径流量日益匮乏,河道两岸生态用水逐渐紧缺,地下水位逐年下降,土壤表层干旱、盐碱胁迫加剧。因此,以中游河段牺牲生态环境来换取下游生态修复方法的利弊有待权衡,对于此地堤防的改进刻不容缓。

参考文献(References):

- [1] 韩路,王海珍,陈加利,于军. 塔里木荒漠河岸林干扰状况与林窗特征. 生态学报, 2011, 31(16):4699-4708.
- [2] 朱教君,闫巧玲,于立忠,张金鑫,杨凯,高添. 根植森林生态研究与试验示范,支撑东北森林生态保护恢复与可持续发展. 中国科学院院刊, 2018, 33(01):107-118.
- [3] Gray A N, Spies T A, Pabst R J. Canopy gaps affect long-term patterns of tree growth and mortality in mature and old-growth forests in the Pacific Northwest. *Forest Ecology and Management*, 2012, 281(28):111-120.
- [4] 朱教君,刘足根. 森林干扰生态研究. 应用生态学报, 2004, 15(10):1703-1710.
- [5] Watt A S. On the ecology of the British beech woods with special reference to their regeneration. *Journal of Ecology*, 1923, 11(145):1-48.
- [6] Chaudhry V, Pandey J K, Kumaran H. Influence of gap size on the dynamic behavior of perforated tube under seismic excitation. *Procedia Engineering*, 2017, 173:1816-1824.
- [7] 刘华,张丹桔,张健,杨万勤,李勋,张艳,张明. 锦马尾松人工林林窗大小对四种凋落叶质量损失和养分释放的影响. 生态学报, 2017, 37(02):513-522.
- [8] Hu L L, Gong Z W, Li, J S. Estimation of canopy gap size and gap shape using a hemispherical photograph. *Trees-Structure and Function*, 2009, 23(05):1101-1108.
- [9] Orman O, Dobrowolska D. Gap dynamics in the Western Carpathian mixed beech old-growth forests affected by spruce bark beetle outbreak.

- European Journal of Forest Research, 2017, 136(04):571-581.
- [10] 臧润国. 林隙动态与森林生物多样性. 中国林业出版社, 1999.
- [11] 袁春明, 刘文耀, 杨国平. 哀牢山湿性常绿阔叶林林窗木质藤本植物的物种组成与多样性. 山地学报, 2008, 26(01):29-35.
- [12] 刘庆, 吴彦. 滇西北高山针叶林林窗大小与更新的初步分析. 应用与环境生物学报, 2002, 8(05):453-459.
- [13] 刘少冲, 陈立新, 段文标, 张超, 李少博, 李亦菲, 李少然, 梁薇薇. 影响不同林型天然红松混交林林隙更新的土壤特征因子. 生态学报, 2017, 37(12):4072-4083.
- [14] 王智斌. 冠层林隙面积对油松和华北落叶松更新苗生长和空间分布的影响. 北京林业大学, 2017.
- [15] 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(09):2646-2655.
- [16] Thevs N. Ecology, spatial distribution and utilization of the Tugai vegetation at the middle reaches of the Tarim River, Xinjiang/China. Gottingen: Cuvillier Press, 2007.
- [17] 陈艳瑞, 尹林克, 白旭. 漫溢补水干扰后的天然胡杨群落波动特征. 中国沙漠, 2009, 29(05):891-896.
- [18] Aishan T, Halik Ü, Cyffka B, Kuba M. Monitoring the hydrological and ecological response to water diversion in the lower reaches of the Tarim River, Northwest China. Quaternary International, 2013, 311(09):155-162.
- [19] 徐海量, 樊自立, 杨鹏年, 玉米提·哈力克, 艾力西尔·库尔班, 阿不都米吉提·阿不力克, 凌红波, 赵新风, 张鹏. 塔里木河近期治理评估及对编制流域综合规划的建议. 干旱区研究, 2016, 33(02):223-229.
- [20] Keyimu M, Halik Ü, Kurban A. Estimation of water consumption of riparian forest in the lower reaches of Tarim River, Northwest China. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(16):547.
- [21] Aishan T, Halik Ü, Kurban A, Cyffka B, Kuba M, Betz F. Eco-morphological response of floodplain forests (*Populus euphratica* Oliv.) to water diversion in the lower Tarim River, Northwest China. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(02):533-545.
- [22] Aishan T, Halik Ü, Betz F, Gärtner P, Cyffka B. Modeling height-diameter relationship for *Populus euphratica* in the Tarim riparian forest ecosystem, Northwest China. Journal of Forestry Research, 2016, 27(04):889-900.
- [23] 赵少军, 魏强, 徐海量, 郭宏伟, 王希义, 赵新风. 树木年轮对塔里木河生态环境变迁的印证. 中国沙漠, 2017, 37(03):594-600.
- [24] Keyimu M, Ümüt H, Betz F, Dulamsuren C. Vitality variation and population structure of a riparian forest in the lower reaches of the Tarim River, Northwest China. Journal of Forestry Research, 2018, (3):1-12.
- [25] Xue L, Yang F, Yang C, Chen X, Zhang L, Chi Y. Identification of potential impacts of climate change and anthropogenic activities on stream flow alterations in the Tarim River Basin, China. Scientific Report, 2017, 7(01):8254.
- [26] Keram A, Halik Ü, Keyimu M, Aishan T, Mamat Z, Rouzi A. Gap dynamics of natural *Populus euphratica* floodplain forests affected by hydrological alteration along the Tarim River: Implications for restoration of the riparian forests. Forest Ecology and Management, 2019, 438:103-113.
- [27] Yang H, Liu S, Cao K. Characteristics of typhoon disturbed gaps in an old-growth tropical montane rainforest in Hainan Island, China. Journal of Forestry Research, 2017, (6):1-9.
- [28] Liu Q, Hytteborn H. Gap structure, disturbance and regeneration in a primeval *Piceaabies* forest. Journal of Vegetation Science, 1991, 2(03):391-402.
- [29] Wen K. Study on the relationship among *Abies faxoniana* regeneration, canopy gaps, and *Fargesia denudate* in subalpine coniferous forest in Southwestern Sichuan, China. Beijing Forestry University, 2016.
- [30] 周晨, 冯宇东, 肖匡心, 韩珊, 董颖. 基于多元线性回归模型的东北地区需水量分析. 数学的实践与认识, 2014, 44(01):118-123.
- [31] 陈晓德. 植物种群与群落结构动态量化分析方法研究. 生态学报, 1998, 18(02):214-217.
- [32] 王金山, 哈力克·玉米提, Cyffka B, 吾斯曼·库尔班, 彭树宏. 塔里木河下游胡杨林胸径结构及林木分布特征. 植物学报, 2008, 25(06):728-733.
- [33] 赵锐锋, 陈亚宁, 李卫红, 陈忠升, 郝兴明. 1957年至2005年塔里木河干流径流变化趋势分析. 资源科学, 2010, 32(06):1196-1203.
- [34] 陈亚鹏, 陈亚宁, 李卫红, 张宏锋. 新疆塔里木河下游生态输水对胡杨叶片MDA含量的影响. 应用与环境生物学报, 2004, 10(04):408-411.
- [35] 陈超群, 吴煜, 王健, 赵新风, 赵乐. 塔里木河中游人工与天然绿洲相互转化过程与适宜比例探讨. 水资源与水工程学报, 2017, 28(03):42-47.
- [36] 买尔当·克依木, 玉米提·哈力克, Betz F, 古力比亚·乌买尔, 古丽卡玛尔·迪力木拉提. 输水影响下胡杨胸径生长量时空变化. 森林与环境学报, 2016, 36(02):148-154.
- [37] 邓潮州, 张希明, 吴俊侠, 朱军涛, 魏疆, 吕朝燕. 输水堤坝对塔里木河中游胡杨群落及种群的影响. 生态学报, 2010, 30(05):1356-1366.
- [38] Halik Ü, Kurban A, Mijit M, Schulz J, Paproth F, Coenradie B. The potential influence of embankment engineering and ecological water transfers on the riparian vegetation along the middle and lower reaches of the Tarim River. In: Hoppe, T., et al. (eds). Watershed and floodplain management along the Tarim River in China's arid Northwest. Aachen: Shaker Press, 2006: 221-236.
- [39] 徐海量, 宋郁东, 王强, 艾合买提. 塔里木河中游地区不同地下水位对植被的影响. 植物生态学报, 2004, 28(03):400-405.
- [40] 韩路, 席琳芬, 王家强, 王海珍, 宇振荣. 塔里木河上游灰胡杨种群生活史特征与空间分布格局. 生态学报, 2013, 33(19):6181-6189.